



小深孔精加工电镀 CBN 珩具的优化设计与研

摘 要

针对长径比大于 5, 直径 4~20mm 圆柱孔零件大批量生产的精加工要求, 电镀 CBN 珩具相比精密镗孔、研磨和珩磨具有优势。但随着精密零件的发展需求, 仍需进一步提高内孔加工精度和表面粗糙度。珩具受力变形是降低内孔加工质量的关键因素, 而受力变形由珩具结构和加工工艺决定, 受力计算也没有明确公式, 因此对珩具结构和加工工艺的优化非常必要。基于电镀 CBN 技术现状和一般深孔加工理论, 本文对电镀 CBN 珩具结构设计及其参数优化进行了深入研究, 具体内容如下:

1) 分析了电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理和珩具的受力。对比较削、珩磨和磨削加工, 电镀珩具磨粒切削工件内孔壁经过了滑擦、耕犁和切屑形成三个阶段。珩具受切向力、法向力和轴向力的作用, 切向力是主切削力, 由珩具旋转与内孔壁摩擦产生, 因刀柄固定形成一对力偶; 法向力是内孔壁对珩具的反作用力, 最终抵消; 轴向力由切削部分主偏角产生; 根据产生切屑的条件轴向力必须满足一定数值要求, 但轴向力又是使珩具受力变形进而影响内孔加工质量, 故对珩具所受轴向力的数值优化是提高加工精度和表面质量的良好途径。

2) 推导了电镀 CBN 珩具铰珩时轴向力计算公式和分析了主偏角、进给量、加工余量对轴向力的影响。依据内镀法制备电镀 CBN 珩具良好的性能和深孔加工刀具计算理论, 合理简化了 CBN 磨粒形状以及磨粒排列方式, 由此推导出了珩具所受轴向力的计算公式。通过数学方法分析可知: CBN

珩具主偏角的大小对轴向力的影响最大，即轴向力随主偏角增大而递增，同时也随进给量和加工余量的增加而增大。

3) 建立了以主偏角、进给量、加工余量为设计变量，轴向力最小为目标函数以及各约束条件的优化设计数学模型；利用 MATLAB 求解设计变量最优值，从而确定了适合的工件导杆小深孔加工要求的电镀 CBN 珩具结构尺寸。

4) 采用控制变量法，利用 MATLAB 对优化结果进行了图形分析。分别选择三种进给量 0.7mm/r 、 1.2mm/r 、 1.5mm/r ，研究了轴向力、接触应力随主偏角、加工余量变化的分布情况。主偏角减小使轴向力减小，珩具受力变形减小；进给量增大使满足约束条件下轴向力达到最小，且生产效率较高；由于加工余量变化范围较小对轴向力影响不大。综上所述，为了减少轴向力，提高零件加工质量，在满足加工条件下，尽可能减少主偏角增大进给量对铰珩是有利的。

关键词：电镀 CBN 珩具，小深孔，精加工，优化设计，MATLAB

THE OPTIMAL DESIGN AND RESEARCH OF
DEEP AND SMALL HOLE FINISHING
ELECTROPLATING CBN HONING TOOLS

ABSTRACT

According to the finishing requirement of length-diameter ratio greater than 5 and 4~20mm in diameter cylindrical hole parts with the mass production of the type, compared with fine boring, lapping, honing, electroplating CBN honing tools was overriding. But with the developmental need of precision parts, the machining accuracy and the surface roughness of inner hole still need to be further improved. The deformation of honing tools which was determined by the structure and machining technology of honing tools was the critical factors of lowering the processing quality of hole. Meanwhile, force calculation was also not explicit formulas, so it was necessary that the structure and machining technology of honing tools were optimized. Being based on the present situation of electroplating technology and the processing theory of general deep hole, the design of electroplating CBN honing tools and the optimization of parameters were researched further. Concrete content as follows:

1) The reaming-honing mechanism finishing deep and small hole by using electroplating CBN honing tools and the force of honing tools were analyzed. Compared with reaming, honing and abrasive machining, the process which the

grain of electroplating honing tools machining inner hole contained slippery wipe, plough and scraps form three stages. Honing tools had tangential force, normal force and axial force. The tangential force which was produced by the friction between the rotation of honing tools and the surface of inner hole was the main cutting force. Because of the fixed shank, honing tools had a pair of couple. The normal force which was the reacting force by the inner hole to honing tools was counteracted. The axial force was produced by the main angle. The axial force must meet with the processing requirement of producing scraps, but the axial force caused the deformation of honing tools, which affected the processing quality of the inner hole. So the numerical optimization of the axial force for honing tools was a good way of improving machining accuracy and surface quality.

2) The axial force calculation formula of electroplating CBN honing tools was derived and the influence of the main angle, the feed rate and the mechanical allowance to the axial force was analyzed. According to the good-performance of electroplating CBN honing tools being manufactured by the inside electroplating and the calculational theory of deep-hole machining tool, the shape and arrange of CBN grains were simplified rationally, thereout, the axial force calculation formula was derived. The size of the main angle for CBN honing tools was the greatest impact for the axial force, the axial force was increasing with the main angle, meanwhile, the axial force was also increasing with the increase of the feed rate and the mechanical allowance, which were

found by the mathematical analysis.

3) The mathematical model of optimal design was established. The design variables contained the main angle, the feed rate and the machining allowance. The objective function was that the axial force was given the minimum value. It had all kinds of the constraint conditions. The optimal values of the design variables were solved by using MATLAB so that the axial force was reduced as soon as possible. Finally the physical dimensions of electroplating CBN honing tools being applied in the machining requirements of deep and small hole of guide bar were identified.

4) Using the controlled variable method, the optimal result was analyzed in the form of three-dimensional graphics by using MATLAB. When the three feed rate 0.7mm/r, 1.2mm/r, 1.5mm/r were chose respectively, the distributed situation of the axial force and the contact stress with the change of the main angle, the machining allowance was researched. The reduction of the main angle made the axial smaller, so the deformation of honing tools was decreased. The increase of the feed rate made the minimum value of the axial force smaller, meanwhile, the production efficiency was upper. Because the value of the machining allowance was very small, its influence was tiny. In conclusion, the main angle was reduced and the feed rate was increased as soon as possible in order to reduce the axial force under constraint conditions being meet, which is benefic for honing.

KEY WORDS: electroplating CBN honing tools, deep and small hole, finishing, optimal design, MATLAB

第一章 绪 论

1.1 小深孔加工技术

1.1.1 小深孔的定义及应用

在机械制造中,将工件内孔孔深 L 与孔径 d 之比: $L/d > 5$ 的圆柱孔称为深孔^[1];对深孔按照直径大小分类:直径 $\Phi 200\text{mm}$ 以上称特大深孔;直径 $\Phi 65\text{mm} \sim \Phi 200\text{mm}$ 称大深孔;直径 $\Phi 20\text{mm} \sim \Phi 65\text{mm}$ 称普通深孔;直径 $\Phi 4\text{mm} \sim \Phi 20\text{mm}$ 称小深孔;直径数值 $\Phi 4\text{mm}$ 以下称微小深孔^[2]。根据深孔的定义和直径大小范围,本文所要研究的内容是小深孔加工技术。

机器设备中,小深孔零件应用很多,这类孔在内燃机油泵油嘴和各种阀、汽车、微小机械、航天航空及军工领域中应用相当广泛^[3]。

孔是各种机器零件上最多的几个表面之一,按它和其他零件的连接关系可分为非配合孔和配合孔。配合性小深孔与一般孔的加工技术有很大差别,并非简单外延^[4]。在加工配合性小深孔时,刀具因细长刚性差、冷却差、切屑不容易排出,且切削时切削变化情况和刀具磨损情况不能观察到,故是一种难度较大的加工工艺。目前,小深孔零件应用广泛,加工要求越来越高,因此对小深孔加工技术的研究具有重大意义。

1.1.2 小深孔加工技术的发展概况

从刚开始的扁钻至麻花钻、枪钻,直至 BTA 深孔钻,小深孔加工技术成为了制造技术中的独特分支。纵观 20 世纪期间,小深孔加工技术的发展经历了三个阶段:

- 1) 从实体金属材料上用切削方法连续加工出深孔,深孔要求偏移量小、平直度高。
- 2) 对已加工的深孔精加工,包括磨削、研磨、珩磨、铰削和其他精加工方法,加工后孔的精度和表面质量提高。
- 3) 随着航天航空科技、计算机及微电子技术、新型材料的涌现,产生了特种加工

技术，包括电火花、电解、电子束和激光等。

1.1.3 常用的小深孔加工技术

小深孔加工中，常因加工技术缺点导致一系列问题，如：加工出的孔直径扩大、加工精度低、表面粗糙度值大、刀具使用寿命降低等，因此新技术的改进都应朝着避免和解决这些问题的方向发展。选择合适的小深孔加工技术，要结合孔径、孔深、孔的实际结构、公差和表面粗糙度要求，确保加工质量^[5]。若小深孔加工精度、表面质量要求不高，一般常用的小深孔加工技术主要是传统的钻削、扩孔、铰削工艺，但 20 世纪中叶出现的特种加工技术，拓宽了小深孔加工技术的空间。

1) 传统的钻削、扩孔、铰削工艺

传统钻削、扩孔、铰削工艺的各刀具是麻花钻、扩孔钻、深孔钻和铰刀。钻头主要钻孔和扩孔，铰刀主要提高孔的精度和降低孔的表面粗糙度，一般用于加工直径较小的孔。在钻床上，用旋转的钻头钻削孔，是孔加工最常用的方法。钻孔精度比较低，一般是 IT13~IT11，表面粗糙度 R_a 值是 $12.5\sim0.8\mu\text{m}$ ，因此若精度和表面质量要求高的小孔，钻削之后要采用扩孔和铰孔进行半精加工和精加工。用扩孔钻完成扩孔，再用铰刀铰孔，其加工精度能达到 IT9~IT8，表面粗糙度 R_a 值是 $1.6\sim0.4\mu\text{m}$ 。不同加工方法达到的孔径精度与表面粗糙度是不同的^[6]，如表 1-1 所示。

表 1-1 不同加工方法的孔加工精度与表面粗糙度

Tab.1-1 The accuracy and surface roughness of hole-machining basing on different processing method

加工方法	孔径精度	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
钻	IT12~13	12.5
钻、扩	IT10~12	3.2~6.3
钻、铰	IT8~11	1.6~3.2
钻、扩、铰	IT6~8	0.8~3.2
钻、扩、粗铰、精铰	IT6~8	0.8~1.6

虽然扩孔与铰孔使孔的加工精度和表面粗糙度提高，但是扩孔和铰孔时，扩孔钻和铰刀都是在原来底孔基础上加工，所以不能提高孔轴线的直线度和位置精度。

随着机械制造技术的发展，现代深孔钻削技术也得到长足的发展。钻削技术主要取决于钻头结构和工艺的不断改进，研制新型钻头仍然是小深孔加工技术方面研究的重点，日本赛脱研究小直径 $\Phi 0.05\sim 3\text{mm}$ 导向孔专用钻头，由较短切削刃、小横刃宽度和端部，经过倒棱加工，这样的刃形结构能够防止切削时产生滑移及摆动，故位置精度得到提高。

2) 特种加工

20 世纪 50 年代后, 随着航空航天及国防工业部门对高科技产品高精度、高速度、高温、高压、大功率、小型化等方向发展的需求, 出现了小深孔特种加工技术, 如: 电火花、电解、电子束等加工, 作为现代机械制造技术一个重要组成部分, 在小深孔加工方面有独特优势^[7]。

(1) 电火花加工

电火花加工原理: 利用火花放电产生的局部及瞬时高温腐蚀去除材料^[8]。

与机械加工相比, 它打破了工具材料硬度必须高于工件的限制, 硬工件可用软工具加工, 且切削力很小, 电极强度刚度要求低, 因此宜直径 0.3~3mm 的小孔加工, 适用于难加工金属材料、硬质合金材料、硬质合金小直径钻套、金属陶瓷刀片上的小孔及异型表面加工。不足之处: 工具电极截面积小, 可用的加工电规准小, 爆炸力弱, 孔底电蚀产物排除难; 加工时间长时, 因放电间隙电蚀产物浓度高而易搭桥, 形成短路使加工不稳定; 二次放电几率愈高, 则生产率下降, 影响加工质量。因此采用电火花加工小孔, 效率低质量差, 孔深受限制。尤其高速电火花小孔加工, 加工的表面质量差。

(2) 电解加工

电解加工原理: 在电解液中利用金属产生阳极溶解的电化学反应而对金属材料的成型加工工艺^[9]。

电解加工无需考虑材料强度和硬度, 适用于各种金属材料, 特别是高强度、高硬度和高韧性材料; 相比电火花加工, 生产率高, 可获得较低且稳定的表面粗糙度值 (R_a 为 0.2~0.8 μm); 切削力为零, 加工表面无残余应力、无残余变形、无毛刺和刀痕; 适于难加工材料大批量生产。不足之处: 工具阴极制造复杂; 因加工间隙为 0.1~1mm, 故加工精度不高; 夹具和机床等有腐蚀现象出现。

(3) 电子束加工

电子束加工原理: 真空条件下, 利用聚焦使能量密度极高的电子束以极快的速度冲击到工件表面极小面积上, 在极短时间内能量大部分转变为热能, 使被冲击部分的工件材料因几千摄氏度以上高温而局部熔化和气化, 被真空系统抽走^[10]。

目前, 可加工直径小于 3 μm 的孔, 应用于微电子领域零件的打孔; 断面直径是电子束聚焦后最细部分长度的数十倍, 适于加工小深孔; 打小孔时作用力小导致应力变形很小, 可用于脆性和韧性材料等; 在高真空中避免了空气氧化, 适于易氧化金属和合金

材料的加工。不足之处：需要配备专用设备与真空系统，价格昂贵，生产应用中受限。

综上所述，内孔高精度高表面质量要求和难加工材料广泛应用，传统钻削、扩孔、铰削无法满足要求，特种加工主要对 3mm 以下微小孔有优势，因此就本文研究的小深孔加工技术，若要满足高精度高表面质量要求，只能在传统钻削、扩孔、铰削基础上进行开发研究。

1.2 小深孔精加工技术

1.2.1 小深孔精加工概述

精加工是指在粗加工后从工件上切除很薄的材料层，提高工件精度和减少表面粗糙度的加工方法。小深孔二次加工即小深孔精加工，实心材料在传统钻削、扩孔、铰削之后，精度和表面粗糙度未达到要求，采用小深孔精加工进行二次或更多次加工。在生产中，液压缸、仪器仪表精密管、泵筒和提供物理化学反应场所的管道腔、精密传感器管体等深孔都要精加工，保证孔加工精度为 IT9~IT5，表面粗糙度值为 $1.6\mu\text{m}\sim 0.2\mu\text{m}$ ^[1]。

由于小深孔精加工大多数是在通孔基础上进行，排屑不是主要问题，但仍需在孔的封闭内腔进行，不易监视和检测加工过程；工件长，零件结构复杂，工件刚度和刀杆刚度难保证，因此小深孔精加工并非是孔加工的延伸，其难度远远高于浅孔的精加工。

1.2.2 四种小深孔精加工技术的特点

目前，小深孔精加工常采用的方法有：精细镗孔、研磨、珩磨及电镀珩具加工。

1) 精细镗孔

精细镗孔与一般镗孔基本相同，最初用金刚石做镗刀，用于有色金属合金和铸铁套筒零件孔的最后一道工序，或珩磨前的预加工。

镗削是小深孔精加工主要手段，特点是：可在钻孔、铸孔和锻孔后镗孔，满足尺寸公差等级和表面粗糙度值的要求范围广，除直径小且深的孔外，各种直径和结构类型的孔均可镗削；适应各种工件和材质，工作效率高、装备投资低，加工精度 IT8，表面粗糙度 R_a 为 $0.8\mu\text{m}$ ，若用自导镗头，位置精度高；有效校正上道工序位置误差，但镗杆直径受孔径限制，刚性较差，易弯曲和扭转振动，尤其对细长孔镗削质量不如铰削；若以

切深和进给量小多次走刀减小刀杆弯曲变形,生产效率低;调整镗刀在刀杆上径向位置,操作复杂、费时;用于单件小批量生产。

2) 内孔研磨

研磨是利用涂敷或压嵌游离磨粒与研磨剂的混合物,在一定刚性的软质研具上,通过研具与工件向磨料施加一定压力,磨粒作滚动与滑动,从被研磨工件上去除极薄的余量,以提高工件精度和降低表面粗糙度值的加工方法^[12]。

研磨是孔常用的一种精密加工方法。精镗、精铰或精磨后进行研磨,孔尺寸公差等级达 IT6~IT5,表面粗糙度值 R_a 达 $0.1\sim 0.008\mu\text{m}$,孔的圆度和圆柱度提高。缺点:位置精度只能靠前工序保证,对上道工序要求高;研磨之前需磨削、精铰或精镗等减少加工余量,生产率较低;劳动强度大,对操作人员的技巧和经验要求高;尺寸分散性大;孔两端易产生喇叭口;研磨过程中,磨粒易造成环槽和直槽的损坏;由于使用难于清洗干净的研磨膏,造成清洁度超过标准。

3) 内孔珩磨

珩磨是磨削或精镗后,用油石条加工孔的一种高效率精密加工方法。珩磨加工精度高,尺寸公差等级达 IT7~IT6,表面粗糙度值 R_a 达 $0.2\sim 0.05\mu\text{m}$;应用范围广,除易堵塞油石的塑性金属外,对铸铁件、淬硬和不淬硬钢件、青铜等均可加工;可加工孔径为 $\Phi 5\sim \Phi 500\text{mm}$,长径比大于 10 的深孔;油石与孔壁接触面积较大,参加切削的磨粒多,因此加工每颗磨粒上切削力小;因大量冷却液发热少,孔表面不易烧伤;珩磨头与工件和机床主轴都有少量浮动,因此无法修正孔的直线度和位置精度。

4) 电镀珩具内孔加工

将金刚石、立方氮化硼等超硬磨料细粒放进电解液中,使其沉积在金属制成的工具基体上,通过电镀作用使镀层将与基体接触的一层磨粒固定,形成电镀珩具。用于深孔加工的电镀珩具也称为电镀铰刀,对小深孔精加工具有较高的加工精度及表面质量。

电镀珩具小深孔精加工特点:孔的尺寸分散小;几何精度高达 0.002mm ;表面粗糙度值 R_a 小于 $0.4\sim 0.2\mu\text{m}$ ^[13];一次走刀或一次往返走刀完成,生产效率高;使用方便、成本低、刀具使用寿命长,平均每把可加工 10000 件以上;适于淬火钢、氮化钢等高硬度钢件的小深孔精密加工,尤其大批量生产加工具有良好互换性^[14]。目前,在液压元件阀孔、航天航空仪表和电子产业中,作为小深孔精加工最后一道工序应用广泛。

综上所述,对以上四种小深孔精加工方法特性的比较如表 1-2 所示。

表 1-2 四种小深孔精加工方法特性的比较

Tab.1-2 The comparison of four small deep hole-processing methods in machining characteristics

加工方法	公差等级	表面粗糙度 R_a (μm)	生产类型	优点	缺点
精细镗孔	IT8	0.8	单件小批量	1、适用于各种工件和材质; 2、工作效率高、装备投资低; 3、能有效校正上道工序的位置误差。	1、镗杆直径受孔径限制,刚性较差,易引起弯曲和扭转振动; 2、调整镗刀在刀杆上的径向位置,操作比较复杂和费时间。
研磨	IT6 ~ IT5	0.1~0.008	小批量	1、精加工常用方法; 2、尺寸精度和表面粗糙度好; 3、可提高孔的圆度和圆柱度。	1、位置精度无法保证; 2、研磨前需精铰或精镗,生产效率低; 3、尺寸分散性大,易产生喇叭口。
珩磨	IT7 ~ IT6	0.2~0.05	小批量	1、材质范围广,除易堵油石塑性材料; 2、孔径 5~500mm,长径比大于 10; 3、尺寸精度和表面粗糙度好。	1、油石易磨损,寿命低; 2、珩磨无法保证修正孔的直线度和位置精度。
电镀珩具	IT5 ~ IT4	小于 0.4~0.2	大批量	1、尺寸分散度小;几何形状精度高,可达 0.002mm; 2、生产效率高,一次走刀或往返走刀; 3、刀具寿命长,成本低。	加工前对孔径的一致性要求高。

针对公差等级要求高的大批量生产条件,电镀珩具对小深孔精加工有明显优势,是较为理想的加工方式。与珩磨相比,电镀珩具外径尺寸根据孔径确定,磨粒的耐磨性使直径尺寸基本不变,不受上道工序几何形状误差影响,并能校正误差;与研磨相比,磨粒固定在珩具基体上,规律性的作圆周和轴向运动,微刃切削金属,比研磨中悬浮的磨粒切削性能更强^[15]。本文主要研究利用电镀珩具对小深孔精加工。

1.3 电镀珩具的概述

1.3.1 电镀珩具的定义

目前文献中定义,将金刚石、立方氮化硼等超硬磨料细粒置于电解液中,通过电镀方法使磨粒沉积在刀具金属基体并由金属镀层固定,经过电镀工艺过程,磨粒被均匀地

镀在金属基体上，形成电镀铰刀或电镀珩具，其主要用于小深孔加工。

然而在 19 世纪 80~90 年代左右常被称为“金刚石铰刀^[16]”、“立方氮化硼铰刀^[14]”、“电镀金刚石铰刀^[17]”和“电镀立方氮化硼铰刀”等，其定义是：金刚石或立方氮化硼铰刀是以金属镍和钴等作为粘接剂，把金刚石或立方氮化硼的细小颗粒包镶在一定尺寸和几何形状的铰刀基体表面上，再经过适当的修磨而制成^[18]。

1.3.2 电镀珩具的结构

电镀珩具应用领域不断扩大，结构也逐渐改进以保证适应工件的加工要求。

1) 普通的电镀珩具

电镀珩具不是先用于孔加工而是代替砂轮磨削，称为电镀磨具。普通的电镀磨具基体按用途加工成各种不同的回转体结构形状，磨料被电镀于基体上制成相应电镀磨具。电镀磨具还可制成不同形状的磨轮和锉刀，凡是用于替代各种普通砂轮的电镀磨削工具，通称为电镀磨轮。不同结构形状的电镀磨轮如图 1-1 所示。

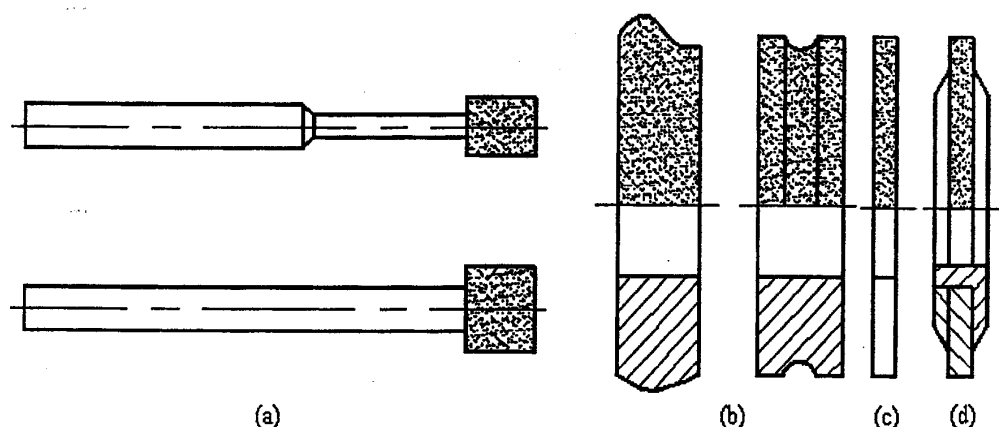


图 1-1 电镀磨轮

Fig.1-1 Electroplated grinding wheels

图 1-1 中，(a)是电镀珩具应用中最常用的小磨头结构。电镀磨头最小直径 0.2mm，用以取代普通磨料的小磨轮，在气动内圆磨床或坐标磨床上磨削小孔，转速达 $4 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ r/min}$ ，最高可达 $2.3 \times 10^4 \text{ r/min}$ ，磨削进给量 $0.001 \text{ mm}^{[2]}$ ，能加工各种淬火钢、硬质合金、陶瓷等。加工过程中可不用冷却液，一把电镀小磨轮能连续加工数千件工件，且不需修整，生产效率高。(b)是成形磨削的电镀磨轮基体形状，基体结构形状决定磨削后工件要求的形状。(c)是锯片砂轮的基体。(d)也是锯片砂轮的基体，因为锯片砂轮很薄，刚性差，所以用复合型保证刚度，实现与锯片砂轮磨削的作用。

2) 用于深孔精加工的电镀珩具

针对深孔精加工, 若将电镀磨料工具作为定尺寸加工, 一般称为“电镀珩具”或“电镀铰刀”, 主要原因是: 刀具和工件相对运动与铰削、珩磨较为类似, 与磨削有很大区别^[19]。对于长径比小于 10、孔径相对较大且没有限制的深孔, 一般使用的电镀珩具(铰刀) 结构如图 1-2 所示。

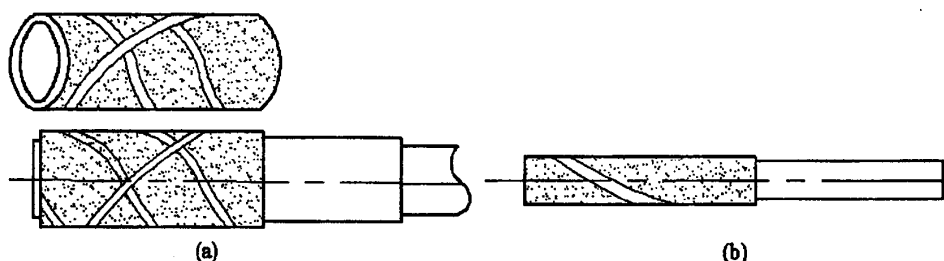


图 1-2 电镀珩具

Fig.1-2 The electroplated honing tools

当直径大于 10mm 的孔精加工时, 多采用图 1-2 中(a)结构: 套筒式电镀金刚石或立方氮化硼铰刀, 由一个专用锥形心轴和一个镀有超硬磨料的开槽套筒装配而成。开槽薄壁套筒的内锥面与心轴的外锥面相匹配, 使开槽套筒准确定心。当孔加工余量 0.05mm 以下, 套筒式电镀珩具往复一次走刀完成加工。若预制孔公差超过磨粒磨损范围, 可采用图 2-2 中(b)结构: 固定式(又称整体式)珩具。一般固定式珩具制成尺寸大小不同的两把, 分别粗磨和精磨, 在加工过程中不需要调整, 常用于大批量的生产加工。

3) 用于小深孔精加工的固定式(整体式)电镀珩具

对于小深孔精加工, 若采用上述 1)、2) 电镀珩具, 则存在以下问题:

(1) 因珩具外径与孔径最终基本尺寸相等, 故电镀珩具磨粒外露高度决定加工余量。一般磨粒高度 $2/3$ 被埋入镀层, 若选择立方氮化硼磨粒粒度 120 目, 则平均直径为 0.126mm, 磨粒高度 0.042mm 裸露在基体外参与切削, 故上道工序加工预留的加工余量要小于 0.042mm。预留的加工余量由前道工序的加工工艺决定, 上道工序切除余量大, 则预留余量小, 否则反之。电镀珩具精整加工质量与上道工序内孔加工质量关系密切, 上道工序表面质量愈好, 电镀珩具精整质量也就愈好。裸露磨粒高度很小, 加工余量和精度要求使得对上道工序要求苛刻, 因此需改进电镀珩具结构扩大加工余量。

(2) 根据小深孔刀杆较长直径小, 若采用 1)、2) 电镀珩具, 加工时受力如悬臂梁, 无合理导向部分易弯曲变形, 导致出现喇叭口, 无法保证圆度和圆柱度等加工精度。

(3) 电镀珩具加工的上道工序一般是钻、镗、铰。若钻头刚度不足, 进给速度较

快，易产生引偏使被加工孔的中心偏斜，孔径未变化；镗孔有时会因机床主轴中心线和导轨不平行或导轨扭曲而产生锥度；铰孔后孔径扩大和表面粗糙度差，这些造成孔的各种缺陷，如：圆度、喇叭口、锥形、产生的残留切削痕迹及振纹，需在最后工序中得到修正，但是 1)、2) 不能很好的起到这个作用。

对上述问题改进电镀珩齿结构，用于小深孔大批量精加工结构示意图如 1-3 所示。

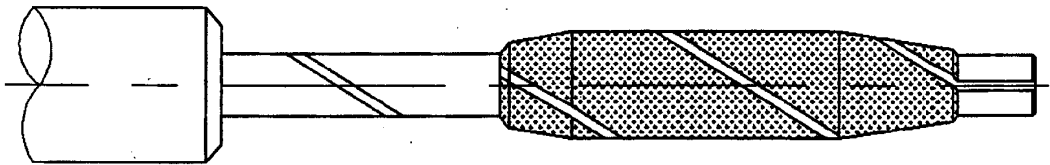


图 1-3 用于小深孔精加工的电镀珩齿

Fig.1-3 The electroplated honing tools using in finishing machining of small-deep hole

电镀珩齿结构有两种：可调式和固定式。所谓可调式和固定式是根据电镀珩齿具外径是否可调而定义。可调式电镀珩齿具通过控制珩齿具外径尺寸可加工不同直径内孔，而固定式珩齿具外径不变，外径与孔的最终尺寸相等。可调式珩齿具外径尺寸可调整，寿命长，但制造精度要求高，基体刚性差，珩齿套易变形，加工精度比固定式低^[20]。固定式珩齿具基体刚性好，易修磨，加工孔的尺寸稳定，但刀具寿命稍低。由于可调式珩齿具制造工艺复杂，工厂多采用固定式珩齿具。一般粗加工和半精加工多用可调式，精加工多用固定式。

综上所述，针对本文所研究的小深孔加工精度高和批量生产的要求，采用固定式电镀珩齿具加工是合理的。固定式电镀珩齿具结构示意图如 1-4 所示。

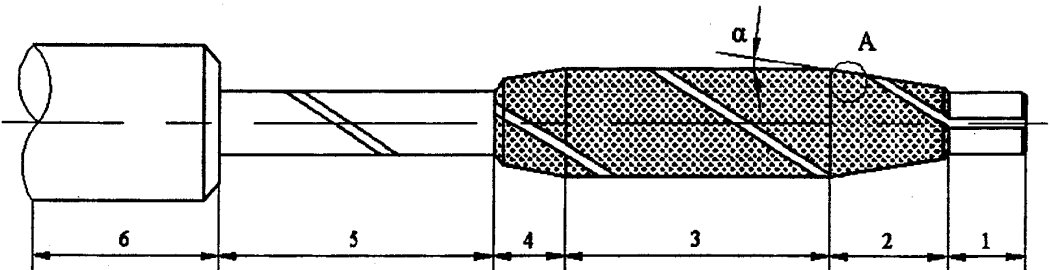


图 1-4 固定式电镀珩齿具结构示意图

Fig.1-4 The structural diagrammatic drawing of fixed-electroplated honing tools

用于小深孔精加工的固定式电镀珩齿具结构主要是在原来固定式结构基础上，添加前后的锥面和引导部分。锥角设计增大加工余量使对上道工序加工要求降低，前后引导部分对珩齿具进入和退出具有引导性。图 1-4 中数字 1~6 分别代表电镀珩齿具的各组成部分，依次是：前导向部分、切削部分、校准部分、倒锥导向部分、后导向部分、柄部，前导

向部分、切削部分、校准部分和倒锥导向部分合起来称工作部分。各部分作用如下：

- (1) 前导向部分：引导电镀珩具进入工件，保护切削刃；
- (2) 切削部分：切除被加工工件加工余量的 80%~90%，对电镀珩具的寿命和加工质量有很大影响。主要参数是切削部分长度和主偏角 α ；
- (3) 校准部分：提高孔的加工精度和表面质量；
- (4) 倒锥部分：减少校准部分与孔壁的摩擦，避免因电镀珩具在孔中的倾斜而导致校准部分后段孔变大；
- (5) 后导向部分：引导电镀珩具退出工件；
- (6) 柄部：电镀珩具的夹持。

图 1-4 中 A 部分放大如图 1-5 所示，是电镀珩具各镀层的分布示意图。电镀珩具镀层包括：珩具基体、电镀金属结合剂、金刚石或立方氮化硼磨粒层。磨粒高度的 2/3 被埋入电镀金属结合剂层起到固定作用，剩余部分裸露基体外作为主要切削刃。

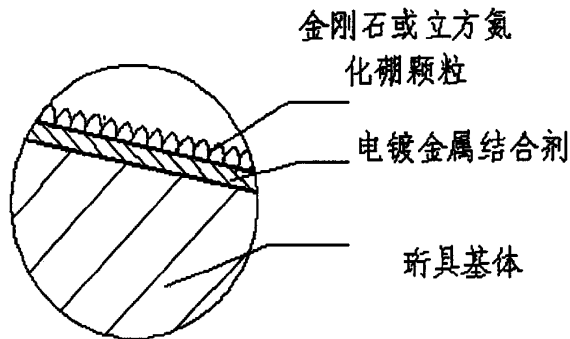


图 1-5 电镀珩具镀层的局部示意图

Fig.1-5 The local diagrammatic drawing of electroplated coating of electroplated honing tools

1.3.3 电镀珩具在小深孔精加工中的应用

精密性孔加工技术是金属切削加工的一个难点，对小深孔而言加工难度更大，但液压、农机、汽车、机床、航空、航天等行业中小深孔零件的应用广泛^[21]，内孔尺寸精度和表面粗糙度要求愈来愈高：圆度、圆柱度精度 0.002mm，表面粗糙度值 0.16~0.2 μm ，属于精密加工范围，且大批量生产类型，传统的孔加工技术如：精镗、精磨、珩磨、研磨和滚压等无法经济性实现，电度珩具就是针对这种加工要求应运而生^[22]。

电镀金刚石铰刀是 1975 年开始在国际上研究，被作为加工精密孔的先进工具。美国 Diagrit 金刚石工具公司研制成功最早，联邦德国在应用方面处于世界上领先地位，

我国于 1979 年开始研制使用^[23]。不论国外还是国内,电镀珩具最先应用于液压阀件的精加工,而阀孔精加工主要是提高液压装置中的介质压力,一般方法是使阀体和阀套、阀套和阀芯之间间隙减小;降低内孔表面粗糙度($1\sim 2\mu\text{m}$)^[24],这要求对小深孔精密加工。在液压行业中,阀孔精加工是机械加工中的关键工艺,以前加工效率低、质量差的工艺过程无法实现,国内外对利用电镀珩具精加工阀孔开始研究。

目前为止,对小深孔精加工的电镀珩具结构和工艺有较成熟的研究。机械工业部郑州磨料磨具磨削研究所研究的电镀金刚石铰刀已经发展到 $\Phi 6\sim \Phi 30\text{mm}$ 十多种规格,可加工铸铁、铝合金,淬火钢、40Cr 合金钢、有机玻璃等^[25]。北京金刚石厂生产 $\Phi 10\text{mm}$, $\Phi 12\text{mm}$, $\Phi 16\text{mm}$, $\Phi 20\text{mm}$ 四种规格的固定式人造金刚石铰刀都达到精加工要求。随着立方氮化硼材料的出现,以相比于金刚石优势在硬度高的钢制被加工材料内孔精加工应用越来越广泛。随动阀最核心的工序是对热装于阀体内的淬火三联缸套孔精加工,长城机床厂利用立方氮化硼铰刀对淬火三联缸套孔完成了精加工,精度稳定地达到要求,效率提高并具有极好地互换性,刀具内柔外硬刚性好,具有一定的经济性^[26]。由于电镀金刚石和立方氮化硼铰刀能够高效、可靠、精确的对内孔一次铰珩达到加工精度和表面粗糙度要求,所以备受广大孔精密加工用户的青睐。

1.4 国内外研究现状

对电镀珩具精加工小深孔提高内孔加工精度和表面粗糙度,研究者是从加工精度和表面粗糙度的影响因素角度分析。

1) 加工精度的影响因素

机械加工中,加工精度是指工件加工完成之后测量实际几何尺寸包括基本尺寸、形状尺寸、位置尺寸,再与理想的几何尺寸参数作对比,看其相符合程度。对加工精度的量化主要是对实际几何尺寸和理想几何尺寸之间做差值,此差值称为加工误差,若加工误差数值大,则表明加工精度低;若加工误差数值小,则表明加工精度高,因此加工误差反映加工精度。然而整个零件的加工完成是在由机床、夹具、刀具和工件组成的工艺系统中,零件最终的加工精度是由这个工艺系统中每个因素本身的加工误差共同作用形成,因此要想提高工件加工精度,需要减少工艺系统中各因素的加工误差。

对工艺系统中直接引起加工误差的因素称为原始误差,将原始误差划分如 1-6 所示:

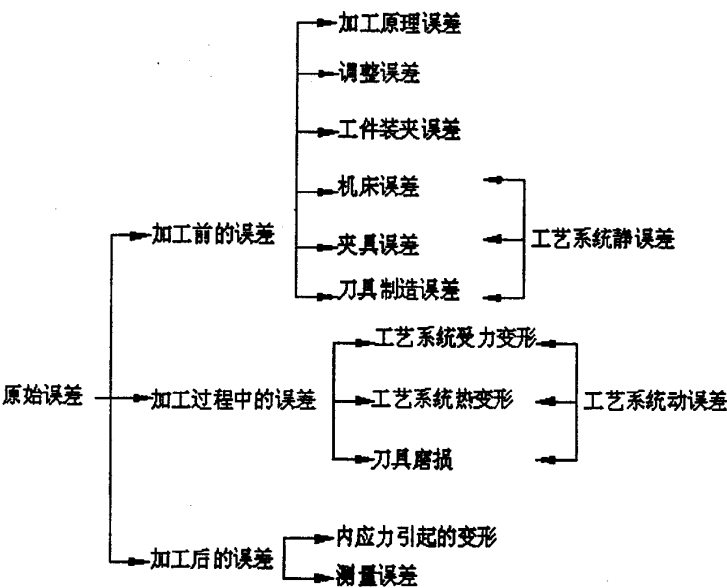


图 1-6 原始误差分类

Fig.1-6 The categorization of original errors

基于上述原始误差分类可知，加工精度主要受到工艺系统中原始误差而形成。若要提高加工精度，必须减少由工艺系统引起的各原始误差。

2) 表面粗糙度的影响因素

表面粗糙度形成原因包括：几何因素、物理因素和工艺系统的振动。几何因素是刀具切削工件表面遗留下的切削层残留面积，主要由刀具的形状参数、进给量和加工余量决定；物理因素是加工过程中的塑性变形，取决于工件材料。因此表面粗糙度影响因素是：刀具的结构参数和加工用量。针对电镀珩具对小深孔精加工，内孔表面粗糙度主要由磨粒的粒度、珩具修整、进给量、加工余量决定。

依据影响内孔加工精度和表面粗糙度的主要因素：珩具结构参数、进给量和加工余量，研究者具体做了如下研究：

由于金刚石的发现与应用，19 世纪 70 年代左右美国 Diagrit 金刚石工具公司研制出电镀金刚石铰刀。随着电镀金刚石铰刀的良好性能在机械加工中发挥，1975 年开始使用它作为孔的先进精密加工工具。1979 年，我国大连机床厂和上海金刚石工具厂开始电镀铰刀的研制，也开启了我国的研究之路。

1980~1990 年，朱文正^[27]、叶伟昌^[28]、陈启松^[29]等针对不同材料工件内孔情况，设计制备相应的电镀金刚石铰刀，并选用不同的加工用量，根据加工精度和表面粗糙度要求反复进行加工试验，最终总结出与之相对应电镀金刚石铰刀的结构和磨粒粒度、前

道工序的要求、加工用量等参数。这段时期对金刚石铰刀的应用主要是在液压行业中的阀孔精加工。由于立方氮化硼（简称：CBN）材料出现，它具有与金刚石相近的硬度，而且对铁元素没有亲和力，可加工钢类零件，所以众多研究者开始研制 CBN 铰刀，徐玉山^[14]、朱黎^[30]、韦昌^[20]等针对工件材料性能和加工要求，对 CBN 铰刀的结构设计参数、加工工艺用量等通过反复的试验研究，最终总结出相应的数值，以达到满足加工精度和表面粗糙度要求。

1991 年，朱黎、钱晓红^[31]进行了 CBN 铰刀铰削渗碳淬火钢的实验研究，分析了刀具磨损对加工精度的影响，磨损导致使用寿命缩短很多，使用寿命关系着加工精度，并提出从铰刀的结构来考虑，通过对切削部分主偏角和校准部分长度的合理选择，以便延长刀具使用寿命，满足加工精度高要求。

1997 年，由山东蓬莱工具厂与长城机床厂合作研制出 CBN 铰刀，张同波^[26]等针对淬火钢套内孔的精加工进行研究，用外电镀法将 CBN 磨粒固定在 45 号钢基体表面，由于 CBN 材料价格较贵，仅电镀了一层 CBN 磨粒，制备的电镀 CBN 铰刀具有整体内柔外硬的特性和良好的刚性。通过用电镀 CBN 铰刀对淬火钢套内孔加工试验，总结出：用 CBN 磨粒加工内孔，尺寸分散度小，精度能稳定保证，孔径一致性好，提高零件互换性，对大批量的生产类型具有重要意义；提出 CBN 作为磨削材料，CBN 对铁没有亲和力，比金刚石更适合加工普通钢、淬硬钢和耐热钢等一些难加工材料工件，改善了大批量加工工件加工精度的稳定性。

2001 年，郑广花、陈明和傅建军^[32]等从电镀珩具的制备技术方向研究，分析外镀法制备电镀珩具存在的问题，然后设计出内镀法制备工艺，保证制备电镀珩具基体上磨粒具有更好的等高性、均匀性和微刃性，从而使单位面积上参与切削的磨粒数量增多，单颗粒受力变小，珩具受力均匀，变形减小，提高了加工精度和表面粗糙度。

2002 年，美国 ENGIS 公司作为世界上著名的金刚石刀具及机床的制造商，廉洁^[33]等研制 single-pass（一步到位）孔加工机床，从提高机床的性能方面来满足用电镀铰刀替代传统珩磨和研磨工艺的加工精度和表面粗糙度要求。若使用孔加工专用机床，电镀珩具可一次走刀完成孔的精加工，最终孔的尺寸精度达 0.001mm，加工精度提高。

综上所述，为了提高内孔加工精度和表面粗糙度，研究者们从刀具结构参数、磨粒的种类、磨粒的粒度、刀具磨损、加工用量等反复进行试验，总结出各参数在相应加工条件下合理取值，这对实际生产具有重大意义。

1.5 本课题的提出、研究思路及主要工作安排

1.5.1 课题的提出

基于上述研究者对电镀珩具小深孔精加工的研究, 本文认为存在以下问题:

1) 为了提高加工精度和表面粗糙度, 对电镀金刚石或 CBN 铰刀结构和加工用量参数取值的研究通过反复进行试验, 且仅是特定的材料和孔加工要求下, 这种研究方法比较复杂, 投资成本高, 研究的结论具有局限性;

2) 用 single-pass 孔加工专用机床提高加工精度和表面粗糙度, 机床费用昂贵, 生产成本低, 应用受限;

3) 工艺系统受力变形是影响加工精度和表面粗糙度的主要原因, 但铰珩时电镀珩具受力计算没有引用公式, 且孔加工过程是封闭的, 无法测量电镀珩具的受力。

针对上述问题, 就本课题内容提出: 研究分析电镀珩具结构参数和加工用量对内孔加工精度和表面粗糙度的影响原因之一是通过刀具的受力变形; 从铰珩机理角度, 结合现在电镀珩具制备的技术, 根据深孔加工刀具的受力分析, 对磨粒和磨粒分布做合理的简化, 建立计算铰珩力公式; 分析切削部分主偏角、进给量、加工余量对加工精度和表面粗糙度的影响, 建立以主偏角、进给量、加工余量为设计变量, 满足产生切屑条件下电镀珩具受到轴向力最小为目标函数的优化计算数学模型; 利用 MATLAB 求取主偏角、进给量、加工余量和轴向力最优值, 并采集数据建立图形分析三个设计变量对轴向力和接触应力的影响, 进而提高加工精度和表面粗糙度。

机械加工中, 相比于研磨、珩磨等精加工方式, 电镀珩具精加工小深孔具有独特的优势: 加工精度高, 几何精度达 0.002mm ; 表面粗糙度值达 $0.2\mu\text{m}$; 加工生产效率是研磨与珩磨的 3~5 倍; 一把刀能连续工作加工 10000~30000 件以上, 使用寿命长, 具有经济性; 加工孔尺寸分散性小, 工件互换性好, 质量稳定可靠; 不需要高质量的机床设备, 加工成本低; 加工质量主要取决于刀具, 对工人技能要求低; 适合于生产中大批量生产类型。随着科技的飞速发展, 对电镀珩具对小深孔精加工问题, 不论是从材料、结构或电镀珩具制备工艺, 还是加工工艺等方面都有了进一步发展。人类对机加工零件加工精度和表面粗糙度的更高要求使得电镀珩具的应用仍然具有广阔前景, 因此结合目前电镀珩具对小深孔精加工方面的新研究内容, 做进一步的研究具有重要意义。

1.5.2 研究思路

本课题的研究思路总体是：首先以材料是奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 工件内孔精加工尺寸、精度和表面粗糙度要求为加工条件，根据电镀珩具的设计和制备理论计算出相应电镀 CBN 珩具的结构尺寸；然后提出本文对电镀珩具精加工小深孔的加工精度和表面粗糙度的影响因素分析理论：即切削部分的参数主偏角和加工用量的进给量、加工余量对电镀珩具受到轴向力的影响，最终导致内孔加工精度和表面粗糙度的好坏；接着结合切削原理和深孔加工刀具的受力分析，推导出电镀 CBN 珩具铰珩小深孔时受力计算公式，并建立以主偏角、进给量和加工余量为设计变量，以电镀 CBN 珩具受到轴向力最小为目标函数，以加工工艺的基本要求和材料被切削产生切屑的加工要求为约束条件建立优化设计数学模型；最终利用 MATLAB 软件编程对优化设计数学模型进行运算，对得出的结果进行分析，并进一步将这三个量对轴向力、接触应力的影响编程图示化，生成相应三维模型分布，并进行对比分析总结规律。

1.5.3 主要工作安排

依据整个课题的研究内容，对各章节的主要研究工作安排如下：

第一章：绪论。综述机械加工中对小深孔的定义及应用；常用的小深孔加工技术——传统的钻削、扩孔、铰削工艺和特种加工的特点和应用；小深孔精加工技术中精细镗孔、内孔研磨、内孔珩磨、电镀珩具内孔铰珩四种加工方式的特点；对于电镀珩具的定义、结构应用情况作简单论述；从机加工加工精度和表面粗糙度的影响因素着手，对电镀珩具精加工小深孔国内外研究发展状况进行总结，对众位研究者取得的成果及存在的问题作概述；最后提出本课题的研究内容与思路。

第二章：电镀 CBN 珩具的基本理论和结构设计。提出导杆的加工要求作为研究条件，分析电镀珩具的制备工艺包括外镀法和内镀法基本原理；根据磨料性能选择 CBN 作为导杆的加工磨料；论述磨粒粒度选取原则和基体计算理论；电镀 CBN 珩具各结构部分的加工作用及参数取值规律；选取和计算适合导杆的基本尺寸参数；研究电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理及特性；最后分析切削长度和主偏角对加工质量的影响。

第三章：电镀 CBN 珩具轴向力计算模型的建立。分析进给量和加工余量对加工精度、表面粗糙度的影响；对铰珩小深孔时电镀 CBN 珩具的受力情况进行具体分析；结

合一般深孔加工刀具的受力分析和计算，对电镀 CBN 珩具磨粒的外形和排布做合理简化，最终推导出电镀 CBN 珩具铰珩时轴向力计算模型。

第四章：优化设计数学模型的建立与计算。本章主要是以主偏角、进给量和加工余量为设计参数，轴向力最小为目标函数，产生切屑等约束条件建立优化设计的数学模型，并利用 MATLAB 进行计算，求取最优值，最后确定针对导杆加工要求的电镀 CBN 珩具结构参数，并进行应力强度的校核。

第五章：优化计算结果的讨论分析。采用控制变量法，首先对优化设计的数学模型中进给量依次取增大数值，计算出轴向力最小值时主偏角和加工余量对应的数值，归纳成表；其次分别研究轴向力和接触应力随着主偏角、进给量、加工余量的数值分布形式，总结这三个量对其的影响；最后将主偏角、进给量、加工余量对轴向力和接触应力的数值分布图建立在一起，分析满足接触应力大于材料屈服应力的条件下，轴向力的分布及主偏角和加工余量的取值范围变化情况。

第六章：总结与展望。对本论文所研究的主要内容归纳总结，且对论文进一步研究做出了展望。

第二章 电镀 CBN 珩具的基本理论和结构设计

在利用电镀珩具精加工小深孔的过程中, 电镀珩具必然产生受力变形, 因此, 本章将分析小深孔精加工电镀珩具的基本理论, 研究电镀珩具结构参数对加工精度和表面粗糙度影响及切削部分参数主偏角与珩具受力的关系。

2.1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢导杆的加工要求

随着机械制造技术的发展,在机械产品中,小深孔零部件得到广泛应用,如:内燃机气门导管、油泵油嘴、液压阀孔等,内孔加工精度和表面质量要求高,属于精密加工范畴。本文以导杆内孔精加工为研究对象,开发电镀 CBN 珩具。

导杆是航空附件中的关键零件,其结构如图2-1所示,材料为1Cr18Ni9Ti不锈钢,导杆总长度为232mm,需用电镀珩具精加工的内孔尺寸为 $\Phi 6H4\left(\begin{smallmatrix} +0.004 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$ mm,深为42mm,圆度是0.002mm,表面粗糙度为 $R_a 0.2\mu\text{m}$,与其孔同轴的外圆尺寸 $\Phi 14f7\left(\begin{smallmatrix} -0.016 \\ -0.034 \end{smallmatrix}\right)$ mm,要求保证同轴度 $\Phi 0.008\text{mm}$,属于大批量的生产类型,要求保证良好的互换性。

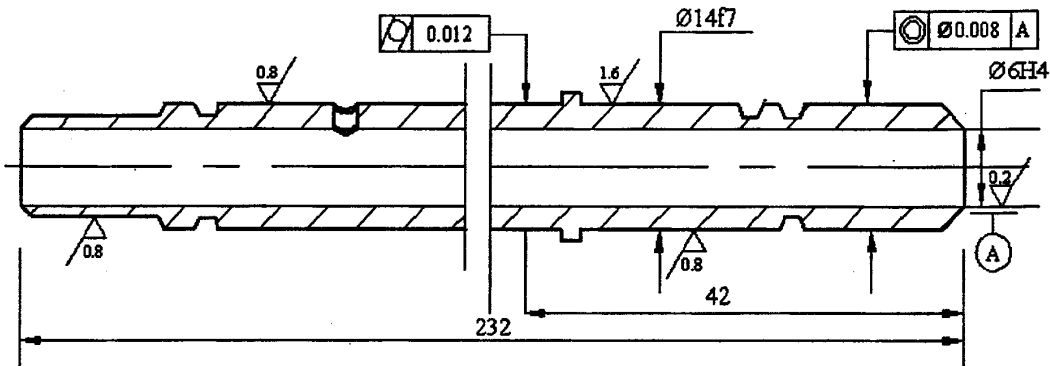


图 2-1 导杆结构示意图

. Fig.2-1 The structure diagrammatic drawing of guide bar

1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢是一种难加工材料, 根据长径比、几何精度和表面粗糙度的数值要求可知属于典型的小深孔精加工范畴, 大批量生产类型, 并要求工件有良好的互换性, 传统的精密加工中精细镗孔、研磨、珩磨都不能达到要求, 所以选用电镀珩具精加工是合理和经济的。

2.2 电镀珩具的制备

电镀珩具制备的基本原理是：将金刚石或 CBN 等超硬磨料颗粒通过电镀方法，使磨粒沉积在刀具金属基体并由金属镀层固定，经过电镀工艺过程，磨粒被均匀地镀在金属基体上，最终形成电镀珩具。目前电镀珩具的制备工艺包括：外镀法和内镀法两种。

2.2.1 外镀法

最初电镀珩具的制备采用外电镀法。外电镀法是指将金刚石或 CBN 等超硬材料磨粒置入电解液，先使磨粒沉积在刀具金属基体上，然后通过电镀作用，采用镍、铁或铜镀层固定磨粒于基体金属表面，磨粒高度的 $2/3$ 被埋在电镀层里， $1/3$ 部分露在镀层外面作为切削刃进行切削，这就是电镀金刚石或 CBN 珩具（铰刀）。这种电镀制备工艺简单，若能满足加工要求，加工具有较好的经济性。

从 80 年代开始到目前，期间众多研究者对外镀法做了很多研究，阎萍萍^[34]等研究了落砂法和埋砂法制备电镀磨具，刀具质量提高，但外镀法仍存在以下问题：

1) 金刚石或 CBN 颗粒是一种不规则的自由状态分布于刀具基体表面上，这样露在基体外的磨粒高度不同，难以控制；单位面积上磨粒数量也是不定的，磨粒分布不均匀，即制备出电镀珩具磨粒的等高性、均匀性和微刃性比较差。当切削时，磨粒等高性差会使得参与切削的磨粒数量减小，单颗磨粒受到的力增大，磨粒容易磨损甚至脱落，破坏磨粒的微刃性，降低刀具的使用寿命，内孔表面粗糙度差；磨粒分布均匀性差使珩具整体受到的力不均匀，容易产生振动，加工精度不稳定。

2) 外镀法制备的电镀珩具等高性、均匀性和微刃性难以保证，因此需要修整。修整一般是采用金刚石砂轮磨粒与制备的电镀金刚石和 CBN 珩具磨粒之间相互挤压，修磨磨粒的高度和微刃。首先修整多了一道工序，生产效率低；其次修整是磨粒之间“硬碰硬”的相互挤压，相互磨损^[35]，磨粒受到很大的力作用，使得高度超出部分断裂，原来天然刃口被破坏，尖端变钝化形成一个个小平面，切削能力降低，小平面对内孔表面形成的沟槽尺寸变大，接触面积增大，磨粒受到的力增大，表面粗糙度降低；最后修整使珩具受到力作用而产生变形，刀具的变形对孔加工质量会产生影响。

2.2.2 内镀法

针对外镀法制备电镀珩具存在的问题,随着电镀工艺技术的进一步研究,产生了内镀法电镀制备工艺。内镀法即内包容电镀制造方法:先制造一个与刀具形状相反的高精度模具,在模具的内腔表面上电镀金刚石或 CBN 颗粒,然后再将其转移到刀杆基体上,形成电镀金刚石或 CBN 珩具^[36]。

若采用内镀法制备工艺,由于磨粒有规律的排列在模具内表面,然后再转移到刀具基体上,这使得磨粒顶端高度相同,整齐排列,而且是有规则的分布,并非随机性,提高了电镀珩具的等高性、均匀性^[37];由于等高性和均匀性好,直接加工内孔能满足加工精度和表面粗糙度要求,因此可以不修磨,提高生产效率;同时磨粒的等高性和均匀性使得在铰珩时单位面积参加的有效磨粒数量增多,这样每个磨粒所受到的铰珩力就会变小,减小磨粒磨损,提高珩具使用寿命。内镀法制备的电镀珩具等高性、均匀性、微刃性好,使用寿命长,为获得较高的内孔加工精度和表面质量做好了准备^[38]。然而内镀法比外镀法工艺略显复杂,如胎具的设计和制造工艺、电镀方式等,但若采用合理的内镀工艺方法能解决胎具加工困难、脱模难等问题,相比内镀法制备的电镀珩具在内孔加工精度、表面质量、生产效率和经济性方面的提高,内镀法的制备工艺具有广阔应用前景。

因此,本研究是建立在内镀法制备电镀珩具的基础上而进行开发。

2.3 电镀珩具的磨料性能及选择

2.3.1 磨料分类及性能

磨料分为普通磨料和超硬磨料,这两大类又被分为天然磨料和人造磨料。天然磨料有天然刚玉、天然金刚砂、石榴石、硅砂、天然金刚石等,除天然金刚石外,其他的硬度比较低、价格便宜、组织不均匀、磨削能力差,因而使用受限。人造磨料包括刚玉系、碳化物系及超硬磨料三类。为了能适应各种材料加工需求,磨料应具备如下性能:

- 1) 有高的硬度。硬度是磨料的基本性能。磨料硬度高于工件才能切削产生切屑。
- 2) 有一定韧性。磨粒有效韧性能提高微刃的切削作用和自锐作用,保持锋利状态。
- 3) 有一定机械强度。磨削过程中,磨粒会受反复切削力作用、接触工件时受到冲击载荷和切削温度的影响,因此磨粒要有一定机械强度发挥切削作用。

4) 有良好的热稳定性或红硬性。磨削区温度高,一般约 $400\sim 1000^{\circ}\text{C}$,因此要保证磨粒高温下仍具有物理机械性能,保持锋利的切削刃。

5) 有化学稳定性。磨料不能和工件材料轻易起反应,因为化学反应会产生粘附和扩散作用,造成磨粒钝化或磨具堵塞及最终导致降低或丧失切削能力。

2.3.2 电镀珩具磨料的选择

电镀珩具一般采用超硬磨料。超硬磨料指金刚石和 CBN 及这两种磨料为主的复合材料。与刚玉和碳化硅相比,超硬磨料具有硬度高、强度高、颗粒形状好、良好导热性和低热膨胀系数等特点。超硬磨料制成的珩具切削性能突出;极高硬度;耐磨损性能好;形状和尺寸保持性好;能长时间保持磨粒微刃锋锐性;切削温度比较低。

金刚石包括天然金刚石和人造金刚石。切削有色金属和非金属材料用天然金刚石合理的原因是:硬度高、摩擦系数小、耐磨损、导热性好。50 年代末期,天然单晶金刚石刀具被应用于精密和超精密零件的切削。虽然天然单晶金刚石刀具的应用逐渐成熟,但由于产量低、价格昂贵,出现了人造金刚石。人造金刚石以比天然金刚石的价格优势应用迅速,且发现有抗压强度好、散热速度快、极低的热膨胀和摩擦系数、比热值低等^[39]优点。随后几种人造金刚石以良好性能、价格和成熟的使用技术,逐步占领了加工要求相对较低的精密加工市场。

金刚石以自身优点对超硬合金、半导体、玻璃、陶瓷和石材等高硬度脆性材料切削应用广泛,但与铁亲和力强且热稳定性差, 700°C 以上会发生炭化现象,因此金刚石不能切削钢类工件。CBN 对铁没有亲和力,其他性能与金刚石相当,既可对普通磨料不能切削的高钒钢或不锈钢发挥优势^[40],又能对金刚石不能加工的钢类精加工^[41]。

CBN 是利用高压高温技术合成的一种新型超硬材料,到目前为止,未发现自然界存在。CBN 物理、化学性能被应用于切削所表现出的特点有:

1) 相比金刚石, CBN 热稳定性和化学惰性更好,热稳定性数值 $1250^{\circ}\text{C}\sim 1350^{\circ}\text{C}$ 。对一些高硬度高韧性金属,如:淬硬钢、高速钢、高强度钢、不锈钢和耐热合金等, CBN 完全可代替刚玉磨削工艺技术,成为最理想磨料^[42]。

2) 切削时产生的切削力小、温度低,故加工工件表面无烧伤和变形,质量好。

3) 切除率高,切削比大,使用寿命长。CBN 切削钢的切削比 $4000\sim 10000$,是刚玉 $120\sim 150$ 倍,使用寿命达刚玉砂轮 100 倍以上^[43]。

4) 切削能力很强, 耐磨性好, 耐用度高, 易于控制加工尺寸及实现自动化加工。

综上所述, 实际生产中 CBN 因良好的切削性能而应用广泛, 尤其高温下与铁无亲和性, 适宜加工高速钢、工具钢、模具钢、轴承钢、不锈钢、镍、钴基合金、冷硬铸铁等^[44]。本文选用 CBN 磨料精加工不锈钢导杆, 即“电镀 CBN 珩具”。

2.4 磨粒粒度选择和基体尺寸计算

2.4.1 电镀 CBN 珩具磨粒粒度的选择

磨粒粒度即磨粒大小, 粒度号越大, 表示磨粒粒度越小, 否则反之。电镀珩具磨粒粒度大小影响磨粒的韧性和机械强度, 最终关系到工件加工精度和表面质量的好坏。因此根据工件加工要求应选择适宜的磨粒粒度^[45]。

一般粗加工选择粒度较大的磨粒, 精加工选择粒度较小的磨粒。磨粒粒度大, 镀层越厚, 镀层强度增强可承受更大切削负荷, 生产效率高; 但由于单位面积上参与切削的数量少, 单个微刃受到载荷大, 变形就越大, 珩具使用寿命降低, 大量切削热易引起珩具直径胀大导致工件加工精度降低, 表面质量变差。磨粒粒度小, 单位面积上参与切削的磨粒数量多, 单个磨粒受到切削力就越小, 切削更平稳, 加工精度高, 磨粒在内孔壁上的加工痕迹比较细密, 表面粗糙度值小; 但磨粒粒度小, 容屑空间减小, 切削能力减弱, 允许的加工余量小, 难以纠正上道工序残留的变形。因此磨粒粒度选择原则是: 在满足加工精度和表面粗糙度的条件下, 尽可能选择粒度大的磨粒。

粒度 120 目的 CBN 磨粒主要应用于半精磨、精磨、成形磨、刀具刃磨和珩磨等, 因此本文电镀 CBN 珩具精加工小深孔选用粒度 120 目的 CBN 磨粒。

2.4.2 电镀珩具基体尺寸的计算理论

根据内孔加工精度和表面粗糙度要求确定 CBN 磨粒粒度后, 要计算电镀珩具基体尺寸, 则必须清楚各电镀层之间尺寸关系。

电镀珩具各镀层示意图如图 2-2 所示, 其中, d_j : 基体的直径; h_d : 电镀底镀层的厚度; h_b : 电镀包裹层的厚度; d_w : 电镀珩具的外径。

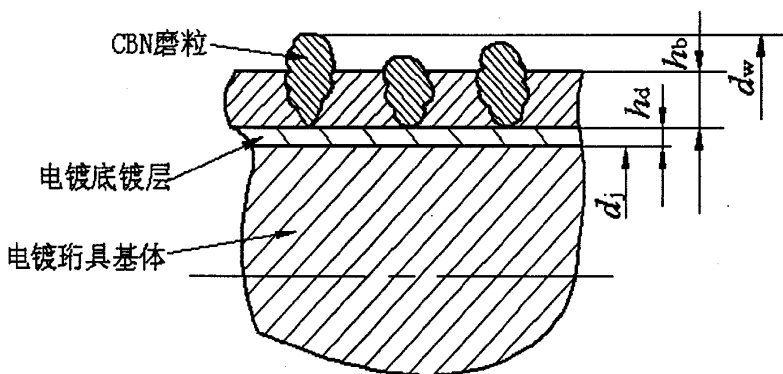


图 2-2 基体、磨粒层和镀层分布示意图

Fig.2-2 The distribution diagrammatic drawing of matrix, abrasive layer and plating layer

根据需要选 120 目 CBN 磨料, 其磨粒粒径约 $125 \sim 100 \mu\text{m}$ 。为了准确计算基体直径, 一般使用磨粒平均粒径。若记粒度号为 M , 平均粒径为 d_g , 由平均粒径 d_g 近似是筛孔数为粒度号 M^1 (in) 的 60% ^[40] 计算 CBN 磨粒的平均粒径 d_g , 即:

$$d_g = 0.6M^{-1}(\text{in}) = 15.2M^{-1}(\text{mm}) \quad (2-1)$$

结合图 2-2, 可计算基体尺寸 d_j , 得:

$$d_j = d_w - 2h_d - 2d_g \quad (2-2)$$

一般电镀 CBN 磨粒时, 先要在基体上电镀一层底层金属, 称底镀层或预镀层。电镀底镀层的厚度 h_d 一般是磨粒平均粒径的 $1/10$, 即:

$$h_d = \frac{1}{10} \times d_g \quad (2-3)$$

电镀珩具的外径 d_w 由加工的内孔径决定, 因此 d_w 等于内孔加工最终的孔径值。

综上所述, 根据磨粒平均直径和内孔最终孔径就可以计算基体的尺寸, 即式 (2-2)。

2.5 电镀 CBN 珩具的结构分析及计算

2.5.1 电镀 CBN 珩具结构分析

根据实际需要, 如图 2-3 所示, 为电镀 CBN 珩具结构, 它包括: 前导向部分、切削部分、校准部分、倒锥部分、后引导部分、刀柄部分及螺旋槽。切削部分、校准部分和倒锥部分组成工作部分, 这些工作部位表面整个圆周上通过内镀法布满 CBN 磨粒。珩具用具有等高性、均匀性和微刃性的 CBN 磨粒对被加工工件内孔壁切削、挤压摩擦

和抛光完成精加工。

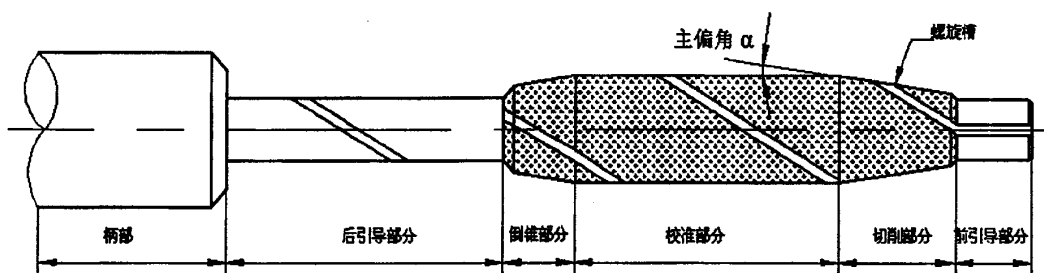


图 2-3 电镀 CBN 珩具的结构示意图

Fig.2-3 The structure diagrammatic drawing of electroplated CBN honing tools

电镀 CBN 珩具各部分结构的设计在小深孔精加工过程中起到不同作用，不同的结构参数取值直接影响内孔加工质量。下面分析电镀 CBN 珩具各部分结构的设计作用和各部分结构参数的取值范围。

1) 前导向部分

由于内孔加工余量太小，切削部分和校准部分的外径尺寸与内孔要加工达到的尺寸很相近，为了将刀具引入内孔，需要一段外径比要加工的内孔直径小的部分，即前引导部分，因此前引导部分是为了顺利引导刀具进入内孔，保护切削部分的磨粒锋刃。

前导向部分结构尺寸参数是直径和长度，一般要保证与加工前孔最小 $10\sim 20\mu\text{m}$ 的间隙，长度取孔径的 $1\sim 1.5$ 倍，倒角 45° 。

2) 切削部分

切削部分是切除加工余量的主要部分，能切除被加工零件加工余量的 $80\%\sim 90\%$ 。设计圆锥台结构有两个作用，其一：普通圆柱形电镀珩具可取的加工余量要小于裸露基体外的磨粒高度，而圆锥台形因主偏角的设计使加工余量数值增大，既对上道工序的加工要求降低，也可修整上道工序残留的加工误差；其二：切削部分切除了大部分加工余量，校准部分承担的加工余量几乎很小，磨粒磨损减小，磨粒可保持锋利微刃精磨，提高内孔最终的表面粗糙度。由于锥台结构的设计，使电镀 CBN 珩具受到轴向力，若轴向力过大会发生变形，刀具受力变形直接影响加工精度，因此需要合理设计切削部分的结构参数，保证刀具在满足加工要求的情况下，受到的轴向力最小。

切削部分结构参数是主偏角 α （如图 2-3 中）和切削长度，大量文献研究，反复试验得出经验值：切削长度一般取 $15\sim 25\text{mm}$ ；粗加工主偏角 α 为 $5'\sim 20'$ ，精加工主偏角 α 为 $1'\sim 5'$ 。切削长度确定后，主偏角数值的确定是要保证切削部分总长度的 $1/10\sim 1/2$ 参与切削^[46]。

3) 校准部分

切削部分因切除大量加工余量磨粒微刃磨损较快, 挤压摩擦过的内孔表面凹凸不平相差大, 内孔表面粗糙度低, 而校准部分微刃由于切削少量的余量受力小, 磨粒等高性和微刃性很好, 再次修整内孔, 将凸凹沟槽碾平, 提高内孔加工精度和表面粗糙度。

校准部分结构参数是直径和长度。直径数值等于孔要求加工的基本尺寸。对于长度, 深孔取 3~4 倍直径; 一般孔取 2~3 倍直径; 短孔取 0.7~1 倍直径。

4) 倒锥部分

倒锥部分可保证孔的几何尺寸和刀具顺利退出。由于电镀 CBN 珩具退出内孔时经过已加工表面, 设计成后倒锥结构, 避免由于刀具的变形而破坏已加工表面。

倒锥部分参数是长度和锥角。长度一般取 10~15mm, 锥角取 5' 左右。

5) 后导向部分

后导向部分引导电镀珩具顺利退出孔, 避免因珩具长退出时变形划伤已加工表面。

后导向部分参数是长度和直径。一般直径保证与加工前孔最小 10~20 μm 的间隙, 长度是孔深的 0.6~1 倍。

6) 螺旋槽

螺旋槽主要是冷却、润滑。电镀珩具与孔之间因间隙小热量排除难, 采用与旋转方式相反的螺旋槽, 给冷却液加一定压强, 使冷却液能够把切屑沿着螺旋槽冲出, 带走大量的热量, 保证不被烧伤, 并润滑使得切屑不划伤已加工表面质量。

螺旋槽一般设计 2~5 条, 螺旋角是 20~45°, 螺旋方向与刀具的旋转方向相反, 保证切屑和冷却液流向未加工表面, 确保已加工表面不被擦伤。螺旋槽宽度一般是 1mm, 深度 0.5mm 左右, 螺距 12~18mm 为宜。

2.5.2 基于导杆的电镀 CBN 珩具结构参数计算

切削部分长度和主偏角的取值对电镀 CBN 珩具切削时的受力有很大影响, 是本文研究的主要内容。下面根据 2.5.1 节各结构参数的取值原则, 计算除切削部分外的电镀 CBN 珩具结构参数。

1) 前引导部分

前引导部分直径必须小于切削部分小端的直径, 且保持间隙尺寸, 基于导杆加工尺寸要求, 前引导部分的直径取为 $\Phi 5h6 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.008 \end{smallmatrix} \right) \text{mm}$, 长度取为 6mm, 倒角取 45°。

2) 校准部分

校准部分直径等于孔最终要求加工的基本尺寸，取为 6mm；导杆孔属于深孔，长度取为 3~4 倍直径，长度取为 20mm。

由 2.4.2 节的式 (2-1)、式 (2-2)、式 (2-3) 计算基体尺寸如下。

由式 (2-1) 计算 120 目 CBN 磨粒的平均粒径 d_g 得：

$$d_g \approx 0.1267\text{mm}$$

由式 (2-3) 计算电镀底镀层的厚度 h_d 得：

$$h_d \approx 0.0127\text{mm}$$

根据校准部分外径所取的值 $d_w=6\text{mm}$ ，所以由式 (2-2) 得：

$$d_j \approx 5.72\text{mm}$$

即校准部分的基体尺寸为 $\Phi 5.72\text{h}4 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.004 \end{smallmatrix} \right) \text{mm}$ 。

3) 倒锥部分

根据长度一般取 10~15mm，锥角取为 $5'$ ，本文取长度 10mm，锥角为 $5'$ 。

由校准部分计算可得：倒锥部分大端直径是 6mm，根据锥角和倒锥部分的长度计算小端直径，如图 2-4 所示：

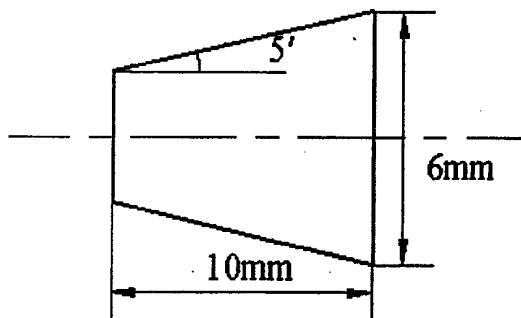


图 2-4 倒锥部分示意图

Fig.2-4 The diagrammatic drawing of back taper

小端直径为：

$$6 - 2 \times (10 \times \tan 5') \approx 5.97\text{mm}$$

根据小端直径 $d_w=5.97\text{mm}$ 及式 (2-2) 计算小端的基体尺寸，得：

$$d_j \approx 5.69\text{mm}$$

故倒锥部分小端镀后尺寸 $\Phi 5.97\text{h}6 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.008 \end{smallmatrix} \right) \text{mm}$ ；镀前基体尺寸 $\Phi 5.69\text{h}4 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.004 \end{smallmatrix} \right) \text{mm}$ 。

4) 后引导部分

一般保证与加工前孔最小间隙保留 10~20μm，长度是内孔深度的 0.6~1 倍。本文中取后引导部分直径为 $\Phi 5h6 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.008 \end{pmatrix}$ mm，长度是 35mm。

5) 螺旋槽

取螺旋槽宽度 1mm，深度 0.5mm，螺旋角 45°，螺距取 14mm。

基于上述结构设计过程，总结归纳后如表 2-1 所示。

表 2-1 电镀 CBN 珩具各部分结构尺寸（除切削部分）

Tab.2-1 The structural sizes of all parts of electroplated CBN honing tools (Except the cutting part)

名称	电镀后尺寸	基体尺寸
前引导部分	长度：6mm	
	直径： $\Phi 5h6 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.008 \end{pmatrix}$ mm	
校准部分	长度：20mm	
	直径： $\Phi 6$ mm	直径： $\Phi 5.72h4 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.004 \end{pmatrix}$ mm
倒锥部分	长度：10mm	
	锥角：5' 大端直径： $\Phi 6$ mm 小端直径： $\Phi 5.97$ mm	锥角：5' 大端直径： $\Phi 5.72h4 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.004 \end{pmatrix}$ mm 小端直径： $\Phi 5.69h4 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.004 \end{pmatrix}$ mm
后引导部分	长度：35mm	
	直径： $\Phi 5h6 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.008 \end{pmatrix}$ mm	
螺旋槽	槽宽：1mm；深度 0.5mm；螺旋角 45°；螺距：14mm	

2.6 电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理及特性

2.6.1 电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理

将电镀 CBN 珩具称为“电镀铰刀或电镀珩具”，主要原因是：电镀铰刀或珩具对内孔的加工在刀具结构和加工机理方面与铰刀、珩磨有相同之处。文献将电镀珩具对孔的加工工艺称铰珩，铰珩工艺是在传统珩磨工艺基础上，融入铰孔特点而形成的新工艺^[47]。

在结构上，一方面电镀 CBN 珩具与铰刀相似，包括前引导部分、切削部分、校准部分、倒锥部分、后引导部分和刀柄，切削部分、校准部分和倒锥部分组成工作部分；

刀具校准部分直径与内孔最终加工尺寸相等，确定后不变。另一方面电镀 CBN 珩具与铰刀有区别，铰刀螺旋槽是刀刃，用于切削；但电镀 CBN 珩具靠磨粒与工件内孔的摩擦、挤压和耕犁产生切屑，螺旋槽仅是注入冷却液起到冷却和润滑作用，且将切屑在压强作用下甩出及冲出加工的内孔壁。

在加工机理上，一方面电镀 CBN 珩具与珩磨相似，靠刀具和孔内壁之间相互摩擦、挤压和耕犁完成内孔切削加工^[48]。另一方面电镀 CBN 珩具与珩磨有区别，电镀 CBN 珩具校准部分外径等于孔加工最终尺寸，不再改变，但珩磨外径是可变的，珩磨条形成的孔径可由所加工的孔径调整；电镀 CBN 珩具靠露在基体外的磨粒切削工件，珩磨靠油石磨削工件；电镀 CBN 珩具与内孔壁的挤压力靠刀具进入内孔，刀具外径大于欲加工前孔径，切削部分锥面与孔径接触因进给产生挤压力，当挤压力产生的接触应力大于工件材料屈服强度时产生切屑，珩磨是因油石珩磨条的张开，与工件内壁挤压，当接触应力大于工件材料屈服强度时产生切屑；与珩磨相比，电镀 CBN 珩具对内孔精加工，主轴进给速度小，旋转速度较大，只需一次走刀或一个往复即可完成。

因此可以将电镀 CBN 珩具精加工小深孔的加工工艺称为“铰珩”。铰珩内孔时电镀珩具是旋转运动兼轴向进给运动，工件固定不动，下面分析铰珩原理。

首先，电镀 CBN 珩具前引导部分逐渐进入内孔，接着引导切削部分也慢慢开始进入，由于珩具切削部分的外径因主偏角逐渐增大，当切削部分的外径与孔内径相等时，此孔径处的长度位置为切削部分参与铰珩的起始位置，该处磨粒开始与内孔壁接触，但由于相接触并没有产生相互作用力，所以磨粒仅是与内孔表面滑擦。珩具继续进给，由于珩具孔径的增大使珩具与内孔壁产生的作用力逐步增大，珩具的旋转和进给使磨粒与内孔壁产生相互干涉，CBN 微刃都是负前角和小后角，挤压力因持续的进给而增大使磨粒接触的内孔表面发生塑性变形，最终当挤压力产生的接触应力大于工件材料屈服强度时，磨粒微刃就将孔内壁的干涉点切削掉产生切屑，在内孔表面耕犁出沟槽。接着珩具不断的进给使先进入铰珩磨粒微刃不断先接触待加工表面，先产生干涉点，先在内孔表面耕犁形成沟槽。依据王君明^[49]等研究砂轮相邻磨粒在工件表面耕犁的沟槽轨迹理论，可知珩具同一外径上周边磨粒耕犁的沟槽轨迹是不同的，基本互不干涉，类似于螺旋线，如图 2-5 所示，为径向相邻磨粒 A 和 B 在工件内孔中铰珩产生的沟槽。珩具进给使轴向磨粒在前端磨粒加工过的表面基础上再次加工，原先已产生的沟槽与后续磨粒产生的干涉点将继续切除，这样进给的珩具切削部分后端磨粒就总是与前端磨粒残留的沟

槽产生相应的新干涉点，最终依次切除，直到切削部分全部进入内孔完成任务。

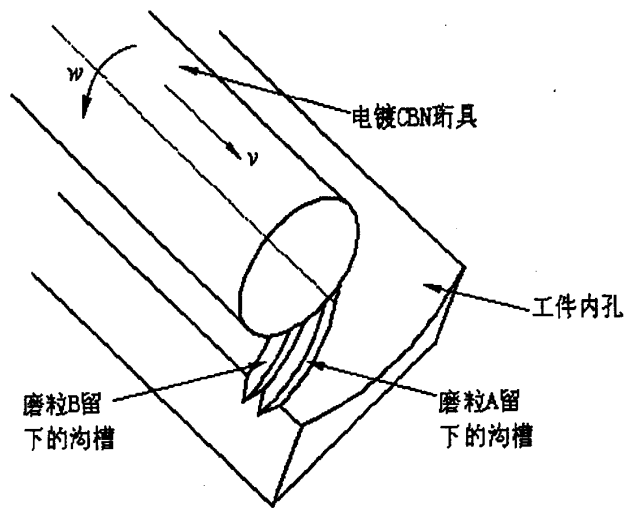


图 2-5 磨粒 A 和 B 产生的沟槽示意图

Fig.2-5 The diagrammatic drawing of groove which was generated by grits A and B

其次，由于切削部分切除大量加工余量，磨粒因受铰珩力大相对磨损大，微刃开始非常锋利，但逐渐变钝，尖端被磨成一个个小平面，小平面对内孔表面形成的沟槽谷底和谷峰高度差值大，加工精度和表面粗糙度不能满足精加工要求。切削部分磨粒对内孔表面产生小沟槽、残留高度或表面凸峰将被校准部分磨粒对其滑挤、摩擦和抛光作用碾平^[50]。校准部分切削余量小，磨粒磨损小，微刃保持着锋利，提高了内孔加工精度和表面粗糙度。由于电镀 CBN 珩具的外径等于孔径最终要求尺寸，且固定不变，若上道工序使得内孔圆度不好、有凸起等，铰珩中珩具与凸起发生干涉、滑擦挤压，最终切削掉凸起，提高圆度，这样一次加工就可达到加工精度和表面质量的要求^[51]。

最后，当校准部分全部加工完内孔表面之后，珩具将退出内孔。倒锥部分尺寸越来越小保护已加工表面，后引导部分引导电镀 CBN 珩具退出内孔。

综上所述，电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理是磨粒与工件内壁之间的相互作用而产生切屑，过程与 CBN 砂轮磨削有些相似，但也有区别。CBN 砂轮磨削是把 CBN 单颗粒看成切削刃，是高速、间断加工，切屑是短切屑；电镀 CBN 珩具铰珩内孔是磨粒挤压孔内壁产生塑性变形而形成，铰珩后工件硬度还有明显的提高，是低速、常接触加工，切屑呈连续型，铰珩是微粒切削和摩擦抛光综合作用的过程。

2.6.2 电镀 CBN 珩具精加工小深孔的特性

与珩磨刀具、铰刀不同，对小深孔精加工电镀 CBN 珩具具有如下特性：

1) 电镀 CBN 珩具修磨作用

采用内镀法制备的电镀 CBN 珩具精密加工, 珩具磨粒等高性、均匀性和微刃性还需做适当的修磨, 提高刀具本身加工质量。等高性要求珩具磨粒露出高度相同; 均匀性要求单位面积上磨粒数量相同; 微刃性要求珩具磨粒小尖端锋利具有良好的切削性能。铰珩内孔时, 珩具磨粒的切削刃等高性好, 参加切削的微刃数量越多, 单个微刃受的切削力就越小, 切削稳定使用寿命越长, 内孔表面加工精度越高, 表面粗糙度越好。特别是校准部分 CBN 磨粒均匀布满基体, 珩具导向性好, 内孔圆度、圆柱度提高。

2) 电镀 CBN 珩具保持寿命长的原因

电镀珩具露出的磨粒参与切削, 磨粒之间的结合剂形成了一个凹坑, 切屑就藏于这些凹坑中。铰珩过程中, 珩具上的结合剂被藏于凹坑中的切屑磨削蚀除一部分, 凹坑深度增加, 但磨粒后面的结合剂晶体蚀除量很少, 当切屑蚀除磨粒前面的结合剂时, 产生的挤压力推移结合剂材料向后蠕动, 使结合剂对磨粒的支撑作用增强^[52], 电镀珩具 CBN 颗粒不易脱落, 保持寿命较长。

3) 螺旋槽的作用

与普通铰刀螺旋槽的铰削作用不同, 电镀珩具上螺旋槽是排屑、冷却和润滑作用。电镀珩具整个工作部分开设有螺旋槽原因是: 铰珩过程在半封闭状态下进行, 多刃切削产生大量热量, 切下的切屑带有大部分热量藏于颗粒之间的凹坑中, 导入的切削液冲洗切屑, 并在珩具旋转时由产生的离心力甩出, 切削热也通过切屑带走, 否则切屑的滞留使内孔壁加工面和磨粒之间挤卷, 划伤已加工表面, 影响内孔壁表面质量。

2.7 主偏角与电镀 CBN 珩具轴向力的关系

切削部分承担切削任务的 80%~90%, 预留校准部分加工余量的大小决定着内孔最终加工精度和表面粗糙度, 因此切削部分结构参数取值非常重要。如前所述切削部分的结构参数: 切削长度和主偏角 α , 分析如下:

1) 切削部分长度对加工质量的影响

如图 2-6 所示为切削部分示意图。当主偏角 α 为定值时, 切削部分长度值偏大时, 其优点: 可切去相对多的加工余量, 对上道工序的加工要求降低; 缺点: 铰珩时刀具与工件接触面积过大, 产生的铰珩力就大, 加工不平稳易产生振动, 切削部分长度增大了

刀具的总长度，刀杆刚性降低。反之，当切削部分长度偏小，加工余量就很小，要想达到工件加工要求，对上道工序的要求苛刻。一般情况下，切削部分长度取 15~25mm，本文选用中间值 $L=20\text{mm}$ 。

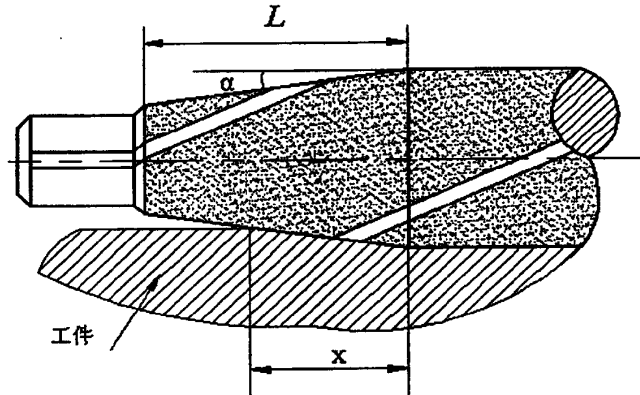


图 2-6 切削部分示意图

Fig.2-6 The diagrammatic drawing of cutting structure

2) 主偏角 α 对加工质量的影响

当切削长度取定值，主偏角取值过大，加工余量增大，参与铰珩的微刃过少，每个微刃受的切削力增大，磨损增大，使用寿命缩短；主偏角取值过小，加工余量小生产效率降低。切削部分担任主要切削，铰珩力主要由切削部分铰珩时产生。珩具铰珩力分解为轴向力、径向力和法向力，其中轴向力数值仅与主偏角有关，若主偏角大，受到的轴向力就大，若主偏角小，受到的轴向力就小。前研究者生产实践经验归纳主偏角取值范围，做出了定性分析，下面从主偏角对轴向力影响角度，定量研究以提高内孔加工质量。

(1) 主偏角 α 对切削层参数的影响 如图 2-7 所示，切削层参数包括：主偏角 α 、切削厚度 h_D 、切削宽度 b_D 、进给量 f 、加工余量 a_p 。

从几何关系角度分析，主偏角与切削层各参数关系如下式所示：

$$\sin \alpha = \frac{h_D}{f} \quad (2-4)$$

$$\sin \alpha = \frac{a_p}{b_D} \quad (2-5)$$

由式 (2-4) 得出：当切削长度 L 一定时，若进给量 f 不变，主偏角 α 取值偏小，则切削厚度 h_D 变小，进给阻力减小，摩擦变形增大易引起振动，切入切出时间增加，生产效率降低；主偏角 α 取值偏大，则切削厚度 h_D 增大，刀具所受阻力增大，每颗磨粒所受铰珩力较大，磨粒的锋利微刃易遭破坏，使用寿命缩短。

由式 (2-5) 得出：当切削长度 L 一定时，若加工余量 a_p 不变，主偏角 α 取值偏小，则切削宽度 b_D 偏小，珩具阻力变大，每颗磨粒受到的较珩力偏大，刀具寿命缩短，对微刃的破坏严重，被加工后孔的表面粗糙度差；主偏角 α 取值偏大，切削宽度 b_D 偏大，进给阻力减小，挤压摩擦变形加大，生产效率低。

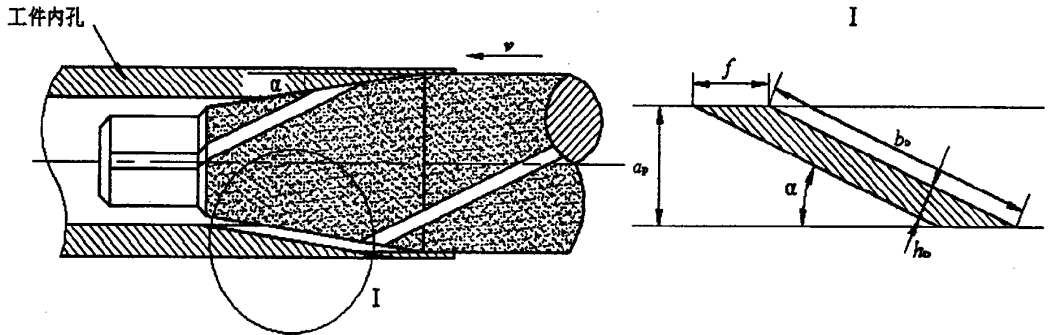


图 2-7 主偏角对切削层参数的影响

Fig.2-7 The effect of main angle for the cutting layer's parameter

由此可见，主偏角 α 的取值决定切削层形状参数，最终影响珩具使用寿命、被加工孔的加工精度和表面粗糙度、生产效率，需要合理的设计。

(2) 主偏角 α 与轴向力的关系 电镀 CBN 珩具受力分解为切向力、径向力、轴向力。径向力相互抵消，切向力是主切削力，这两个力与主偏角 α 没有关系，只有轴向力与主偏角 α 有很大关系，且轴向力过大珩具弯曲变形影响内孔加工精度和表面质量，因此轴向力越小珩具变形越小，但根据小深孔较珩机理，轴向力不能过小，因为产生切屑必须满足珩具与内孔壁挤压力大于工件材料屈服强度。下面分析珩具切削部分轴向力与主偏角 α 关系，如图 2-8 所示。

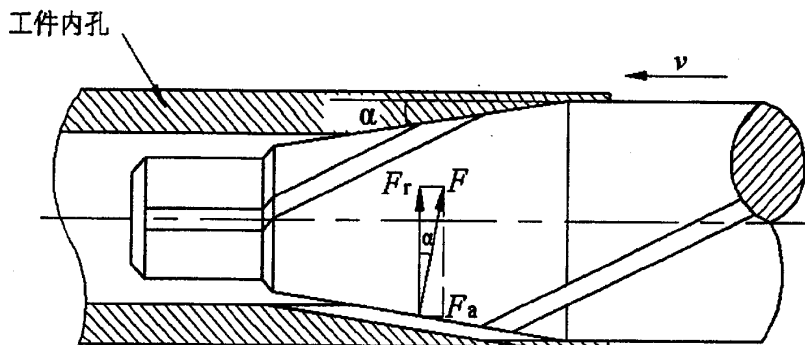


图 2-8 电镀 CBN 珩具切削部分受力与主偏角的关系

Fig.2-8 The relation between force of cutting structure and main angel for electroplated CBN honing tools

由于珩具切削部分的受力简化为集中力不影响分析结果，因此简化珩具切削部分受到工件作用垂直于锥面的集中力为 F ，利用平行四边形法则分解成两个方向的力，即径向力 F_r 和轴向力 F_a 。轴向力与主偏角的关系为：

$$F_a = F \times \sin \alpha \quad (2-6)$$

从式 (2-6) 看, 轴向力不仅和主偏角 α 有关, 而且与力 F 也有关, 力 F 与主偏角关系不明确, 因此不能具体得到轴向力与主偏角 α 的数学关系。

首先: 从切向力 F_t 和功率考虑, μ 为 CBN 磨粒与工件之间的摩擦系数, 珩具受到的切向力 F_t 如下:

$$F_t = F \times \mu \quad (2-7)$$

切向力是铰珩内孔时的主切削力, 是最大的一个分力, 消耗切削总功率 95% 左右^[53]。电镀珩具所受扭矩由主切削力产生, 故以扭矩为等价关系建立切削力与功率的关系。

其次: 从切削力角度推导扭矩公式。珩具切削部分与校准部分是电镀珩具的主要工作部分, 对于主偏角 α , 在切削部分时 $\alpha > 0^\circ$; 在校准部分时 $\alpha = 0^\circ$ 。校准部分也消耗一部分功率, 但为了研究主偏角 α 与轴向力的关系, 就直接把功率分成两部分, 取切削部分占总功率 m , 下面分析计算切削部分的扭矩, 电镀珩具切削部分的几何尺寸关系示意图如图 2-9 所示, 其中, d_0 : 珩具外径; α : 主偏角; L : 切削部分总长度。

铰珩时, 受力简化为集中力, 因此求切向力 F_t 产生的扭矩时, 其力径取如图 2-9 中的 $\overline{DE}$ 。

在 Rt $\triangle ABC$ 中, 利用三角函数计算得:

$$\tan \alpha = \frac{\overline{BC}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{BC}}{L} \quad (2-8)$$

由式 (2-8) 可得:

$$\overline{BC} = L \times \tan \alpha \quad (2-9)$$

$$\overline{DF} = \frac{1}{2} \times \overline{BC} = \frac{1}{2} L \tan \alpha \quad (2-10)$$

因此, 可得:

$$\overline{DE} = d_0 - 2 \times \overline{DF} = d_0 - L \tan \alpha \quad (2-11)$$

可知:

$$T = F_t \times \frac{\overline{DE}}{2} = \frac{F_t (d_0 - L \tan \alpha)}{2} \quad (2-12)$$

再由式 (2-7) 可知:

$$T = \frac{F\mu(d_0 - L \tan \alpha)}{2} \quad (2-13)$$

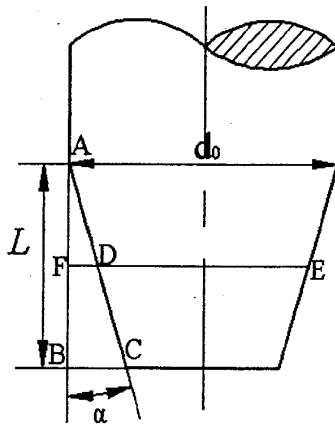


图 2-9 切削部分的几何尺寸关系

Fig.2-9 The relation of geometry size in cutting part

最后：由功率计算扭矩。电镀珩具较珩时，是由电主轴带动旋转实现，其产生的扭矩是 T ，输出功率是 P ，转速为 n ，传动效率是 η ，较削部分的功率使用率是 m ，由扭矩计算公式可得：

$$T = \frac{9550 p \eta m}{n} \quad (2-14)$$

由式 (2-13) 和式 (2-14)，以扭矩作为等量条件可得：

$$\frac{F\mu(d_0 - L \tan \alpha)}{2} = \frac{9550 p \eta m}{n} \quad (2-15)$$

从式 (2-6) 可知：

$$F = \frac{F_a}{\sin \alpha} \quad (2-16)$$

因此，得：

$$\frac{F_a \mu (d_0 - L \tan \alpha)}{2 \sin \alpha} = \frac{9550 p \eta m}{n} \quad (2-17)$$

计算 F_a 得：

$$F_a = \frac{19100 p \eta m}{n \mu} \times \frac{\sin \alpha}{d_0 - L \tan \alpha} \quad (2-18)$$

式 (2-18) 中， P ， η ， m ， μ ， n ， d_0 ， L 都是与 α 无函数关系，只剩下 F_a 与 α 有函数关系。 F_a 对 α 求一阶导数得：

$$F'_a = \frac{19100P\eta m}{n\mu} \times \frac{d_0 \cos \alpha - L \sin \alpha + L \frac{\sin \alpha}{(\cos \alpha)^2}}{(d_0 - L \tan \alpha)^2} > 0 \quad (2-19)$$

可知, F_a 对 α 一阶导数大于零, 说明 F_a 是随着 α 的增大而增大。

由 (1) 和 (2) 可知, 主偏角大小影响切削层形状参数和珩具所受轴向力, 决定着加工珩具使用寿命、内孔加工精度和表面粗糙度、生产效率。轴向力随主偏角增大而增大, 轴向力的增大会使珩具产生变形, 根据铰珩机理轴向力又应该保证数值产生切屑, 因此主偏角对加工精度和表面粗糙度的影响, 需要通过珩具轴向力的优化取值保证, 其取值需要进一步分析获得优化。

2.8 本章小结

1) 分析 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢导杆的加工要求, 属于小深孔精加工范围, 宜选用电镀珩具对其加工。

2) 研究电镀珩具外镀法和内镀法制备工艺的基本原理及对比其两者优缺点, 并根据磨料性能选定 CBN 作为珩具磨料及粒度号 120 目, 同时依据电镀珩具基体尺寸的理论计算出适合导杆的电镀 CBN 珩具镀前镀后基本尺寸。

3) 研究电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理; 分析切削部分长度和主偏角对内孔精加工精度和表面粗糙度的影响, 主要研究主偏角对珩具所受轴向力的影响, 提出要保证内孔加工质量, 必须对主偏角取值合理优化轴向力减少珩具变形。

第三章 电镀 CBN 珩具轴向力计算模型的建立

本章首先分析进给量和加工余量对加工精度、表面粗糙度的影响；其次研究电镀 CBN 珩具精加工小深孔时的受力情况；最后建立电镀 CBN 珩具轴向力的数学模型。

3.1 进给量和加工余量对加工精度、表面粗糙度的影响

由式 (2-4)、式 (2-5) 可知：切削厚度是由主偏角和进给量决定；切削宽度由主偏角与加工余量决定，所以切削层参数可简化为：主偏角 α 、进给量 f 、加工余量 a_p 。

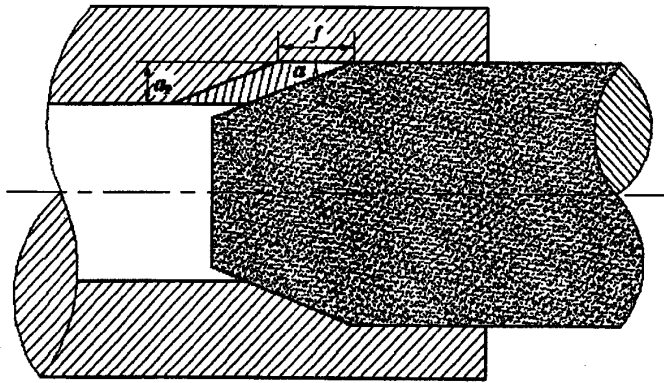


图 3-1 切削层示意图

Fig.3-1 The diagrammatic drawing of cutting layer

当主偏角一定时，分析进给量、加工余量对加工精度和表面粗糙度的影响作如下分析。从切削层形状分析，如图 3-1 所示。

1) 当主偏角一定时，若加工余量不变，进给量增大时，生产效率提高，但切削层横向面积增大，珩具受到的铰珩力增大，轴向力增大，容易变形，内孔几何精度降低；原来定数量参与切削的磨粒受力增大，磨粒的磨损加剧，内孔的表面质量差，若进给量值太大，磨粒无法承受工件的挤压而脱落，珩具使用寿命降低；否则反之。故主偏角和加工余量一定时，进给量取值在保证加工精度和表面质量的前提下尽可能提高。

2) 当主偏角一定时，若进给量不变，加工余量增大时，珩具在一定进给量下承担的切削任务增大，受到的铰珩力增大，轴向力也增大，珩具易变形影响加工精度，磨粒

易磨损甚至脱落，内孔表面质量差和珩具使用寿命缩短，优点是降低上道工序加工要求且易修整上道工序留下的几何精度等问题；否则反之。

综上所述，主偏角、进给量、加工余量数值选取决定电镀 CBN 珩具轴向力的大小，影响内孔加工精度和表面质量以及珩具的使用寿命和生产效率。

3.2 电镀 CBN 珩具的受力分析

依据电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理分析其受力。由第二章图 2-8 可知，铰珩过程中珩具切削部分锥面与内孔壁相互挤压，珩具锥面受到内孔壁作用垂直锥面方向的正压力 F ，可分解为径向力 F_r 和轴向力 F_a ，而从内孔壁与珩具开始接触，所有接触力都会分解一个轴向力，这些小轴向力就组成珩具受到的总轴向力，具体示意图如图 3-2 所示。校准部分与内壁接触也会有轴向力，但由于加工余量数值小产生的轴向力可忽略，因此电镀 CBN 珩具受到的轴向力主要指切削部分受到的轴向力。

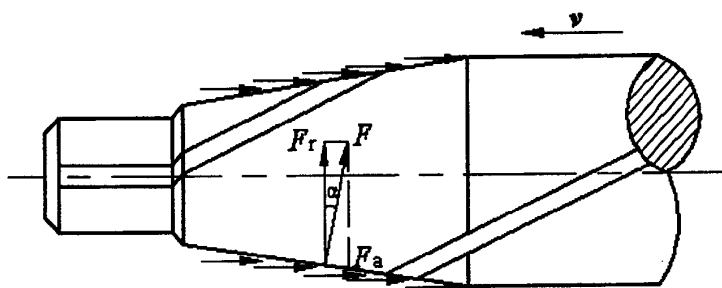


图 3-2 切削部分轴向力分布

Fig.3-2 The distribution of axial force of cutting part

珩具受的正压力还分解成一个径向力，这些径向力方向都指向轴心，大小相等，最终相互抵消。珩具和主轴一起转动，铰珩时珩具表面磨粒和工件之间有摩擦力，方向沿切线与旋转方向相反，由于刀柄部分固定不动，刀柄部分和工作部分组合使珩具受一对力偶。简化电镀 CBN 珩具结构及力简化为集中力，铰珩时受力示意图如图 3-3 所示：

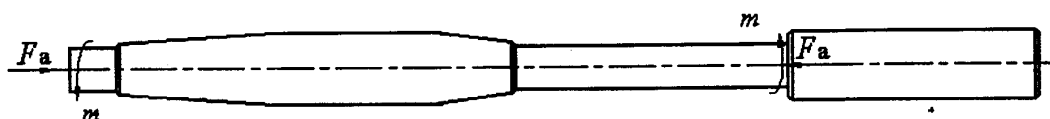


图 3-3 电镀 CBN 珩具受力简图

Fig.3-3 The force schematic diagram of electroplated CBN honing tools

电镀 CBN 珩具受力偶 m ，这个力是铰珩时的主切削力；珩具铰珩时，为了产生切屑，切削锥面与内孔壁之间的正压力必须使工件所受接触应力大于工件材料的屈服强

度,但正压力增大使分解的轴向力也增大,若受的总轴向力过大,珩具会产生压缩变形,校准部分是定尺寸结构,若发生变形,则内孔加工精度就无法保证。因此主偏角、进给量、加工余量的取值应该保证电镀 CBN 珩具铰珩时所受轴向力在满足产生切屑的前提下尽可能最小,为了减少刀具变形而提高内孔加工精度和表面粗糙度。

3.3 电镀 CBN 珩具轴向力计算模型的建立

基于电镀 CBN 珩具精加工小深孔铰珩机理和受力分析,根据一般深孔加工刀具受力的分析和计算,简化电镀 CBN 珩具为多刃刃深孔加工刀具,推导轴向力计算公式。

3.3.1 一般深孔加工刀具的受力分析

一般深孔加工,如:钻削、铰削、扩孔、珩磨等,其刀具结构包括导向条和切削刃,导向条起引导作用,切削刃用于切削。单边刃深孔刀具的受力分析如图 3-4 所示,切削刃受三个方向的力:切向力 F_t 、径向力 F_r 和轴向力 F_a 。主切削力是切向力 F_t ,它是刀具与工件之间的摩擦力,沿切线方向与刀具旋转方向相反;径向力是刀具与工件径向挤压产生的力;轴向力是刀具锥面与工件挤压产生的分力。刀具既旋转运动,又横向进给。

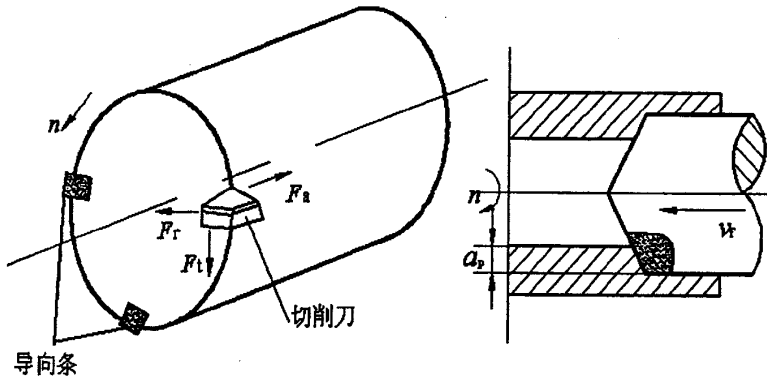


图 3-4 单边刃深孔加工受力分析

Fig.3-4 The force analysis of single-edge lip deep hole processing

根据切削原理,由单位面积切削力与切削层面积的乘积计算深孔刀具主切削力得:

$$F_t = K_s \cdot f \cdot a_p \quad (3-1)$$

公式中参数: K_s : 单位切削力 (N/mm^2); f : 进给量 (mm/r); a_p : 切削深度 (mm)。

3.3.2 电镀 CBN 珩具轴向力计算模型的简化

电镀 CBN 珩具是靠基体上的无数细小磨粒切削工件内壁，并非像钻头、铰刀和扩孔刀等刀刃切削，但珩具制备技术发展，就目前的内镀法^[54]、钎焊^[55]、PCBN^[56]及磨粒的可控分布^[57]等使磨粒的分布排列与深孔加工刀具的刀刃有些相似。下面参考深孔加工刀具理论，对电镀 CBN 珩具磨粒的形状和分布做合理简化。

1) 磨粒形状的简化

为了计算方便，分析电镀 CBN 珩具精加工小深孔常会把 CBN 磨粒形状做简化处理。文献中对 CBN 磨粒有简化成棱形^[58]、圆锥形^{[59][60]}、球形^{[61][62]}，但实际计算中，它们的差异不大^[63]。本文将 CBN 磨粒简化成球形。

2) 磨粒排列分布的简化

基于内镀法制备的电镀 CBN 珩具等高性、均匀性发展现状，磨粒可整齐有规律的排列在刀具基体上，对磨粒分布排列做一定假设，具体如图 3-5 所示：

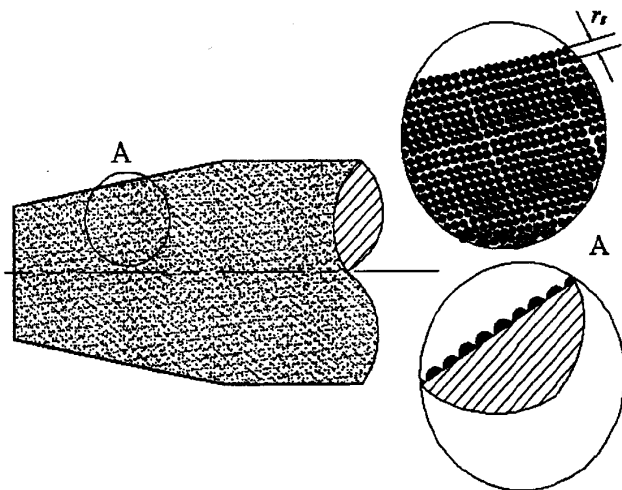


图 3-5 磨粒的有序排列示意图

Fig.3-5 The diagrammatic drawing of the ordered arrangement of grits

如图 3-5 中 A 部分，右上图是假设球形的 CBN 磨粒按行整齐排列，两行磨粒中心之间的距离相等，记为 r_g ；右下图是假设单行磨粒整齐等高，磨粒电镀在基体上，部分是埋于电镀层中，露出外面的部分是磨粒直径的 1/3，本文选用 120 目的 CBN 磨粒，平均直径是 0.1267mm，则露在外面的磨粒高度约是 0.042mm。从微观角度分析，每行中磨粒之间有一定的间隙，但间隙比磨粒直径小，所以行中磨粒简化为相互紧挨排列，磨粒是球形的，外露的 1/3 部分连在一起，使得每行磨粒可简化成一把小的单边刃深孔加工刀具。电镀 CBN 珩具可简化成下面的结构，如图 3-6 所示：

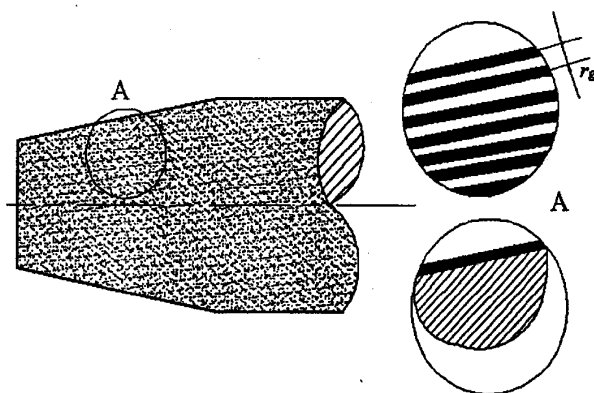


图 3-6 电镀 CBN 珩具磨粒行简化示意图

Fig.3-6 The diagrammatic drawing of grits' order for electroplated CBN honing tools

磨粒排列分布的简化包括磨粒整齐排列分布成一行、每一行磨粒的结构简化成深孔加工刀具的刀刃、磨粒行间距是相等的。对比单边刃深孔加工刀具结构，电镀 CBN 珩具简化后结构类似多刀刃深孔加工刀具，是将单边刃深孔加工刀具中的导向条都换成由磨粒排列形成分布均匀的细小切削刃，简化后示意图如图 3-7 所示。

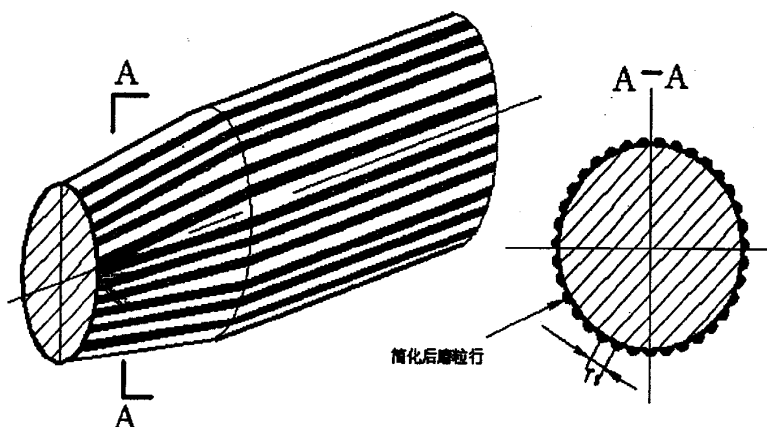


图 3-7 电镀 CBN 珩具简化成多边刃刀具

Fig.3-7 The electroplated CBN honing tools was simplified as multiple-edge lips tool

3.3.3 电镀 CBN 珩具轴向力的理论分析

电镀 CBN 珩具结构简化为多边刃深孔加工刀具，本节研究单边刃与多边刃深孔加工刀具加工内孔时轴向力关系。

以电镀 CBN 珩具简化为多边刃刀具的模型，取如图 3-8 所示的两个单边刃分析受力。每个单边刃受的正压力记为 F_i ，方向与切削部分锥面垂直，可分解为轴向力 F_{ai} 和径向力 F_{ri} 。还受到切向力 F_{ti} ，它是珩具旋转与工件之间产生的摩擦力，方向沿切线与珩具旋转方向相反，属于动摩擦，是正压力与摩擦系数之积。珩具刀柄固定与切向力形

成扭矩，各单边刃形成扭矩方向相同，所以总扭矩是各单边刃扭矩的矢量和。每个单边刃受的正压力数值相等，因此分解的轴向力和径向力数值相等，由图 3-8 可知各单边刃的径向力方向都指向轴心，最终切削部分上各单边刃径向力矢量和为零；各单边刃所受轴向力方向相同，因此电镀 CBN 珩具受到的总轴向力等于单边刃轴向力的矢量和。

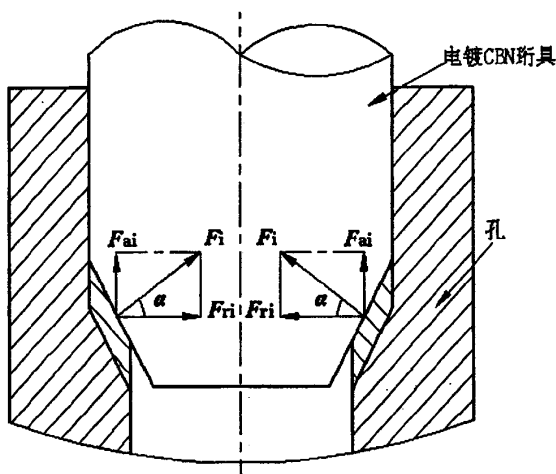


图 3-8 多边刃刀具的受力分析示意图

Fig.3-8 The diagrammatic drawing of the force analysis of multiple-edge lips tool

3.3.4 电镀 CBN 珩具轴向力的计算

基于电镀 CBN 珩具轴向力计算模型简化和总轴向力分析，若知道珩具切削部分多边形总数，则可根据单边刃与多边形所受轴向力之间关系，计算珩具所受轴向力数值。

1) 多边形总数的计算

根据 3.2 节切削部分磨粒的简化模型，磨粒间距记 r_g ，王君明等利用日本公司生产的超景深三维显微系统 VHX-600 对 CBN 磨粒间距的测量平均值 $r_g \approx 150\mu\text{m}$ ^[64]，这个数值具有参考价值，本文选用 CBN 磨粒间距 $r_g \approx 150\mu\text{m}$ 。

切削部分多边形总数的计算示意图如图 3-9 所示，其中， d_0 ：镀后校准部分外径，也是切削部分大端直径； d_1 ：镀后切削部分小端直径； d_2 ：镀后切削部分圆台中间圆直径；依据切削部分长度为 20mm； α ：主偏角。

由主偏角 α 、切削部分长度和切削部分大端直径 d_0 （图 3-9）计算切削部分小端直径 d_1 得：

$$d_1 = d_0 - 40 \tan \alpha \quad (3-2)$$

由 d_0 和 d_1 求镀后切削部分圆台中间圆的直径 d_2 得：

$$d_2 = \frac{1}{2}(d_0 + d_1) \quad (3-3)$$

以直径 d_2 的圆周长和磨粒之间间距 $r_g \approx 150\mu\text{m}$ 来计算多边刃的总数 n ，即：

$$n = \frac{\pi \cdot d_2}{r_g} = \frac{\pi \cdot (d_0 - 20 \cdot \tan \alpha)}{r_g} \quad (3-4)$$

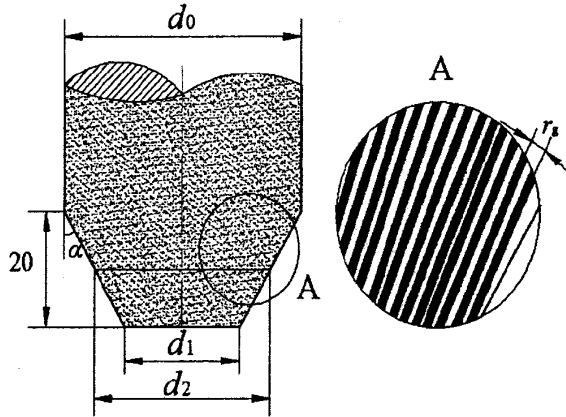


图 3-9 多边刃总数计算示意图

Fig.3-9 The diagrammatic drawing of the of multiple-edge lips tool

2) 电镀 CBN 珩具轴向力计算过程

单边刃受力记为：正压力 F_i 、轴向力 F_{ai} 、径向力 F_{ri} 、切向力 F_{ti} ；电镀 CBN 珩具受力记为：正压力 F 、轴向力 F_a 、径向力 F_r 、切向力 F_t 。受力示意图如 3-10 所示。

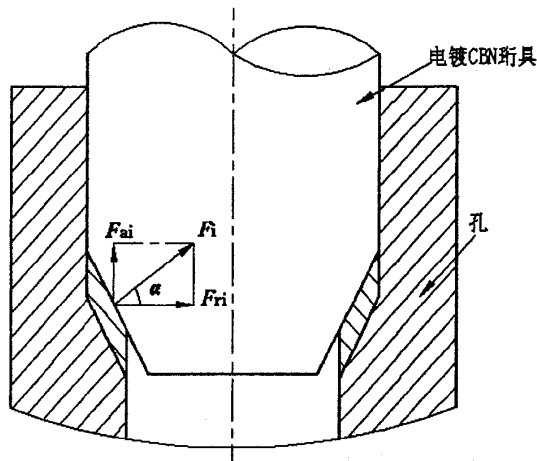


图 3-10 电镀 CBN 珩具较珩力示意图

Fig.3-10 The diagrammatic drawing of the force of electroplated CBN honing tools

单边刃所受到的切向力 F_{ti} 由式 (3-1) 得：

$$F_{ti} = K_s \cdot f \cdot a_p \quad (3-5)$$

同时，单边刃所受到的切向力 F_{ti} 也是：

$$F_{ti} = F_i \cdot \mu \quad (3-6)$$

式 (3-6) 中 μ 是 CBN 磨粒与工件材料不锈钢之间的动摩擦系数。

由式 (3-5) 和式 (3-6) 可知：

$$F_i = \frac{F_{ti}}{\mu} = \frac{K_s f a_p}{\mu} \quad (3-7)$$

由图 3-9 可知，单边刃正压力 F_i 和轴向力 F_{ai} 之间的关系：

$$F_{ai} = F_i \cdot \sin \alpha \quad (3-8)$$

把式 (3-7) 代入式 (3-8) 得：

$$F_{ai} = F_i \cdot \sin \alpha = \frac{K_s f a_p}{\mu} \cdot \sin \alpha \quad (3-9)$$

由于珩具的每个单边刃所受到的轴向力大小相等，方向一致，所以电镀 CBN 珩具受的总轴向力 F_a 是各单边刃轴向力 F_{ai} 矢量和，也是标量和。由式 (3-4)、式 (3-9) 得：

$$F_a = n \cdot F_{ai} = \frac{\pi(d_0 - 20 \tan \alpha)}{\mu \cdot r_g} K_s f a_p \sin \alpha \quad (3-10)$$

式 (3-10) 中 d_0 、 μ 、 r_g 、 K_s 四个量是已知的，其主偏角、进给量和加工余量是未知量。因此可知电镀 CBN 珩具受到的轴向力由主偏角、进给量、加工余量决定。

3.4 本章小结

本章首先分析了进给量、加工用量对加工精度和表面粗糙度的影响；其次依据电镀 CBN 珩对小深孔精加工的铰珩机理分析了珩具的受力情况，得出珩具所受轴向力是使得珩具受力变形的主要原因；最后将电镀 CBN 珩具简化为多边形深孔加工刀具，根据单边刃主切削力计算公式，推导出珩具轴向力计算公式。

第四章 优化设计数学模型的建立与计算

本章以主偏角、进给量和加工余量为设计变量，轴向力最小为目标函数，产生切屑等为约束条件建立优化设计的数学模型，并利用 MATLAB 求取最优值。

4.1 优化计算数学模型的建立

优化设计的数学模型包括：设计变量、目标函数、约束条件，下面逐一建立：

1) 设计变量是：主偏角 α 、进给量 f 、加工余量 a_p 。

2) 目标函数由式 (3-10) 得：

$$\min(F_a) = \frac{\pi(d_0 - 20 \tan \alpha)}{\mu \cdot r_g} K_s f a_p \sin \alpha \quad (4-1)$$

3) 约束条件：

(1) 磨粒高度 1/3 裸露基体外，故切削厚度 h_D 要小于磨粒整个高度的 1/3，得：

$$h_D < \frac{1}{3} \cdot d_g \quad (4-2)$$

本文选用 120 目 CBN 磨粒及计算出的平均高度 $d_g=0.1267\text{mm}$ ，由式 (2-4) 得：

$$f \cdot \sin \alpha < 0.04 \quad (4-3)$$

(2) 参考大量文献，进给量 f 的取值一般是 $0.3\text{mm/r} \sim 1.5\text{mm/r}$ ，加工余量 a_p 的取值一般是 $0.01\text{mm} \sim 0.04\text{mm}$ ^[65]，得：

$$0.3 \leq f \leq 1.5 \quad (4-4)$$

$$0.01 \leq a_p \leq 0.04 \quad (4-5)$$

(3) 切削部分长度取为 20mm，为了保证电镀 CBN 珩具的导向性，珩具切削部分实际的切入长度 m 应保证一定的范围，其示意图如 4-1 所示。

切削部分实际的切入长度 m 与切削部分的总长度 $L=20\text{mm}$ 有如下关系：

$$\frac{1}{2} \cdot L \leq m \leq \frac{9}{10} \cdot L \quad (4-6)$$

因此, 切入长度 m 可取的范围是:

$$10\text{mm} \leq m \leq 18\text{mm} \quad (4-7)$$

由图 4-1 还可得切入长度 m 与主偏角 α 、加工余量 a_p 之间的关系, 如下:

$$m = a_p \cdot \cot \alpha \quad (4-8)$$

由式 (4-7) 得:

$$10 \leq a_p \cdot \cot \alpha \leq 18 \quad (4-9)$$

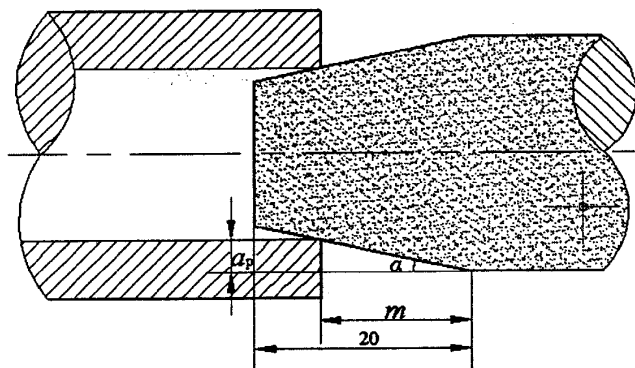


图 4-1 切削部分实际切入长度示意图

Fig.4-1 The diagrammatic drawing of the actual length of cutting part

(4) 电镀 CBN 珩具铰珩内孔实际就是磨粒对内孔表面的挤压、摩擦和切除干涉, 与磨削机理相同, 也经历了三个阶段: 滑擦、耕犁、切屑形成。开始珩具磨粒与工件表面接触, 相互挤压力和摩擦小, 磨粒微刃对工件表面仅是滑擦; 随珩具进给逐渐使工件与珩具之间正压力、摩擦力稳步增大, 当珩具与工件之间由正压力产生的接触应力超过工件材料的屈服强度时, 磨粒微刃就压入工件材料基体, 压入工件材料的前方发生塑性变形表面隆起, 形成耕犁作用, 随着珩具旋转最后将产生切屑。因此珩具磨粒若要切下切屑必须使珩具与工件之间的接触应力大于工件材料的屈服强度。查表得: 工件材料 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的屈服应力 $\sigma_{0.2}=196\text{MPa}$, 接触应力记为 σ , 可得:

$$\sigma > \sigma_{0.2} \quad (4-10)$$

下面求解电镀 CBN 珩具受到的接触应力:

由式 (3-4)、式 (3-7) 求珩具受到的正压力 F , 得:

$$F = n \cdot F_i = \frac{\pi \cdot (d_0 - 20 \cdot \tan \alpha) \cdot K_s f a_p}{r_g \mu} \quad (4-11)$$

参与切削的电镀 CBN 珩具切削部分面积示意图如 4-2 所示, 将图 (1) 的切削部分沿着 $\overline{BE}$ 剪切并展开形成图 (2), 其中阴影部分为实际参与切削的面积。

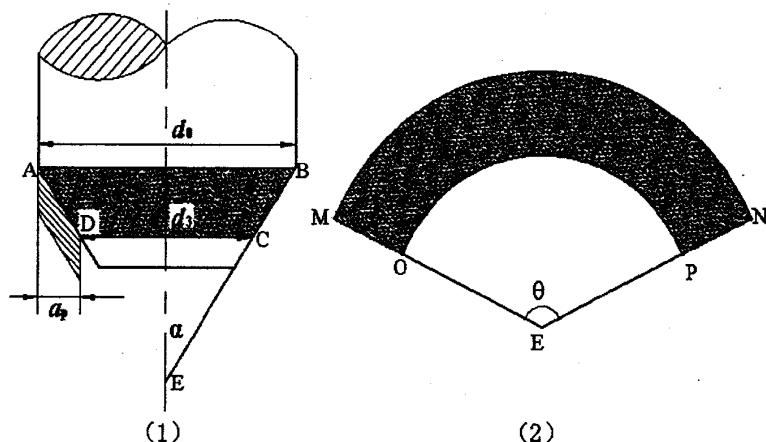


图 4-2 切削部分参与切削的有效面积

Fig.4-2 The effective area of cutting part participating in cutting

由几何关系得:

$$\overline{BE} = \overline{EN} = \frac{d_0}{2 \sin \alpha} \quad (4-12)$$

$$d_3 = d_0 - 2a_p \quad (4-13)$$

$$\overline{EC} = \overline{EP} = \frac{d_3}{2 \sin \alpha} = \frac{d_0 - 2a_p}{2 \sin \alpha} \quad (4-14)$$

弧长 $\widehat{MN}$:

$$\widehat{MN} = \pi \cdot d_0 \quad (4-15)$$

以 $\overline{EN}$ 为半径的圆周长记为 C_1 , 得:

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot \overline{EN} = \frac{\pi \cdot d_0}{\sin \alpha} \quad (4-16)$$

以 $\overline{EN}$ 为半径的圆面积记为 S_1 , 可知:

$$S_1 = \pi \cdot (\overline{EN})^2 = \frac{\pi \cdot (d_0)^2}{4 \cdot \sin^2 \alpha} \quad (4-17)$$

以 $\overline{EP}$ 为半径的圆面积记为 S_2 , 即:

$$S_2 = \pi \cdot (\overline{EP})^2 = \frac{\pi \cdot (d_0 - 2 \cdot a_p)^2}{4 \cdot \sin^2 \alpha} \quad (4-18)$$

分别以 $\overline{EN}$ 和 $\overline{EP}$ 为半径形成的圆环面积记为 S_3 , 可得:

$$S_3 = S_1 - S_2 = \frac{\pi \cdot (d_0 a_p - a_p^2)}{\sin^2 \alpha} \quad (4-19)$$

参与切削的切削部分面积也就是图(2)中阴影部分面积记为 S , 由 $\frac{\widehat{MN}}{C_1} = \frac{\theta}{360^\circ} = \frac{S}{S_3}$

比例关系得:

$$S = \frac{S_3 \cdot \widehat{MN}}{C_1} = \frac{\pi \cdot (d_0 \cdot a_p - a_p^2)}{\sin \alpha} \quad (4-20)$$

由式(4-11)可得参与切削的切削部分受到的接触应力 σ , 如下:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{(d_0 - 20 \cdot \tan \alpha) \cdot K_s \cdot f \cdot \sin \alpha}{\mu \cdot r_g \cdot (d_0 - a_p)} \quad (4-21)$$

由式(4-10)和式(4-21)得:

$$\sigma = \frac{(d_0 - 20 \cdot \tan \alpha) \cdot K_s \cdot f \cdot \sin \alpha}{\mu \cdot r_g \cdot (d_0 - a_p)} > 196 = \sigma_{0.2} \quad (4-22)$$

对式(4-1)至式(4-9)及式(4-22)中含有的一些参数, 如: K_s 、 d_0 、 μ 、 r_g , 这都是已知数据, 工件材料 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢单位面积切削力 K_s 查机械工艺师手册, 由不同材料单位面积上切削力推荐值表得: $K_s=2450\text{N/mm}^2$; 镀后电镀 CBN 珩具切削部分大径(或是校准部分外径) $d_0=6\text{mm}$; CBN 材料与不同材料的摩擦系数约为 0.1~0.3, 与 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢之间的摩擦系数 $\mu=0.2$; $r_g=0.15\text{mm}$ 。将这些参数代入到目标函数与约束条件中总结如下:

设计变量是: 主偏角 α 、进给量 f 、加工余量 a_p 。

目标函数是:

$$\min(F_a) = \frac{245000\pi(6 - 20 \tan \alpha)}{3} f a_p \sin \alpha \quad (4-23)$$

约束条件:

$$f \cdot \sin \alpha < 0.04 \quad (4-24)$$

$$0.3 \leq f \leq 1.5 \quad (4-25)$$

$$0.01 \leq a_p \leq 0.04 \quad (4-26)$$

$$10 \leq a_p \cdot \cot \alpha \leq 18 \quad (4-27)$$

$$\frac{245000(6-20 \tan \alpha)}{3(6-a_p)} f \sin \alpha > 196 \quad (4-28)$$

综上所述, 根据目标函数及与约束条件分类, 所建立优化设计数学模型属于单目标多变量非线性约束最小值的优化设计问题。

4.2 基于 MATLAB 的优化计算

利用 MATLAB 调用 fmincon 函数计算优化设计数学模型。

fmincon 函数的调用格式如下:

$$[x, fval, exitflag] = \text{fmincon}(' \text{objfun}', x0, [], [], [], lb, ub, ' \text{confun}', options)$$

x: 最优解; fval: 目标函数在最优解 x 下的函数值; exitflag: 目标函数的收敛性, exitflag=1 说明优化收敛到局部最优解, exitflag=4、5 说明采用的有效集算法也得到相应的结果, exitflag=0 说明优化失败; objfun: 目标函数; x0: 设计变量初值; lb: 设计变量的下界值, 多变量就是矩阵; ub: 设计变量的上界值, 多变量就是矩阵; confun: 非线性约束函数; options: 优化选项参数。

根据 MATLAB 编程语言规则将优化设计数学模型转化如下:

设计变量: 主偏角 x_1 、进给量 x_2 、加工余量 x_3 。

目标函数: 轴向力 y。

$$\min (y) = \frac{245000\pi(6-20 \tan(x_1))}{3} x_2 x_3 \sin(x_1) \quad (4-29)$$

约束条件:

$$x_2 \cdot \sin(x_1) < 0.04 \quad (4-30)$$

$$0.3 \leq x_2 \leq 1.5 \quad (4-31)$$

$$0.01 \leq x_3 \leq 0.04 \quad (4-32)$$

$$10 \leq x_3 \cdot \cot(x_1) \leq 18 \quad (4-33)$$

$$\frac{245000(6 - 20 \tan(x_1))}{3(6 - x_3)} x_2 \sin(x_1) > 196 \quad (4-34)$$

其中初始值取为: $[x_1, x_2, x_3] = [0, 0, 0]$; 下界 $lb = [\inf, 1.5, \inf]$; 上界 $ub = [0.0167, 0.3, 0.01]$;

具体 MATLAB 程序见附表一, 该程序运行结果如下:

$x = [x_1, x_2, x_3] = [0.0919, 1.500, 0.0160]$; $f_{av1} = 59.1127N$; $exitflag = 1$ 。

对其结果分析总结如下:

- 1) 设计变量最优解: 主偏角 $\alpha = 0.0919^\circ$; 进给量 $f = 1.5mm/r$; 加工余量 $a_p = 0.0160mm$ 。
- 2) 当设计变量取上述值时轴向力最小, 最小值 $F_a = 59.1127N$ 。
- 3) 优化是收敛的。

4.3 电镀 CBN 珩具结构及强度校核

4.3.1 电镀 CBN 珩具的结构

根据优化的主偏角数值 $\alpha = 0.0919^\circ \approx 5'$, 确定切削部分镀前和镀后的尺寸。

1) 大端尺寸

根据镀后电镀 CBN 珩具切削部分大端直径尺寸 $\Phi 6mm$ 和 2.5.2 节已计算 CBN 磨粒平均粒径 $d_g = 0.1267mm$ 及镀底镀层厚度 $h_d = 0.0127mm$, 由式 (2-2) 得大端基体尺寸为:

$$d_j \approx 5.72mm$$

因此, 大端镀前直径尺寸为 $\Phi 5.72h4 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.004 \end{smallmatrix} \right) mm$ 。

2) 小端尺寸

(1) 镀后: 依据切削部分主偏角 $\alpha = 5'$ 和长度 $L = 20mm$ 计算小端直径, 得:

$$d_w = 6 - 2 \cdot (20 \cdot \tan \alpha) \approx 5.94mm$$

(2) 镀前: 由式 (2-2) 计算小端基体尺寸, 得:

$$d_j = 5.66mm$$

因此, 镀后小端直径是 $\Phi 5.94mm$; 镀前小端直径基体尺寸为 $\Phi 5.66h4 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.004 \end{smallmatrix} \right) mm$ 。

由表 2-1 中电镀 CBN 珩具其他结构参数和上述切削部分参数绘制镀前电镀 CBN 珩

具基体结构图如图 4-3 所示, 镀后电镀 CBN 珐具结构图如图 4-4 所示。

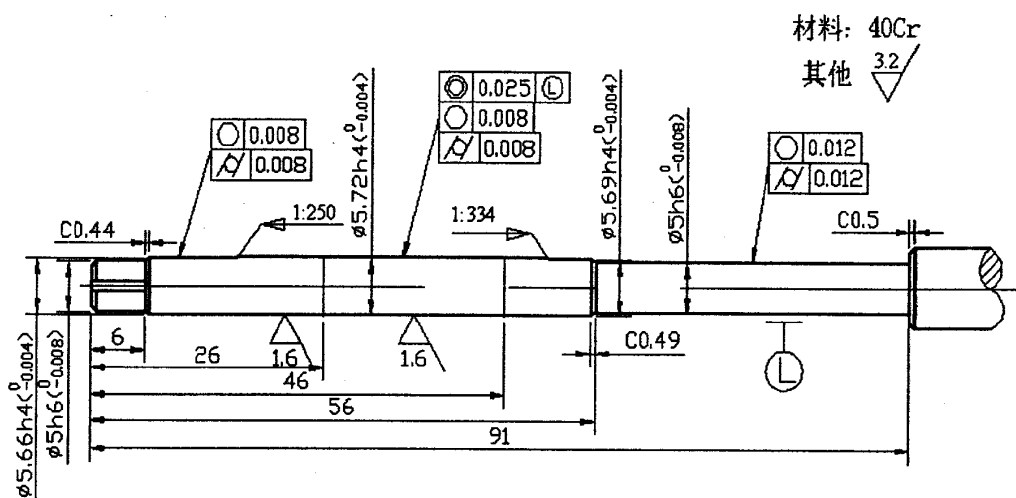


图 4-3 镀前电镀 CBN 珩具的结构图

Fig.4-3 The structure draw of electroplated CBN honing tools before electroplating

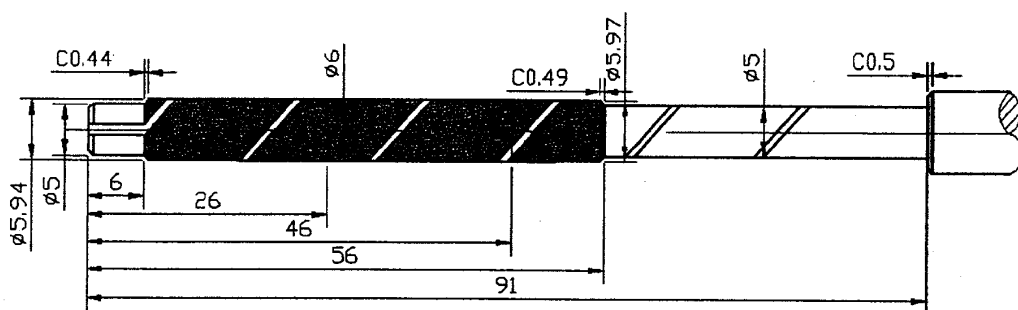


图 4-4 镀后电镀 CBN 珩具的结构图

Fig.4-4 The structure draw of electroplated CBN honing tools after electroplating

4.3.2 电镀 CBN 珩具的校核

本节圆整设计变量的优化数值和对结构的应力强度进行校核。

数据圆整: 主偏角 $\alpha=0.0919^\circ \approx 5'$; 进给量 $f=1.5\text{mm/r}$; 加工余量 $a_0=0.0160\text{mm}$ 。

将上述圆整数值代入式(4-23)计算轴向力:

$$F_s \approx 53.43 \text{ N}$$

电镀 CBN 珩具基体材料选用合金结构钢 40Cr, 查 40Cr 材料屈服强度 $\sigma_s=785\text{MPa}$, 强度极限 (抗拉极限) 为 $\sigma_b=980\text{MPa}$ 。

电镀 CBN 珩具整体在铰珩时的受轴向力和一对力偶, 具体示意图如 4-5 所示。电镀 CBN 珩具受轴向力 F_a 和力偶 m , 轴向力使珩具整体受压, 力偶使珩具受扭转, 下面根据圆整后数据确立切削部分结构, 分别对正应力和剪应力进行校核。

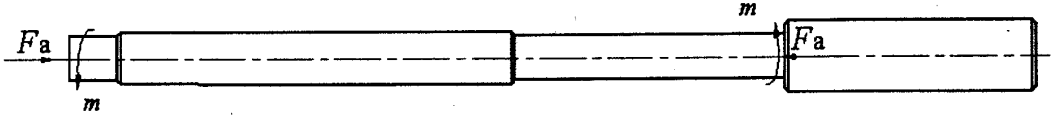


图 4-5 电镀 CBN 珩具整体受力分析示意图

Fig.4-5 The diagrammatic drawing of the force analysis of electroplated CBN honing tools

1) 正应力校核

根据切削部分大端直径 6mm 和小端直径 5.94mm 得, 大小端直径的中间值 $d=5.97\text{mm}$ 。依据轴向力与直径 d 计算珩具受到的正应力, 如:

$$\sigma = \frac{F_a}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \approx 1.910\text{MPa} \ll [\sigma_b]$$

故电镀 CBN 珩具基体材料 40Cr 满足优化设计变量下强度要求。

2) 剪应力校核

电镀 CBN 珩具类似于圆轴扭转, 横截面为圆形的直杆受扭转时主要受切应力 τ 。电镀珩具基体材料是 40Cr, 延伸率大于 9% 属于塑性材料, 许用剪切应力是 $[\tau]$:

$$[\tau] = (0.6 \sim 0.8)[\sigma_b] \quad (4-35)$$

由 40Cr 材料强度极限 (抗拉极限) 为 $\sigma_b=980\text{MPa}$ 得:

$$[\tau] = 588 \sim 784\text{MPa}$$

电镀 CBN 珩具受到扭矩由切向力产生, 对于单边刃受到的切向力 F_{ti} 如式 (3-5) 所示, 因此单边刃上受的切向力 F_{ti} 产生扭矩为:

$$T_i = F_{ti} \cdot \frac{d_0}{2} = K_s f a_p \frac{d_0}{2} = 7.35 f a_p$$

由于电镀 CBN 珩具上多边刃受的切向力方向相同, 都是与旋转方向相反的切线方向, 因此这些切向力形成的扭矩方向相同且数值相等, 因此根据式 (3-4) 可计算出电镀 CBN 珩具切削部分受到的总扭矩 T 如下:

$$T = T_i \cdot n = 153.86 f a_p (6 - 20 \tan \alpha) \quad (4-36)$$

电镀 CBN 珩具整体结构直径差值很小, 可以看成是直径为 $d_0=6\text{mm}$ 的圆柱, 抗扭截面系数 W_t :

$$W_t = \frac{\pi \cdot d_0^3}{16} = 4.239 \times 10^{-8} \text{m}^3$$

主偏角 $\alpha=5'$ ，加工余量 $a_p=0.016\text{mm}$ ，代入式 (4-36) 得：

$$T \approx 22.05\text{N.m}$$

剪应力为：

$$\tau = \frac{T}{W_t} = 520\text{MPa}$$

故，可知：

$$\tau < [\tau]$$

综上所述，主偏角、进给量、加工余量的最优解，从电镀 CBN 珩具结构和工艺参数角度来说，电镀 CBN 珩具的抗压应力和抗剪切强度都满足条件。

4.4 本章小结

本章主要是以主偏角、进给量和加工余量为设计参数，轴向力最小为目标函数，产生切屑等约束条件建立优化设计的数学模型，并利用 MATLAB 编程进行计算，求取最优值，得出当主偏角 $\alpha=5'$ ；进给量 $f=1.5\text{mm/r}$ ；加工余量 $a_p=0.0160\text{mm}$ 时，电镀珩具在满足加工要求的条件下轴向力取值最小，数值为 $F_a=59.1127\text{N}$ 。切削部分参数确定之后，针对导杆的加工要求，电镀 CBN 珩具的镀前和镀后结构尺寸也就确定，对主偏角、进给量和加工余量的最优解也是符合结构抗压应力和抗剪切强度要求的。

第五章 优化计算结果的讨论分析

5.1 不同进给量下，轴向力最小时主偏角和加工余量取值

采用控制变量法分析主偏角、进给量和加工余量对轴向力的影响。因主偏角和加工余量数值太小，故将进给量按取值范围 0.3~2mm/r 由小到大取值编写相应 MATLAB 程序，求出不同进给量数值下轴向力最小时对应的主偏角和加工余量数值、收敛性情况。将数据采集如表 5-1 所示。

表 5-1 不同进给量下，主偏角、加工余量取相应值时，各轴向力的最小值
Tab.5-1 When the main angle and machining allowance take corresponding value under different feed rate the axial force gets the minimum value

进给量 f (mm/r)	主偏角 α		加工余量(mm)	最小轴向力(N)	收敛性
	($^{\circ}$)	($'$)			
0.3	0.4647	28	0.0811	295.6263	收敛
0.4	0.3473	21	0.0606	221.6979	收敛
0.5	0.2773	17	0.0484	177.3504	收敛
0.6	0.2307	14	0.0403	147.7885	收敛
0.7	0.1976	12	0.0345	126.6740	收敛
0.8	0.1728	10	0.0302	110.8387	收敛
0.9	0.1535	9	0.0268	98.5227	收敛
1.0	0.1381	8	0.0241	88.6088	收敛
1.1	0.1255	8	0.0219	80.6088	收敛
1.2	0.1150	7	0.0201	73.8912	收敛
1.3	0.1061	6	0.0185	68.2072	收敛
1.4	0.0985	6	0.0172	63.3351	收敛
1.5	0.0919	6	0.016	63.3351	收敛
1.6	0.0862	5	0.0150	55.4181	收敛
1.7	0.0811	5	0.0142	52.1582	收敛
1.8	0.0766	5	0.0134	49.2605	收敛
1.9	0.0725	4	0.0127	46.6678	收敛
2.0	0.0689	4	0.0120	44.3344	收敛

对比数据可得结论如下：

- 1) 不同进给量下，优化主偏角和加工余量数值使轴向力最小，优化有收敛性；

2) 随进给量的增大, 主偏角、进给量减小, 轴向力取得最小值, 且数值减小。

5.2 主偏角、进给量和加工余量对轴向力影响的分析

采用控制变量法, 从表 5-1 中取三组数据: $f=0.7\text{mm/r}$ 、 $f=1.2\text{mm/r}$ 、 $f=1.5\text{mm/r}$; 利用 MATLAB 编程, 研究进给量取这三组数据时轴向力随主偏角和加工余量的数值分布。

1) 进给量 $f=0.7\text{mm/r}$ 、 $f=1.2\text{mm/r}$ 、 $f=1.5\text{mm/r}$ 时, 主偏角和加工余量对轴向力大小的影响, 程序见附表二 (1)、(2)、(3), 运行程序结果如图 5-1、图 5-2、图 5-3 所示。

从图 5-1、图 5-2、图 5-3 中, 可得结论如下:

(1) 在图 5-1、图 5-2、图 5-3 中, 当主偏角一定时, 随着加工余量取值的增大, 轴向力逐渐增大。

由式 (4-23) 将进给量与主偏角取为定值, 则得出:

$$F_a = \frac{245000\pi(6-20\tan\alpha)f\sin\alpha}{3} a_p = A \cdot a_p \quad (5-1)$$

其中 A 为:

$$A = \frac{245000\pi(6-20\tan\alpha)f\sin\alpha}{3} = \text{常数} \quad (5-2)$$

因此, 随着加工余量数值的增大, 轴向力增大。其原因是: 主偏角与进给量一定时, 若加工余量增大, 电镀 CBN 珩具切削部分参与切削的长度增大, 参与切削的面积增大, 参与的磨粒数量也会增多, 因此电镀 CBN 珩具受到的作用力也会增大, 又由于主偏角一定, 由受到的作用力和主偏角计算得出的轴向力就会增大。

(2) 在图 5-1、图 5-2、图 5-3 中, 当加工余量一定时, 随着主偏角的增大, 轴向力也是逐渐增大;

由式 (4-23) 将进给量与加工余量取为定值, 则得出:

$$F_a = \frac{245000\pi f a_p}{3} (6-20\tan\alpha)\sin\alpha = B \cdot (6-20\tan\alpha)\sin\alpha \quad (5-3)$$

其中 B 为:

$$B = \frac{245000\pi f a_p}{3} = \text{常数} \quad (5-4)$$

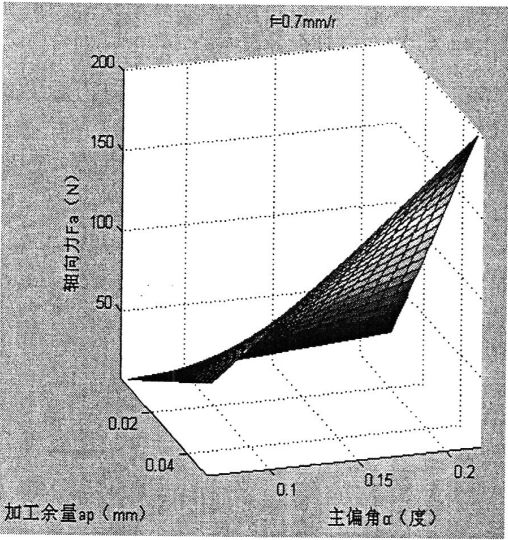


图 5-1 进给量 $f=0.7\text{mm/r}$
Fig.5-1 Feed rate $f=0.7\text{mm/r}$

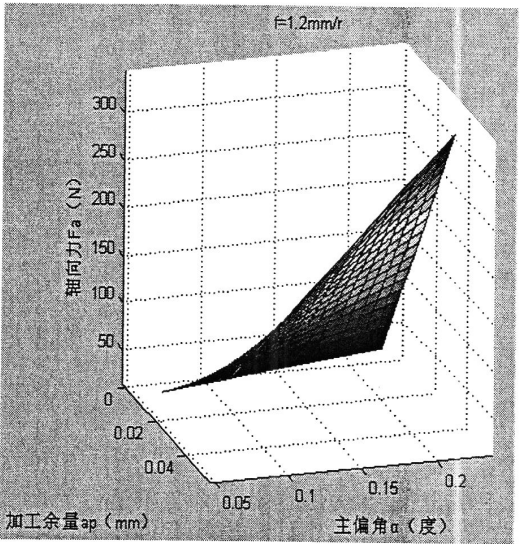


图 5-2 进给量 $f=1.2\text{mm/r}$
Fig.5-2 Feed rate $f=1.2\text{mm/r}$

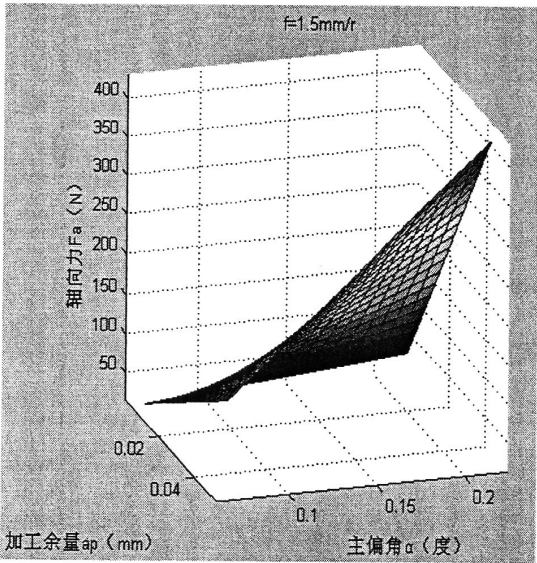


图 5-3 进给量 $f=1.5\text{mm/r}$
Fig.5-3 Feed rate $f=1.5\text{mm/r}$

对式 (5-1) 利用 MATLAB 编程分析轴向力与主偏角的关系, 程序如附表二 (4), 变化关系图 5-4 所示, 由图可知: 主偏角数值增大, 轴向力增大。其原因是: 当进给量和加工余量一定时, 若主偏角增大, 电镀 CBN 珩具切削部分参与切削的长度减少, 但由于加工余量与进给量一定, 由式 (4-11) 可知受到正压力基本不变, 但主偏角增大, 正弦值增大, 因此轴向力就增大。

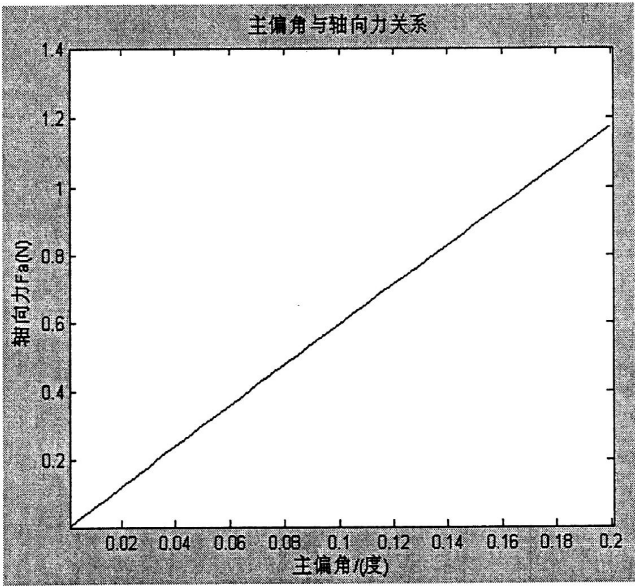


图 5-4 当进给量与加工余量一定时，主偏角与轴向力的关系

Fig.5-4 The relation between the main angle and axial force when the values of feed rate and mechanical allowance were set

(3) 从图 5-1、图 5-2、图 5-3 整体分析：虽进给量取值不同，但当进给量为定值时，主偏角与加工余量的增大使轴向力数值增大，其分布图外形相同，有些类似于“马鞍形”。

上述 (1) (2) 分析，当进给量一定时，若主偏角为定值，轴向力随加工余量的增大而增大；若加工余量一定时，轴向力随主偏角的增大而增大；当进给量一定时，轴向力随主偏角和加工余量这两个量的变化，却类似马鞍形，主要原因是：当加工余量与进给量一定时，主偏角的增大使轴向力增大，但根据主偏角的数值是 $0 \sim 0.2^\circ$ ，其正弦值范围 $0 \sim 0.0034$ ；当主偏角与进给量一定时，加工余量的增大使轴向力增大，加工余量的范围 $0.01 \sim 0.04\text{mm}$ ；根据式 (5-1)、式 (5-3) 可得：当进给量一定时，轴向力随主偏角增大的幅度比随加工余量增大的幅度要小，增加幅度不同导致出现的图形类似马鞍形。

2) 对式 (4-22) 中进给量分别取 $f=0.7\text{mm/r}$ 、 $f=1.2\text{mm/r}$ 、 $f=1.5\text{mm/r}$ 时，轴向力随主偏角和加工余量变化的数值分布情况，程序如附表二 (5)，结果如图 5-5 所示：

由图 5-5 得出结论如下：

(1) 从总体来看，随着进给量、加工余量、主偏角的增大，轴向力数值逐渐增大；

上述已分析：当进给量一定时，随主偏角和加工余量的增大，轴向力逐渐增大。下面分析进给量的变化对轴向力的影响情况。

由式(4-23)可得:

$$F_a = \frac{245000\pi(6-20\tan\alpha)a_p \sin\alpha}{3} f \quad (5-4)$$

式中 C :

$$C = \frac{245000\pi(6-20\tan\alpha)a_p \sin\alpha}{3} \quad (5-5)$$

因此可得:

$$F_a = C \cdot f \quad (5-6)$$

由此可知: 因为 C 增大使轴向力增大, 所以可得: 进给量增大, 轴向力是增大的。其原因是: 当主偏角和加工余量不变时, 进给量增大, 切削层面积增大, 单位时间内, 电镀 CBN 珩具进给距离增大, 珩具基体上磨粒承受的切削量增大, 受到的切削力增大, 因此轴向力也就随着增大。

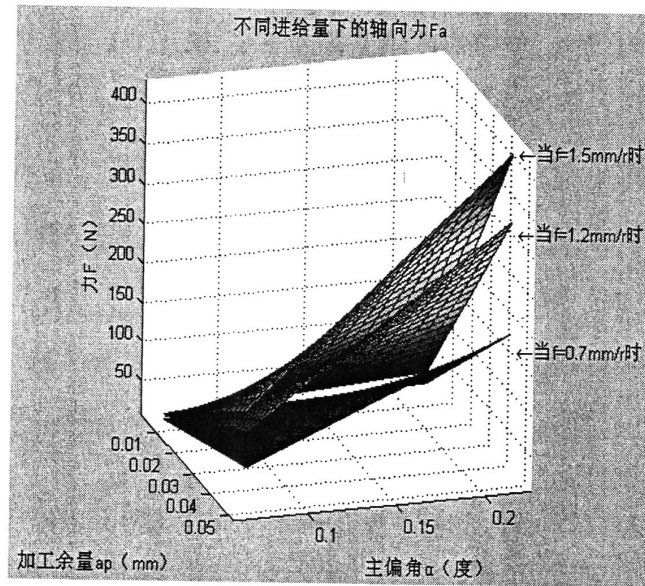


图 5-5 当不同进给量时, 轴向力 F_a 的变化

Fig.5-5 The change of axial force F_a when the value of feed rate were different

(2) 当进给量 $f=0.7\text{mm/r}$ 时, 轴向力的取值范围是: $F_a=0\sim 200\text{N}$;

当进给量 $f=1.2\text{mm/r}$ 时, 轴向力的取值范围是: $F_a=0\sim 350\text{N}$;

当进给量 $f=1.5\text{mm/r}$ 时, 轴向力的取值范围是: $F_a=0\sim 400\text{N}$;

综上所述, 随着主偏角、进给量和加工余量的数值增大, 轴向力是增大的。

5.3 主偏角、进给量和加工余量对接触应力影响的分析

在约束条件中, 式 (4-28) 表明工件受到的接触应力必须大于材料屈服强度, 是主要约束条件, 决定了主偏角、进给量和加工余量的取值范围。采用控制变量法研究主偏角、进给量和加工余量在满足约束条件下的可取范围。仍取 $f=0.7\text{mm/r}$ 、 $f=1.2\text{mm/r}$ 、 $f=1.5\text{mm/r}$ 三组数据, 利用 MATLAB 编程得到接触应力随主偏角和加工余量变化的数值分布情况。

由式 (4-28) 得:

$$\sigma = \frac{245000(6 - 20 \tan \alpha)}{3(6 - a_p)} f \sin \alpha \quad (5-7)$$

$$\sigma_{0.2} = 196 \quad (5-8)$$

由式 (5-7) 得: 主偏角 α 、进给量 f 、加工余量 a_p 与电镀 CBN 珩具切削部分受到的接触应力 σ 之间的关系。式 (5-8) 表示奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 材料的屈服强度。

1) 对式 (5-7)、式 (5-8), 取进给量 $f=0.7\text{mm/r}$ 、 $f=1.2\text{mm/r}$ 、 $f=1.5\text{mm/r}$ 时, 分析主偏角和加工余量变化对接触应力数值的影响, 且接触应力要大于屈服应力对主偏角和加工余量可取范围的影响, 程序见附表三 (1)、(2)、(3), 结果如图 5-6、图 5-7、图 5-8 所示。

由图 5-6、图 5-7、图 5-8, 可得出结论如下:

(1) 在图 5-6、图 5-7、图 5-8 中, 当加工余量一定时, 随着主偏角的增大, 电镀 CBN 珩具受到的接触应力逐渐增大;

由式 (5-7) 得:

$$\sigma = \frac{245000f}{3(6 - a_p)} (6 - 20 \tan \alpha) \sin \alpha = A \cdot (6 - 20 \tan \alpha) \sin \alpha \quad (5-9)$$

其中 A 为:

$$A = \frac{245000f}{3(6 - a_p)} = \text{常数} \quad (5-10)$$

对于式 (5-9) 与式 (5-3) 数学结构相同, 故所得关系曲线相同, 因此可得出: 当进给量和加工余量一定时, 随着主偏角的增大, 接触应力数值递增。其原因是: 当进给量和加工余量一定值时, 若主偏角增大, 根据式 (4-11)、(4-20) 可知, 电镀 CBN 珩具

受到的总正压力减小，切削部分参与的切削面积也减少，但由于切削部分减少的幅度小于总正压力减少的幅度，因此接触应力仍是增大的。

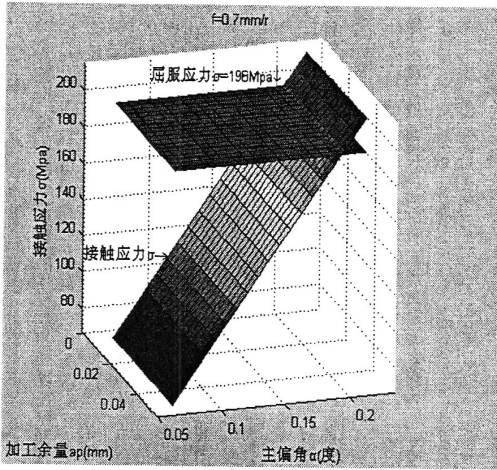


图 5-6 进给量 $f=0.7\text{mm/r}$
Fig.5-6 Feed rate $f=0.7\text{mm/r}$

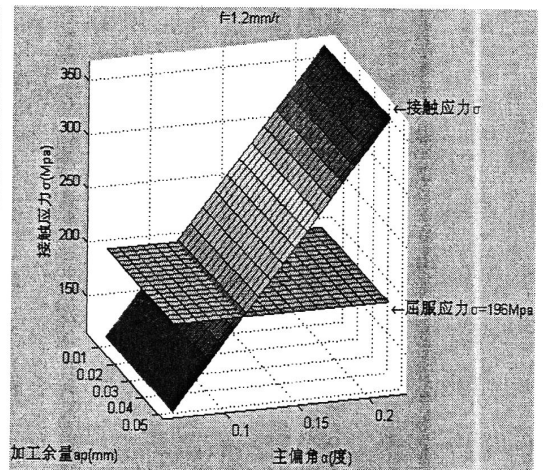


图 5-7 进给量 $f=1.2\text{mm/r}$
Fig.5-7 Feed rate $f=1.2\text{mm/r}$

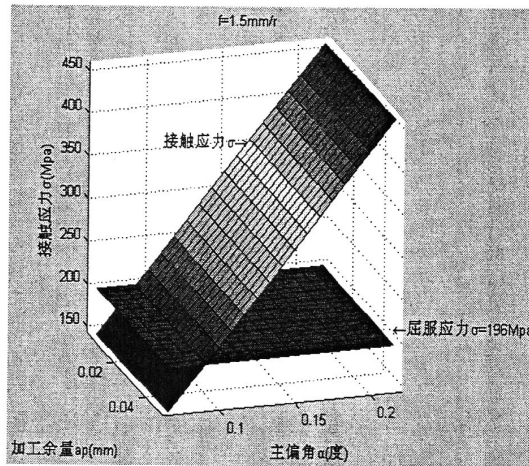


图 5-8 进给量 $f=1.5\text{mm/r}$
Fig.5-8 Feed rate $f=1.5\text{mm/r}$

(2) 在图 5-6、图 5-7、图 5-8 中，当主偏角一定时，随着加工余量的增大，电镀 CBN 珩具受到的接触应力逐渐增大；

由式 (5-7) 得：

$$\sigma = \frac{245000 f (6 - 20 \tan \alpha) \sin \alpha}{3} \cdot \frac{1}{6 - a_p} = \frac{B}{6 - a_p} \quad (5-11)$$

其中 B ,

$$B = \frac{245000 f (6 - 20 \tan \alpha) \sin \alpha}{3} = \text{常数} \quad (5-12)$$

可得出：当主偏角一定时，随着加工余量的增大，电镀 CBN 珩具受到的接触应力

逐渐递增。其原因是：当进给量和主偏角一定时，随着加工余量的增大，参与切削的切削部分长度增加，电镀 CBN 珩具受到的总作用力和切削面积增加，总作用力的增加幅度大于切削面积的增加幅度，因此接触应力数值是逐渐递增的。

(3) 在图 5-6、图 5-7、图 5-8 中，随着主偏角和加工余量的增大，电镀 CBN 珩具受到的接触应力逐渐增大，基本形状类似于一个平面。

基于 (1) (2) 分析，进给量一定时，随主偏角和加工余量的增大，接触应力逐渐递增。但由于进给量一定时，接触应力随主偏角的变化幅度比随加工余量的变化幅度要大很多，且接触应力随着加工余量变化幅度特别小，所以在图中看似一个平面。

(4) 在图 5-6、图 5-7、图 5-8 中，电镀 CBN 珩具受到的接触应力数值分布图与材料屈服应力图 $\sigma=196\text{MPa}$ 相交，接触应力值大于 196MPa 时对应的主偏角和加工余量数值是可取的。

2) 对式 (4-28)，进给量分别取 $f=0.7\text{mm/r}$ 、 $f=1.2\text{mm/r}$ 、 $f=1.5\text{mm/r}$ 时，对三组接触应力分布图进行比较，程序如附表三 (4)，结果图如 5-9 所示：

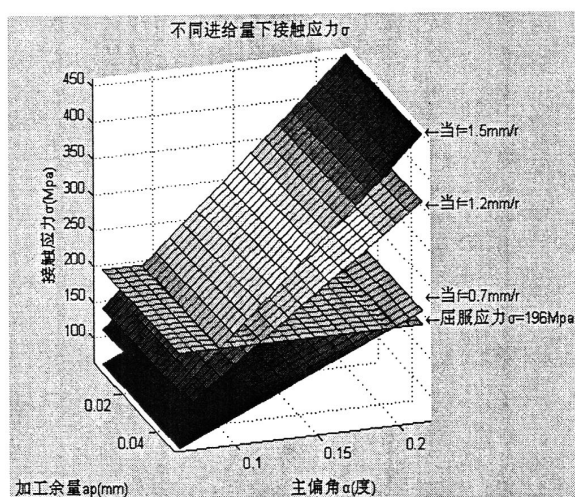


图 5-9 不同进给量下，接触应力数值的变化

Fig.5-9 The change of contact stress when the value of feed rate were different

由图 5-9 可得结论如下：

(1) 随着进给量的增大，在相同的主偏角和加工余量数值时，电镀 CBN 珩具受到的接触应力值增大；

由式 (5-7) 可得：

$$\sigma = \frac{245000(6 - 20 \tan \alpha) \sin \alpha}{3(6 - a_p)} f = C \cdot (6 - 20 \tan \alpha) \sin \alpha \quad (5-13)$$

其中 C 为:

$$C = \frac{245000(6 - 20 \tan \alpha) \sin \alpha}{3(6 - a_p)} \quad (5-14)$$

同式 (5-3) 可知, 当主偏角和加工余量一定时, 进给量与接触应力成递增关系。其原因是: 若主偏角和加工余量一定时, 进给量增大, 参与切削的磨粒单位时间内前进距离增大, 磨粒承担的切削任务加重, 使每颗磨粒所承受的切削力增大, 但参与切削切削部分面积并未改变, 因此电镀 CBN 珩具单位面积上的接触应力值增加。

(2) 随着进给量的增大, 电镀 CBN 珩具受到的接触应力值大于 196MPa 的分布图所对应的主偏角和加工余量取值范围扩大; 其中进给量增大, 对加工余量对应的取值范围基本没有影响, 主要是对主偏角取值范围的影响很大。

综上所述, 当进给量一定时, 随主偏角和加工余量的数值增大, 接触应力值增大, 但由于接触应力随着主偏角的变化幅度比随着加工余量的变化幅度要大很多, 因此接触应力值的分布看似没有随着加工余量的增大而变化, 分布看似是一个平面; 进给量的增大, 接触应力值增大使大于 196MPa 对应的加工余量和主偏角数值可取范围扩大, 但对加工余量的取值范围影响很小, 对主偏角的取值范围影响相对较大。

5.4 设计变量对轴向力和接触应力综合影响的分析

由 5.3 节和 5.4 节分析得: 设计变量主偏角 α 、进给量 f 、加工余量 a_p 数值组合使各轴向力最小, 但必须满足电镀 CBN 珩具受到的接触应力大于工件材料 1Cr18Ni9Ti 的屈服强度, 这使在进给量一定数值时主偏角和加工余量的可取值范围有变化。本节分析主偏角、进给量、加工余量数值在满足约束条件式 (4-34) 情况下对轴向力的影响。

图 5-1~5-4 是当进给量一定时, 主偏角和加工余量变化对轴向力数值分布的影响; 图 5-6~5-8 是当进给量一定时, 主偏角和加工余量变化对接触应力数值分布的影响, 还有接触应力大于 196MPa 时对应主偏角和加工余量取值范围的变化; 但在满足约束条件的情况下使目标函数最小, 需要将相同进给量数值的约束条件分布图和目标函数轴向力分布图结合在一起, 分析进给量一定时, 满足约束条件下主偏角和加工余量可取的范围。纵观这六张图, 轴向力和接触应力数值相当, 且加工余量和主偏角的取值也相同, 因此将其对应相同进给量数值的图集合在一起进行研究。

根据上面的设想, 将进给量一定时, 随着主偏角和加工余量数值变化电镀 CBN 珩具切削部分所受轴向力数值分布图、接触应力数值分布图和工件材料 1Cr18Ni9Ti 的屈服强度集中一个图中, 分析研究约束条件下目标函数的取值情况和目标函数中主偏角和加工余量这两个自变量的取值范围, 其编写 MATLAB 程序如附表四 (1)、(2)、(3), 程序运行结果如图 5-10、图 5-11、图 5-12 所示。

由图 5-10、图 5-11、图 5-12 可得结论如下:

1) 轴向力分布类似马鞍形, 接触应力分布类似一平面, 屈服应力 $\sigma_{0.2}=196\text{MPa}$ 是一个平面, 这三个图形组合在一起, 可确定电镀 CBN 珩具切削部分受轴向力最小值情况、以及满足约束条件情况下, 当进给量一定时主偏角和加工余量取值范围的变化。

2) 轴向力分布图是进给量一定时, 主偏角和加工余量取不同的数值时对应轴向力数值的组合分布; 接触应力分布图是进给量一定时, 主偏角和加工余量取不同的数值时对应接触应力数值的组合分布; 屈服应力分布图与主偏角、进给量、加工余量的数值没有关系, 是屈服应力值为 196MPa 的平面。从图中看到接触应力分布图与屈服应力平面相交一条线, 这条线是指: 对应主偏角和加工余量取此值时, 电镀 CBN 珩具切削部分受接触应力是 196MPa ; 接触应力分布图高于屈服应力平面的部分所对应的主偏角和加工余量数值是可取的数值范围, 在此范围内, 再看轴向力的分布图, 轴向力在可取范围内哪一点最小, 则该点意义是: 该点对应的主偏角和加工余量数值是在满足约束条件的情况下使得轴向力最小, 也就是在这个进给量下, 主偏角和加工余量取值的最优点。

3) 比较这三幅图, 可以发现:

(1) 随着进给量数值的增大, 接触应力数值增大, 大于屈服强度 196MPa 满足条件的主偏角和加工余量取值范围扩大, 加工余量的范围变化很小, 尤其是主偏角的取值范围逐渐扩大, 图 5-10 中主偏角可取范围大致是: 大于 $0.2^\circ \approx 12'$; 图 5-11 中主偏角可取范围大致是: 大于 $0.12^\circ \approx 7'$; 图 5-12 中主偏角可取范围大致是: 大于 $0.09^\circ \approx 5'$;

(2) 基于 (1) 可知主偏角范围扩大, 可取的数值减小, 轴向力数值分布没有变化, 因此随着主偏角的可取最小数值减小, 轴向力最小值也减小, 图 5-10 中进给量 $f=0.7\text{mm/r}$, 轴向力最小值是 $\min F_a=126\text{N}$; 图 5-11 中进给量 $f=1.2\text{mm/r}$, 轴向力最小值是 $\min F_a=74\text{N}$; 图 5-12 中进给量 $f=1.5\text{mm/r}$, 轴向力最小值是 $\min F_a=63\text{N}$;

综上所述, 随进给量增大, 主偏角数值可取的范围扩大, 可取更小值, 这使轴向力最小值减小。由此可见, 进给量增加可缩短生产时间, 提高生产效率; 轴向力减小可使

电镀 CBN 珩具受力变形减小；这样在满足约束条件和加工余量的要求下，进给量可增大，主偏角数值可减小，这样既能保证加工精度和表面质量，还可提高生产效率。

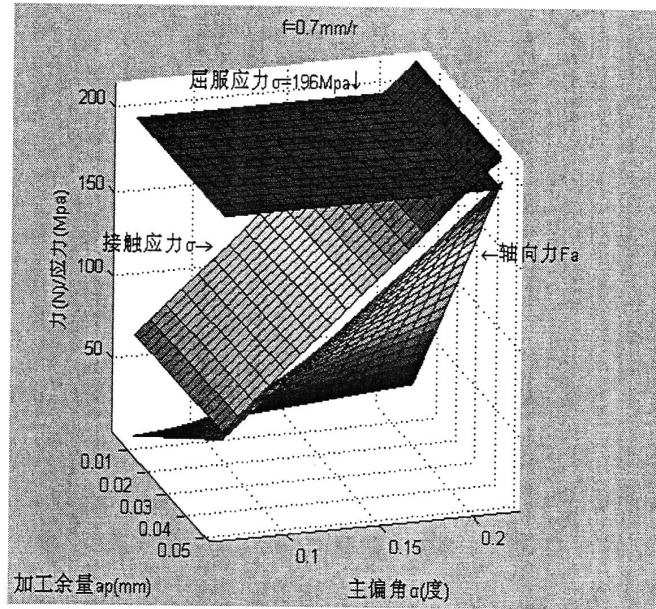


图 5-10 进给量 $f=0.7\text{mm/r}$
Fig.5-10 Feed rate $f=0.7\text{mm/r}$

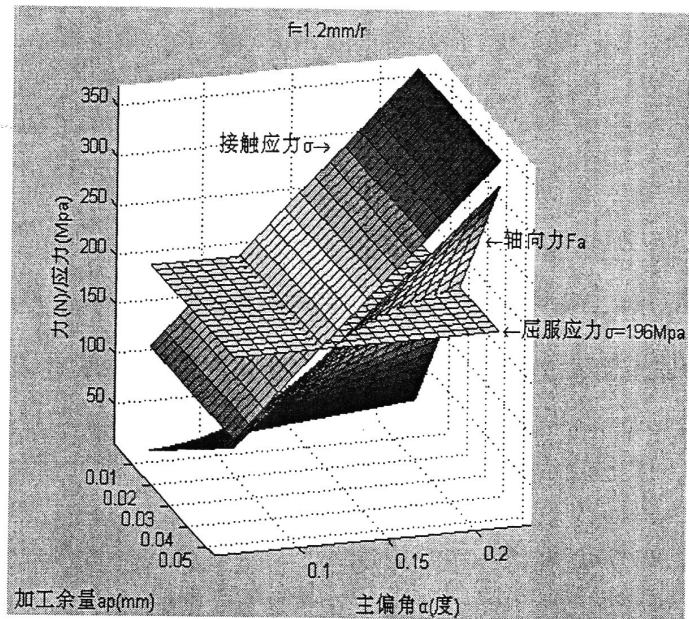


图 5-11 进给量 $f=1.2\text{mm/r}$
Fig.5-11 Feed rate $f=1.2\text{mm/r}$

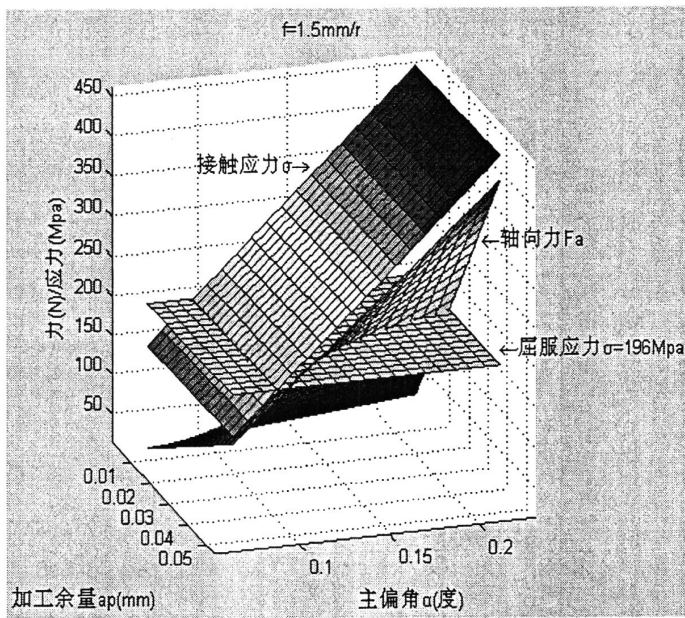


图 5-12 进给量 $f=1.5\text{mm/r}$
Fig.5-12 Feed rate $f=1.5\text{mm/r}$

5.5 本章小结

- 1) 利用 MATLAB 采用控制变量法，使进给量依次递增取值，求取满足轴向力最小的主偏角和加工余量，采集数据制成表；
- 2) 对进给量取三组数据： $f=0.7\text{mm/r}$ 、 $f=1.2\text{mm/r}$ 、 $f=1.5\text{mm/r}$ ，利用 MATLAB 编程研究目标函数轴向力随主偏角和加工余量变化的数值分布情况，对比图形分布；
- 3) 对进给量取三组数据： $f=0.7\text{mm/r}$ 、 $f=1.2\text{mm/r}$ 、 $f=1.5\text{mm/r}$ ，利用 MATLAB 编程研究约束条件接触应力随主偏角和加工余量变化的数值分布情况，对比图形分布；
- 4) 由 2) 3) 分析，轴向力和接触应力随主偏角、进给量、加工余量变化的数值分布集中于一个图，分析在满足接触应力数值大于 196MPa 条件下轴向力数值分布形式；对比不同进给量下，轴向力数值和主偏角、加工余量的取值范围。

第六章 总结与展望

6.1 总结

本文分析了电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理和受力情况,提出珩具因受轴向力过大而变形是降低内孔加工精度和表面质量的原因之一,研究内容总结如下:

1) 分析了电镀 CBN 珩具精加工小深孔的铰珩机理,得出结论:磨粒切削工件内孔壁经过了滑擦、耕犁和切屑形成三个阶段。磨粒随进给与工件相互接触并挤压产生干涉点,由于起始作用力小磨粒仅是滑擦内表面,力逐渐增大使工件受到的接触应力大于工件材料屈服强度时,磨粒在内孔面耕犁产生切屑,切掉了干涉点后内孔壁留下微小沟槽,珩具进给与旋转使轴向和径向磨粒与内孔壁又产生新干涉点并切除,如此反复。

2) 对电镀 CBN 珩具铰珩时的受力进行了分析,得出结论:珩具受一对力偶和轴向力,轴向力使其受力变形是影响内孔加工精度和表面粗糙度的原因。珩具受切向力、法向力和轴向力,切向力是主切削力,由珩具旋转与内孔壁摩擦产生,因刀柄固定形成一对力偶;法向力是内孔壁对珩具的反作用力,最终抵消;轴向力由切削部分主偏角产生;根据产生切屑的条件轴向力必须满足数值要求,但轴向力又使珩具受力变形进而影响内孔加工质量,故珩具所受轴向力数值优化可提高内孔加工精度和表面质量。

3) 推导了电镀 CBN 珩具铰珩时所受轴向力计算公式,得出结论:主偏角、进给量和加工余量是轴向力的主要参数。根据内镀法制备电镀 CBN 珩具具有良好的性能和一般深孔加工刀具结构、受力和主切削力的计算理论,合理简化了 CBN 磨粒的形状为球形和磨粒整齐的排列方式,将电镀 CBN 珩具简化为多边刃深孔加工刀具,推导出珩具所受轴向力的计算公式,其中参数是主偏角、进给量和加工余量。

4) 分析了主偏角、进给量和加工余量对轴向力的影响,得出结论:轴向力随这三个量的增大而增大。当进给量和加工余量一定时,切削部分长度取定值,主偏角决定切削层形状,进而决定轴向力的大小;并推导计算轴向力对主偏角的一阶偏导数大于零,得到轴向力随主偏角增大递增。当主偏角和加工余量一定时,进给量增大,单位时间珩

具进给的距离增大,磨粒切削任务加重,受到轴向力就增大。当主偏角和进给量一定时,加工余量增大,对上道工序的要求降低且易修整残留缺陷,但珩具承担的切削任务增大,受轴向力数值增大。

5) 建立以主偏角、进给量、加工余量为设计变量,轴向力最小为目标函数,珩具所受接触应力大于工件材料屈服强度等为约束条件的优化设计数学模型;利用 MATLAB 求解设计变量最优值,使轴向力数值最小;采用控制变量法,分析进给量取三种数值 0.7mm/r、1.2mm/r、1.5mm/r 时,轴向力的数值分布类似“马鞍形”,接触应力分布类似一个“平面”且随着进给量增大满足接触应力大于 196MPa 所对应的主偏角和加工余量的取值范围扩大,由此使得轴向力的最小值数值减小。故主偏角减小使轴向力减小,珩具受力变形减小;进给量的提高使得满足条件下轴向力最小值减小,且生产效率提高;加工余量数值小影响不大,因此为了减少轴向力,在满足加工余量的条件下,应尽可能减小主偏角增大进给量。

6) 确定了适合工件导杆小深孔加工要求的电镀 CBN 珩具结构尺寸。分析导杆小深孔精加工要求,根据电镀珩具结构尺寸标准、基体尺寸计算公式和主偏角优化数值,选择磨料 CBN、磨粒粒度 120 目,计算电镀前后的珩具各结构尺寸,珩具基体材料选为 40Cr,并校核珩具正应力和剪应力满足强度要求。

6.2 展望

1) 本文对电镀 CBN 珩具简化为多边刃深孔加工刀具是建立在内镀法制备的珩具具有良好等高性、均匀性和微刃性基础上,是一种理想状态,因此应该对电镀 CBN 珩具实际制备质量与理想的误差进行分析,提高制备技术;

2) 本文对电镀 CBN 珩具受力的分析与计算都将面载荷简化为集中力,可进一步分析此种简化的误差,并尝试采用积分方式更为精确的计算受力数值;

3) 小深孔精加工过程中会产生大量的热使工件材料屈服强度数值降低,本文未考虑这个因素,取屈服强度 196MPa 是作为产生切屑的条件,可尝试对电镀珩具铰珩过程利用 ANSYS/LS-DYNA 或 ABAQUS 等有限元分析软件进行热力耦合分析与仿真;

4) 对利用 MATLAB 计算优化设计计算模型获得满足约束条件下轴向力最小对应的设计变量最优解,这仅是理论上的分析结果,可尝试对优化结果进行实验验证。

参考文献

- [1] 杨棹, 陈国香. 机械与模具制造工艺学[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 111.
- [2] 王峻. 现代深孔加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 2, 5, 291.
- [3] 刘吉成. 金刚石铰刀在工程机械制造中的应用[J]. 工程机械, 1994, (8): 32.
- [4] 孔祥中. 小直径深孔精加工电镀珩具制备及应用技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [5] 郭丽静. 孔加工技术综述[J]. 机械工程与自动化, 2011: (165): 212.
- [6] 杨叔子. 机械加工工艺师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 963.
- [7] 叶树林. 小孔的特种加工技术综述[J]. 机械工艺师, 1997, (6): 48-50.
- [8] 宋书善. 数控加工工艺[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2008, (3): 312.
- [9] 范植坚, 李新忠, 王天诚等. 电解加工与复合电解加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 1, 2.
- [10] 乔允涛. 小孔特种加工理论及方法的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2003.
- [11] 于俊一, 邹青. 机械制造技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 86.
- [12] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 342.
- [13] Enrique Martinez, Alex Grossman, Walter Holder. Reach for Reamers[J]. Cutting Tool Engineering, 1990, (9): 24-28.
- [14] 徐玉山. 立方氮化硼铰刀的研制[J]. 西安矿业学院学报, 1987, (2): 73.
- [15] 季关德, 殷文法. 应用电镀金刚石精加工气缸内孔[J]. 航空工艺技术, 1985, (3): 10.
- [16] 叶萌森. 液压件阀孔的精密加工[J]. 机械工艺师, 1986: 9.
- [17] 左玉营, 魏向东. 电镀金刚石铰刀[J]. 机械工程师, 1995, (1): 31.
- [18] Bouchard, Donald W. IMPROVING PRODUCTIVITY, QUALITY WITH SBF[J]. Cutting Tool Engineering, 1986, 38(3): 81-84.
- [19] 胡凤兰, 董丽君, 高为国. 用电镀珩具(铰刀)进行深孔精细加工[J]. 工艺与检测, 2007, (10): 106.
- [20] 韦昌. 新型刀具——金刚石或立方氮化硼铰刀[J]. 机械制造, 1986, (5): 24.

- [21] 陈明, 傅建军. 精密孔加工的金刚石刀具技术研究[J]. 机械制造与研究, 2010, (6): 73.
- [22] Chen Ming, Yu Jie, Wang Chunhai. A research on eddy flowage precision manufacturing technology of inside-holding diamond reamers[J]. IET Conference Publications, 2006, (524): 782-784.
- [23] 常建新. 用电镀金刚石铰刀加工精密孔[J]. 机械工艺师, 1984, (7): 37.
- [24] 孙挺一. 用于阀孔精加工的电镀金刚石铰刀的使用工艺[J]. 磨杆磨具与磨削, 1993, 5(77): 25.
- [25] 杨裕成, 沈默生. 精密金刚石铰刀[J]. 工具技术, 1985, (2): 1-3.
- [26] 张同波. CBN 铰刀铰削淬火钢套内孔[J]. 制造技术与机床, 1997, (9): 35.
- [27] 朱文正. $\Phi 6$ 深孔电镀金刚石铰刀[J]. 机械工艺师, 1982, (9): 25.
- [28] 叶伟昌. 金刚石铰刀加工精密孔[J]. 机械科学与技术, 1989, (6): 2-8.
- [29] 陈启松. 金刚石铰刀的设计与应用[J]. 机床工程师, 1987, (4): 9-10.
- [30] 朱黎, 钱晓红. 整体式立方氮化硼铰刀的研究[J]. 航空工艺技术, 1990, (4): 32-33.
- [31] 朱黎, 钱晓红. 立方氮化硼铰刀铰削渗碳淬火钢的试验研究[J]. 机械制造, 1991, (12): 30-32.
- [32] 陈明, 傅建军. 精密孔加工之金刚石铰刀的研制[J]. 机械制造与研究, 2001, (4): 118.
- [33] Lian Jie. Application of single-pass hole machining machine[J]. MANUFACTURE TECHNOLOGY & MACHINE TOOL, 2002, (6): 39-40.
- [34] 阎萍萍. 单涂层超硬磨料磨具工艺及应用基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 1996.
- [35] Zheng Guanghua . Wang Chunhai . Manufacturing process of inside-holding electroplating diamond reamer[J]. Progress of Machining Technology-Proceedings of the Seventh International Conference on Progress of Machining Technology, 2004: 154-157.
- [36] 刘京秋, 杨嵩. 内镀金刚石铰刀的制造工艺[J]. 工艺与检测, 2008, (7): 122.
- [37] 陈明. 金刚石铰刀的设计与使用工艺[J]. 航天工艺, 1997, (6): 50-53.
- [38] 陈明, 王春海. 内包容金刚石铰刀的研制与铰削工艺研究[J]. 机床与液压, 2006,

(2): 47.

- [39] Herbert, Stan. BETTER WAY TO TACKLE THAT PROBLEM BORE[J]. Industrial Diamond Review, 1980: 241-243.
- [40] (日) 庄司克雄著, 郭隐彪, 王振忠译. 磨削加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 20, 21.
- [41] Kolchmanov N.A. POTENTIALITY OF DIAMOND TOOLS FOR IMPROVING GRINDING PRACTICE[J]. Soviet journal of superhard materials, 1987, 9(6): 45-48.
- [42] 程伟, 叶伟昌. CBN 磨削技术的发展与应用[J]. 工具技术, 2000, 34: 104-106.
- [43] 叶伟昌. CBN 砂轮的进展[J]. 新技术新工艺, 2000, (11): 13-15.
- [44] Eiqemann R, Zwahlen S. Machining grey cast iron with PCBN-tipped reamers[J]. Industrial Diamond Review, 2001, 61(589): 105,107.
- [45] Kholmogortsev Yu. P. Optimizing the diamond reaming of precision holes[J]. Russian Engineering Research, 2009, 29(5): 375-382.
- [46] 贺金峰. 金刚石和立方氮化硼铰刀的设计和探讨[J]. 工具技术, 1992, 26(1): 10-13.
- [47] 陈波, 牟阳. 对发动机零部件及珩磨技术应用[J]. 中国新技术新产品, 2011, (17): 160.
- [48] 董丽君, 胡凤兰. 金刚石铰刀在液压零件高精度深孔加工中的应用[J]. 工具技术, 2006, 40(7): 58.
- [49] 王君明, 汤漾平, 宾鸿赞. 轴向进给周边轮廓通用磨削力模型[J]. 华中科技大学学报, 2010, 38(7): 8-11.
- [50] 陈明, 齐世恩, 刘华明. 内镀法金刚石铰刀的设计与制造[J]. 制造技术与机床, 1999, (11): 12-14.
- [51] 叶荫森. 金刚石铰刀设计及应用的几个技术问题[J]. 机械工艺师, 1986, (6): 89.
- [52] 李子有. 金刚石铰刀精加工液压件阀孔[J]. 金属加工, 2011, (10): 56.
- [53] 曾志新, 吕明. 机械制造技术基础[M]. 湖北: 武汉理工大学出版社, 2008: 27.
- [54] 郑广花, 张守学. 精密内镀铰刀金刚石复合镀层制备工艺[J]. 表面技术, 2005, 34(4): 48-50.
- [55] 王双喜, 刘雪敬, 耿彪等. 金属结合剂金刚石磨具的研究发展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2006, (4): 71-75.

- [56] 刘超峰, 刘书锋, 方少明. 国内外 PCBN 刀具新品[J]. 制造技术与机床, 2008, (6): 52-57.
- [57] 汪吉川. 磨粒可控排布砂轮磨削性能的一些研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [58] Badger J, Torrance A. A Comparison of Two Models to Predict the Grinding Force from Wheel Surface Topography[J]. Int. J. Mach. Tool. Manuf, 2000, 40(8): 1099-1120.
- [59] 王龙山, 李国发. 磨削过程模型的建立及其计算机仿真[J]. 中国机械工程, 2003, 13(1): 1-4.
- [60] Cooper W L, Lavine A S. Grinding Process Size Effect and Kinematics Numerical Analysis[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122(1): 59-69.
- [61] Gong Y D, Wang W S. The Simulation of Grinding Wheels and Ground Surface Roughness Based on Virtual Reality Technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 123-125.
- [62] Shaw M. New Developments in Grinding[C]//Fundamentals of Grinding. Proceeding of the International Grinding Conference. Pittsburgh P A, 1972: 223-248.
- [63] Tlnshoff H, Peters J, Inasaki I et al. Modeling and Simulation of Grinding Processes[J]. Annals of the CIRP, 1992, 42(2): 679-688.
- [64] 王君明, 汤漾平, 宾鸿赞等. 55 钢平面磨削中未变形磨屑厚度及单位磨削力的研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1176-1178.
- [65] Wang Yongguo, Chen Xiaoguang, Liu Gang. PCD reamer for machining cylinder head[J]. Application of Diamond and Related Materials, 2011, (175): 321-325.

致 谢

在我就读研究生这三年期间，每当脑海中浮现出父母、老师、同学、朋友所给予我支持、指导和帮助的画面时，内心深处对他们就会充满着真诚的敬重和感谢！在毕业论文完成之际，我已经抑制不住内心的澎湃，感慨颇多！

首先，衷心感谢我的导师李文斌教授！在研究生期间，李老师经常的严格要求我，尤其是从学习的态度和方法上面，使我获益甚多。对于搞学术，李老师说：“你首先得有认真的态度，再有合理有效的学习方法，这样学习才会卓有成效”，这话使我很受触动。对于论文撰写与修改，李老师特别注重写作格式的规范性和语言的准确性，尤其是仔细的反复修改我的论文，这种严谨的治学态度使我印象深刻，值得我学习。李老师学识渊博，当遇到问题时，只要询问，李老师都会不厌其烦的解答清楚。我觉得李老师对做事的认真仔细和严谨使我颇为收益，我会在以后的生活学习中保持并发扬。特此谢谢李老师对我的悉心指导和帮助！

其次，真诚的感谢梁国星老师。在我的学术研究过程中，梁老师不光是知识方面的指导，而且特别的平易近人，以自己做课题和撰写论文的经验，毫无保留的传授我，以诙谐的语言方式，热情的鼓励着我，对我论文的顺利撰写帮助很大，怀着诚挚的心情再次感谢梁老师的帮助！

同时也感谢同实验室的蓝善超、李高峰、茹君、李坤等同学。谢谢他们在学习和生活中给予的帮助，尤其是相互探讨和交流学术问题，对我的课题提出的宝贵意见。互相学习，共同进步的美好时光，会永远珍藏！

我还要感谢我的父母对我生活和学习方面的支持。父母默默的支持给了我温暖，在我失意的时候，他们经常会语重心长的鼓励我，支持我，使我没有后顾之忧，安心轻松的完成了研究生学业。从内心深处，我衷心的感谢他们！

最后，我要感谢在百忙之中抽出宝贵时间来参加毕业论文答辩的专家和教授们！真诚的感谢他们提出的宝贵意见！

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 李萍, 李文斌. 用于内圆磨的整体式电镀 CBN 砂轮结构设计与分析[J]. 机械工程与自动化, 2012. 2.

附表一

```

function y=objfun(x);
y=((100*pi)/3)*(6-20*tand(x(1)))*2450*x(2)*x(3)*sind(x(1));
function [c,ceq]=confun(x);
c=[x(2)*sind(x(1))-0.03;-x(2)+0.3;-x(2)+1.5;-x(3)*cotd(x(1))+10;x(3)*cotd(x(1))-18;
-x(3)+0.01;x(3)-0.04;-((6-20*tand(x(1)))*2450*x(2)*sind(x(1)))/(0.03*(6-x(3)))+196];
x0=[0,0,0];
options=optimset('largescale','off');
[x,fval,exitflag]=fmincon('objfun',x0,[],[],[],[],[0.0167,0.3,0.01],[inf,1.5,inf],'confun',options);

```

附表二

```

(1) x=0.005:0.0025:0.05;
y=0.0667:0.0083:0.2161;
[X,Y]=meshgrid(x,y);
Z=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*0.7.*X.*sind(Y);
surf(X,Y,Z);
view(-37.5+110,18);
xlabel('加工余量ap (mm) ');
ylabel('主偏角 α (度) ');
zlabel('轴向力Fa (N) ');
title('f=0.7mm/r');

(2) x=0.005:0.0025:0.05;
y=0.0667:0.0083:0.2161;
[X,Y]=meshgrid(x,y);
Z=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.2.*X.*sind(Y);
surf(X,Y,Z);
view(-37.5+110,18);
xlabel('加工余量ap (mm) ');
ylabel('主偏角 α (度) ');
zlabel('轴向力Fa (N) ');
title('f=1.2mm/r');

```

```

(3) x=0.005:0.0025:0.05;
    y=0.0667:0.0083:0.2161;
    [X,Y]=meshgrid(x,y);
    Z=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.5.*X.*sind(Y);
    surf(X,Y,Z);
    view(-37.5+110,18);
    xlabel('加工余量ap (mm) ');
    ylabel('主偏角  $\alpha$  (度) ');
    zlabel('轴向力Fa (N) ');
    title('f=1.5mm/r');

(4) x=0:0.005:0.2;
    y=(6-20.*tand(x))sin(x);
    plot(x,y);

(5) x=0.005:0.0025:0.05;
    y=0.0667:0.0083:0.2161;
    [X,Y]=meshgrid(x,y);
    Z1=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*0.7.*X.*sind(Y);
    Z2=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.2.*X.*sind(Y);
    Z3=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.5.*X.*sind(Y);
    surf(X,Y,Z1);
    hold on;
    surf(X,Y,Z2);
    hold on;
    surf(X,Y,Z3);
    view(-37.5+110,18);
    xlabel('加工余量ap (mm) ');
    ylabel('主偏角  $\alpha$  (度) ');
    zlabel('轴向力Fa (N) ');
    title('不同进给量下轴向力Fa');
    text(0.04,0.23,170,'\leftarrow 当f=0.7mm/r时');
    text(0.04,0.23,300,'\leftarrow 当f=1.2mm/r时');
    
```

text(0.04,0.23,400,'\leftarrow当f=1.5mm/r时');

附表三

(1) x=0.005:0.0025:0.05;

y=0.0667:0.0083:0.2161;

[X,Y]=meshgrid(x,y);

M=(6-20.*tand(Y)).*2450.*0.7.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));

N=196.*ones(19);

surf(X,Y,M),hold on,surf(X,Y,N);

view(-37.5+110,18);

xlabel('加工余量ap(mm)'),ylabel('主偏角 α (度)'),zlabel('接触应力 σ (Mpa)');

title('f=0.7mm/r');

text(0,0.05,110,'接触应力 σ \rightarrow');

text(0,0.1,205,'屈服应力 $\sigma=196$ Mpa\downarrow');

(2) x=0.005:0.0025:0.05;

y=0.0667:0.0083:0.2161;

[X,Y]=meshgrid(x,y);

M=(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.2.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));

N=196.*ones(19);

surf(X,Y,M),hold on,surf(X,Y,N);

view(-37.5+110,18);

xlabel('加工余量ap(mm)'),ylabel('主偏角 α (度)'),zlabel('接触应力 σ (Mpa)');

title('f=1.2mm/r');

text(0.01,0.26,310,'\leftarrow接触应力 σ ');

text(0.02,0.25,140,'\leftarrow屈服应力 $\sigma=196$ Mpa');

(3) x=0.005:0.0025:0.05;

y=0.0667:0.0083:0.2161;

[X,Y]=meshgrid(x,y);

M=(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.5.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));

N=196.*ones(19);

surf(X,Y,M),hold on,surf(X,Y,N);

view(-37.5+110,18);

```
xlabel('加工余量ap(mm)'),ylabel('主偏角 $\alpha$ (度)'),zlabel('接触应力 $\sigma$ (Mpa)');
title('f=1.5mm/r');
text(0,0.115,350,'接触应力 $\sigma$ \rightarrow');
text(0.008,0.26,120,'屈服强度 $\sigma=196\text{Mpa}$ ');
```

(4) x=0.005:0.0025:0.05;

```
y=0.0667:0.0083:0.2161;
```

```
[X,Y]=meshgrid(x,y);
```

```
M1=(6-20.*tand(Y)).*2450.*0.7.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));
```

```
M2=(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.2.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));
```

```
M3=(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.5.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));
```

```
N=196.*ones(19);
```

```
surf(X,Y,M1),hold on,surf(X,Y,M2),hold on,surf(X,Y,M3),hold on,surf(X,Y,N);
```

```
view(-37.5+110,18);
```

```
xlabel('加工余量ap(mm)'),ylabel('主偏角 $\alpha$ (度)'),zlabel('接触应力 $\sigma$ (Mpa)');
```

```
title('不同进给量下接触应力 $\sigma$ ');
```

```
text(0.02,0.25,120,'\leftarrow屈服强度 $\sigma=196\text{Mpa}$ ');
```

```
text(0.02,0.25,150,'\leftarrow当f=0.7mm/r');
```

```
text(0.02,0.25,280,'\leftarrow当f=1.2mm/r');
```

```
text(0.02,0.25,380,'\leftarrow当f=1.5mm/r');
```

附表四

(1) x=0.005:0.0025:0.05;

```
y=0.0667:0.0083:0.2161;
```

```
[X,Y]=meshgrid(x,y);
```

```
Z=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*0.7.*X.*sind(Y);
```

```
M=(6-20.*tand(Y)).*2450.*0.7.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));
```

```
N=196.*ones(19),surf(X,Y,Z);
```

```
hold on,surf(X,Y,M),hold on,surf(X,Y,N);
```

```
hidden off;
```

```
view(-37.5+110,18);
```

```
xlabel('加工余量ap(mm)'),ylabel('主偏角 $\alpha$ (度)'),zlabel('力(N)/应力(Mpa)');
```

```
title('f=0.7mm/r');
```

```

text(0.008,0.25,100,'\leftarrow轴向力Fa');
text(-0.005,0.06,110,'接触应力 $\sigma$  \rightarrow');
text(0,0.1,208,'屈服应力 $\sigma=196\text{Mpa}$ \downarrow');
(2) x=0.005:0.0025:0.05;
y=0.0667:0.0083:0.2161;
[X,Y]=meshgrid(x,y);
Z=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.2.*X.*sind(Y);
M=(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.2.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));
N=196.*ones(19);
surf(X,Y,Z),hold on,surf(X,Y,M),hold on,surf(X,Y,N);
hidden off;
view(-37.5+110,18);
xlabel('加工余量ap(mm)'),ylabel('主偏角 $\alpha$ (度)'),zlabel('力(N)/应力(Mpa)');
title('f=1.2mm/r');
text(0,0.11,300,'接触应力 $\sigma$ \rightarrow');
text(0.01,0.25,200,'\leftarrow轴向力Fa');
text(0.02,0.25,130,'\leftarrow屈服应力 $\sigma=196\text{Mpa}$ ');
(3) x=0.005:0.0025:0.05;
y=0.0667:0.0083:0.2161;
[X,Y]=meshgrid(x,y);
Z=((100.*pi)/3).*(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.5.*X.*sind(Y);
M=(6-20.*tand(Y)).*2450.*1.5.*sind(Y)./(0.03.*(6-X));
N=196.*ones(19);
surf(X,Y,Z),hold on,surf(X,Y,M),hold on,surf(X,Y,N);
hidden off;
view(-37.5+110,18);
xlabel('加工余量ap(mm)'),ylabel('主偏角 $\alpha$ (度)'),zlabel('力(N)/应力(Mpa)');
title('f=1.5mm/r');
text(0.008,0.25,240,'\leftarrow轴向力Fa');
text(0,0.1,350,'接触应力 $\sigma$ \rightarrow');
text(0.008,0.26,100,'\leftarrow屈服应力 $\sigma=196\text{Mpa}$ ');

```