

小型异步实验轧机的设计

作者姓名：刘长坤

指导教师：兰亮云

单位名称：机械工程与自动化

专业名称：机械工程及自动化

东北大学

2015年6月

The design of small asynchronous experimental mill

by Changkun Liu

Supervisor: Liangyun Lan

Northeastern University

June 2015

毕业设计（论文）任务书

机械工程与自动化学院

班级 机械 1111

姓名 刘长坤

毕业设计（论文）题目：

小型异步实验轧机的设计

设计(论文)的基本内容：

1. 翻译外文文献，提高对本专业外文资料查阅能力，要求译文不少于 4000 字；
2. 撰写设计内容的开题报告，确定机构的整体设计思路与方案，应用基本理论知识解决实际问题；
3. 设计图纸，要求工作量不少于 3 张 A_0 图纸（约 4 张），包括总装图，组部件图和零件图；
4. 撰写毕业设计论文（说明书），要求理论充分，计算准确，行文要有逻辑，图表规范；
5. 主要设计了轧机的压下装置、轧辊、轴承座以及轧机的机架。

毕业设计（论文）专题部分：

题目： _____

设计或论文专题的基本内容：

学生接受毕业设计（论文）题目日期

第 1 周

指导教师签字：

2015 年 3 月 12 日

小型异步实验轧机的设计

摘要

轧制是一种极为广泛的金属材料成型工艺。目前，各大钢厂主要采用同步轧机对金属材料进行生产加工。但对于难加工的材料如硅钢或加工薄规格材料生产困难。同步轧机的成形能力是非常有限的，因此，需要采用一个新型轧制方法。

异步轧制是一种新的轧制工艺，有许多优点。采用异步轧制可以大大地降低轧制力，所以设备重量轻，能耗低，轧机变形小，产品精度高，减少了轧辊的磨损和中间退火，降低了生产费用，轧制道次少，生产率高，轧机可轧厚度大，可以提高材料成形性，且能实现生产薄规格的产品。因此，设计合理的异步轧机是非常有必要的。

本轧机为小型四辊异步轧机。主要设计了轧机的机架，压下装置，平衡装置，轧辊及轴承座。机架是轧钢机的重要部件，用来安装整个辊系及轧辊调整装置，并承受全部轧制力。因机架重量大、制造复杂一般给予很大安全系数，并作为永久使用的不更换零件来进行设计。本文系统的阐述了该异步轧机的工作原理，结构组成，详细的对轧制力能参数进行了计算。并将计算出的轧制力与相同条件下的一般轧制的轧制力进行了比较。经过计算后，绘制了详细的二维图，并保证了结构的合理性与设计的可行性。

关键词：异步轧机，轧制力，强度校核

The design of small asynchronous experimental mill

Abstract

Rolling is a kind of metal forming technology which is widely used in metal materials. At present, the major steel mills mainly use synchronous rolling mill for the production and processing of metal materials. But it is difficult to produce the material such as silicon steel or processing thin material. The forming ability of synchronous rolling mill is very limited. Therefore, a new rolling method is needed.

Asynchronous rolling is a new rolling process with many advantages. The rolling force can be greatly reduced by using asynchronous rolling. So the equipment is light weight, low energy consumption and deformation of rolling mill, high product accuracy. It can also decrease the wear and middle annealing of the roll, reduce the production cost, and the rolling pass is less, the productivity is high, the rolling thickness of the rolling mill can be increased, and the formability of the material can be improved. And it can achieve the production of thin specifications of the product. Therefore, it is necessary to design a reasonable asynchronous mill.

This mill is a compact four roll asynchronous mill. The main design of the mill are frame, screwdown, balancing device, rolls and bearing seats. The frame is an important part of the rolling mill, which is used to install the whole roll system and roll adjustment device, and bear all the rolling force. Because of the weight of the machine and the manufacturing complex, the general safety factor is given, and the permanent use of the non replacement parts to design. This paper expounds the working principle and structure of the asynchronous mill, and calculates the energy parameters of the rolling force. The rolling force of the normal rolling and asynchronous rolling are compared with the same conditions. After calculation, the detailed two-dimensional chart is drawn, and the rationality of the structure and the feasibility of the design are ensured.

Key words: Asynchronous mill, Rolling force, Strength check

目录

任务书.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 异步轧制的优势.....	1
1.3 国内外异步轧机发展概况.....	2
1.4 冷轧带钢生产工艺.....	2
第 2 章 轧机轧辊	4
2.1 轧机轧辊的参数.....	4
2.1.1 轧辊辊身的长度和直径.....	4
2.1.2 轧辊辊颈的长度和直径.....	4
2.1.3 轧辊辊头的型式和尺寸.....	5
2.2 轧机轧辊的材料.....	5
2.3 轧辊成形工艺.....	6
2.4 轧辊强度校核.....	7
2.5 本章小结.....	11
第 3 章 轧制力能参数计算	12
3.1 轧制力的确定方法.....	12
3.2 轧制力的计算.....	12
3.2.1 摩擦系数的确定.....	12
3.2.2 异步轧制条件下轧制力的计算.....	13
3.3 轧制力矩的计算.....	15

3.3.1 轧制力方向与轧辊传动力矩.....	15
3.3.2 轧机主电动机力矩与电动机功率.....	18
第 4 章 轧机机架的设计.....	22
4.1 轧机的类型.....	22
4.2 机架的主要结构参数.....	23
4.2.1 机架的基本尺寸.....	23
4.2.2 机架的材料和许用应力.....	25
4.2.3 机架强度和变形计算.....	26
第 5 章 轧机工作机座的其他部分.....	32
5.1 压下装置的结构形式.....	32
5.2 轧辊轴承及轴承座.....	33
5.2.1 轴承的特点.....	33
5.2.2 轴承寿命计算.....	33
5.3 轧辊平衡装置.....	35
5.4 联轴器.....	36
5.4.1 轧机万向联轴器的缺点.....	37
5.4.2 万向联轴器的选择.....	37
5.5 液压弯辊装置.....	41
结论.....	43
参考文献.....	44
致谢.....	46
附录 1 英文原文.....	47
附录 2 中文翻译.....	58

第1章 绪论

1.1 课题背景

近十几年来,各种轧制技术迅速发展,钢材产量迅速提高,异步轧制技术很少被应用。但这种技术是不可或缺的。随着我国钢材产量的迅猛增长,产能过剩问题日趋显著,吨钢耗能还很高,产品质量合格率、高附加值产品也都不尽人意。因此,迫切需要在现有的大量的冷、热连轧机组中施加先进的生产工艺,提高产品质量,降低能耗及生产成本,生产高附加值的产品,使我国完成由钢铁大国向钢铁强国转变。

研究在热连轧过程中各种不同的异步轧制工艺参数对轧件变形规律、相变级组织演变规律的影响,完善热连轧的异步轧制理论,能够使异步轧制理论在热连轧工艺中得到成功应用。特别是异步轧制可使轧件在较低的温度下,实现预定的变形量,这样就可以为实现低温铁素体轧制创造条件,从而可避免两相区轧制容易出现的混晶及带状组织等缺陷,拓宽异步轧制工艺的应用范围。异步轧制可以降低轧制温度,在精轧后几道次,控制合适的加工温度,进行大压下量轧制,形变的同时诱导相变,轧后快冷,即可获得铁素体细晶,为实现低温铁素体轧制创造了条件。拉直异步轧制不受速比等于延伸的限制,可实现大变形量轧制,提高轧机的轧薄能力和效率,用于极薄带材生产。异步恒延伸轧制可以保持延伸系数恒定,轧制过程中延伸系数不受轧辊偏心、带坯厚度波动和变形抗力不均的影响,可生产高精度带材。异步轧制用于板带的冷轧复合,可增加材料接触面的剪切变形,有助于破碎表面氧化膜,促进新鲜金属表面暴露和产生摩擦热,提高表面能,有利于减小冷轧时的变形量。

1.2 异步轧制的优势

异步轧制是一个新的轧制工艺,可以大大降低轧制力。轧机重量较轻,轧机变形小,能耗低,产品精度比较高,可轧制厚度大。减少了轧辊的磨损和中间退火的程序,降低了生产成本,程序简便,生产效率高。异步轧制既适用于冷轧板带又适用于热轧板,前景广阔。

异步轧机的特点决定了它的优势。由于其附加剪切变形的存在,造成了搓扎区上下表面金属流动的不同,导致金属表面质量,金相组织,晶体位相和力学性能的变化。与常规轧制相比,异步轧制具有显著降低轧制力和轧制扭矩,降低产品能耗,减少轧制道次,

增强轧薄能力,改善产品厚度精度和板形,提高轧制效率等优点。特别是对于轧制变形抗力高、加工硬化严重的极薄带材,其节能效果更加显著。其次,异步轧制产生了比普通对称轧制大得多的附加剪切变形,并且与正常压缩变形同时存在于轧制变形区中,因而可以促使晶粒细化。因此,异步轧制为晶粒细化提供有利条件,非常有利于提高金属轧件的力学性能。由于异步轧制可以实现大下压量轧制,因而也为形变诱导相变细化晶粒机制提供有利条件^[1]。异步轧制相对于一般轧制具有诸多优点,尤其是适合于轧制极薄带材,因此,异步轧机具有非常广阔的发展前景和应用。所以我所选择的课题是用于轧制薄板的异步轧机的设计。在金属轧件变形区,由于所受的摩擦力方向相反,造成搓轧区上、下表面金属流动速度不同,因而在变形区内引起剪切变形,导致金属表面质量、金相组织、晶体位相和力学性能的变化。异步轧制对金属轧件产生的变形可以看成是由拉伸压缩以及剪切变形的叠加而成,这种叠加不是简单的代数和相加^[2]。

1.3 国内外异步轧机发展概况

我国对异步轧制技术的研究起步于20世纪70年代初。东北大学异步轧制研究组在朱泉教授的带领下,针对拉直式异步轧制过程进行了深入系统的实验研究和理论分析,解决了异步轧制中的振动和板形等问题,并提出了弹性塞理论,完成了异步恒延伸轧制新技术和极薄带材轧制新技术等科研成果^[3]。20世纪80年代末,东北大学把异步轧制成功地应用于结构材料轧制之后,又开展了像取向硅钢这种功能材料异步轧制的研究,并取得了一定进展。

20世纪40年代初,德国研究者在研究单辊传动叠轧薄板和前苏联研究者在研究三辊劳特式轧机时,对两个工作辊圆周速度不等使轧材在变形区产生独特的变形产生兴趣,认为这种异步轧制可以降低轧制压力,提高板材加工效率,并发展了一种以非对称流变为特征的异步轧制过程。因此,异步轧制工艺逐渐受重视,异步轧制理论和技术也得到了很大的发展。1958年,Coffin发明了CBS轧机;20世纪60年代初又推出S轧机;20世纪70年代初出现了F-B0轧制法;20世纪80年代初又推出了直式异步轧机。1966年,Johnson和Needham就用铅板轧制来模拟热轧过程。他们通过实验研究了上下轧辊辊速差、辊径差及不同的辊面粗糙度对轧制力、轧制力矩及板弯曲的影响。结果表明;板带弯曲方向随轧辊线速度、压下率和表面粗糙度的不同而发生变化。20世纪70年代,Dewhurst等人采用滑移线场解析了板弯曲规律,并把结果与纯铅带轧制实验进行了对

比。结果显示,当辊速差一定时,随着压下率的增大,板带弯曲方向发生改变。

1.4 冷轧带钢生产工艺

车间中冷轧带钢主要有以下几个特点:

(1) 加工温度一般比较低,在钢板轧制过程中会产生不同程度的加工硬化现象;

(2) 冷轧中一般会采用工艺冷却与润滑:实验表明带钢在冷轧过程中会有 84%-88% 的变形功转化为热能,工作辊表面温度会上升 100℃左右,支承辊会上升 60℃左右,辊身表面会产生一定的温度差,若不对轧辊和带材进行冷却,辊身表面会产生淬火层硬度降低的问题,同时也会影响轧件的尺寸精度^[4]。

(3) 轧件可能会产生跑偏现象。本方案中会通过张力控制的方法来防止轧件跑偏。

第 2 章 轧机轧辊

轧辊是用来对轧件进行轧制加工的工具，它是整个工作机座的中心，机座的其他组件和机构都是为装置、支撑和调整轧辊以及引导轧件正确地进出轧辊而设的。轧辊的结构一般由辊身、辊颈和辊头三部分组成。冷轧板轧辊的辊身微凸，当它受力弯曲时，可以保证良好的板形。轧辊的基本尺寸参数是：轧辊名义直径 D 、辊身长度 L 、辊颈直径 d 和辊颈长度 l 。

2.1 轧机轧辊的参数

2.1.1 轧辊辊身的长度和直径

根据工作辊辊身长度理应与板、带材的宽度相适应的原则及已知数据，通过以下计算辊身参数^[5]：

辊身长度 L 比所轧钢板的最大宽的 b 大一个适当的裕量 a ，即

$$L = b + a \quad (2-1)$$

本文中轧件宽度选取 $b=200\text{mm}$ ，因此，取辊身长度为 $L=500\text{mm}$ 。

四辊轧机的辊身长度 L 确定以后，可根据表 2.1 确定工作辊直径 D_1 和支承辊直径 D_2 。

表 2.1 各种四辊轧机的 L/D_1 、 L/D_2 、及 D_2/D_1

轧机名称	L/D_1	L/D_2	L/D_3
厚板轧机	3.0~5.2	1.9~2.7	1.5~2.2
粗轧机	1.5~3.5	1.0~1.8	1.2~2.0
精轧机	2.1~4.0	1.0~1.8	1.8~2.2
冷板带轧机	2.3~3.0	0.8~1.8	2.3~3.5

本文中选取工作辊直径 $D_1 = 180\text{mm}$ ，支承辊直径 $D_2 = 450\text{mm}$ 。

2.1.2 轧辊辊颈的长度和直径

辊颈的直径和长度与轴承的型式和工作载荷有关，直径 d 受轴承径向尺寸的限制，而且辊颈和辊身的交界面，往往是最薄弱环节。只要条件允许，辊颈直径和辊颈与辊身

的过度圆角 r 应选得大些。

使用滚动轴承时，由于轴承外径较大，辊颈尺寸不能过大，一般近似的选

$$d = (0.5 \sim 0.55)D \quad (2-2)$$

根据以上，选取工作辊辊颈直径为 $d_1=90\sim 99mm$ ，可近似取 $d_1=100mm$ 。作辊辊颈长度根据轴承选取，在这里取 $l_1 = 237mm$

支承辊辊颈直径 $d_2 = 450mm$ ，根据轴承选取 $l_2 = 237mm$ 。

2.1.3 轧辊辊头的型式和尺寸

各种轧机由于传动连接方法的不同，所要求的辊头型式也不同。选择辊头的尺寸时，应根据辊头的型式确定。

本文选用梅花头，直径根据下式确定：

$$d_3 = 0.85d \quad (2-3)$$

$D_3 = 0.85mm \times 100 = 85mm$ 。可以取长度 $l_3 = 75mm$ 。

2.2 轧机轧辊的材料

用于轧辊的合金锻钢在我国重型机械企业标准 JB/ZQ4289-86(轧辊钢)中已有规定。

热轧工作辊用钢的钢号为^[6]：55Cr、50CrMnMo、60CrMnMo、50CrNiMo、60CrNiMo、60SiMnMo、60CrMoV、70Cr3NiMo 等。

冷轧工作辊用钢的钢号为：8CrMoV、86Cr2MoV、9Cr、9Cr2、9Cr2Mo、9Cr2W、9Cr3Mo、60CrMoV 等。

支承辊用钢有：60CrMnMo、75CrMo、70Ni3CrMo、9Cr2、9Cr2Mo、9CrV、55Cr、42CrMo、35CrMo 等。

在这里选择 9Cr2Mo 为工作辊和支承辊的材料。

冷轧工作辊的常见表面硬度见表 2.2。

表 2.2 冷轧工作辊的表面硬度

轧辊直径(mm)	辊身表面硬度范围 (HS)	最小淬硬层深度 (mm)	辊颈硬度范围 (HS)
0~300	0~95	6	30~55
	90~98	8	
	80~90	10	
301~600	0~95	10	30~55
	90~98	12	
	80~90	15	
601~900	0~95	8	30~55
	90~98	10	
	80~90	12	

表 2.3 支承辊表面硬度

用途	辊身表面硬度范围 (HS)	最小淬硬层深度 (mm)	辊颈硬度范围 (HS)
热轧	60~70	45	35~50
	50~60	50	
	40~50	55	
冷轧	65~75	40	35~50
	60~70	45	
	55~65	50	

综合上表，选取：

工作辊：9Cr2Mo，辊身：HS=90~98 辊颈：HS=45~50。

支承辊：9Cr2Mo，辊身：HS=60~70 辊颈：HS=40~45。

2.3 轧辊成形工艺

轧辊成形方法主要有两种：分别是铸造轧辊和锻造轧辊。铸造轧辊是指将冶炼钢水或熔炼铁水直接浇注成型这一生产方式制造的轧辊种类。铸造轧辊按材质又可分为铸钢轧辊和铸铁轧辊两类；按制造方法又可分为整体铸造轧辊和复合铸造轧辊两类。

锻造轧辊按材质分类如下：

- (1)锻造合金钢轧辊;
- (2)锻造半钢轧辊;
- (3)锻造半高速钢轧辊;
- (4)锻造白口铸铁轧辊。

本方案中采用锻造轧辊，锻钢轧辊可分为锻钢热轧辊及锻钢冷轧辊，锻钢热轧辊主要用于热轧开坯及型钢粗轧辊，锻钢冷轧辊广泛用作冷轧工作辊。由于冷轧板材要求质量较高，尤其是冷轧薄板广泛用于轻工、汽车、建筑及铁道等行业，要生产高质量的冷轧薄板，必须要有高质量的冷轧工作辊做保证，这样对冷轧工作辊的性能提出很高的要求：辊身表面必须具有高而均匀的硬度，以保证冷轧带材或钢板的尺寸精度和良好的表面质量；辊身具有一定的淬硬层深度；具有高的抗事故能力。为达到这些性能，对轧辊材质的原始组织要求很严：一是纯净的冶金质量；二是组织的均匀性。高的冶金质量指轧辊钢锭结晶致密，偏析不严重，不允许存在白点，钢中残存的非金属夹杂物含量尽可能低。

2.4 轧辊强度校核

四辊轧机有两个工作辊（小直径的）和两个支承辊（大直径的），轧制压力由工作辊传递到支承辊，再由支承辊轴承座传递给机架。由于支承辊具有较大的刚性，其直径为工作辊直径的 1~2 倍，故抗弯断面系数亦较工作辊大得多。辊系在轧制过程中将产生弯曲变形，驱动的工作辊还将存在扭转变形^[7]，如图 2.1 所示。

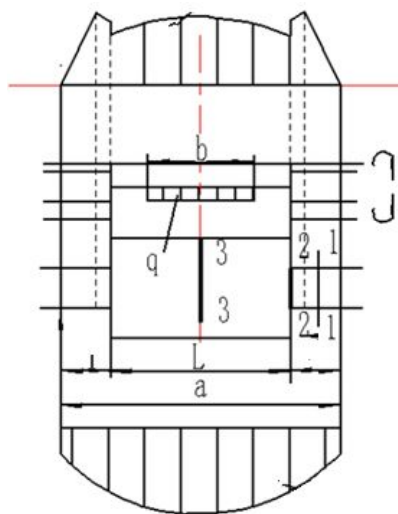


图 2.1 四辊轧机轧辊辊系作用力图

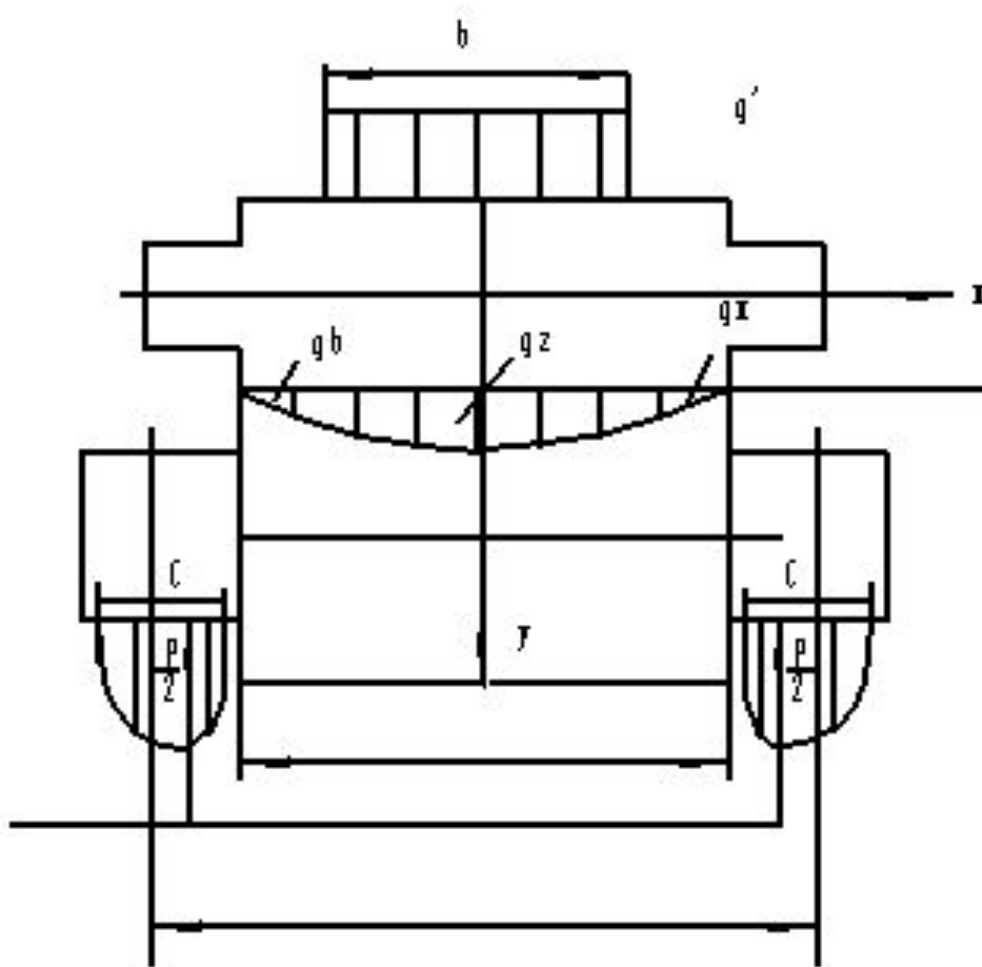


图 2.2 四辊轧机工作压力分布状况

如果工作辊与支承辊辊身为圆柱形又都以相同的弯曲曲率共同弯曲，工作辊与支承辊的弯曲挠度 f_w 和 f_B 将为：

$$f_w = k_1 \frac{P_w}{D_1^4}; f_B = k_1 \frac{P_B}{D_2^4} \quad (2-4)$$

式中 k_1 —比例系数；

因为 $f_w = f_B$ ，则轧辊的弯曲力矩与作用在轧辊上的载荷成正比

$$\frac{M_{WB}}{M_{wW}} = \frac{P_B}{P_w} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 \quad (2-5)$$

式中 M_{WB} 、 M_{wW} —支承辊及工作辊上的弯矩；

P_B 、 P_W —支承辊及工作辊上的作用力；

D_2 、 D_1 —支承辊与工作辊的直径。

因为 $P = P_B + P_W$ ，则

$$P_W = P \frac{1}{1 + (D_2/D_1)^4}; P_B = P - P_W \quad (2-6)$$

$D_1 = 180mm, D_2 = 450mm$ ，则：

$(\frac{D_2}{D_1})^4 = 2.5^4 = 39$ ，于是可知：

$$P_W = P \frac{1}{1 + 39} = \frac{1}{40} P = 8.6KN, P_B = P - P_W = 334.9KN$$

于是可知作用在工作辊上的力仅占轧制压力的 $\frac{8.6}{343.5} \cdot 100\% = 2.5\%$ 。

即轧制压力有 1/40 作用在工作辊上，使之产生弯曲，而其余的月约 97.5%的作用在支承辊上。由于轧制时弯曲力矩绝大部分由支承辊承担，在计算支承辊时通常按承受全部轧制力的情况考虑。而工作辊只核算辊颈和辊端的扭转应力。

(1) 工作辊应力计算

工作辊承受垂直力 P_W 时，最大弯曲力矩 M_{WP} 为：

$$\begin{aligned} M_{WP} &= ql^2 / 8 = P_W (l / 8) = (P_W / 8)(L + 2c_1) \\ &= (334.9 / 8)(0.5 + 2 \times 340) = 28.5kN \cdot m \end{aligned}$$

由水平张力作用在一个轧辊上的弯曲力矩 M_T 为：

$$M_T = \frac{1}{2} \times \frac{T}{4} (a' - \frac{b}{2}) = \frac{40}{8} (0.91 - \frac{0.2}{2}) = 4kN \cdot m$$

作用在工作辊上的合成弯曲力矩 M 为：

$$M = \sqrt{M_{WP}^2 + M_P^2} = \sqrt{28.5^2 + 4^2} \approx 28.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

作用在辊身中间位置最大弯曲应力为:

$$\sigma = \frac{M}{0.1D_1^3} = \frac{28.8 \times 10^3 \times 10^3}{0.1 \times 180^3} = 4.9 \text{ MPa}$$

作用于辊颈的扭转应力为:

$$\tau = \frac{M_K}{0.2D^3} = \frac{0.78 \times 10^6}{0.2 \times 100^3} = 3.9 \text{ MPa}$$

(2) 支承辊应力计算

轧辊中间位置最大弯曲力矩和应力计算:

$$M_{WB} = \frac{P_B}{4} \left(a - \frac{L}{2} \right) = \frac{0.3349}{4} \left(0.913 - \frac{0.5}{2} \right) = 55 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma = \frac{M_{WB}}{0.1D^3} = \frac{55}{0.1 \times 0.45^3} = 6.0 \text{ MPa}$$

断面 1—1 的弯曲应力 ($d=240\text{mm}$):

$$\sigma = \frac{(P/2)c'}{0.1d^3} = \frac{(343.5/2) \times 0.24}{0.1 \times 0.24^3} = 29.8 \text{ MPa}$$

断面 2—2 的弯曲应力为 ($d=450\text{mm}$):

$$\sigma = \frac{(P/2)c}{0.1d^3} = \frac{(0.33/2) \times 0.237}{0.1 \times 0.45^3} = 4.3 \text{ MPa}$$

工作辊和支承辊全用 9Cr2Mo 制造, 其 $\sigma_s = 235 \text{ MPa}$, $\tau_s = 200 \text{ MPa}$, 疲劳极限

$\sigma_{-1} = 180 \text{ MPa}$, 因此符合要求。

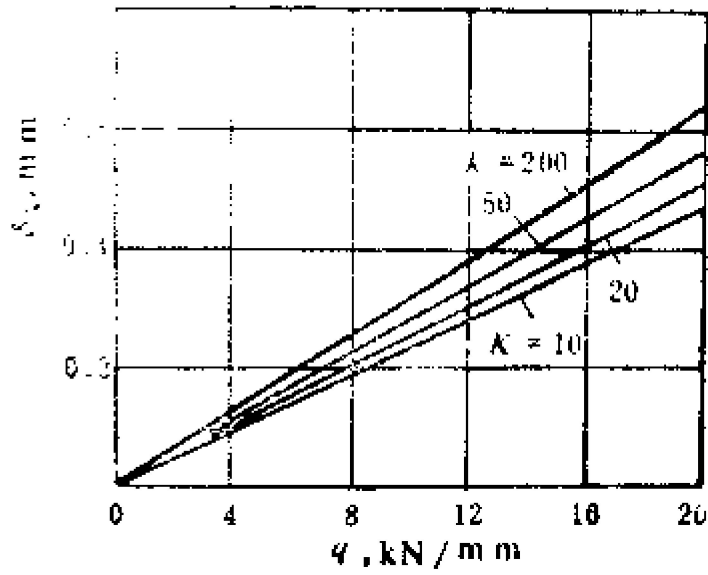


图 2.3 四辊轧机轧辊接触变形的计算

2.5 本章小结

轧件: $H = 108\text{mm}$, $h = 1.6\text{mm}$

材料: Q345;

带宽: 200mm;

带长: 450mm;

轧辊材料: 工作辊: 9Cr2Mo, 辊身硬度: HS=90~98 辊径: HS=45~50;

支承辊: 9Cr2Mo, 辊身硬度: HS=60~70 辊径: HS=40~45;

工作辊参数: $D_1 = 180\text{mm}$, $L = 500\text{mm}$;

支承辊参数: $D_2 = 450\text{mm}$, $L = 500\text{mm}$ 。

第3章 轧制力能参数计算

3.1 轧制力的确定方法

轧制压力是由轧件通过轧辊时产生塑性变形而产生的作用力。确定轧制压力的方法有三种，即实测法、经验公式计算法和理论计算法^[8]。

1) 实测法

在轧钢机上放置专门设置的压力传感器，将轧制力的信号转换成电信号，通过放大或直接送往记录仪表，将其记录下来，获得轧制力实测数据。这样测量所得的轧制力是作用于轧辊上的总压力的垂直分量。

2) 经验公式计算法

根据大量实测数据，采用统计方法，归纳成能反应一些主要影响因素的经验计算公式。

3) 理论公式计算法

根据塑性力学原理分析变形区内应力状态与变形规律，首先确定接触弧上单位压力 p_x 的分布规律及大小，求出接触弧上平均单位压力 p_m 后，按下式即可计算出常规轧制下的轧制力

$$P = p_m F = p_m b_m l \quad (3-1)$$

式中 F —轧件与轧辊的接触面积（实际接触面积的水平投影）；

b_m —轧制前后的轧件平均宽度；

L —接触弧长度（即变形区长度）。

3.2 轧制力的计算

3.2.1 摩擦系数的确定

冷轧时一般都采用相应的润滑剂，采用合适的润滑剂不仅能大大降低轧辊和轧件之间的摩擦力，减少了轧辊的磨损，而且，也减少了外摩擦对应力状态的影响，降低了轧制时的单位压力。在计算冷轧的平均单位压力时工艺润滑的影响是通过相应的摩擦吸收

来考虑的^[9]。

冷轧时的摩擦系数与润滑剂和轧辊表面状况有关。在轧制平整带材时，若无润滑剂，摩擦力则一般取 $\mu_p = 0.12 - 0.15$ 。

表 3.1 冷轧时 μ_p 值与轧制速度的关系^[10]

轧制速度 (m/s)	乳化油	矿物油	棕榈油
3 以下	0.14	0.10~0.12	0.08
10 以下	0.10~0.12	0.09~0.10	0.06
20 以下	...	0.08	0.05
大于 20	...	0.06	0.03

本方案中由于是异步轧制，因此，不采用润滑剂，则可以取 $\mu = 0.15$ 。

3.2.2 异步轧制条件下轧制力的计算

异步轧制是由于上下辊速度之差，改变了同步轧制时金属变形的应力状态，使得轧辊与扎件之间的摩擦力方向发生了改变。如图 3.1 所示。在相同的条件下，由于上轧辊的速度 V_1 大于下轧辊的速度 V_2 ，这使得中性角相对于同步轧制时有了改变，高速辊出口侧前滑减小，低速辊出口侧前滑增大。摩擦力也随之改变，上下辊与扎件之间摩擦力的方向相反，从而实现异步轧制。

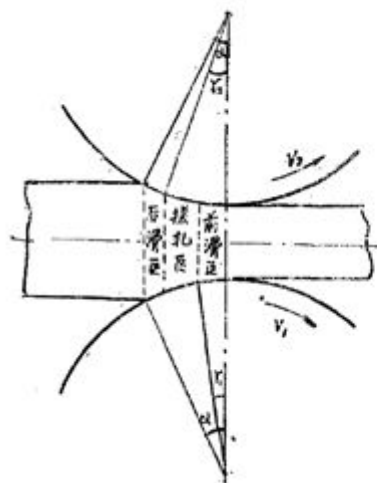


图 3.1

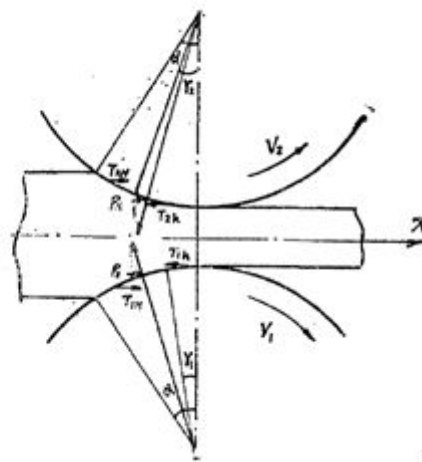


图 3.2

图 3.2 中，中性角计算过程如下^[11]：

根据平衡条件得：

$$-2P_x + T_{1H} - T_{1h} + T_{2H} - T_{2h} = 0 \quad (3-2)$$

式中各值为：

$$P_x = p.B.\frac{D}{2}\alpha.\text{Sin}\frac{\alpha}{2}$$

$$T_{2H} = \mu p.B.\frac{D}{2}(\alpha - r_2).\text{Cos}\frac{\alpha + r_2}{2}$$

$$T_{2h} = \mu p.B.\frac{D}{2}r_2.\text{Cos}\frac{r_2}{2}$$

$$T_{1H} = \mu p.B.\frac{D}{2}(\alpha - r_1).\text{Cos}\frac{\alpha + r_1}{2}$$

$$T_{1h} = \mu p.B.\frac{D}{2} + r_1.\text{Cos}\frac{r_1}{2}$$

带入公式（3-2），并令 $\text{Sin}\frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$, $\text{Cos}\alpha \approx 1$ 整理得：

$$r_1 + r_2 = \alpha(1 - \frac{\alpha}{2\mu})$$

而在相同条件的同步轧制时：

$$r = \frac{\alpha}{2}(1 - \frac{\alpha}{2\mu})$$

所以

$$r_1 + r_2 = \alpha(1 - \frac{\alpha}{2\mu}) = 2r \quad (3-3)$$

取 $\mu = 0.15$ ，又由已知条件得 $\Delta h = 0.15$ ，求得 $\text{Cos}\alpha = 0.99$ ，解得：

$$\alpha = 2.7^\circ, \quad \alpha = 0.0471 \quad \text{得}$$

$$2r = 2.3^\circ, \quad \text{Sin}2r = 0.0397, \quad \text{Sin}\alpha = 0.0471$$

在此取后张力值 $Q_H = 40\text{KN}$ ，前张力值 $Q_h = 42.009\text{KN}$

$$\text{单位后张力 } t_H = \frac{Q_H}{B.H}, \quad \text{单位前张力 } t_h = \frac{Q_h}{B.h},$$

解得：

$t_H = 111\text{MPa}$ ， $t_h = 125\text{MPa}$ 。

金属轧辊表面单位压力计算公式为^[12]：

$$P_x = P_a + 2K \ln \frac{h_x}{h_a} \quad (3-4)$$

单位轧制压力为 $2K - t_H$ ，其中， $2K$ 的值相当与 $1.15\sigma_s$ ，因此，单位轧制压力为：

$$P_x = (2k - t_H) + 2K \ln \frac{h_x}{H} \quad (3-5)$$

再由已知异步轧制实验研究公式求轧制压力：

$$P = (2K - t_h) \sqrt{R\Delta h B} \quad (3-6)$$

当 $H=1.8\text{mm}$ ， $h=1.6\text{mm}$ 时，由 Q345 冷作硬化曲线知 $\sigma_s = 448.5\text{MPa}$ 。

带入公式得：

$$P = (1.15 \times 448.5\text{MPa} - 111\text{MPa}) \sqrt{90 \times 0.2 \times 200} = 343.5\text{kN}。$$

因此，异步轧制条件下的轧制压力为 343.5kN。

相同条件下的同步轧制时的轧制力为 469kN，在此不进行计算。

因此，异步轧制相对于同步轧制，轧制力降低了 26.8%。

3.3 轧制力矩的计算

3.3.1 轧制力方向与轧辊传动力矩

轧制时轧件在轧制压力的作用下会产生塑性变形，轧件在同时也会给轧辊一个大小相等，方向相反的作用力，轧件对轧辊的作用力 P 相对轧辊中心的力矩，我们称之为轧制力矩 M ，轧制力矩 M 的值与轧制压力 P 的方向及其在接触弧上的作用点位置相关。并且，由于轧机的结构与轧制情况的不同，轧制压力方向也不同。

四辊轧机由两个直径较小的工作辊以及两个大直径的支承辊组成。它们有两种驱动方式，分别是驱动工作辊和驱动支承辊。

本设计中采用驱动工作辊的方式。由两个电机分别带动上下两个相同的工作辊，使两个电机的转速不同从而实现异步轧制。其受力如图 3.3 所示。

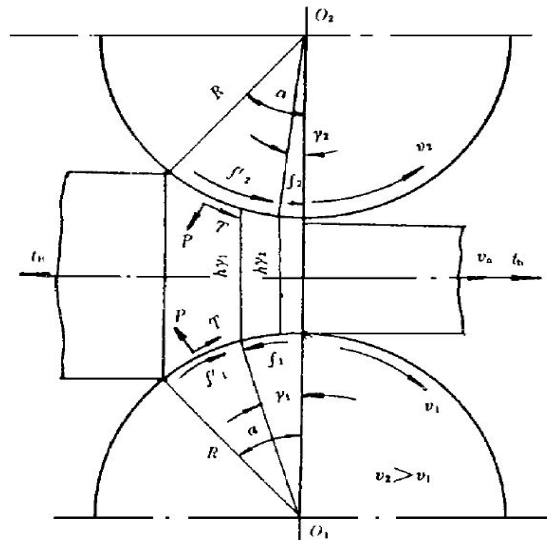


图 3.3 驱动工作辊的轧机受力图

作用于工作辊上的力主要有三个，分别为：

- (1) 轧制压力 P ，力臂为 a ， P 与 a 组成力臂；
- (2) 工作辊轴承处的摩擦力 F ，其中摩擦圆半径 ρ_1 与其相切；
- (3) 支承辊对工作辊的反力 R 。

当忽略支承辊轴承处的摩擦力及工作辊与支撑辊之间的滚动摩擦时，支承辊对工作辊的反力 R 的方向在轧辊圆心 O_1O_2 连心线上，如果考虑该摩擦力的影响， R 力应与摩擦圆半径 ρ_2 相切，并在工作辊与支承辊处偏离一个滚动摩擦力臂的距离 m 。一般情况下， $m=0.1-0.3mm$ 。

下面计算轧辊传动力矩^[13]：传动轧辊所需力矩为轧制力矩 M_Z ，由工作辊带动支承辊的力矩 M_R ，与工作辊轴承中摩擦力矩 M_{f1} 三部分组成，即

$$M_K = M_Z + M_R + M_{f1} \tag{3-7}$$

(1) 求轧制力矩 M_Z

$$M_Z = Pa \tag{3-8}$$

式中 P —轧制力；

a —轧制力力臂，其大小与轧制力作用点及前后张力大小有关。

因为 $T_1 > T_0$ ，所以， $a = R_1 \sin(\beta - \varphi)$ ，其中

R_1 —工作辊半径；

β —不考虑张力时轧制力作用点对应的轧辊中心角；

φ —前后张力对轧制力方向影响的片状角。

$$\varphi = \arcsin \frac{T_1 - T_0}{2P}$$

$$\varphi = 0.0006^\circ$$

$\beta = \psi\alpha$ ，取 $\psi = 0.4$ ，求得 $\beta = 1.08^\circ$ ，求得

$a = 1.7\text{mm}$ 。

$$M_Z = Pa = 343.5 \times 1.7 \text{N} \cdot \text{m} = 584 \text{N} \cdot \text{m}。$$

(2) 求工作辊传动支撑辊的力矩 M_R

$$M_R = R \cdot c \tag{3-9}$$

$$R = \frac{P \cos \varphi}{\cos(\theta + \gamma)} \tag{3-10}$$

式中 θ —工作辊与支承辊连心线与垂直线夹角， $\theta = \arcsin \frac{e}{\frac{D_1}{2} + \frac{D_2}{2}}$ ；

m —在工作辊和支承辊接触处偏移的一个滚动摩擦力矩的距离（一般情况下取 $m = 0.1-0.3$ ，这里取 $m = 0.2$ ）。

γ —轧辊连心线与反力 R 的夹角， $\gamma = \arcsin \frac{\rho_2 + m}{\frac{D_2}{2}}$ ；

c —反力 R 对工作辊的力臂， $c = m \cos \gamma + \frac{D_1}{2} \sin \gamma$ ；

D_2 —支承辊直径；

e —工作辊轴线相对与支承辊轴线的偏移距离（由于工作辊偏移距离 e 的值一般为 5mm 到 10mm ，这相对于工作辊和支承辊的直径来说很小，在计算传动力矩时为了简化可取 $e = 0$ ，此时误差很低，这是 $\theta = 0^\circ$ ）；

ρ_2 —支承辊摩擦元半径， $\rho_2 = f_v \times r$ （ r 为四列圆柱滚子轴承内径的半径 $r=120\text{mm}$ ； f_v 为当量摩擦系数 $f_v = kf$ ，当两个接触面沿整个半圆周均匀接触时 k 取 $\pi/2$ ，冷轧时圆柱滚子轴承摩擦系数 $f=0.004$ ）。

$$\text{则 } \rho_2 = kfr = \frac{\pi}{2} \times 0.004 \times 120 = 0.75\text{mm}。$$

整理得

$$\gamma = 0.24^\circ, \quad c = m \cos \gamma + \frac{D_1}{2} \sin \gamma = 0.2 \times \cos 0.24^\circ + 90 \times \sin 0.24^\circ = 0.58\text{mm},$$

$$R=343.5\text{KN}, \quad M_R = Rc = 200\text{N} \cdot \text{m}。$$

(3) 求工作辊轴承的摩擦力矩 M_{f1}

$$M_{f1} = F \cdot \rho_1 \quad (3-11)$$

式中 F —工作辊轴承处的反力；当 $T_1 > T_0$ 时， $F = R \sin(\theta + \gamma) + P \sin \varphi$ ，

带入得 $F=1622\text{N}$ 。

$$\rho_1 \text{—工作辊摩擦圆半径，} \rho_1 = kfr_1 = \frac{\pi}{2} \times 0.004 \times 50 = 0.31\text{mm}。$$

$$\text{得 } M_{f1} = F \cdot \rho_1 = 1622 \times 0.31 = 0.5\text{N} \cdot \text{m}$$

综上所述：

轧制力矩为

$$M_K = M_Z + M_R + M_{f1} = 584 + 200 + 0.5 = 784.5\text{N} \cdot \text{m}$$

驱动两个工作辊总传动力矩为

$$M_{K\Sigma} = 2M_K = 2 \times 784.5 = 1569\text{N} \cdot \text{m}$$

3.3.2 轧机主电动机力矩与电动机功率

轧辊与电动机之间的速比是求主电机功率中的重要依据，辊速与电动机转速直接相关，

轧制速度：由最佳异步轧制条件可知，当 $\frac{V_1}{V_2} = \lambda$ 时，轧制力降低效果最好，其中 λ 为延

伸率，可以取 $\lambda=1.2$ [14-15]。当取 $V_1 = 2\text{m/s}$ 时， $V_2 = 1.7\text{m/s}$ 。

此时，轧件入口速度为：

$$U_H = V_2 \cos \alpha \quad (3-12)$$

轧件出口速度为:

$$u_h = V_1 \quad (3-13)$$

由以上两个公式可以求得:

$$U_H = V_2 \cos \alpha = 1.7 \times \cos 2.7^\circ = 1.698 \text{ m/s}$$

$$u_h = V_1 = 2 \text{ m/s}$$

$$\text{下工作辊转速: } V_1 = 2 \text{ m/s}, \quad n_1 = \frac{V_1}{\pi D_1} = \frac{2}{3.14 \times 0.18} \text{ r/s} = 3.54 \text{ r/s} = 212 \text{ r/min}$$

$$\text{上工作辊转速: } V_2 = 1.7 \text{ m/s}, \quad n_2 = \frac{V_2}{\pi D_1} = \frac{1.7}{3.14 \times 0.18} = 3 \text{ r/s} = 180 \text{ r/min}$$

$$\text{下支承辊转速: } n_3 = \frac{V_1}{\pi D_2} = \frac{2}{3.14 \times 0.45} = 1.42 \text{ r/s} = 85.2 \text{ r/min}$$

$$\text{上支承辊转速: } n_4 = \frac{V_2}{\pi D_2} = \frac{1.7}{3.14 \times 0.45} = 1.2 \text{ r/s} = 72 \text{ r/min}$$

$$i_1 = \frac{n_{\text{电1}}}{n_1} = \frac{1320}{212} = 6.3$$

$$i_2 = \frac{n_{\text{电2}}}{n_2} = \frac{1134}{180} = 6.3$$

1) 轧辊与电机间的效率:

电动机到工作辊之间要经过减速器和万向联轴器。

减速器传动效率: $\eta_1 = 0.93 \sim 0.96$, 取 $\eta_1 = 0.95$;

万向联轴器传动效率: $\eta_2 = 0.96 \sim 0.98$, 取 $\eta_2 = 0.96$; 则总传动效率 $\eta = \eta_1 \eta_2 = 0.91$ 。

2) 电动机力矩:

主电动机周上的力矩由四部分组成^[16], 即:

$$\begin{aligned} M_D &= \frac{M_Z + M_{f1}}{i} + M_{f2} + M_{kon} \pm M_{don} \\ &= \frac{M_Z}{i} + M_f + M_{kon} \pm M_{don} \end{aligned} \quad (3-14)$$

式中 M_D —主电动机力矩;

M_Z —轧辊上的轧制力矩;

M_f —附加摩擦力矩, 即当轧制时由于轧制力作用在轧辊轴承、传动机构及其它转动件中的摩擦而产生的附加力矩, $M_f = \frac{M_{f1}}{i} + M_{f2}$;

M_{kon} —空转力矩, 即轧机空转时, 由于各转动件的重量所产生的摩擦力矩及其它阻力力矩;

M_{don} —动力矩, 轧辊运转速度不均匀时, 各部件由于有加速或减速所引起的惯性力所产生的力矩;

i —电动机和轧辊之间的传动比。

$$M_{f2} = \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \frac{M_K}{i} = \left(\frac{1}{0.91} - 1\right) \frac{784.5}{6.3} = 12.3 N \cdot m$$

$$M_f = \frac{M_{f1}}{i} + M_{f2} = \frac{0.5}{6.3} + 12.3 = 12.4 N \cdot m$$

空转力矩 M_{kon} 由各转动零件的重量产生的摩擦损失, 可由下式确定

$$M_{kon} = \sum \frac{G_n \mu_n d_n}{2i_n} + M'_{kon} \quad (3-15)$$

式中 G_n —某一转动件的重量;

μ_n —某一转动件的摩擦系数;

d_n —某一转动件的轴颈直径;

i_n —某一转动件到电动机之间的传动比。

动力矩 M_{don} 为:

$$M_{don} = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4} \frac{d\omega}{dt} N \cdot m \quad (3-16)$$

式中 GD^2 —各转动件推算到电动机轴上的飞轮力矩;

$\frac{d\omega}{dt}$ —电动机的角加速度，由电动机类型和操作情况而定。

由上述各式求得电动机静力矩后，便可根据轧机轧制周期，以时间 t 为横坐标，以静力矩为纵坐标作出 M_j-t 图形，由图 3.4 所示，静力矩随时间 t 的变化关系，称为静负荷图^[15]。

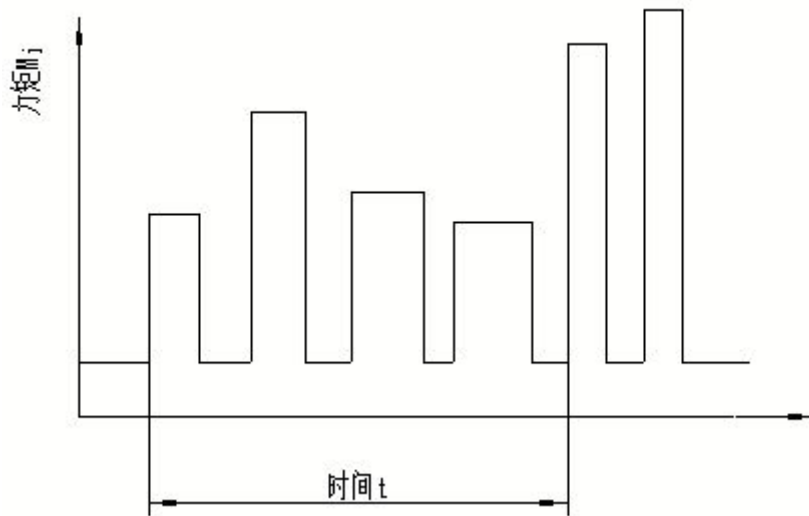


图 3.4 轧机电动机静负荷图

主电机力矩为：

$$M_D = \frac{M_K}{\eta i} = \frac{784.5}{6.3 \times 0.91} N \cdot m = 137 N \cdot m$$

因此，轧机电动机轴上力矩为 $137 N \cdot m$ 。

3) 电动机功率 P_D ：

$$P_D = \frac{M_D \cdot n}{9550} \tag{3-17}$$

$$P_D = \frac{M_D \times n}{9550} = \frac{137 \times 1300}{9550} = 18.6 \text{kw}$$

第 4 章 轧机机架的设计

4.1 轧机的类型

轧钢机机架是工作机座的重要部件，轧辊轴承座及轧辊调整装置等都安装在机架上。机架要承受全部轧制力，必须有足够的强度和刚度。

根据轧钢机架结构不同，轧钢机机架分为闭式和开式两种^[17]。

（1）闭式机架

如图 4.1 所示，闭式机架是一个将上下横梁与立柱铸成一体的封闭式整体框架，具有较强的强度和刚度，但换辊不便。它常用在受力大或要求轧件精度高而不经常换辊的轧钢，如轧制力较大的轧机、板坯轧机和板带轧机等。对于板带轧机来说，为提高轧制精度，需要较高的机架刚度。采用闭式机架的工作机座，在换辊时，轧辊是沿其轴线方向从机架窗口中抽出或装入，这种轧机一般都设有专用的换辊装置。

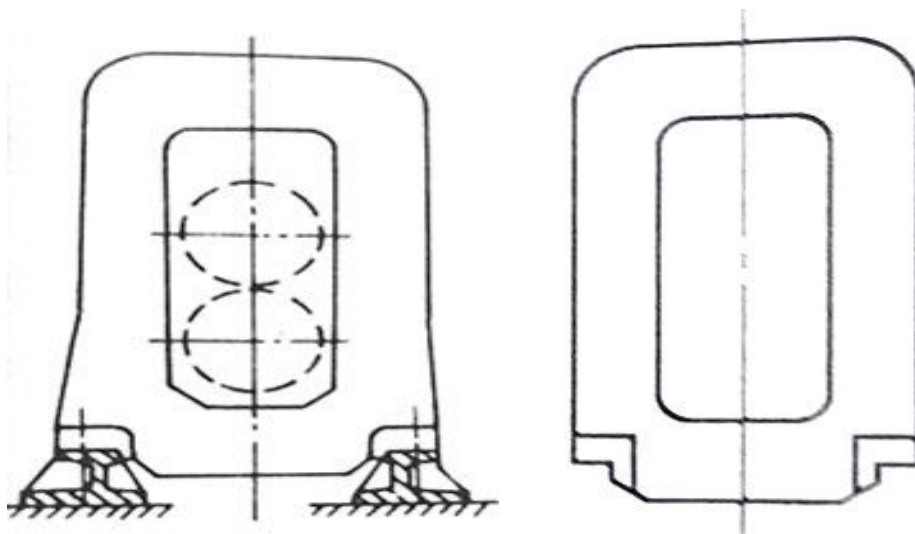


图 4.1 闭式机架结构及简图

（2）开式机架

开式机架由机架本体和上盖两部分组成，如图 4.2，它主要用在横列式型钢轧机上，其主要优点是换辊方便。因为，在横列式型钢轧机上如果采用闭式机架，由于受到相邻机座和连接轴的妨碍，沿轧辊轴线方向换辊是很困难得。采用开式机架，只要拆下上盖，就可以很方便地将轧辊从上面吊出或装入。开式机架主要缺点是刚度较差。影响开式机架刚度和换辊速度的主要关键是上盖与 U 型架体的连接方式。常见的上盖连接方式有四

种。

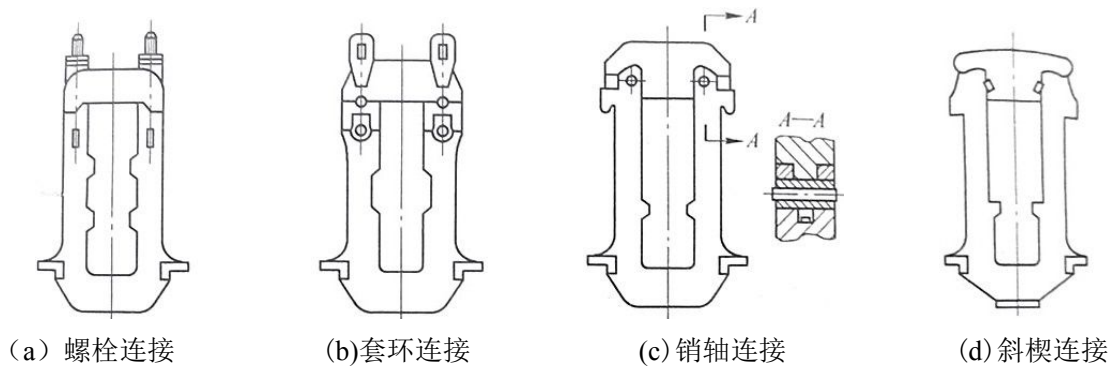


图 4.2 机架上盖连接方式

因机架重量大、制造复杂，一般给予很大的安全系数，并作为永久使用的不更换零件来设计。本次设计中选用闭式机架。

4.2 机架的主要结构参数

4.2.1 机架的基本尺寸

机架的主要结构参数是窗口宽度、窗口高度和立柱端面尺寸^[18]。

(1) 机架窗口高度 H

机架窗口高度 H 与轧辊数目、辊身直径、辊颈直径，轴承、轴承座径向厚度，以及上辊的调整距离等因素有关。主要根据轧辊最大开口度、压下螺丝最小伸出端，以及换辊等要求确定。

对于四辊轧机可取

$$H = (2.6 \sim 3.5)(D_1 + D_2) = (2.6 \sim 3.5)(180 + 450) = 1638 \sim 2205\text{mm}$$

式中： D_1, D_2 —工作辊、支承辊直径，mm；取 $H=2188\text{mm}$ 。

(2) 机架窗口宽度 B

在闭式机架中，机架窗口应稍大于轧辊最大直径，以便于换辊。四辊轧机机架窗口宽度一般为支承辊直径的 1.15~1.30 倍。

$$B = (1.15 \sim 1.30)D_2 = (1.15 \sim 1.30) \times 450 = 517.5 \sim 585\text{mm}$$

为换辊方便，换辊侧的机架窗口应比传动侧窗口宽 5~10mm，亦可表示为

$$B = B_z + 2s = 580 + 2 \times 20 = 620\text{mm}$$

式中： B —机架窗口宽度；

D_2 —支承辊直径，mm；

B_z —支承辊轴承座宽度，mm，取 $B_z=580\text{mm}$ ；

s —窗口滑板厚度，mm，一般 $s=20\sim 40\text{mm}$ ，取 $s=20$ 。

(3) 机架端面尺寸

机架立柱的端面尺寸是根据轧钢机类型、强度条件、机架受力特点等确定的。

查轧钢机械第三版表 5-1 得：四辊轧机机架立柱断面积与轧辊颈平方的比值：

$$\frac{F}{d^2} = 1.2 \sim 1.6 \tag{4-1}$$

则四辊轧机机架端面面积

$$F = (1.2 \sim 1.6) \times 240^2 = 69120 \sim 92160\text{mm}^2$$

对于四辊轧机，可选惯性矩较小的近似正方形断面。实际上，一般都是选择断面尺寸小的矩形断面，这对于减轻机架的重量是有利的。

所以根据经验值取端面尺寸为 $272\text{mm} \times 272\text{mm}$ 。

$$F = 272 \times 272 = 73984\text{mm}^2$$

机架结构简图如图 4.3：

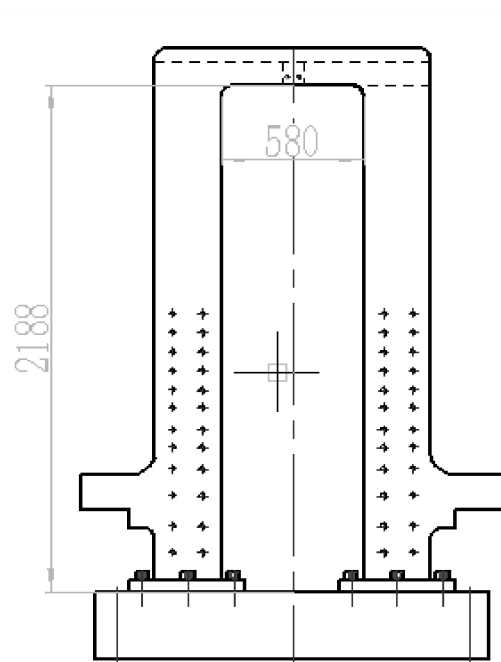


图 4.3 机架结构简图

4.2.2 机架的材料和许用应力

轧钢机机架一般采用含碳量为 0.25%~0.35% 的 ZG270~500，其强度极限 $\sigma_b=500\sim600\text{MPa}$ ，延伸率 $\delta_s=12\%\sim16\%$ 。ZG270~500 是大型铸钢件生产中最常用的碳素铸钢，具有较好的铸造性和焊接性，但易产生较大的铸造应力引起热裂，广泛应用于轧钢、锻压、矿山等设备，如轧钢机机架、辊道架、连轧机轨座、坯扎机立辊机架及板带轧机机架等^[19]。

由于机架是轧机中最贵重和最重要的零件，必须具有较大的强度储备。一般机架的安全系数为 $m=12.5\sim15$ ；对于 ZG270—500 来说，许用应力 $[\sigma]$ 采用以下数值：

对于横梁 $[\sigma] \leq 50 \sim 70\text{MPa}$ ；

对于立柱 $[\sigma] \leq 40 \sim 50\text{MPa}$ ；

为了防止机架在过载时破坏，在轧辊断裂时机架要不产生塑性变形。根据这一要求，机架的安全系数为

$$n_j > n_g \frac{\sigma_b}{\sigma_s} \quad (4-2)$$

式中： n_j —机架的安全系数；

n_g —轧辊的安全系数；

σ_b —机架材料的强度极限；

σ_s —机架材料的屈服极限。

在一般情况下，材料的强度极限与屈服极限的比值近似为 2，为了安全起见，可将机架安全系数取为：

$$n_j = (2 \sim 2.5)n_g$$

当轧辊安全系数 n_g 取为 5 时，机架的安全系数 n_j 为 10~12.5。

安全系数的大小直接反应了轧机机架的承载能力的大小，安全系数越大，说明机架的承载能力越大，这时，轧机所能承受的轧制力越大。

4.2.3 机架强度和变形计算

1. 机架强度计算

轧钢机机架强度和变形的计算，一般可采用如下步骤：

（1）将机架结构图简化成为平面刚架，可取出工作机架横梁和立柱的轴线，把机架按长方形框架处理。也可近似地处理成直线或规整的圆弧线断，并确定求解断面的位置。

（2）确定静不定阶数，如一般闭式机架是三次静不定问题，需作一系列假设来简化模型，降低静不定阶数。

（3）确定外力的大小及作用点。

（4）根据变形协调条件，用材料力学中任一种方法（卡式定理，莫尔积分法，图乘法，力法等）求解静不定力和力矩。

（5）根据计算截面的面积、惯性矩、中性轴线的位置及承载情况，求出应力和变形。

用材料力学方法计算时，为了简化计算，一般做以下假设^[20]：

1) 每片机架只在上下横梁的中间端面处受有垂直力 R ，而且这两个力大小相等、方向相反，作用在同一直线上，即机架的外负荷是对称的。此时，机架没有倾翻力矩，机架底脚不受力。应该指出，由于两个轧辊直径和速度的不同、轧制速度的变化和咬入时冲击引起的惯性力，或在张力轧制时，轧制力方向都不是垂直的。由于水平分力的数值一般都较小，约为垂直分力的 3%~4%，故可以忽略不计。只有当水平分力较大时（例如，超过垂直分力的 15%），则应考虑水平分力的影响。

2) 机架结构对窗口的垂直中心线是对称的，而且不考虑由于上下横梁惯性矩不同所引起的水平内力。

3) 上下横梁和立柱交界处（转角处）是刚性的（一般机架转角处的刚性都是比较大的），即机架变形后，机架转角仍保持不变。

轧机的轧制力大部分作用在机架上，因此，对于机架的强度有很大的要求，必须要选择合适的材料作为轧机机架，同时还要进行静力矩的计算和倾翻力的计算。图 4.4 为矩形自由框架弯曲力矩图。

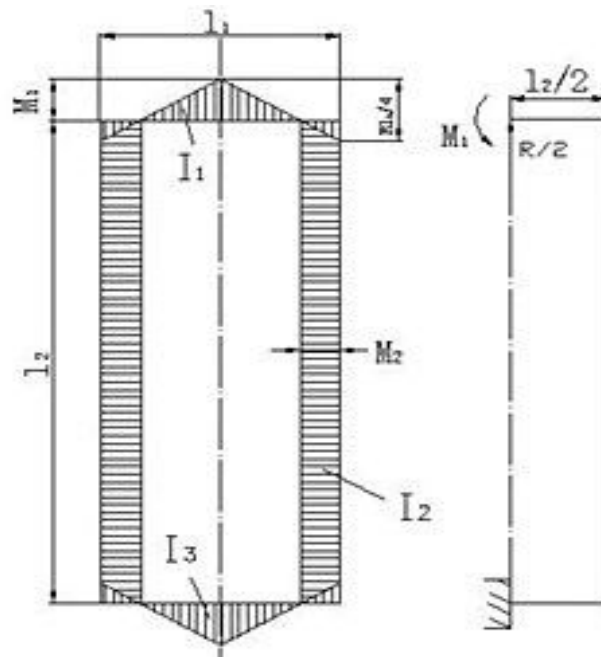


图 4.4 矩形自由框架弯曲力矩图

$$R = \frac{P}{2} = \frac{343.5}{2} \text{KN} = 171.75 \text{KN} \approx 172 \text{KN}$$

静不定力矩：

$$M_1 = \frac{Rl_1}{4} \times \frac{\frac{l_1}{4I_1} + \frac{l_2}{I_2} + \frac{l_3}{4I_3}}{\frac{l_1}{2I_1} + \frac{l_2}{I_2} + \frac{l_3}{2I_3}} \quad (4-3)$$

式中： l_1 ——机架横梁的中性线长度；

l_2 ——机架立柱的中性线长度；

I_1 ——机架上横梁的断面惯性矩；

I_2 ——机架立柱的断面惯性矩；

I_3 ——机架下横梁的断面惯性矩。

假设上下衡量惯性矩相同，即 $I_1 = I_3$ 时，则力矩 M_1 为：

$$M_1 = \frac{Rl_1}{4} \times \frac{\frac{l_1}{2I_1} + \frac{l_2}{I_2}}{\frac{l_1}{I_1} + \frac{l_2}{I_2}} \quad (4-4)$$

其中：（矩形截面 $I = \frac{bh^3}{12}$ ）

$$I_1 = I_3 = \frac{272 \times 450^3}{12} = 2.06 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = \frac{272 \times 272^3}{12} = 4.56 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

则经计算得：

$$M_1 = \frac{172 \times 852}{4} \times \frac{\frac{852}{2 \times 2.06 \times 10^9} + \frac{2188}{4.56 \times 10^8}}{\frac{852}{2.06 \times 10^9} + \frac{2188}{4.56 \times 10^8}} = 18318 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

立柱上的弯矩：

$$M_2 = \frac{Rl_1}{4} - M_1 = \frac{172 \times 852}{4} - 18318 = 18318 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

由上可知，减小立柱的惯性矩 I_2 和增加横梁的惯性矩 I_1 可以部分地减少立柱中的弯矩 M_2 ，这对于减轻窄而高的机架重量是有利的。

危险截面应力：（ $w = \frac{bh^2}{6}$ ）

上下横梁最大弯曲应力：

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_1} = \frac{18318}{\frac{272}{6} \times 450^2} = 0.002 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

立柱的拉弯应力：

$$\sigma_2 = \frac{R}{2F} + \frac{M_2}{W_2} = \frac{172}{2 \times 73984} + \frac{18318}{\frac{282}{6} \times 272^2} = 0.0064 \text{ kN} / \text{mm}^2$$

对于机架，安全系数一般不小于 10。

而对于 ZG270~500，横梁的许用应力 $[\sigma_1] = 5 \sim 7 \text{ kg} / \text{mm}^2$ ，立柱的许用应力 $[\sigma_2] = 4 \sim 5 \text{ kg} / \text{mm}^2$ 。 $[\sigma_1] > \sigma_1$ 、 $[\sigma_2] > \sigma_2$ 故机架强度足够。

2、机架变形计算

机架在垂直方向的变形是由横梁变形和立柱拉伸变形 f_3'' 两部分组成的，由于横梁的端面尺寸较横梁的长度来说是较大的，所以横梁变形又包括由弯曲力矩 f_3' 所引起的变

形和由切力 f_3'' 引起的变形两项。

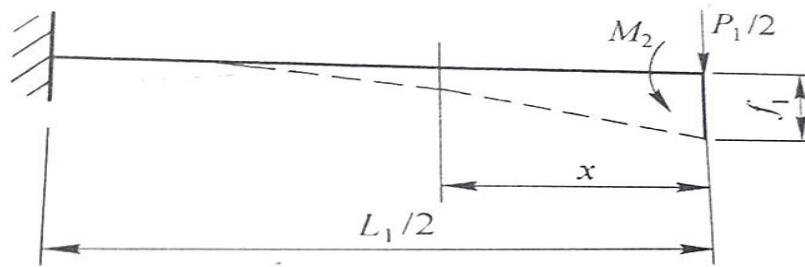


图 4.5 机架横梁的等效悬臂梁

机架的弹性变形是由横梁的弯曲和立柱的拉伸变形组成的。在计算横梁的弯曲变形时，应考虑横向切力的影响，即

$$f_3 = f_3' + f_3'' + f_3''' \tag{4-5}$$

式中： f_3 ——机架的弹性变形；

f_3' ——由弯矩产生的横梁弯曲变形；

f_3'' ——由切力产生的横梁弯曲变形；

f_3''' ——由拉力产生的立柱拉伸变形。

图 4.6 是闭式机架的横梁受力图

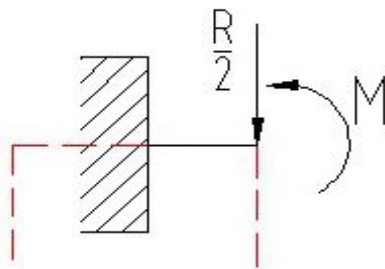


图 4.6 闭式机架的横梁受力

根据卡氏定理，由弯矩产生的两个横梁的弯曲变形为：

$$f_3' = \frac{l_1^2}{EI_1} \left(\frac{Rl_1}{24} - \frac{M_2}{4} \right) \tag{4-6}$$

式中： E ——机架材料的弹性模数， $E = 2.1 \times 10^6 \text{ MPa}$ ；

I_1 ——横梁的惯性矩；

l_1 —横梁中性轴的长度；

R —横梁上的作用力，对于轧钢机，一般 R 为轧制力的一半，即 $R = \frac{P}{2}$ ；

M_2 —机架立柱中的力矩。

$$\text{所以 } f_3' = \frac{272^2}{2.1 \times 10^3 \times 2.06 \times 10^9} \times \left(\frac{172 \times 272}{24} - \frac{18318}{4} \right) \text{mm} = 4.50 \times 10^{-5} \text{mm}$$

$$f_3'' = K \frac{Rl_1}{2GF_1} \quad (4-7)$$

式中： G —机架材料的剪切弹性模数，取 $G = 8.1 \times 10^4 \text{MPa}$ ；

F_1 —横梁的端面面积；

K —横梁的端面形状系数，对于矩形端面，系数 K 为 1.2。

$$\text{所以 } f_3'' = 1.2 \times \frac{172 \times 272}{2 \times 81 \times (272 \times 450)} \text{mm} = 2.8 \times 10^{-3} \text{mm}$$

$$f_3''' = \frac{Rl_2}{2EF_2} \quad (4-7)$$

式中， l_2 —立柱中性轴的长度；

F_2 —立柱的端面面积。

$$\text{所以 } f_3''' = \frac{172 \times 272}{2 \times 2.1 \times 10^3 \times 73984} = 1.51 \times 10^{-4} \text{mm}$$

机架的弹性变形

$$f_3 = 4.5 \times 10^{-5} + 2.8 \times 10^{-3} + 1.51 \times 10^{-4} = 0.003 \text{mm}$$

而对于钢板轧机，机架的允许变形 $[f_3]$ 为 0.4~0.5mm（冷轧机），故机架刚度满足要求。

3、机架的倾翻力矩计算

在轧制过程中，工作机架的倾翻力矩通常由两部分组成，即

$$M_Q = M_d + M_h \quad (4-8)$$

式中： M_Q —机架总倾翻力矩；

M_d —传动系统加于机架上的倾翻力矩（在正常轧制情况下 $M_d = 0$ ）；

M_h —水平力引起的倾翻力矩。

如图 4.7 所示，水平力 Q 引起的倾翻力矩为：

$$M_k = Q \times c \tag{4-9}$$

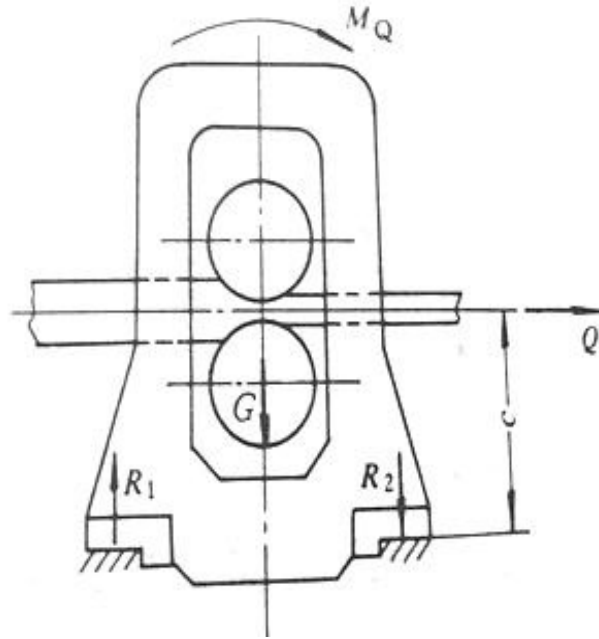


图 4.7 水平力 Q 引起的倾翻力矩

式中： c —轧制中心线至轧制机座的距离。

由轧制速度的变化使轧件产生的惯性力，前、后张力差，以及在穿孔机上顶杆的作用力，都会在轧件上作用水平力。

在一般情况下，水平力 Q 是随着各种轧制工艺条件的改变而变化的，其最大值可按下式计算

$$Q_{\max} = \frac{2M_R}{D} \tag{4-10}$$

故
$$M_{h\max} = \frac{2M_R}{D} c \tag{4-11}$$

式中： M_R —工作辊传动支承辊的力矩；

D —轧辊直径。

则
$$M_Q = M_{k\max} = \frac{2 \times 852 \times 10^3}{180} \times 1135 = 1.07 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}。$$

第 5 章 轧机工作机座的其他部分

5.1 压下装置的结构形式

压下装置目前就驱动方式而言有手动的、电动的和液压的三种结构型式。

1) 手动压下

其优点是结构简单，价格低。其缺点是体力劳动繁琐，压下速度和压下能力较小。

2) 电动压下

电动压下是最常用的上辊调整装置。是电动机通过圆柱齿轮减速箱和涡轮减速箱传递运动的，它可以用于所有的轧机上，如初轧机、板坯轧机、冷板带轧机等。其优点是移动距离可达较大的数值，压下能力较大，缺点是结构复杂、反应时间较慢、效率较低。

压下装置的结构在很大程度上与轧辊的调整速度、调整距离、调整频率、和调整精度有关。按照压下速度的大小，电动压下装置可分为快速压下装置和慢速压下装置两大类。

（1）快速压下装置

由于其压下速度一般大于 1mm/s，故称为快速压下装置。这类压下装置多用在初轧机、板坯轧机、中厚板轧机、连轧机组的可逆式粗轧机上。其工艺特点是：

- 1) 工作时要求大行程、快速和频繁的升降轧辊。
- 2) 轧辊调整时，不“带钢”压下，即不带轧制负荷压下。

（2）慢速压下装置

这类装置通常用在热轧或冷轧薄板和带钢轧机上，其轧制速度很高。轧制精度要求也高。所以这类压下装置具有以下特点：

- 1) 较小的轧辊调整量与较高的调整精度；
- 2) 带钢压下；
- 3) 必须动作快，灵敏度高；
- 4) 轧辊平行度的调整要求严格。

3) 液压压下

液压压下装置是用液压缸代替传统的压下螺丝、螺母来调整轧辊辊缝的。在这一装置中，除液压缸外，还有与之配套的伺服阀、液压系统及检测仪表及运算控制系统。与

电动压下装置相比较，液压压下装置有如下特点：

- 1) 快速响应性好，调整精度高；
- 2) 过载保护简单、可靠；
- 3) 机械传动效率高；
- 4) 便于快速换辊，提高轧机作业率；
- 5) 采用标准液压元件，简化了机械结构，消耗的功率小，效率高。

综合以上原则，本设计选择液压压下装置^[21]。

5.2 轧辊轴承及轴承座

5.2.1 轴承的特点

轧辊轴承用来支承转动的轧辊，并保持轧辊在机架中正确的位置。轧辊轴承与一般轴承的工作条件差别很大，其特点：

- 1、承受能力很高，这是因为轴承受外围尺寸的限制和在较短的辊颈内可用很大的许用应力所决定的；
- 2、运转速度差别大；
- 3、工作环境恶劣。

轧辊轴承的性能与摩擦功率的损耗成正比，表征了轴承的发热率。其主要形式是滚动轴承与滑动轴承。滚动轴承主要是用双列球面滚子轴承，四列圆锥滚子轴承。在某些情况下，由于受轧辊轴承尺寸的限制，可采用滚针轴承。板带轧机上多用滚动轴承。

本方案中支承辊采用四列圆柱滚子轴承，工作辊采用四列圆柱滚子轴承与推理轴承相结合，轴承座采用自行设计的闭式轴承座。

5.2.2 轴承寿命计算

根据轧辊尺寸选择合适的轴承型号，轴承寿命计算方法如下^[22]：

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^\epsilon \quad (5-1)$$

式中 L_h —以小时计算的轴承额定寿命， h ；

n —轴承的转速， r/min ；

C —轴承额定动负荷, N , 由轴承样本查得;

ε —寿命指数, 对于球轴承 $\varepsilon = 3$, 对于滚子轴承 $\varepsilon = \frac{10}{3}$;

P —当量动负荷, N 。

当量动负荷可由下式求得:

$$P = (XF_r + YF_a)f_F F_T \quad (5-2)$$

式中 X —径向系数, 根据 F_a / F_r 的比值由轴承样本查;

Y —轴向系数, 由轴承样本查的;

F_a —轴承轴向负荷, N ;

F_r —轴承径向负荷, N ;

f_F —负荷系数, 由于工作中的振动, 冲击和轴承负荷不均等许多因素的影响, 轴承实际负荷要比计算负荷大, 根据工作情况以确定负荷系数。板带轧机的 f_F 值推荐如下:

下: 1) 热轧机 $f_F = 1.5 \sim 1.8$; 2) 冷轧机 $f_F = 1.2 \sim 1.5$;

F_T —温度系数, 轧辊轴承一般只能在低于 100°C 下工作, 所以 $F_T = 1$ 。需要轴承在高温条件下工作时, 应向轴承厂提出要求, 对于高温轴承可查轴承样本得到^[6]。

板带轧机轴向负荷较小, 在计算时可大致取轴向负荷等于轧辊上平均压力的 2%-10%。当计算多列圆柱滚子轴承时, 取轴向负荷等于零, 其轴向负荷有专门的止推轴承承受^[6]。当量动负荷计算如下:

$$P = f_F F_r \quad (5-3)$$

当计算多列圆柱轴承配套使用的止推轴承时, 取径向负荷等于零, 当量动负荷计算式为:

$$P = f_F F_a \quad (5-4)$$

对于二辊和四辊带材轧机, 一端轴承所承受的径向负荷为轧制压力的一半:

$$F_r = \frac{P_z}{2} \quad (5-5)$$

计算过程如下:

上工作辊轴承转速 $n=180\text{r/min}$ ，额定动负荷 $C=335\text{kN}$ ，寿命系数 $\varepsilon = \frac{10}{3}$ ，轧制压力 $P=343.5\text{kN}$ ，带入式 (5-5) (5-3)，(5-1) 得：

$$\text{径向力 } F_r = \frac{P_z}{2} = \frac{343.5}{2} \text{ kN} = 171.8 \text{ kN}，\text{取 } f_F = 1.2，\text{则}$$

$$P = f_F F_r = 1.2 \times 171.8 \text{ kN} = 206 \text{ kN}，\text{则轴承寿命为：}$$

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^\varepsilon = \frac{10^6}{60 \times 180} \left(\frac{335}{206} \right)^{\frac{10}{3}} = 486 \text{ h}；$$

下工作辊转速为 $n=212\text{r/min}$ ，则寿命为：

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^\varepsilon = \frac{10^6}{60 \times 212} \left(\frac{335}{206} \right)^{\frac{10}{3}} = 413 \text{ h}；$$

上支承辊转速为 $n=72\text{r/min}$ ， $C=1780\text{kN}$ ，则轴承寿命为：

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^\varepsilon = \frac{10^6}{60 \times 72} \left(\frac{1780}{206} \right)^{\frac{10}{3}} = 285194 \text{ h}；$$

下支承辊转速为 $n=85.2\text{r/min}$ ， $C=1780\text{kN}$ ，轴承寿命为：

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^\varepsilon = \frac{10^6}{60 \times 85.2} \left(\frac{1780}{206} \right)^{\frac{10}{3}} = 241009 \text{ h}。$$

5.3 轧辊平衡装置

平衡装置的作用是消除轧制系统间隙，避免冲击。提升上轧辊，用来大大降低咬入轧件时的冲击和工作辊的频繁换辊。上辊平衡装置有重锤平衡、弹簧平衡、液压平衡三种形式。现在在小型冷轧机上，广泛使用液压平衡装置，它是由液压缸产生的推力来进行工作的。液压平衡优点是结构紧凑，工作灵敏度高，平衡效果好。本设计方案选择四个安装在工作辊轴承座上的平衡液压缸来实现工作辊的平衡和提升^[19-20]。工作辊平衡装置如图 5.1 所示。

用于抬升上辊和防止轧件进出轧辊时受冲击的装置。形式有：弹簧式、多用在型材轧机上；重锤式，常用在轧辊移动量大的初轧机上；液压式，多用在四辊板带轧机上。

为提高作业率，要求轧机换辊迅速、方便。换辊方式有 C 形钩式、套筒式、小车式和整机架换辊式四种。用前两种方式换辊靠吊车辅助操作，而整机架换辊需有两套机架，此法多用于小的轧机。小车换辊适合于大的轧机，有利于自动化。目前，轧机上均

采用快速自动换辊装置，换一次轧辊只需 5 ~ 8 分钟。

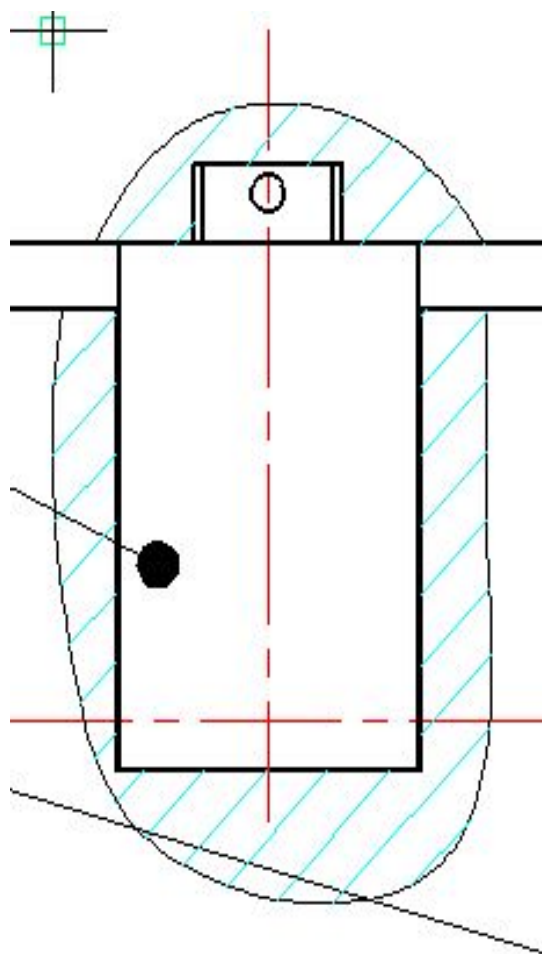


图 5.1 四辊轧机工作辊平衡装置

5.4 联轴器

万向联轴器利用其机构的特点，使两轴不在同一轴线，存在轴线夹角的情况下能实现所联接的两轴连续回转，并可靠地传递转矩和运动。万向联轴器最大的特点是：其结构有较大的角向补偿能力，结构紧凑，传动效率高。不同结构型式万向联轴器两轴线夹角不相同，一般在 $5^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间。

5.4.1 轧机万向联轴器的缺点

轧机的传动是通过十字万向联接轴连接减速机和轧机。在减速机和轧机之间距离长达2米，并形成梅花轴和梅花套等关节。万向联轴器自身重量大，当轧机运转速度较快时，偏心力矩也大；加上关节太多、传动距离长，在主传动系统上引发和出现了如下一些故障和弊端：

- 1)托架本体上对称平衡连杆机构的连杆销子容易磨损，连杆调整较难。调整后由于冲击大，拉杆不能锁死，只能靠焊接固定拉杆，以保持调整后的状态，几次调整后拉杆失效不能满足 $\Delta h=0$ ，调整失效而造成托架剧烈振动；
- 2)大大缩短了减速箱齿轮、轴承和轧辊以及轧辊轴承的正常使用寿命；
- 3)造成现用轧机托架轴承座抖动严重、轴承容易烧损和托架。

5.4.2 万向联轴器的选择

具体选择时可考虑以下几点：

绝大多数联轴器均已标准化或规格化。设计者的任务是选用，而不是设计。选用联轴器的基本步骤如下：根据传递载荷的大小，轴转速的高低，被联接两部件的安装精度等，参考各类联轴器特性，选择一种合用的联轴器类型^[17]。

1)所需传递的转矩大小和性质以及对缓冲减振功能的要求。例如，对大功率的重载传动，可选用齿式联轴器；对严重冲击载荷或要求消除轴系扭转振动的传动，可选用轮胎式联轴器等具有高弹性的联轴器。

2)联轴器的工作转速高低和引起的离心力大小。对于高速传动轴，应选用平衡精度高的联轴器，例如膜片联轴器等，而不宜选用存在偏心的滑块联轴器等。

3)两轴相对位移的大小和方向。当安装调整后，难以保持两轴严格精确对中，或工作过程中两轴将产生较大的附加相对位移时，应选用挠性联轴器。例如当径向位移较大时，可选滑块联轴器，角位移较大或相交两轴的联接可选用万向联轴器等。

4) 联轴器的可靠性和工作环境。通常由金属元件制成的不需润滑的联轴器比较可靠；需要润滑的联轴器，其性能易受润滑完善程度的影响，且可能污染环境。含有橡胶等非金属元件的联轴器对温度、腐蚀性介质及强光等比较敏感，而且容易老化。

5) 由于制造、安装、受载变形和温度变化等原因，当安装调整后，难以保持两轴严格精确对中。存在一定程度的 X、Y 方向位移和偏斜角。当径向位移较大时，可选滑块联轴器，角位移较大或相交两轴的联接可选用万向联轴器等。当工作过程中两轴产生较大的附加相对位移时，应选用挠性联轴器。

万向联轴器的计算转矩： $T_c = T \cdot K_n \cdot K_h \cdot K \cdot K_a \leq T_n (N \cdot m)$ ；

交变载荷时： $T_c \leq T_f (N \cdot m)$ ；

式中 T_n ——万向联轴器的公称转矩， $N \cdot m$ ，（它是在给定条件下的理论计算数值，即联轴器转速， $n \approx 10 r/min$ 。轴承寿命 $L_n = 5000 h$ 、轴线折角为 3° 、载荷平稳时的数值）；

T_f ——万向联轴器的疲劳转矩， $N \cdot m$ ；

T ——万向联轴器的理论转矩， $N \cdot m$ ；其中 $T = 9550 P_w / N (N \cdot m)$ ；

P_w ——驱动功率， kw ；

N ——万向联轴器转速， r/min ；

K_n ——万向联轴器的转速修正系数；

K_h ——万向联轴器的轴承寿命修正系数；

K ——万向联轴器的两轴线折角修正系数；

K_a ——载荷修正系数。载荷均匀，工作平稳时， $K_a = 1.0$ ；载荷不均匀，中等冲击时， $K_a = 1.1 \sim 1.3$ ；较大冲击载荷和频繁正反转时， $K_a = 1.3 \sim 1.5$ ，特大冲击载荷和频繁正反转时 $K_a > 1.5$ 。

对于转速高、折角大或其长度超出规定的万向联轴器，除按上述计算处，还必须验算其转动灵活性，转动灵活性用 n 表示，一般情况下： $n > 18000$ 。

式中万向联轴器的轴线折角单位为(°)；

n ——万向联轴器的转速，r/min。

标准 BH 型联轴器如图 5.2 所示：

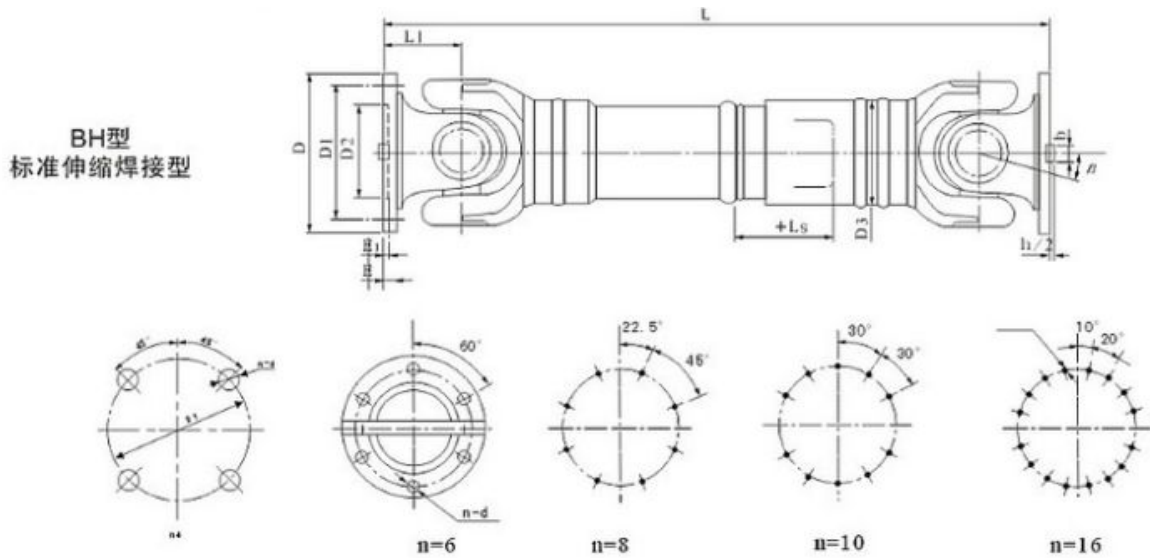
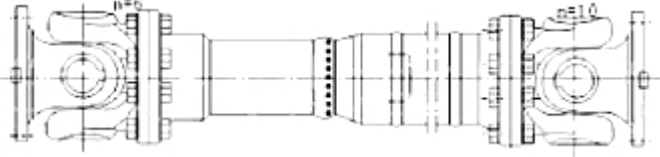
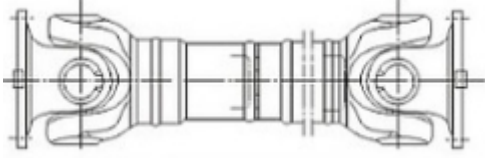
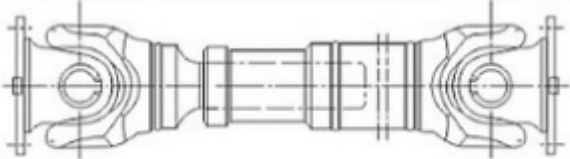
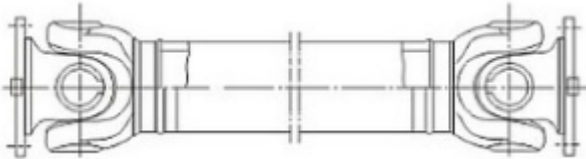
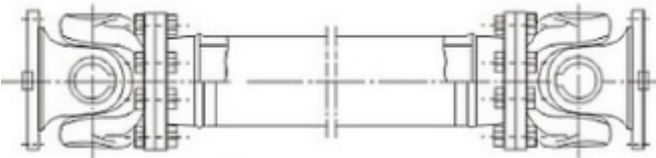
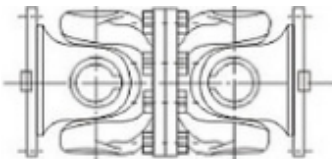


图 5.2 BH 标准伸缩焊接型联轴器

万向联轴器由于其偏差角度大，传递扭矩高等特点，被广泛应用于各类通用机械场合。万向联轴器常见类型有：通用型，高转速型微型可伸缩，大扭矩万向联轴器等诸多类型。WS，WSD 小型十字轴万向联轴器适用于联接两轴轴线夹角 $\beta \leq 45^\circ$ 的传动轴系；传递公称转矩 11.2~1120N·m 的单十字轴万向联轴器和双十字轴万向联轴器。

万向联轴器适用于联结空间同一平面上两轴轴线夹角 $\beta \leq 45^\circ$ 的传动场合，传递公称转矩 11.2~120N.m。WSD 型为单十字万向联轴器，WS 型为双十字万向联轴器每节最大轴间夹角 45° 。成品孔 H7，可根据要求开键槽六方孔和四方孔，允许两轴间夹角在限定的范围内随工作需要而改变。万向联轴器的找正是机器安装的重要工作之一。找正的目的在于机器在工作时使主动轴和从动轴两轴中心线在同一直线上。找正的精度关系到机器是否能正常运转，对高速运转的机器尤其重要。十字万向联轴器两轴绝对准确的对中是难以达到的，对连续运转的机器要求始终保持准确的对中就困难。十字万向联轴器各零部件的不均匀热膨胀，轴的挠曲，轴承的不均匀磨损，机器产生的位移及基础的不均匀下沉等，都是造成不易保持轴对中的原因。因此，在设计机器时规定两轴中心有一个允许偏差值，这也是安装联轴器时所需要的。各类万向联轴器型号如表 5.1。

表 5.1 各类万向联轴器

序号	型式代号	图示
1	BF	型标准伸缩法兰型 
2	DH	短伸缩焊接型：  长伸缩焊接型： 
3	CH	无伸缩焊接型： 
4	WH	无伸缩法兰型： 
5	WF	无伸缩短型： 
6	WD	

5.5 液压弯辊装置

根据弯曲对象和施加弯辊力的部位的不同，可分为工作辊弯曲和支承辊弯曲两种形式。每种方式又有正弯曲和负弯曲两种^[23]。

工作辊正弯是将液压缸安放在工作辊轴承座之间，与工作辊平衡液压缸相类似，弯曲力所产生的工作辊挠度，使轧制力作用于工作辊时挠度减小。调整弯辊力的大小可改变 f_b 的值，达到调节辊型的目的。其优点是结构简单，弯辊缸可安放在平衡缸的位置上，同时起平衡缸的作用。

工作辊负弯是将液压缸安放在工作辊轴承座和支承辊轴承座之间，弯曲力所产生的工作辊挠度使轧制力作用在工作辊的挠度增大，增减弯辊力，同样能改变工作辊的挠度 f_b ，达到调节辊型的目的。其优缺点与工作辊正弯恰好相反。由于负弯辊力对于工作辊和支承辊来说相当于内力，故在调节弯辊力时不影响压下负荷，因此对压下系统的影响很小。

不管工作辊正弯还是负弯，都会加大工作辊辊颈和轴承的负荷，降低承载能力和寿命。

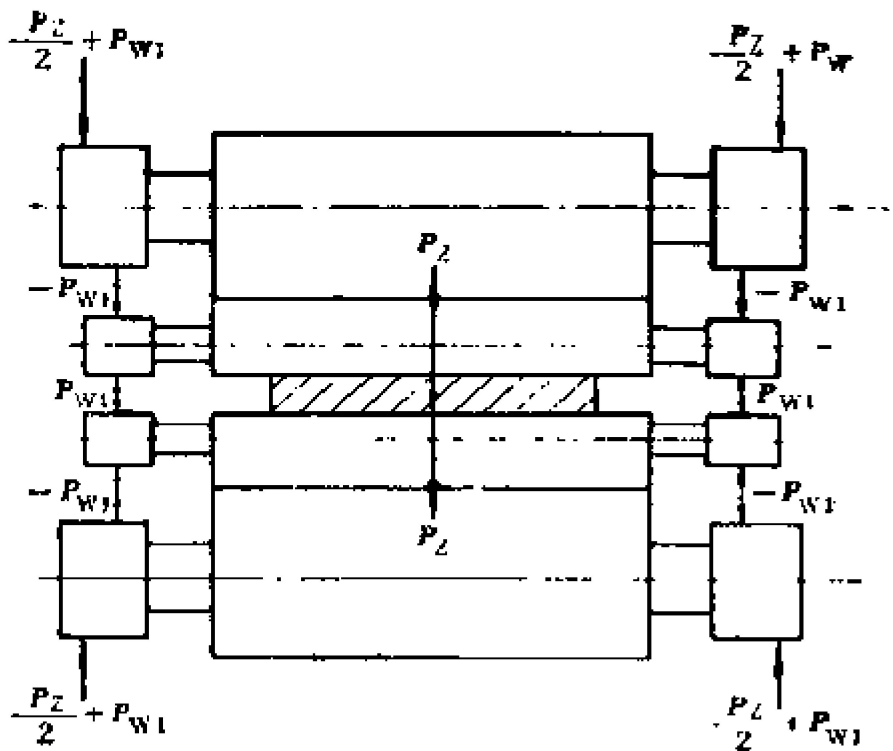


图 5.3 工作辊弯曲辊型调节示意图

当采用正弯工作辊时，支承辊辊身边缘处可磨成一定的锥度，这样可大大降低工作辊和支承辊辊身之间的接触应力和工作辊辊颈的应力，增加轧辊表面接触和工作辊辊颈的疲劳寿命同时增大弯辊效果，减小所需的弯辊力。

综上所述，采用工作辊正弯的方法比较好，工作辊负弯的方法次之，最好是两种方法同时采用，这样可扩大辊型的调节范围，甚至可以采用一种辊型或圆柱形辊面的工作辊来轧制不同规格的带材。本文采用工作辊正弯的方法。在两个工作辊之间安放四个液压缸，同时起到弯辊和平衡的作用。

结论

钢材轧制（轧钢）是金属压力加工的重要组成部分。由于这一生产方式具有生产效率高、品种多等优点，已成为钢材生产的主要方式。目前 85%—90%以上的钢材采用这一生产方式。

大型机架由于其体积庞大,通常整体铸造成形,而后对窗口部分进行机械加工的方法成形,铸造成形是大型轧机机架生产过程中最基础和最重要的工序。由两片“牌坊”组成以安装轧辊轴承座和轧辊调整装置,需有足够的强度和刚度承受轧制力。

异步轧制相对于常规轧制有诸多优点:采用异步轧制可以大大地降低轧制力,所以设备重量轻,能耗低,轧机变形小,产品精度高;减少了轧辊的磨损和中间退火,降低了生产费用;轧制道次少,生产率高;轧机可轧厚度大。异步轧制不但适用于冷轧板带,并且可以用于热轧板等,是一项很有发展前途的生产工艺。异步轧制的不足主要是容易引起轧机震颤。

本次设计的题目是薄板异步轧机的设计,本次设计主要完成了以下几个方面的工作:

- 1.整体设计结构方案的选择;
- 2.机架的结构尺寸设计;
- 3.压下装置的选择设计;
- 4.轧辊的设计;
- 5.平衡装置的设计;
- 6.轴承座的设计;
- 7.绘制二维图。

技术参数要求如下: 1.轧制材料: Q345;

2.轧辊尺寸: $\phi 180 / \phi 450 \times 500 \text{mm}$;

3.轧制速度: 下辊 2m/s, 上辊 1.7m/s;

4.轧制力矩: 1569kN.mm。

在设计中,主要计算了轧制力、驱动力矩、轧机主电动机功率、机架静强度、刚度等,并合理的完成轧机的整体设计。

参考文献

- [1] 孙蓟泉, 戴辉, 唐荻. 异步轧机技术发展概况及其应用前景[J], 鞍钢技术, 第5期, 2009.
- [2] Liu Gang, Liu Guilan, Qi Kemin, etc. Tertiary recrystallization in thin strips of grain oriented silicon steel produced by cross shear rolling [J], Chinese journal of Materials Research, 1998, 12(4): 431~433.
- [3] Shivpuri R, Chou P C, Lau C W. Finite element investigations of curling in non-symmetric rolling of flat stock[J], International Journal of Mechanical Sciences, 1988(9): 625-635.
- [4] 刘宝衍. 轧钢机械设备[M], 北京: 冶金工业出版社, 1984.6.
- [5] 邹家祥. 轧钢机械[M], 北京: 冶金工业出版社, 1988. 3: 84-88.
- [6] 施东成. 轧钢机械设计方法[M], 北京: 冶金工业出版社, 1990: 114-117.
- [7] 邹家祥. 轧钢机现代设计理论[M], 北京: 冶金工业出版社, 1989.10.
- [8] 施东成. 轧钢机械设计方法[M], 北京: 冶金工业出版社, 1990: 113-114.
- [9] 宋冀生, 王曼星. 轧制时摩擦系数的研究[J], 中南矿冶学院学报, 1980. 3.
- [10] 施东成. 轧钢机械设计方法[M], 北京: 冶金工业出版社, 1990: 56-58.
- [11] 邵晓蓉. 异步轧制条件下轧制力的计算[J], 内蒙古科技大学学报, Z1期, 1983: 143-148.
- [12] 朱泉. 异步轧制实验研究[J], 钢铁, 1980, 15:9-11.
- [13] 邹家祥. 轧钢机械[M], 北京: 冶金工业出版社, 1988. 3: 72-81.
- [14] 张杏耀, 付斌, 单爱国等. 异步轧制过程中的轧制压力研究[J], 上海应用技术学院学报, 2012, 12:3-4.
- [15] 赵正才. 异步轧制的最佳状态[J], 金属科学与工艺, 第4卷第4期, 1985. 12.
- [16] 施东成. 轧钢机械设计方法[M], 北京: 冶金工业出版社, 1990: 102-109.
- [17] 邹家祥. 轧钢机现代设计理论[M], 北京: 冶金工业出版社, 1989. 10.
- [18] 成大先. 机械设计手册[M], 第5版第4卷, 化学工业出版社, 1994. 4.
- [19] 任志俊, 薛国祥. 实用金属材料手册[M], 南京: 江苏科学技术出版社, 2007.9.
- [20] 邹家祥. 轧钢机现代设计理论[M], 北京: 冶金工业出版社, 1989. 10.
- [21] 何宜业. 板带轧机液压压下主要元件的选择及液压压下系统的计算[J], 鞍钢技术,

1982. 8: 19-29.

[22] 孙志礼, 马星国, 黄秋波等. 机械设计[M], 北京: 科学出版社, 2008. 3.

[23] 付孝良, 于风云. 异步轧制的综合论述[J], 铜加工论集, 1987.

致谢

毕业设计已经结束了，这意味着我们马上就要离开生活四年的大学，在这里我首先要感谢孔祥伟老师和兰亮云老师在毕业设计期间对我的耐心教导。在做毕业设计的过程中除了学到宝贵的理论知识，两位老师实事求是、严谨认真的工作作风和科研态度，使我受益匪浅。在毕业设计中两位老师丰富的理论知识使我学习到了很多，我会把这次毕业设计当成工作前的一次实习，以后更加努力，争取做的更好。

最后，再次感谢两位老师对我的帮助，并感谢机械学院教导过我的老师们，帮过我的同学们。

附录 1 英文原文

11.9 Synthesis

In this section, different techniques for the synthesis of various carbon nanostructures are summarized. Firstly, growth mechanism is explained briefly. Then the detailed introduction to each synthesis method of nanotubes, fullerenes, nanoballs and nanofibers will be shown. The most results summarized are almost appeared in the literature in the last 5 years, standing for the update proceeding of the synthesis of carbon nanostructures. There are many known ways to prepare carbon nanotubes. Generally speaking, carbon nanotubes are produced by three main techniques: arc discharge, laser ablation and chemical vapor deposition. Fullerenes are produced earlier by arc discharge, methods of benzene flame, sputtering and electron beam evaporation were developed a little later. Nanoballs are usually produced as outgrowth in the processes producing carbon nanotubes, so chemical vapor deposition can be described as the technique of production.

Nanofibers can be produced by traditional techniques, such as chemical vapor deposition et al, but we will mainly discuss new techniques such as “nanofiber seeding”, and ethanol flame. In the sequel the growth mechanism will be described.

11.9.1 Carbon Nanotubes

The growth mechanism of nanotubes is not well understood; different models exist, but some of them cannot unambiguously explain the mechanism. The metal or carbide particles seem to be necessary for the growth because they are often found at the tip inside the nanotube or also somewhere in the middle of the tube. In 1972 Baker et al. proposed a model of the growth of carbon fibers, which is shown in Fig. 11.22(a). It is suggested that acetylene decomposes at 600 °C on the top of a nickel cluster on the support. The dissolved carbon diffuses in the cluster, precipitates on the rear side and forms a fiber. The carbon diffuses through the cluster due to a thermal gradient formed by the heat release of the exothermic decomposition of acetylene. The activation energies for filament growth were in agreement to those for diffusion of carbon through the corresponding metal (Fe, Co, Cr). Oberlin et al. proposed a variation of this model. The fiber is formed by a catalytic process involving the surface diffusion of carbon around the metal particle, rather than by bulk diffusion of carbon through the catalytic cluster. In this model the cluster corresponds to a seed for the fiber nucleation (Fig. 11.22(b)). The metal cluster can have two roles: 1) acting as a catalyst for the dissociation of the carbon-bearing gas species; 2) carbon diffuses on the surface of the metal cluster or through the metal to form a nanotube. The most active metals are Fe, Co and Ni, which are good solvents for carbon (Kim et al. 2001). For SWCNT it is supposed that the nanoparticles have to be smaller than those for MWCNT (Dai et al. 1996), but this is in contradiction to the arc-discharge in which SWCNT grows radial from one bigger metal cluster (Saito 1995).

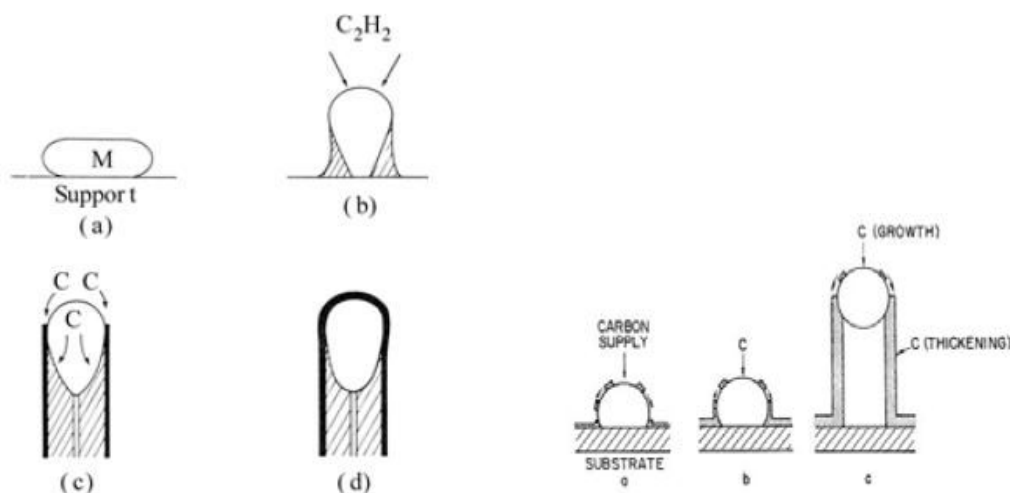


Fig. 11.22: Growth model of vapor grown carbon fibres; the metal cluster acts as a seed for the growth

11.9.2 Fullerenes

In recent years, attempts have been made both theoretically and experimentally in order to unveil the mystery of the growth mechanism of fullerene. Experiments on resistive evaporation of two carbon rods with different degrees of enrichment in ¹³C have revealed that the carbon vapor consists of smaller clusters before the process of fullerene formation starts (Ebbesen 1992). Further, experimental gas ion chromatography studies of the structure of carbon clusters revealed the possible paths of fullerene formation through the coagulation of monocycles and gradual transformations of polycyclic structures into fullerene cages. These elementary carbon clusters such as monocyclic rings or polycyclic rings are termed as precursors from which the fullerenes are supposed to be formed by the successive stacking with the different carbon belts. It is quite natural to presume that the fullerene cages must have been generated from appropriate precursors. Wakabayashi and Achiba have suggested a kinetic-ring stacking model where fullerenes can be constructed by stacking proper-sized carbon rings. Dias has proposed a qualitative circumscribe algorithm based on the graph theoretical footings, which is really akin to the kinetic-ring stacking model. This algorithm can be stated as a method of encircling a monocyclic/polycyclic precursor with appropriate carbon belts in order to generate the fullerene cage structures. It has been further mentioned that successive circumscribing of qualified conjugated hydrocarbons with a combination of pentagonal and hexagonal rings terminates at fullerenes when the number of pentagonal rings reaches 12 or terminates at a system that can be capped to give fullerenes with 12 pentagonal rings. A new research on small fullerenes revealed there is a chance of bond cleavage of the polycyclic precursors as the growth process proceeds towards the cage formation.11 Carbon based Nanostructures 263. On the other hand, the monocyclic precursors are found to have significantly lower deformation energies than the polycyclic precursors.

11.9.3 Nanoballs

Carbon nanoballs are usually produced with carbon nanotubes. Especially in metal catalyzed reaction, nanoballs can be found easily. Growth mechanism of carbon nanoballs is stated below. The nanoballs are usually formed with relatively small particles, and carbon saturation can occur due to its large surface-to-volume ratio (Park et al. 2002). Therefore the small nanoparticles will become rapidly saturated with carbon at the initiation of the CNT growth, and the subsequently occurring diffusion out to the surface forms the graphite rind. The graphite rind at the surface of the nanoballs immediately deactivates their catalytic role by inhibiting incorporation of the carbon species from the ambient gas and stops nucleation and growth from the particle. The observation indicates that the carbon species arriving subsequent to the nanoball formation cannot form crystalline carbon layers without the catalytic role of the small nanoparticles. The mechanism can be also applied in the reaction of Fe(CO)₅ catalyzed pyrolysis of pentane (Liu et al. 2002). Carbon nanoballs were found in the rear end of the high temperature region of the quartz tube. When a lower carrier gas flow rate was used, nanoballs could be found over an extended area and this suggested that the lower carrier gas flow rate favored the formation of carbon nanoballs.

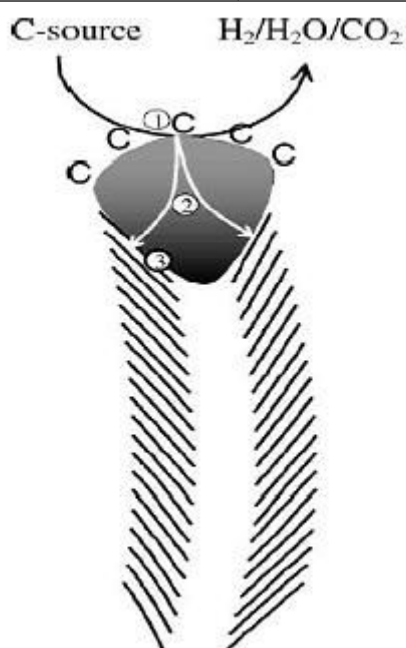
11.9.4 Nanofibers

Baker proposed the root growth mechanism of carbon nanofibers (CNFs) in 1989. Observation of many growth sequences has shown that both the addition of a second metal to the catalyst and also the strength of the metal-support interaction can play an important role in modifying the filament growth characteristics. The growth of so-called vapor-grown carbon nanofibers (VGCNFs) can be classified into the 'hollow-cored mechanism' (Fig. 11.21(b)) (Pan et al. 2004), because VGCNFs were obtained by the following processes: A hollow and highly crystalline graphite carbon nanotubes were formed as the inner region and then, a low crystalline graphitic pyrocarbon layer was deposited on the nanotubes as an outer layer. The mechanism of the catalytic growth of CNF can be concluded to different growth steps. A schematic representation of the mechanism of steady state growth is given in Fig. 11.23, which is based on the review of de Jong and Geus. The above mentioned steps show that the steady state growth process is a delicate balance between the dissociation of the carbon-containing gases, carbon diffusion through the particle, and the rate of nucleation and formation of graphitic layers. The growth mechanisms and synthesis techniques of carbon nanotubes, fullerenes, carbon nanoballs and carbon nanofibers has been summarized. Details of growth mechanisms of them show that carbon nanostructures are basically produced from various shapes of graphite curliness. And so many synthetic
264 11 Qianwang Chen and Zhao Huang methods have been developed. Especially, considerable progress has been made in preparation of carbon nanostructures by simple chemical processes.

Table 11. 1. A brief summary of the major synthesis methods

Sstructures	Synthesis method	Characteristic and conditions
CNT	Arc discharge	SWNT synthesis: use metal catalyst as anode, inert gas. MWNT synthesis: arc-plasma method in water, different helium pressures.
	Laser ablation	Costly technique, Primarily pure SWCNTs with good diameter control and few defects.
	Chemical vapor deposition	Easiest to scale up to industria production, simple process, long SWCNT, diameter controllable, pure, but usually produced MWCNT with defects.
	Chemical reaction method	Simple process, inexpensive technique, products can be controlled.
Fullerenes	radiofrequency (RF) thermal plasma method	Lower gas velocities, more voluminous plasma flames, longer residence time of reactive species, feed rate of powders can be independently changed.
	Laser vaporization	Synthesis of multishell fullerenes, gram amounts production, can be controlled so as to selectively synthesize certain types of multishell fullerenes and other multishell carbon clusters.
	RF-inductive coupled plasma discharge	Synthesis of both fullerenes and endohedral metallofullerenes, allows longer reaction times, the temperature of the RFICP reactor can be adjusted by changing its RF field frequency.
	Flame combustion	Can form fullerenes, fullerene nanostructures and fullerene soot, conditions of fuel/oxygen ratio, chamber pressure, and inert gas dilution are sensitive, formed directly from curved structures in the soot.
CNB	Fe-catalysed grown by thermal chemical vapor deposition	Formed only from pentane, lower carrier gas flow rate favored the formation of CNBs, high temperature gives longer contact times.

	Cobalt catalyst grown production	Acid treatment removes the encapsulated cobalt, increasing the content of cobalt can make high content of products.
CNF	Microwaveplasmaenhanced Chemical vapor deposition	A new type of corn-shape carbon nanofibers (CCNFs) with metal-free tips was fabricated.
	nanofiber seeding	A rapidly convenient method to obtain thin,substrate-supported, transparent films of nanofibers, requiring nanometer scale control of surface architecture.
	Ethanol flame	Synthesis of CNFs with solid-core, much simpler, more economic, easier to be controlled.



Step 1: decomposition of carbon-containing gases on the metal surface. Step 2: carbon atoms dissolve in and diffuse through the bulk of the metal. Step 3: precipitation of carbon in the form of a CNF consisting of graphite

Fig. 11. 23: Schematic representation of the catalytic growth of a CNF using a gaseous carbon-containing gas

11.10 Potential Applications of Nanostructures

11.10.1 Energy Storage

Graphite, carbonaceous materials and carbon fiber electrodes are commonly used in fuel cells, batteries and other electrochemical applications (Daenen et al. 2003). CNTs can be considered as excellent energy storage material because of their small dimensions, smooth surface topology and perfect surface specificity. In 2004 a novel molecular ferrocene-zinc porphyrin-zinc porphyrin-fullerene (Fc- ZnP-ZnP-C-60) tetrad was reported to have energy

storage properties (Guldi et al. 2004). Hydrogen storage, lithium intercalation, and electrochemical supercapacitors in some carbon-based materials will be discussed in the following section.

11.10.2 Hydrogen Storage

Because of their large surface area, low density, and hollow structure, CNTs have been considered to be potential materials for hydrogen storage (Bacsa et al. 2004). Ye et al. measured hydrogen adsorption at low temperatures (70 K) on single-walled CNT samples and concluded that the adsorption was proportional to the BET specific surface area (Ye et al. 1999). Other researchers, however, reported that hydrogen storage capacity was higher in CNT bundles wherein the adsorption sites were created under pressure (Shiraishi et al. 2002). Purification of the CNTs by oxidative acid treatments or by heating in inert gas decreases the hydrogen storage. Also, increasing the specific surface area does not necessarily increase the hydrogen storage capacity. There seems to be a correlation between the pore volume at low pore diameters (<3 nm) and hydrogen storage capacity. Step 1: decomposition of carbon-containing gases on the metal surface. Step 2: carbon atoms dissolve in and diffuse through the bulk of the metal. Step 3: precipitation of carbon in the form of a CNF consisting of graphite.

266 11 Qianwang Chen and Zhao Huang

Hydrogen uptakes in different carbon nanostructures at 10 MPa and 293 K using grand canonical Monte-Carlo numerical simulations have been calculated recently (Guay et al. 2004). Simulations indicate that pure carbon nanostructures could not reach a hydrogen uptake of 6.0 wt.%. The amount of adsorbed hydrogen in SWCNTs, MWCNTs and graphitic nanofibers is lower than 1.4 wt.% for the optimum porosity around 0.70 nm. For standard carbon nanostructures in which the porosity is similar to the bulk interplanar distance in graphite (0.34 nm), the amount of adsorbed hydrogen is lower than 0.6 wt.%. The material properties of hydrogenated fullerenes such as C₆₀H₃₆ are also under scrutiny and some of the features revealed so far may indicate a certain potential in the context of hydrogen storage (Vasilev et al. 2004). In contrast to the attractive forces operative in connection with the storage of hydrogen on nanotubes, which are essentially weak intermolecular interactions, hydrofullerenes feature comparatively strong C-H bonds. This in turn raises the issue of the means whereby the stored hydrogen may be released.

11.10.3 Lithium Intercalation

Molecular dynamic simulation predicted that the alkali metal storage capacity of SWNT bundles is substantially higher than that of the intercalated graphite and disordered carbon, the current anode materials in rechargeable Li-ion batteries (Zhao et al. 2000). Experimentally, the reversible capacity was found to depend on the quality and morphology of the SWCNT containing materials. The reported values vary in the range of Li_{1-1.6}C₆ (Gao et al. 1999). The reversible Li storage capacity increased from LiC₆ in close-end SWCNTs to LiC₃ after etching, which is twice the value observed in intercalated graphite. The enhanced capacity is attributed to Li diffusion into the interior of the SWCNTs through the opened ends and sidewall defects (Fig. 11.24) (Shimoda et al. 2002).



Fig. 11. 24: Li intercalation battery model

In a previous study, it is reported the electrochemical intercalation of lithium into multiwall carbon nanotubes where it has been shown that lithiated MWCNTs present a ‘neck-lace’ structure and that nanotubes could be reversibly intercalated by lithium (Maurin et al. 2000). It is also revealed electrolyte composition can affect the lithium intercalation into carbon nanotubes by introducing side reactions like exfoliation of graphite layers caused by co-intercalation of solvent molecules. The low specific capacity observed may be due to the low proportion of MWCNTs in the raw material. Fullerenes and filamentous carbon structures can also be inserted lithium by the catalytic graphitization (dissolution-precipitation) method in melts of cast iron (Lee et al. 2003). As a result, the graphitic product could reversibly intercalate more than 300 mAh/g equivalent of lithium. The firstcycle irreversible capacity was a mere 14%. The coulombic efficiency seemed to stabilize at values > 99% from the fifth cycle.

11. 10. 4 Electrochemical Supercapacitors

Supercapacitors have a high capacitance and potentially applicable in electronic devices. Typically, they are comprised two electrodes separated by an insulating material that is ionically conducting in electrochemical devices. The capacity of an electrochemical supercap inversely depends on the separation between the charge on the electrode and the counter charge in the electrolyte. Carbon nanotubes have been considered as the ideal material for supercapacitors due to their high utilization of specific surface area, good conductivity, chemical stability and other advantages (Chen et al. 2004). To increase the specific capacitance of supercapacitors based on carbon nanotubes, activation and surface modification can be carried out by using KOH and concentrated nitric acid respectively (Deng et al. 2004). The results showed that activation enlarged the BET specific surface area of the CNTs and hence increased the specific capacitance of the supercapacitors. A new form of carbon nanofiber web was prepared that is considered to be a suitable material for the electrode of a supercapacitor exhibiting high capacitance (Fig. 11.25) (Kim et al. 2004). The capacitance of the electrical double-layer capacitor was strongly dependent on the specific

surface area, micropore volume, and resistivity of the samples. A previous research indicated a controlled rate of fiber formation as well as proper selection of the precursor might play key roles in determining the capacitive behavior (Adhyapak et al. 2002).

Recently researches discovered bimodal porous carbons with both micropores and meso- or macropores selectively synthesized by a SiO₂ colloidal crystal templating process could make a high performance electrical double-layer capacitor (Moriguchi et al. 2004). The electrical double-layer capacitance per surface area of the templated porous carbons was much larger than those of commercially available activated carbons with high surface areas. The surface of meso- and macropores generated in the porous carbons shows a highly efficient electrical double-layer capacitive property; the specific capacitance per surface area originating from meso- and/or macropores was estimated to be 20 +/- 2 muF/cm².

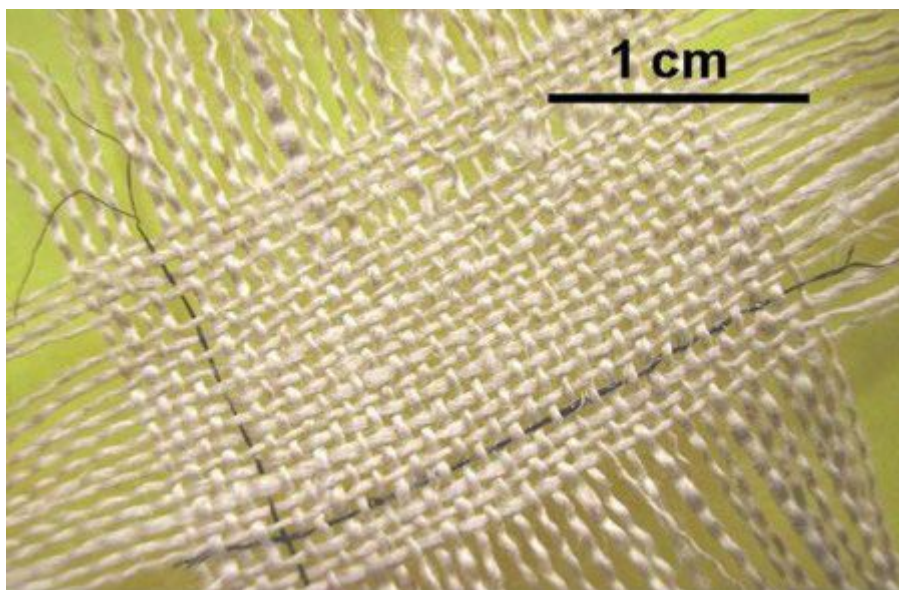


Fig. 11. 25 Fabric web as materials of supercapacitors produced by nano technique graduate school in Dallas, USA

11. 10. 5 Molecular Electronics with CNTs

11. 10. 5. 1 Field Emitting Devices

Carbon nanotubes are promising electron emitters because of their sharp geometries that lead to significant external field enhancement, as well as their mechanical strength. However, distinguishing the emission due to an individual SWCNT from that due to surrounding structures is a challenge (Nojeh et al. 2004). Previous results show that adsorbates on CNTs have great influence on the field emission properties of CNTs. It is observed that the electric field initiates the significant step-like jumps of field emission current, which is believed to be due to the formation of adsorbate enhanced-tunneling configurations between adsorbates and field emitting CNTs (Yeong et al. 2004). Examples of potential applications for nanotubes as field emitting devices are flat panel displays, gas-discharge tubes in telecom networks, and electron guns for electron microscopes, AFM tips and microwave amplifiers. Recently, an electron industry in Japan explored colorful FED monitor using a CNT based field-emission cathode (Fig. 11.26). IBM Company has made the same progress too. Compared with former silicon FED, the index of electric current capability has been improved twice.



Fig. 11. 26: 5.6-inch colorful FED monitor and 12.1 inch homochromatic FED

11. 10. 5. 2 Transistors

CNTs show promise in overcoming limitations as low charge-carrier mobilities because their carrier mobility exceeds even common semiconductor materials (Zinn et al. 2003). Not only do CNTs exhibit very high strength, but also their flexibility makes them a promising material for the development of large-scale flexible electronics. The research team said that the low switching voltage is due to the high carrier mobility of the CNT network. Other advantages such as flexible and could be made inexpensively also make CNTs good materials for transistors. An example of application in audions of CNTs is shown in Fig. 11.27.

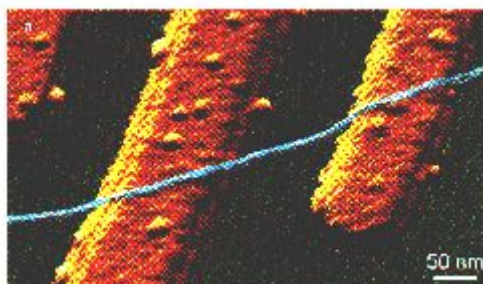


Fig. 11. 27 CNT applied in electronic audion

11. 10. 5. 3 Nanoprobes and Sensors

CNTs might constitute well-defined tips for scanning probe microscopy (Dai et al. 1996). Because of their flexibility, the tips are resistant to damage from tip crashes, while their slenderness permits imaging of sharp recesses in surface topography. Another important application of CNTs is their use as tips of AFM or STM (Fig. 11.28) (Zhao et al. 2002); CNTs are used as nanoprobes. The CNT tips offer several advantages: a) have intrinsically small diameters, which in the case of single-walled nanotubes can be as small as 0.5 nm; b) have high aspect ratios that allow them to probe deep crevices and trench structures; c) can buckle elastically, that limits the force applied by the AFM probe and reduce deformation and damage to biological and organic samples; d) can be modified at their ends to create functional probes. As for sensing applications, carbon nanotubes have some advantages: small

size with larger surface; high sensitivity, fast response and good reversibility at room temperature as a gas molecule sensor; enhanced electron transfer when used as electrodes in electrochemical reactions; and easy protein immobilization with retention of activity as potential biosensors (Zhao et al. 2002). Because of the very rich electrochemical properties of fullerenes, their exploitation for the development of chemical sensors for sensitive and selective detection of different analytes, commenced a few years ago (Sherigara et al. 2003). Due to a sequential reversible oxidative and reductive electron transfers, 270 11 Qianwang Chen and Zhao Huang fullerenes act as electron mediators and, hence, operate as electron relays for activation of oxidations or reductions of target substances.

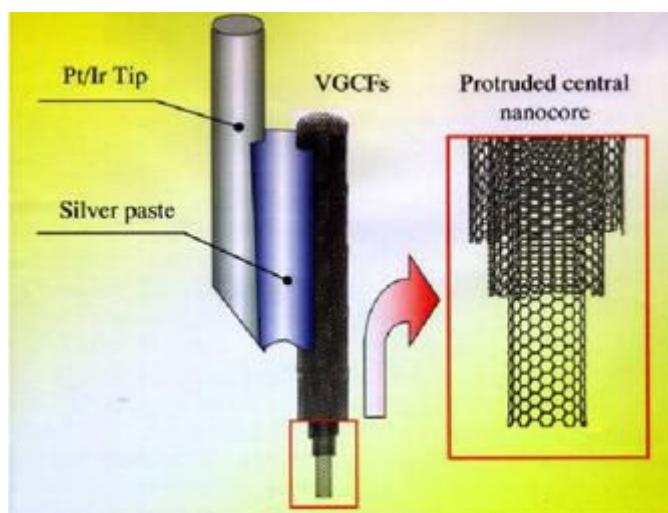


Fig. 11. 28: Use of MWCNT as AFM tip

11.11 Composite Materials

Carbon nanostructures and C-60 fullerenes show unique properties, which make these structures ideally suited for the fabrication of advanced composite materials (Dai et al. 2001). These carbon nanostructures provide an important means for making advanced composite materials with polymers, which have been demonstrated to show properties characteristic of both constituent components with interesting synergetic effects. For example, photovoltaic effects, arising from the photoinduced charge transfer at the interface between conjugated polymers as donors and a C60 film as acceptor, suggests interesting opportunities for improving energy-conversion efficiencies of photovoltaic cells based on conjugated polymers (Sariciftci et al. 1992). Indeed, increased quantum yields have been obtained by addition of C60 to form heterojunctions with conjugated polymers, such as poly(pphenylenevinylene), poly (2-methoxy-5-(2-ethyl-hexyloxy)-pphenylenevinylene)(MEH-PPV), poly (3-alkylthiophenes) (P(3AT)s), and platinum-poly-yne. Another example: Due to its delocalized p-electron orbital fullerene C60 has been shown to exhibit third-order optical responses comparable to those of certain conjugated polymers (Innocenzi et al. 2000). Dissimilar CNTs may be joined together allowing them to form molecular wires with interesting electrical, magnetic, NLO, and mechanical properties attractive for a variety of potential applications. Indeed, CNTs have been proposed as new materials for electron field

emitters in panel displays, single-molecular transistors, scanning probe microscope tips, gas and electrochemical energy storage, catalyst and 11 Carbon based Nanostructures 271 protein/deoxyribonucleic acid (DNA) supports, molecular-filtration membranes, and artificial muscles. Composite materials from carbon nanofibers were already discovered. Vapor-grown carbon nanofibers (VGCFs), used as reinforcements for thermoplastic matrices, have potential applications as conducting polymers, enhancing both stiffness and thermal stability (Lozano et al. 2000).

11.12 Summary

Carbon-based nanomaterials and nanostructures including CNTs and fullerenes play an important role in nanoscale science and technology. This chapter has given an overview of the current status of fullerenes, CNTs and related carbon nanostructures. This field shows several important directions in basic research, including electronic transport, mechanical, field emission properties and chemistry. The perspective for applications also appears very bright, for example, the main avenues of potential applications of carbon nanotubes are: conducting nanowires; field emitters; nanotips for Scanning Tunneling Microscope and ultimate reinforcement fibers for composites. Their realization depends on good preparation methods and precise characterization. It is believed exciting results are born to the world.

附录 2 中文翻译

11.9 合成

在本节中,总结了各种碳纳米结构的不同的合成技术。首先,对于生长机理作了简要的解释。然后会说明每一个纳米管,富勒烯,纳米球和纳米纤维合成方法的详细介绍。大部分的总结结果几乎都出现在过去五年的文献中,这代表着碳纳米结构合成的更新进程。它们是制备碳纳米管的许多已知方法。一般来说,碳纳米管主要通过三种技术来制造:电弧放电,激光烧蚀和化学气相沉积。富勒烯早些时候通过电弧法来制备,苯焰燃烧法,溅射镀膜法和电子束蒸发法发展的晚一些。纳米球通常是碳纳米管的副产物,因此化学气相沉积可以被描述为一种生产技术。纳米纤维可以通过传统技术制备,像化学气相沉积等,但是我们将主要讨论像纳米纤维播种和乙醇火焰燃烧这样的新技术。接下来将描述生长机理。

11.9.1 碳纳米管

碳纳米管的生长机理还不是很清楚;存在不同的模型,但是其中一些不能明确的解释这种机理。金属或碳化物颗粒对于它的生长似乎是必要的,因为经常可以在纳米管内部的尖端或管中间的某处发现它们。在 1972 年贝克等人提出了一个碳纤维的生长模型,如图 11.22 (a) 所示。这个模型提出,乙炔在 600°C 时在镍金属簇顶部的支撑下分解。分解的碳扩散到这些簇中沉淀到后侧并形成纤维。碳由于乙炔分解释放热量形成的热梯度而通过簇扩散。单纤维生长所需的活化能与那些碳通过相应的金属(铁,钴,铬)的扩散一致。奥伯林等人提出了该模型的变体。纤维通过一个包含金属粒子周围的碳的表面扩散的催化进程而形成,而不是由碳通过催化集群的体扩散而形成。在这个模型中,团簇对应于一个纤维核的种子(如图 11.22 (b))。金属簇可以有两个角色:1) 作为一个各种含碳气体分解的催化剂;2) 碳在金属簇的表面扩散或通过金属形成一个纳米管。最活跃的金属是对碳为良好溶剂的铁,钴,镍(Kim 等, 2001)。据推测单壁碳纳米管的纳米粒子一定比那些多壁碳纳米管的小(Dai 等, 1996),但是这与电弧法中单壁碳纳米管从一个更大的金属簇中径向生长相矛盾(Saito 等, 1995)。

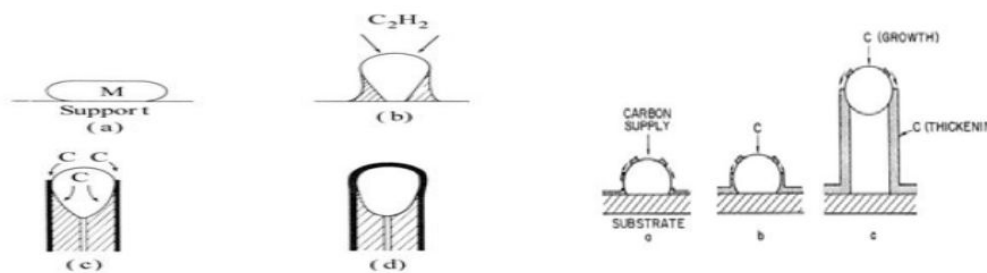


图 11.22：气相生长碳纤维的生长模型；金属簇作为生长的种子。

11.9.2 富勒烯

近几年来，为了揭开富勒烯生长机理的神秘面纱做了理论与实际的尝试。用两个不同浓缩度的碳 13 碳棒做的电阻蒸发实验发现碳气在富勒烯形成开始的进程之前由更小的簇组成 (Ebbesen, 1992)。而且，实验气体碳簇结构的离子色谱法研究显示富勒烯通过单环凝结和多环结构向富勒烯笼的逐步转换而形成的可能路径。这些小碳簇比如单环和多环的环被称为前体，富勒烯应该从前体通过不同碳带的连续堆叠而形成。很自然的认为富勒烯笼已经从适当的前体产生。Wakabayashi 和 Achiba 提出了一个动环堆积模型，在这个模型中富勒烯可以通过堆叠适当大小的碳环来构建。Dias 提出了一个基于图形理论基础的定性约束算法，这十分类似于动环堆积模型。这个算法被称为一种为了产生富勒烯笼结构以适当的碳带包围一个单环/多环前体的方法。已经进一步提出了以五环和六环组合适当共轭碳氢化合物的连续外接直到富勒烯五环的数量达到 12 个或者可以封顶于系统给富勒烯以 12 个五环为止。一项关于小富勒烯的新研究显示随着其生长进程朝着富勒烯笼的形成，多环前体有一定键断裂的几率。另一方面，发现单环前体变性能明显低于多环前体。

11.9.3 纳米球

纳米碳球通常用碳纳米管生产。特别是在金属催化反应中，可以轻易的发现纳米球。下面来明纳米碳球的生长机理。纳米球通常由相对较小的颗粒形成，并且由于较大的表面体积比会发生碳饱和 (Park 等, 2002)。因此，小的纳米粒子会在碳纳米管生长开始时迅速碳饱和，之后发生扩散到表面形成石墨皮。石墨皮在纳米球表面立即通

过抑制环境气体中碳物种的掺入来停止它们的催化作用并且阻止微粒的成核与生长。这项观察表明碳物种到纳米球的形成后在没有小型纳米粒子的催化作用下不能形成结晶碳层。这种机理也可以应用于 Fe(CO)₅ 催化裂解戊烷的反应 (Liu 等, 2002)。纳米碳球发现于石英管高温区域的末端。当使用较低的载气流速时, 纳米球可以在扩展区域发现, 这表明较低的载气流速促成纳米碳球的形成。

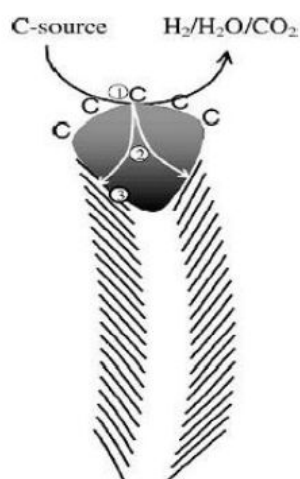
11.9.4 纳米纤维

贝克在 1989 年提出了碳纳米纤维生长机理的本质。对于许多生长序列的观察已经表明, 把第二金属都加入催化剂中, 金属-载体相互作用的强度在修改单纤维生长特性中扮演了一个重要角色。碳纳米纤维所谓的气相生长可以划分成空心机制 (如图 11.21 (b)) (Pan 等, 2004), 因为气相生长碳纳米纤维通过以下过程获得: 一个空心的高晶质石墨碳纳米管作为内部区域而形成, 之后, 结晶石墨热解碳层作为外层沉积到纳米管上。这种碳纳米纤维的催化生长机理可以总结成不同的生长阶段。图 11.23 给出了一个基于 de Jong 和 Geus 的回顾的稳态生长示意图。上面提出的阶段表明稳态生长过程是含碳气体的离解, 碳通过粒子扩散和成核速率与石墨层的形成之间的一个微妙的平衡。碳纳米管, 富勒烯, 纳米碳球和碳纳米纤维的生长机理和合成技术已经进行了概述。它们的生长机理细节表明碳纳米结构基本上都是有各种形状的石墨卷曲产生的。因此, 已经开发了许多的合成方法。特别是通过简单的化学过程对碳纳米结构的制备取得了长足的进步。

表 11.1 主要合成方法的简要总结

结构	合成方法	特点和条件
碳纳米管	电弧法	单壁纳米管合成: 用金属催化剂作为阳极, 惰性气体。 多壁纳米管合成: 在水中, 电弧和等离子体, 不同的氦压。
	激光烧蚀法	昂贵的技术, 主要是纯粹的单壁碳纳米管有良好的直径控制和较少的缺陷。

	化学气相沉积	最容易扩展到工业生产，过程简单，长的单壁碳纳米管，直径可控，纯粹，但是生产的多壁碳纳米管通常有缺陷。
	化学反应方法	简单的过程，廉价的技术，制品可控。
富勒烯	射频(RF)热等离子体方法	较低的气体速度，更大的等离子火焰，活性物种的停留时间更长，粉末的进给速率可以独立改变。
	激光汽化法	多壳富勒烯的合成，以克为单位量产可以控制，这是为了选择性的合成某些类型的多壳富勒烯和其他对壳碳簇。
	射频-电感耦合等离子体放电	富勒烯和金属富勒烯的合成，允许较长的反应时间，射频-电感耦合等离子体反应器的温度可以通过改变它的射频场频率来调整。
	火焰燃烧法	可以形成富勒烯，富勒烯的纳米结构，以及富勒烯烟尘。燃料/氧气的条件比，室压，以及敏感的惰性气体稀释都是从烟尘中的曲线结构中直接形成。
纳米碳球	通过热化学气相沉积利用铁催化生长	只由戊烷产生，低载气流量促进纳米碳球的形成，高温给予了更长的接触时间。
	钴催化剂生长生产	酸处理去除包封钴，增加钴含量可以是产品含量高。
碳纳米纤维	微波等离子体增强化学气相沉积	已制造了一种新型的玉米形无金属尖碳纳米纤维。
	纳米纤维播种	一种获得薄的，基板支撑的带有透明薄膜纳米纤维的便捷快速方法，要求表面结构的纳米级控制。
	乙醇火焰	实心碳纳米纤维的合成，更简单经济，更容易控制。



第一步：含碳气体在金属表面的分解。
 第二步：碳原子通过金属主体的溶解和扩散。
 第三步：碳以由石墨组成的碳纳米纤维形式沉淀。

图 11.23: 碳纳米纤维以气态含碳气体催化生长示意图

11.10 纳米结构的潜在应用

11.10.1 储能

石墨，含碳材料和碳纤维电极通常用在燃料电池，电池和其他的电化学应用中 (Daenen 等, 2003)。碳纳米管由于尺寸小，光滑的表面拓扑结构以及完美的表面特异性而被看做优良的储能材料。在 2004 年，新型分子二茂铁锌卟啉富勒烯 (FC-ZNP-ZNP-C-60) 四元组据报道拥有储能性能 (Guldi 等, 2004)。下面将会讨论一些碳基材料中的储氢，嵌锂和电化学超级电容器。

11.10.2 储氢

由于它们大的表面积，低密度和中空结构，碳纳米管已经被看做储氢的潜在材料 (Bacsa 等, 2004)。Ye 等人测量了氢吸附在低温 (70K) 单壁碳纳米管上的样本，得出的结论是这种吸附正比于 BET 比表面积 (Ye 等, 1999)。不过，其他的研究人员报告称氢储容量在压力下造成吸附点的碳纳米管束中更高 (Shiraishi 等, 2002)。碳纳米管通过氧化酸处理或加热惰性气体以减少氢存储来净化。而且，增加比表面积不一定会增加氢储量。似乎在孔在低孔径 (<3nm) 的体积与氢储量之间有关联。

氢在 10MP 和 293K 下吸收不同的碳纳米结构在最近已经用巨正则蒙特卡罗数值模拟法计算了出来 (Guay 等, 2004)。模拟表明纯粹的碳纳米结构不能达到吸收氢的 6wt.%。

单壁纳米管, 多壁纳米管和石墨纳米纤维吸收氢的量低于约 0.7nm 最佳孔隙度的 1.4wt.%。对于孔隙度类似于石墨中的体晶面间距 (0.34nm) 的标准碳纳米结构, 吸收氢的量低于 0.6wt.%。氢化富勒烯的材料性能如 $C_{60}H_{36}$ 也正在审议, 而且一些到目前已显露的特点表明了氢储背景下的一定潜力 (Vasilev, 2004)。相反, 在手术中的吸引力与氢在纳米管中的存储有关, 其中分子间的相互作用很弱, 氢化富勒烯功能较强像碳氢化合物。这反过来又提高了该装置的问题即存储的氢可能被释放。

11.10.3 嵌锂

分子动力学模型预言单壁碳纳米管束碱金属的存储容量大幅高于插层石墨和无序碳, 是目前充电锂电池的阳极材料 (Zhao 等, 2000)。实验发现可逆容量取决于单壁碳纳米管包含材料的质量和形态。报告值在 $Li_{1-1.6}C_6$ 的范围内是不同的 (Gao 等, 1999)。可逆的锂存储容量在蚀刻后从封闭式单壁碳纳米管中的 LiC_6 增加到了 LiC_3 , 是插层石墨中观察到值的两倍。这种增强能力归因于锂通过两端的开口和侧壁的缺陷扩散到单壁碳纳米管的内部 (如图 11.24) (Shimoda 等, 2002)。

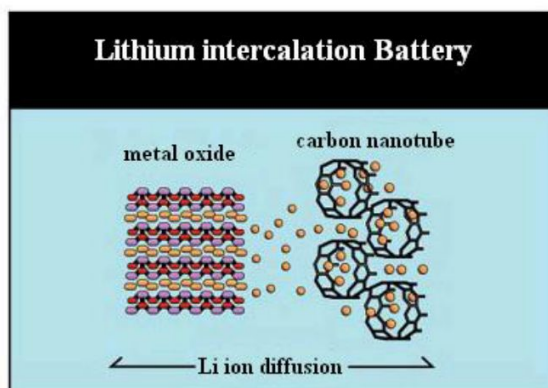


图 11.24: 嵌锂电池模型

在以前的研究中, 据报道称电化学嵌锂的多壁碳纳米管已经显示, 嵌锂多壁碳纳米管呈现一个“项链”结构, 并且纳米管可以可逆嵌锂 (Maurin 等, 2000)。也表明电解质组合物可以通过引入类似于溶剂分子共插层引起的石墨层脱落的副反应来影响碳纳米管的嵌锂。观察的低比容量可能是由于多壁碳纳米管在原料中的低比例。富勒烯和碳纤维结构也可以通过在铸铁熔体中催化石墨化 (溶解沉淀) 的方法来嵌入锂 (Lee 等, 2003)。结果显示, 石墨产品可以可逆地嵌入超过 300 mAh/g 当量的锂。第一次循环的不可逆容量仅仅 14%。库伦效率似乎从第五个周期稳定在值大于 99%。

11.10.4 电化学超级电容器

超级电容器有高电容和电子设备中的潜在应用。通常情况下，它们是由通过电化学设备中离子导电的绝缘材料分开的两个电极构成。相反地，电化学超级电容器的容量依靠电极中的电荷与电解液中的负电荷。碳纳米管由于它们比表面积的高效利用，良好的导电性，化学稳定性和其他优点已经被看做超级电容器的理想材料(Chen 等, 2004)。为了增加基于碳纳米管超级电容器的比电容，活化和表面改进可以分别通过用氢氧化钾和浓硝酸来进行(Deng 等, 2004)。结果表明活化扩大了碳纳米管的 BET 比表面积，之后增加了超级电容器的比电容。一种新形式的碳纳米管纤维网被制备出来，它被看做一种对于使超级电容器呈现高电容的电极的合适材料(如图 11.25)(Kim 等, 2004)。双电层电容器的电容十分依赖于比表面积，微孔容积和样品的电阻率。一份从前的调查表明，纤维形成的控制率以及合适前体的选择可能在确定电容特性中发挥关键作用(Adhyapak 等, 2002)。最近的研究发现带有微孔和中或大孔的双峰多孔炭由二氧化硅胶体晶体模板选择性地合成可以制备高性能的双电层电容器(Moriguchi 等, 2004)。双电层电容单位面积的模板多孔炭比大表面积的市售活性炭大很多。多孔炭中产生的中和大孔表面显示了一个高效的双电层电容的特性；源自中和/或大孔单位面积的比电容估计是 $20 \pm 2 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 。

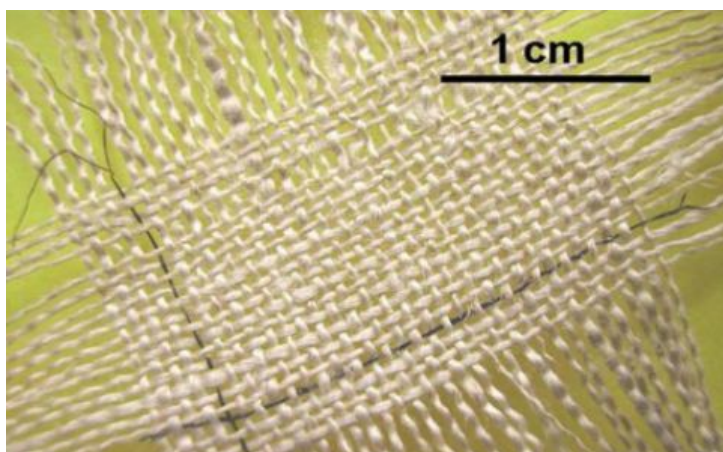


图 11.25: 美国达拉斯纳米技术研究学校以织物为材料生产的超级电容器

11.10.5 碳纳米管分子电子学

11.10.5.1 场致发光器件

碳纳米管由于它们引起重大的外部电场增强尖锐的几何形状和它们的机械强度而成为有前景的电子发射器。然而，区分是由于单独的单壁碳纳米管和由于周围结构的发射是一个挑战（Nojeh 等，2004）。以前的结果表明，碳纳米管上的吸附质对碳纳米管的场发射性能有极大的影响。据观察，电场引起了场发射电流重要的阶跃，这被认为是由于吸附质和场发射碳纳米管之间吸附质增强隧道结构的形成（Yeong 等，2004）。纳米管作为场发射器件潜在应用的例子是平板显示器，电信网络中的气体放电管，用于电子显微镜的电子枪，原子力显微镜探针和微波放大器。最近，一个日本的电子行业用一个基于场发射阴极的碳纳米管探索了彩色 FED 显示器（如图 11.26）。IBM 公司也取得了相同的进展。相比于先前的硅 FED，电流能力的指标已经提高了两倍。



图 11.26：5.6 英寸彩色 FED 显示器和 12.1 英寸黑白 FED 显示器

11.10.5.2 晶体管

碳纳米管由于低电荷载流子迁移率在克服局限性中表现出了前途，因为它们的载体

迁移率甚至超过了普通电导体材料 (Zinn 等, 2003)。碳纳米管不仅呈现了很高的强度, 而且它们的可塑性使它们成为对大型柔性电子的发展而有前景的材料。该研究小组称低开关电压是由于碳纳米管网络的高载流子迁移率。其他的优势像韧性可以低成本而且使碳纳米管成为晶体管的好材料。图 11.27 展示了碳纳米管三极管的应用举例。

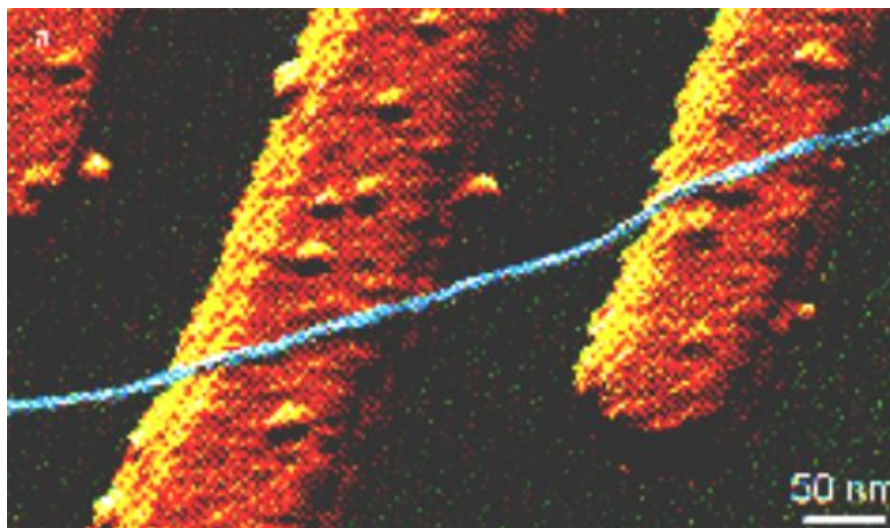


图 11.27: 碳纳米管应用于电子三极管

11.10.5.3 纳米探针和传感器

碳纳米管会对扫描探针显微镜构成明确的尖 (Dai 等, 1996)。因为它们的柔韧性, 这些尖耐尖端崩溃损伤, 而它们的细长比允许表面地形尖端凹槽成像。碳纳米管的其他重要应用是作为原子力显微镜和扫描隧道显微镜的尖端 (图 11.28) (Zhao 等, 2002); 碳纳米管用于纳米探针。碳纳米管尖端有几个优点: a) 有在单壁纳米管能小到 0.5nm 的情况下的本质上的小直径; b) 有高的长宽比可以允许它们探测深裂缝和沟槽结构; c) 可以弹性变形, 这限制了用于原子力显微镜探针的力并且减少形变和破坏生物和有机样品; d) 可以改良, 在末端创造功能探针。至于传感应用, 碳纳米管有一些优点: 小尺寸与更大的表面; 作为气体分子传感器有高灵敏度, 快速的响应以及室温下良好的可逆性; 在作为电化学反应的电极时增强电子转移; 容易保持固定蛋白质活性作为潜在的生物传感器 (Zhao 等, 2002)。由于富勒烯丰富的电学性能, 他们对不同分析物的灵敏度和高选择性检测的化学传感器发展的开发在几年前开始了 (Sherigara 等, 2003)。由于连续可逆的氧化和还原电子转移, 富勒烯作为电子介质, 因此, 作为

电子继电器激活氧化或靶物质的削减。

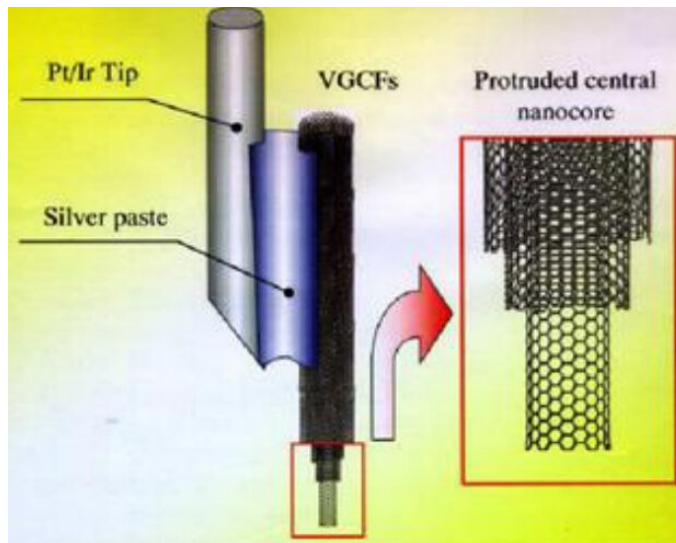


图 11.28: 碳纳米管作为原子力显微镜针尖

11.11 复合材料

碳纳米结构和碳 60 富勒烯展现了独特的性能,这使得这些结构在理想的情况下适合先进复合材料的制造 (Dai 等, 2001)。这些碳纳米结构对于以聚合物制造先进复合材料提供了一个重要的方法,这已经证明了带有有趣协同效应的两者组成成分的性能特点。例如,光伏效应产生于作为供体的共轭聚合物和作为受体的碳 60 薄膜之间的接口处的光生电荷转移,提出了对于改进基于共轭聚合物光伏电池能量转换效率的令人关注的机会 (Sariciftci 等, 1992)。实际上,增加量子产率已经通过添加碳 60 以共轭聚合物形成异质结来取得,像聚(对亚苯基亚乙烯基),聚(2-甲氧基-5-(2- ϕ -乙基-己氧基)-对亚苯基亚乙烯基) (MEH-PPV),聚(3-烷基噻吩) (P(3AT)s)和铂聚炔。另一个例子:由于它的离域对电子轨道富勒烯碳 60 已经展现证明了三阶光学反应可以媲美某些共轭聚合物 (Innocenzi 等, 2000)。不同的碳纳米管会被加在一起使它们形成带有电子的,磁的,非线性光学和机械性能分子导线,提供各种各样的潜在应用。实际上,碳纳米管已被提议为显示器,单分子晶体管,扫描探针显微镜针尖,气体和电化学能量存储,催化剂和蛋白质/脱氧核糖核酸 (DNA) 的支撑,分子过滤膜和人造肌肉中场致电子发射的新材料。碳纳米纤维复合材料已被发现。气相生长碳纳米纤维 (VGCFs) 作为热塑性矩阵的加强剂,作为导电聚合物具有潜在的应用,提高了刚度和热稳定性 (Lozano 等, 2000)。

11.12 总结

碳基纳米材料和纳米结构包括碳纳米管和富勒烯在纳米科学与技术中发挥重要作用。本章给出了富勒烯，碳纳米管和相关碳纳米结构的现状概述。此字段显示了基础研究中的几个重要方向，包括电子运输，机械，场发射性能和化学。透视的应用也显得非常光明，例如，碳纳米管潜在应用的主要途径是：导电纳米线；场致发射体；扫描隧道显微镜的纳米尖端和复合材料的终端增强纤维。它们的实现依赖于制备方法和精确表征。据信令人振奋的结果即将问世。