

摘 要

对于工程陶瓷等硬脆材料,磨削是一种非常有效的加工方法,磨削力信号的研究是工程陶瓷磨削加工中的一项重点研究课题。本文在 Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷磨削实验的基础上,综合利用了切削加工、材料学、计算机、数字信号处理、时间序列分析、数理统计等多学科的知识,系统深入的研究了工程陶瓷磨削力信号的变化规律。

鉴于工程陶瓷磨削力信号数据量大,分析比较困难的特点,开发了磨削力信号处理软件,此软件能够快速、准确地对磨削力信号进行时域频域分析。

通过对 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的检验,分析出 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷的磨削力信号是一种具有平稳性、各态遍历性的周期振动信号。

采用端面磨削实验,研究了磨削用量对 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷磨削力、材料去除率等的影响规律。总结出磨削深度对磨削过程的影响程度要大于砂轮磨削速度和摆动速度;小切深下陶瓷材料的去除主要是发生塑性变形,而大切深下材料除了发生塑性变形之外,大部分发生脆性断裂而被去除。

研究了机床刚度和磨削行程对 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷磨削过程的影响情况,发现它们对磨削力信号的影响规律同对材料去除率的影响规律非常类似,实验进一步发现了在对陶瓷进行超精密磨削时,磨削行程次数的增加将会减小机床刚度的影响。

通过选择不同类型的砂轮对 Si_3N_4 陶瓷进行对比磨削实验,初步发现砂轮的粘结类型、磨粒尺寸对 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号有很大的影响,砂轮振动信号和磨削力信号之间存在着一定程度的相关性。

关键词: 工程陶瓷 磨削力 统计检验 数字信号处理 时间序列分析

Abstract

The grinding is one of the primary methods in machining ceramics, so the investigations of grinding force signal have become a crucial subject in machining fields. Based on a series of grinding experiments about Si_3N_4 and Al_2O_3 , some rules of grinding force signal are investigated by utilizing the multidisciplinary knowledge in cutting machining, materials, computer, digital signal processing, time series analysis and statistics. These investigations are in the paper as follows:

The software about digital signal processing is programmed to analysis grinding force signal efficiently and accurately in view of a large amount of experimental data in grinding ceramics.

The characteristics of grinding force signal about Si_3N_4 and Al_2O_3 verified by means of the theories and methods of DSP and Statistics are calm, periodic and vibrated.

The rules of grinding force, stock removal rate studied by changing grinding parameters in grinding Si_3N_4 and Al_2O_3 are that the influences of grinding depth are more than those of wheel grinding speed and oscillation speed on grinding process, and that the chip removal is finished through the plastic deformation under smaller depth of grinding, but the cracking plays a great role under larger depth of grinding.

The results of this study about the influence of machine stiffness and grinding pass on grinding process in grinding Si_3N_4 and Al_2O_3 demonstrate that a machine of lower stiffness results in smaller grinding force, a lower stock removal, and wheel ADOC in contrast to a higher stiffness machine. On the other hand, the results on multi-pass grinding indicate that the influences of machine stiffness diminish as the number of grinding passes increases.

The influences of wheel specifications on grinding force signal are investigated primarily through selecting different wheels, and the correlation is found between wheel vibrated signal and grinding force signal in grinding Si_3N_4 .

Key words: Engineering Ceramics; Grinding Force; Statistics Verification; Digital Signal Processing; Time Series Analysis

第一章 绪论

1.1 引言

进入 21 世纪,伴随着微电子技术、信息技术、航空航天技术、生物技术和材料科学等高新技术的快速发展,先进制造技术也在不断的进步和发展。先进制造技术的进展主要表现在以下两个方面:其一是向高效率、高速度和自动化无人化方向发展,这导致了计算机控制(CC)、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)和无人工厂等技术的发展。这种技术通过计算机对加工成本、加工能力的最优设计来实现最小成本和最高生产率,以满足生产的要求。其二是追求高精度、高质量,向超精密加工和微细加工方向发展^[1]。

但是,对于当前出现的一些新型难加工材料,由于其独特的组织结构特点,很难进行高效高精加工。工程陶瓷(Engineering Ceramics)就是这种新型的工程材料。它具有很高的强度、硬度和很强的耐腐蚀、耐高温能力,能够在比较苛刻的环境中使用,被誉为“21 世纪代替钢铁的材料”。目前,工程陶瓷已成为尖端科学的重要组成部分,在航空航天、机械、电子、军事、化工等很多领域都得到了广泛的应用。但是作为一种典型的难加工材料,工程陶瓷高效高精加工的理论和技术还很不成熟,这限制了对其进一步的应用。而磨削加工是一种传统的切削加工方法,在工程陶瓷的加工中仍然占有非常重要的地位。因此,作为磨削加工中传统的研究课题,磨削力信号的研究对于工程陶瓷的高效高精加工具有极其重要的作用。特别是当前计算机技术和数字信号处理技术的发展也为切削试验数据的分析处理提供了更为有效的手段和更为精确的方法。

本课题以工程陶瓷的磨削试验为基础,综合利用了切削加工、材料学、计算机、数字信号处理、时间序列分析、数理统计等多学科的知识来研究工程陶瓷磨削力信号的变化规律。

1.2 工程陶瓷材料简介

随着现代能源、空间技术的高度发展,各行各业对产品材料的性能提出了许多特殊的要求,如耐高温、抗腐蚀、耐磨损等。为此科学工作者研制出了新型的工程陶瓷材料。这种陶瓷的化学组成、显微结构及性能都明显的不同于普通陶瓷。工程陶瓷是一种新型的硬脆材料,因其独特的分子构形而具有许多优良的物理、机械性能,如高强度、高硬度、高韧性、耐腐蚀、绝缘等等。自从 80 年代以来,美国、日本、德国等发达国家竞相投入大量的资金和人力,来研究工程陶瓷材料的制备、加工理论、加工技术和产品开发。事实上,工程陶瓷已经成为现代工业技术的重要组成部分,受到世界各国的普遍重视。

1.2.1 工程陶瓷的种类及应用领域

根据不同种类的性能特点,工程陶瓷被广泛应用于航空航天、化工、军事、机械、电子、生物工程等领域。其中氧化物、碳化物、氮化物陶瓷是几种应用非常普遍、技术相对成熟的工程陶瓷制品。氧化物陶瓷(Oxide Ceramics)是发展较早的陶瓷材料,主要包括 Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO 等。碳化硅陶瓷(SiC Ceramics)和氮化硅陶瓷(Si_3N_4 Ceramics)是近几十年才发展起来的材料,但由于其具有特别优良的性能,很快得到了开发和应用,至今已成为主要的工程陶瓷材料。表1.1列出了主要的工程陶瓷类别及其应用范围^[2]。

表 1.1 工程陶瓷主要类别及其应用范围

Tab.1.1 Main sorts and applications of Engineering Ceramics

| 类别 | 应用领域 | | 制品名称 | 利用特征 |
|-------|---------|------|--------------|-----------------|
| 氧化物陶瓷 | 机械装置 | 粉碎装置 | 研钵 粉碎机 | 高密度 高强度 耐磨性 |
| | | 成型机械 | 注射成型模具 | 耐磨性 尺寸稳定性 |
| | | 加工工具 | 轴承 轮叶片 | 耐磨性 尺寸稳定性 |
| | 电磁装置 | | IC 基板 半导体 | 电性能 |
| | 其他 | | 刀具 喷嘴 装甲板 | 高硬度 高强度 耐磨性 耐腐蚀 |
| 碳化物陶瓷 | 石油化工 | | 喷嘴 轴承 阀片 泵部件 | 耐磨耗 耐热性 耐腐蚀 耐高温 |
| | 微电子工业 | | 封装材料 基片 | 高热导 高绝缘 |
| | 汽车工业 | | 燃烧器部件 发动机 | 低摩擦 高强度 |
| | 飞机 宇宙火箭 | | 涡轮叶片 火箭喷嘴等 | 低惯性负荷 耐热冲击 |
| | 耐火材料业 | | 高温窑炉 板棚 支架 | 耐高温 热性能 |
| 氮化物陶瓷 | 机械工业 | | 切割工具 | 高硬度 |
| | 火箭 发动机 | | 喷嘴 叶片等 | 耐热性 耐磨性 高强度 |
| | 汽车工业 | | 热反应器 燃烧室 | 耐热性 高强度 |

1.2.2 工程陶瓷的加工技术

工程陶瓷是一种难加工材料,其加工时表现出的高硬度、高脆性与其物理化学结构性能有关。日本学者 I.Inasaki^[3]等人研究表明,陶瓷晶体的化学键主要由共价键、离子键混合组成。如 Al_2O_3 中共价键和离子键之比为4:6, SiC中共价键与离子键之比为9:1。含离子键较多的材料易受温度的影响,而共价键在温度变化过程中比较稳定,即共价键材料具有低的热膨胀率和高热传导性。而且化学键具有方向性,原子堆积密度低,原子间距离大,使陶瓷显示出很大的脆性,成为难加工材料,特别是加工高精度、形状复杂的构件,非常困难,这导致了精加工费用大大增加,严重阻碍了工程陶瓷材料的进一步推广应用。显然,陶瓷材料作为工程材料的大规模应用,在很大程度上取决于陶瓷零件加工技术的发展。

工程陶瓷材料的加工可根据材料的种类、工件形状、要求的加工精度、表面粗糙度、

加工效率和加工成本等因素来选择不同的加工方法。表 1.2 列出了常见的工程陶瓷加工技术^[4]。

表 1.2 工程陶瓷加工技术分类
Tab.1.2 Machining technology sorts of Engineering Ceramics

| | | |
|-------|----------|--|
| 机械加工 | | 切削 磨削 钻孔等 |
| 高能束加工 | 放电加工 | 刻痕放电 线切割放电加工 |
| | 高压磨料水加工 | 高压磨料水加工 高压水加工 |
| | 超声波加工 | - |
| | 激光/等离子加工 | 激光 等离子 电子束加工 |
| 化学加工 | | 化学蚀刻 化学机械加工 |
| 复合加工 | | 化学机械加工 电解磨削 超声机械磨削 电火花磨削 超声电火花复合加工 电解电火花复合加工 电解电火花机械磨削复合加工 |
| 其他加工 | | 塑性加工 |

1.2.3 工程陶瓷的磨削机理

工程陶瓷材料的磨削加工是目前已有加工方法中应用最多的一种，特别适用于加工平面及柱形工件，所选用的砂轮一般是金刚石砂轮。对于金刚石砂轮磨削工程陶瓷的磨削机理，不同的学者有不同的解释。

1. 磨削时材料的去除是由金刚石磨粒作用于陶瓷工件瞬间产生的所有微观变形和破碎累积完成的。材料的去除方式随着材料内部缺陷（如裂纹、裂缝）的尺寸和密度以及作用区域应力大小的不同而不同。当切削刃接触工件形成的应力场比缺陷尺寸小时，材料主要通过塑性变形去除；当应力场大于缺陷尺寸时，则脆性微裂纹破碎将起主要的作用^[5]。

2. 压痕断裂力学模型近似：认为材料的去除一方面是由于磨粒切入工件时，磨粒切削刃前方的材料受到挤压，当压应力值超过陶瓷材料承受极限时，便被压溃，形成大片碎屑；另一方面磨粒切入工件时，由于压应力和摩擦热的作用，磨粒下方的材料会产生局部塑性流动，形成变形层，当磨粒划过后，由于应力的消失，引起变形层从工件上脱离，形成切屑。在材料去除的整个过程中，前刀面的压溃去除是主要的^[6]。

3. 切削模型近似：认为工程陶瓷材料磨削去除过程分为三个阶段：弹性滑擦、塑性去除和脆性断裂。弹性滑擦是指切削深度很小时，工件与磨粒之间仅作弹性接触滑动，此时不产生切屑。塑性去除是指弹性变形和粘塑性流动造成少量的磨屑，形成磨削表面，此时材料的去除绝大多数为微小破碎微粒形式。材料发生塑性变形的原因是由于磨粒切削刃的刃口钝圆半径较大，外锥角较小，在接触区容易形成较大的非弹性应力场，避免或减少了裂纹的产生和扩展。脆性断裂是在较大的切深条件下形成切屑的主要过程，磨粒给予工件材料施压作用而使其产生裂纹，进而产生局部破坏形成切屑^[6]。

对工程陶瓷材料磨削机理的解释还很多，但总的来说有一点是共同的，即塑性变形和脆性断裂是形成材料去除的主要原因。在工程陶瓷的磨削加工中，陶瓷材料的类别、

磨削用量、机床刚度、砂轮结合剂的种类、磨粒浓度及颗粒大小都是影响陶瓷工件表面质量及加工效率的重要原因。

1.3 工程陶瓷磨削力的研究简介

目前研究表明,工程陶瓷的磨削机理、磨削过程与金属及其它非金属材料有着显著的不同,而这一切仍处于探讨阶段。磨削力是反映磨削过程的基本特征问题之一,它与工程陶瓷的磨削机理、陶瓷材料的纤维结构及性能、磨削用量、磨削砂轮的类型及磨损状况、机床刚度以及磨削液的选用都有着密切的关系。同时,它也是评价材料可磨削性优劣的一个重要指标^[7]。除此之外,由于磨削力易于控制和测量,还常常被用于自动化监测当中,如通过测量磨削力以计算磨削能来检测陶瓷磨削机理的转变^[8],通过测量磨削力监测砂轮的磨损状况来及时修整或更换砂轮^[9]。因此,磨削力的研究对于工程陶瓷磨削机理的分析和磨削过程的研究有着重要的理论价值和实际意义。但是在国内,对工程陶瓷磨削力的研究还远远落后于国外。

1.3.1 磨削力

磨削力信号的研究是磨削加工中一个传统的研究课题,过去大多局限于静态分量,对动态分量的研究还很少。随着现代科学对磨削力分析精度要求的不断提高以及数字信号处理技术和时间序列分析方法的不断完善,动态磨削力信号的分析与处理逐渐被提上了日程。从信号分析的角度来说,动态磨削力信号是一种随机信号,它比较全面地反映了磨削加工的动态过程,具有丰富的内涵。通过对动态磨削力信号进行频谱分析和相关分析,可以提取到许多内在的信息,如通过频谱分析研究工程陶瓷的磨削机理和磨削用量对磨削力的影响规律,通过相关分析可以研究砂轮振动对磨削力的影响情况。这样,可以根据不同的加工要求,可以更好的制定磨削工艺,降低磨削成本。

1.3.2 磨削力比

同磨削力一样,磨削力比(法向磨削力与切向磨削力的比值)也是评价材料可磨削性的重要指标。研究表明,工程陶瓷的磨削力比比较大,即法向磨削力明显大于切向磨削力,这说明了金刚石磨料难以切入陶瓷表面,同时也证明了陶瓷磨削过程以具有压痕特征的摩擦耕犁为主,切屑变形很少发生,切向抗力很小。力比的变化反映了磨削加工的比能耗、磨粒磨损及加工质量。

1.3.3 比磨削刚度

在陶瓷磨削中,较大的法向磨削力表明了在工作表面的法向上,磨削工艺系统产生了较大的弹性变形,这将会严重影响加工精度。为此,I. Inasaki^[10]引入了“比磨削刚度”的概念,即单位切深时的法向磨削力 F_n/a_n 来解释法向磨削力对加工误差的影响程度。

其中 a_a (单行程磨削) 可用下式计算:

$$\frac{a_a}{a_p} = \frac{1}{1 + b_s k_w / k_s} \quad (1-1)$$

上式中, a_p 是名义切深, a_a 是实际切深, b_s 是磨削宽度, k_s 是机床刚度, k_w 是比磨削刚度。从上式可以看出, 比磨削刚度反映了实际切深与加工误差的变化情况。

1.3.4 比磨削能

比磨削能是磨削理论中的重要概念, 它和切向磨削力的关系十分密切, 其值可用下面的公式计算^[10]:

$$u = \frac{F_t v_s}{V_w a_a b_s} \quad (1-2)$$

上式中, a_a 是实际切深, F_t 是切向磨削力, b_s 是磨削宽度, v_s 是砂轮速度, V_w 是工件速度。在工程陶瓷的磨削过程中, 磨削能主要包括两部分: 一部分是工件塑性变形产生的剪切能, 另一部分是磨屑形成过程中, 磨粒和切屑之间的摩擦功。其中, 滑擦和耕犁部分所需的磨削能随着磨削参数的不同而变化, 切屑形成能却基本保持稳定。在粗加工中, 陶瓷材料主要以脆性断裂方式去除, 比能较小; 在精加工中, 去除率的降低使得未变形切屑尺寸减小, 导致更多塑性变形, 比能较大, 这主要是因为陶瓷材料发生塑性变形比发生脆性变形需要消耗更多的能量^[11]。因此, 可以通过测量切向磨削力来计算比磨削能以确定陶瓷材料的去除方式, 进一步分析陶瓷的磨削机理。

1.4 数字信号处理简介

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 作为信号与信息处理的一个分支学科, 起源于 17—18 世纪的数学。自 20 世纪 60 年代以来, 随着计算机和信息学科的飞速发展, 数字信号处理技术也得到了迅猛的发展, 并已形成一门独立的学科体系。国际上, 一般把 1965 年快速傅立叶变换 (FFT) 的问世, 作为数字信号处理这一新学科的开端^[12]。

数字信号处理是利用计算机或专用处理设备, 以数值计算的方法对信号进行采集、变换、综合、估值与识别等加工处理, 借以达到提取信息和便于应用的目的。与模拟信号处理技术相比, 数字信号处理技术及设备具有灵活、精确、抗干扰强、设备尺寸小、造价低、速度快等突出的优点。此外, 数字信号处理技术还具有以下特殊的功能: 一是对信号在时域、频域以及其它变换域内的特性进行分析, 以便对信号的特性与本质有更为清楚的认识; 二是对信号实施处理, 以改善其性能。目前, 数字信号处理技术在语音、雷达、声纳、地震、图像、通信系统、机械振动、遥感遥测、航空航天、故障检测、自

动化仪表等众多领域都获得了极其广泛的应用。经过几十年的理论研究和科学实践,数字信号处理自身已基本形成一套较为完整的理论体系,这些理论包括信号采集(A/D技术、采样定理)、离散信号分析(时域与频域分析、各种变换技术)、信号处理中的快速算法(FFT、快速卷积与相关)、信号估值(各种估值理论、功率谱估计)、滤波技术(各种数字滤波器的设计与实现)、信号建模(最常用的有AR, MA, ARMA, PRONY等各种模型)、信号处理技术的实现(软件实现与硬件实现)等等。

切削力分析是机械加工中最常见的问题的之一。在切削试验中有着多种不同的信号,如切削力信号、振动信号、噪声信号等等,研究目的不同,信号的处理方法也不一样。在工程陶瓷的磨削实验中,研究磨削参数及磨削过程对磨削力的影响规律,对动态磨削力信号进行时域、频域分析,都要用到数字信号处理技术。另一方面,由于工程陶瓷动态磨削力信号的复杂性与随机性,采用时间序列分析对其进行研究也是十分必要的。作为现代数据处理方法之一的时间序列分析,是在20世纪60年代Box Jenkins提出一套比较完善的建模理论及方法之后才发展起来的,它着重研究具有随机性的动态数据,特别是借助于依时间变量之间的相关结构来研究数据变换规律,即时域研究。近些年来,时间序列分析的理论和方法日趋成熟,其内容也极为丰富^[13]。目前,还没有学者采用数字信号处理技术和时间序列分析方法对工程陶瓷的磨削力信号进行定性或定量的分析研究。本论文中,将采用数字信号处理技术和时间序列分析方法对工程陶瓷动态磨削力实验数据进行分析与处理。

1.5 本课题的主要研究工作

1.5.1 课题背景

本文作者通过查阅国内外大量的研究资料发现,工程陶瓷磨削力的研究存在着以下的主要问题:

1. 工程陶瓷作为一种典型的硬脆材料,其磨削力信号的特性还不很明晰,在理论和实践中缺乏对其的检验。

2. 目前为止,几乎还没有人采用数字信号处理理论和时间序列分析方法来研究工程陶瓷动态磨削力信号,更不用说系统研究磨削用量、机床刚度、砂轮类型(不同粘结剂、不同颗粒大小)等对工程陶瓷磨削力时间序列的影响规律。

3. 人们在研究工程陶瓷磨削力的变化规律时,很少考虑到砂轮振动对工程陶瓷精密加工的影响,目前还没有学者对砂轮振动序列和磨削力序列的相关性进行研究。国内外还没有学者研究工程陶瓷动态磨削力的时间序列模型,也不能对动态磨削力信号作出预报与控制。

1.5.2 主要研究工作

针对当前工程陶瓷磨削力研究中存在的问题,本课题从以下几个方面展开工作:

1. 动态磨削力信号作为一种随机振动信号,在时域上是不确定的。通过对 Si_3N_4

陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷进行平稳性、各态遍历性、正态性及周期性检验，研究了工程陶瓷磨削力信号的分布特点。

2. 根据磨削加工实验，从时域、频域两个方面研究了磨削用量、机床刚度、磨削行程和砂轮类型对工程陶瓷静态磨削力、动态磨削力时间序列的影响规律，进一步分析了磨削用量、机床刚度、磨削行程和砂轮类型对陶瓷磨削加工表面质量、加工效率的影响情况。

3. 根据工程陶瓷的磨削实验，在不同的磨削条件下采用正交回归统计分析方法建立了 Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷静态磨削力的数学模型。

4. 为了深入分析砂轮振动对工程陶瓷磨削力的影响情况，选择相同磨削条件下的 Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷磨削力时间序列和砂轮振动序列，并对其进行分析，研究了砂轮振动对磨削力的影响情况。

5. 为了便于快速、准确地处理磨削加工时采集的试验数据，采用 Visual C++ 6.0 开发了磨削力数据处理软件。该软件采用数字信号处理、时间序列分析和数理统计中的多种常用算法，对磨削力信号从时域分析、频域分析两个方面进行了编程。

第二章 磨削力信号处理的软件设计

2.1 引言

在现代数据处理中,数字信号处理、时间序列分析和数理统计理论和方法的综合运用已经起着越来越重要的作用。特别是随着这些技术的不断发展和计算机应用的不断普及,采用计算机来实现上述的理论和方法,将使得磨削力数据的处理更为精确和完善。本章采用面向对象的 Visual C++6.0 开发了磨削力数据处理软件模块,该模块具备了数字信号处理、时间序列分析和统计检验的常用功能,为工程陶瓷磨削力数据的分析处理提供了方便。

2.2 软件模块功能分析

2.2.1 软件功能

作为数据处理的通用模块,应该具备静态、动态信号分析处理的常用功能,这包括以下几个方面:

1. 能够准确的选取信号样本,形成时域分析图。提供可视任意长度的选取信号样本。
2. 能够对选取信号进行去奇异值、去均值、去趋势项的可视化预处理。
3. 能够对选取信号进行平稳性、各态遍历性、正态性和周期性检验,能够分析所选取信号的特性。
4. 能够对选取信号进行谱分析(经典谱分析和现代谱分析),提供时序参数模型的 AR 谱和功率谱图的比较。
5. 能够对选取信号提供建模方案。

2.2.2 软件结构

本软件是在 Windows 环境下采用 VC++ 开发的 Win9x 应用程序,它具备了 Win9x 应用程序的特点:消息驱动;图形菜单用户界面。图 2.1 是该软件的模块结构图。

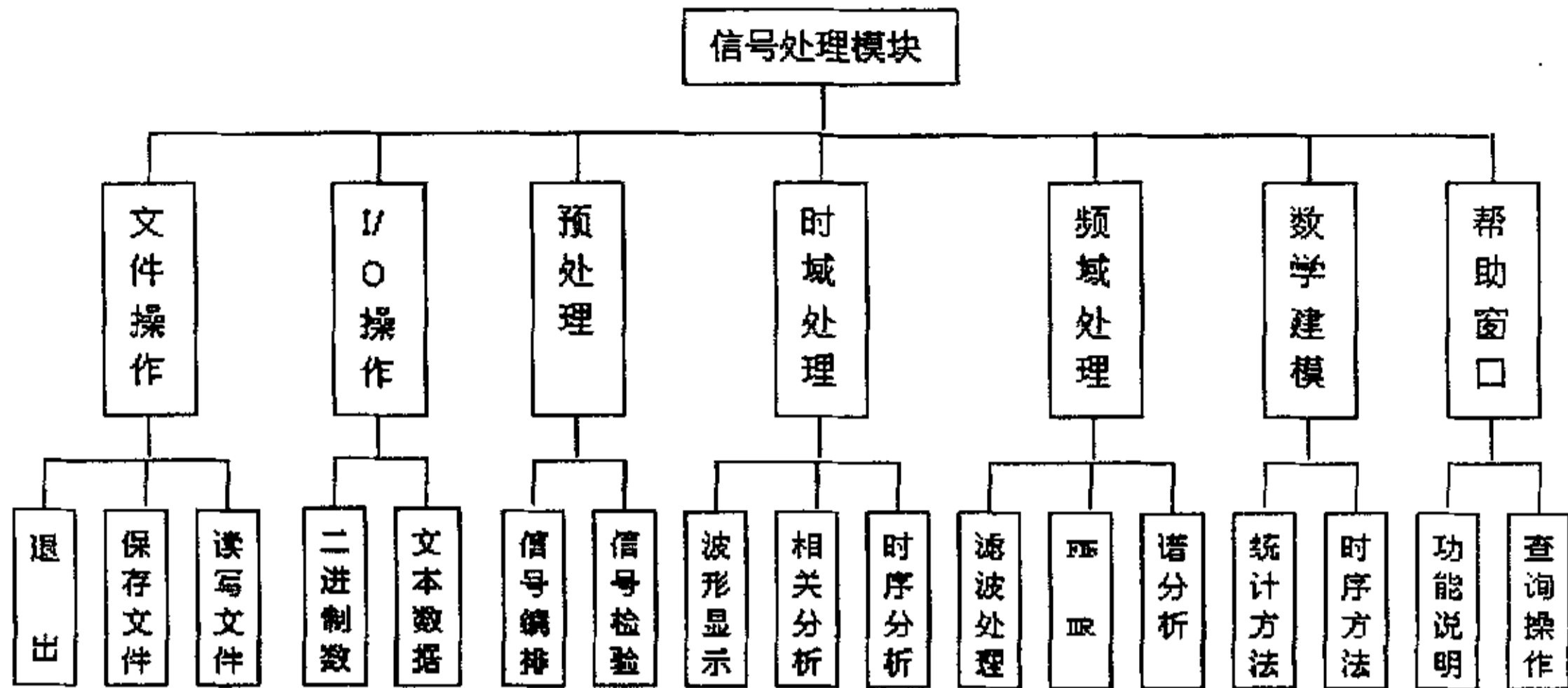


图2.1 磨削力信号处理软件模块图

Fig.2.1 Software module of grinding force signal processing

2.3 软件设计方法

2.3.1 面向对象的软件设计

随着计算机硬件和软件的飞速发展，计算机领域中的观念和方法也日新月异。在70年代，人们认为结构化设计是最好的系统开发方法。然而，随着计算机技术的不断深入和发展，这种传统的系统开发方法已不太适应越来越复杂、越来越庞大的软件开发。80年代以来，面向对象的软件设计方法（Object-Oriented Programming，简称 OOP）引起软件开发者的关注和重视，它克服了传统的结构化方法在建立问题系统模型和求解问题时存在的缺陷，提供了更为合理、有效、自然的方法为广大的系统分析和设计人员所认识、接受、应用和推广。实际上，OOP 技术已成为90年代以来软件开发的主流技术^{[14][15]}。

OOP 技术是一种按照人们对现实世界习惯的认识规律和思维方式来研究和模拟客观世界的方法。它将现实中的任何事物均视为“对象”（Object），将对象的属性（Attribute）和属性的方法（Method）封装在一起构成类（Class），对象间通过相互传递消息（Message）来进行通讯。与传统的结构化设计方法相比，OOP 技术具有以下几个特点：

1. 封装性

把数据和处理数据的代码捆绑在一起，构成一个类，对象封装界面上的信息是公开的，而内部的信息是隐蔽的。

2. 继承性

子对象不但可以继承父对象定义的数据成员和方法，而且还可增加自己的数据成员

和方法。这样一个程序系统的数据成员和方法只定义一次，系统的处理能力可以通过对象的继承性实现共享，系统中的类因此具有了层次结构。同时继承还具有多重性，即一个派生类可以继承多个基类，这使得派生类的实例（对象）具有更加灵活和完善的功

3. 多态性

一个名字可以具有多种语义。多态性主要强调在一个类中可以使用相同函数的多个版本，在运行时决定使用特定的版本，即相同名称的操作方法随着不同类型的入口参数存取方式以及返回值的不同而具有不同的功能。

4. 易维护性

对象实现了抽象和封装使得其中可能出现的错误局部于自身，不会传播，同时封装性使得对象代码的可读性较好，易于测试和修改。

5. 可重用性好

OOP 技术提供了高内聚、低耦合以及对象的高独立性，极大的降低了开发成本，同时提高了代码重用性。

6. 开发效率高

OOP 技术属于增量性设计，表现在继承性使得系统功能不断扩充，而不影响基于其上软件的运行，能很好地适应系统不断发展和变化的要求。

2.3.2 软件功能实现

由于面向对象的软件设计方法具有以上的特点，因此选择该方法进行磨削力信号处理的程序设计，下面列出了该软件所使用的一些类及方法：

1. CPretreatDataClass（数据预处理类）

```
class CPretreatDataClass
{public:
int PautaRule(...);          用 Pauta 准则去除奇异点
int ChauvenlRule(...);      用 Chauvenl 准则去除奇异点
void Detrend(...);          去除趋势量
int CalmChaVer(...);         平稳性检验
double StatChaVer(...);      正态性检验
void PeriodChaVer(...);      周期检验
};
```

2. CFilterDesignClass（数字滤波器设计类）

```
class CFilterDesignClass
{ public:
void gain(...);              数字滤波器响应
int IIRDFDesign(...);        IIR DF 设计
void FIRWinDFDesign(...);    采用窗函数法设计 FIR DF
```

```

void WienerDFDesign(...);   Wiener DF 设计
void LMSDFDesign(...);     LMS DF 设计
double WindowCal(...);     窗函数
int Levin(...);           用 Levinson 方法计算 Toeplitz 方程
};

```

3. CTFDAnalysisClass (时域频域分析类)

```

class CTFDAnalysisClass
{ public:
void FFT2(...);           按时间抽选基 2FFT
void WelchPSpecE(...);   用 Welch 平均周期图进行谱估计
void BTPSpecE(...);      用 Blackman-Turkey 方法进行谱估计
void YuleWalkerSpecE(...); 用 Yule Walk 方法进行谱估计
void BurgSpecE(...);     用 Burg 算法进行谱估计
void ARMASpecE(...);     用 ARMA 模型进行谱估计
void LD(...);           用 L-D 算法计算 YuleWalker 方程
};

```

4. CStaticsClass (统计分析类)

```

class CStaticsClass
{ public:
void OriginDataModel(...); 建立数学模型
void CoefficientVerify(...); 相关系数检验
void Tverify(...);        T 检验
};

```

5. CDrawClass (画图类)

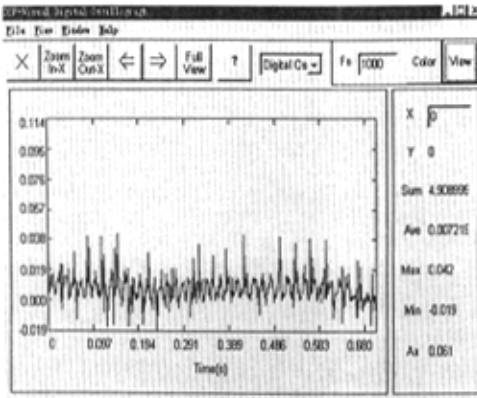
```

class CDrawClass
{ public:
void DrawLine(...);       画图
void GetScaleOfWin(...); 计算窗口放大倍数
};

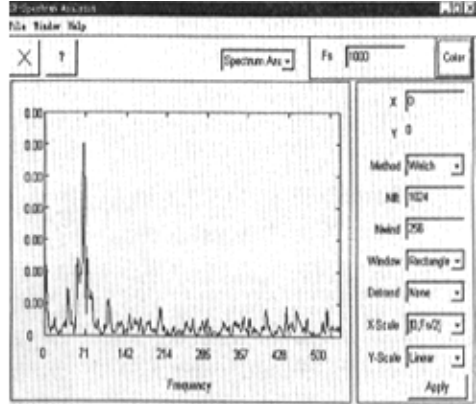
```

2.3.3 软件界面设计实例

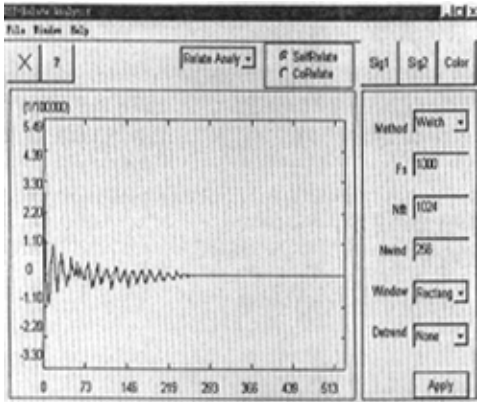
通过采用 VC++6.0 对上述的类及方法进行编程, 在 Win9x 操作平台上完成软件对象的程序化。图 2.2 (a) (b) (c) 为磨削力数字信号处理软件的界面设计实例。



(a)



(b)



(c)

图 2.2 磨削力数字信号处理软件界面设计实例

Fig.2.2 The instances of interface design in digital signal processing software of grinding force

2.4 软件核心算法

2.4.1 时域分析处理

时域的分析处理通常是指在时间域内对数据进行的各种运算，如求平均、方差以及数据的加窗、插入等，或者进行相关分析等操作^[12]。

1. 数据的平均化处理

对输入输出序列进行平滑处理，可以降低随机干扰，减少统计误差，提高信噪比。根据处理目的的不同，常用的序列平均方法有算术平均和加权平均，其原理和计算方法如下所示。其中 m —实验数据记录的组数； n —每组实验采样序列的点数。

(1) 算术平均

$$y_m^{(n)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^{(n)} \quad (n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (2-1)$$

其递推运算形式为:

$$y_m^{(n)} = y_{m-1}^{(n)} + \frac{x_m^{(n)} - y_{m-1}^{(n)}}{m} \quad (m = 1, 2, \dots, M; n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (2-2)$$

(2) 频率平滑

通常用于频域内对频谱(或功率谱)进行平滑处理。三点平滑公式为:

$$\bar{x}_n = (x_{n-1} + x_n + x_{n+1}) \quad (2-3)$$

一般,对第 n 点用近旁的 k 个记录值进行平滑处理的公式可记为:

$$\bar{x}_n = \frac{1}{k} \sum_{i=(k-1)/2}^{(k+1)/2} x_{n+i} \quad (n = \frac{k+1}{2}, \frac{3k+1}{2}, \dots, \frac{N}{k}; i = \frac{k-1}{2}) \quad (2-4)$$

2. 数据加窗处理

在信号处理中不可避免地要遇到数据截断问题,数据的截断常会引起泄漏,为数据分析带来误差。为了减小这种误差,一般在时域上对数据进行加窗处理。根据信号性质与处理目的的不同,可选择不同的窗函数。较常用的窗函数有矩形窗、三角窗、Hanning(汉宁)窗、Hamming(海明)窗等,其中,矩形窗具有最窄的主瓣,但也有最大的边瓣峰值和最慢的衰减速度,Hanning窗和Hamming窗的主瓣稍宽,但有较小的边瓣峰值和较大的衰减速度。

(1) 矩形窗

$$w(n) = 1, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2-5)$$

(2) 三角窗(又称 Bartlett 窗)

$$w(n) = 1 - \frac{2|n|}{N}, \quad -\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2} \quad (2-6)$$

(3) Hanning(汉宁)窗

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos \frac{2\pi n}{N-1} \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2-7)$$

(4) Hamming(海明)窗

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{N-1} \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2-8)$$

3. 相关分析

相关分析可分为自相关分析和互相关分析。自相关分析可以寻找隐藏在随机信号中的周期信号,或者描述同一信号在不同时刻存在的相关性。互相关分析可以反映出两个

信号之间在不同时刻是否存在某种联系或其相似程度。其离散表达式分别为：

$$\hat{R}_{xx}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n)x(m+n), \quad |m| \leq N-1 \quad (2-9)$$

$$\hat{R}_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n)y(m+n), \quad |m| \leq N-1 \quad (2-10)$$

2.4.2 频域分析处理

频域分析是另一种分析处理数据的方式，它是将时间域内的信号通过一定的信号处理技术（如 FFT）转换到频率域内，然后在频域内再进行不同形式的处理。随着计算机技术和数字信号处理技术的不断发展，频域分析逐渐得到了人们的重视。在频域分析中，数据滤波和频谱分析是最为常见的，而快速傅立叶变换（FFT）是频域分析的基础^[12]。

1. 数据滤波

(1) 滤波原理

滤波是数据频域分析中最为常见的一种数据处理方法。在工程中，实际信号 $x(n)$ 一般包括两个成分，一个是有用信号 $s(n)$ ，一个是干扰信号 $u(n)$ ，即： $x(n) = s(n) + u(n)$ 。对信号滤波的目的就是削弱干扰信号，增强或保留有效信号。

如果干扰信号频谱 $U(\omega)$ 与有效信号频谱 $S(\omega)$ 是分离的。即当 $S(\omega) \neq 0$ 时， $U(\omega) = 0$ ，则可以设计一个频率函数 $H(\omega)$ ，把它与 $x(n)$ 的频谱 $X(\omega) = U(\omega) + S(\omega)$ 相乘，即可得到 $Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega) = S(\omega)$ ，其中， $H(\omega)$ 的表达式如下。

$$H(\omega) = \begin{cases} 1 & S(\omega) \neq 0 \\ 0 & S(\omega) = 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

如果干扰信号频谱 $U(\omega)$ 与有效信号频谱 $S(\omega)$ 是并不完全分离的实际信号，可以根据 $U(\omega)$ 和 $S(\omega)$ 的不同特点设计不同的频率函数 $H(\omega)$ ，达到消除干扰信号的目的。

通常所说的滤波就是指用一个频率函数 $H(\omega)$ 与信号的 $x(n)$ 的频谱 $X(\omega)$ 相乘得到 $Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega)$ 的过程。而数字滤波就是使用数字计算的方法对原始信号进行过滤，改变其频率成分以达到增强有用信号、削弱干扰、提取需要信息的过程。处理中采用的具体算法则称为数字滤波器。

(2) 数字滤波器的设计

按照数字滤波器的滤波形式可将滤波器分为：低通滤波、高通滤波、带通滤波、带阻滤波；按照数字滤波器冲激响应函数的时间特性可分为：无限冲激响应（IIR）数字滤波器和有限冲激响应（FIR）数字滤波器；同时，滤波器还分为经典数字滤波器和现代数字滤波器的设计，其中，前者主要是对干扰信号频谱 $U(\omega)$ 与有效信号频谱 $S(\omega)$ 分离情况的滤波，后者主要是对干扰信号频谱 $U(\omega)$ 与有效信号频谱 $S(\omega)$ 相互重叠情况的滤波，其目的是从含有噪声的数据记录（即时间序列）中估计出信号的某些特征或信号本身，这包括维纳滤波、卡尔曼滤波和自适应滤波等，对于滤波器的设计理论，可以参见资料^[12]。

2. 频谱分析

常用的谱分析方法有幅值谱、功率谱、倒谱等形式，其中功率谱估计的应用范围很广，已经受到各学科和应用领域的极大重视，它分为经典谱估计和现代谱估计。

(1) 功率谱估计

经典功率谱估计表示了观测信号在频域范围内的能量分布状态，它是以快速傅立叶（FFT）变换为基础的，其方法主要有直接法（又称周期图法）和间接法（又称自相关法或 BT 法），对实际取样序列 $x(n)$ 的经典谱估计计算公式如（2-12）（直接法）和（2-13）（间接法）所示，其中 $X(e^{j\omega})$ 为取样序列 $x(n)$ 的傅立叶变换， $\hat{r}(m)$ 为取样序列 $x(n)$ 估计出的自相关函数。经典谱估计虽然计算效率

$$\hat{P}_{PER}(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} |X(e^{j\omega})|^2 \quad (2-12)$$

$$\hat{P}_{BT}(e^{j\omega}) = \sum_{m=-M}^M \hat{r}(m) e^{-j\omega m} \quad |M| \leq N-1 \quad (2-13)$$

较高，但有着频率分辨率较低和旁瓣泄漏严重的固有缺点，对其进行平均、加窗平滑处理，可以改善其部分性能，但始终不能从根本上解决频率分辨率和谱估计稳定性之间的矛盾，特别是在实际取样序列 $x(n)$ 长度很短的情况下，这一矛盾显得尤为突出。

现代谱估计是以参数模型为基础的研究方法，通过建立一个准确或至少近似的模型，用估计得到的模型参数计算功率谱，而不必像经典功率谱估计方法那样主观地认为凡未观测到的数据都等于零，这就从根本上摒弃了对数据序列加窗的隐含假设。如自回归 AR (p) 模型输出功率谱为：

$$P_x(e^{j\omega}) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k} \right|^2} \quad (2-14)$$

(2) 倒谱

磨削实验中实测的磨削力信号是很复杂的,许多频率成分重叠在一起,仅仅靠功率谱很难区别开来,而倒谱是解决这一问题的有效方法。倒谱的定义为:

$$C_p(q) = \left| F \left\{ \log P_x(e^{j\omega}) \right\} \right|^2 \quad (2-15)$$

即对功率谱取对数,再经一次 FFT 变换。

3. 快速傅立叶变换 (FFT)

1965 年, J. W. Cooley 和 J. W. Tukey 年提出的快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 算法是数字信号处理发展史上的一个转折点,之后,新的算法不断涌现。本软件采用时间抽取 (DIT) 基 2FFT 算法,其本质是把长数据序列的离散傅立叶变换 (DFT) 的计算适当地分解为短序列的 DFT 的计算,原理如下。

序列 $x(n)$ 的离散傅立叶变换为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2-16)$$

将序列 $x(n)$ 按序号 n 的奇偶分成两组,即:

$$\left. \begin{array}{l} x_1(n) = x(2n) \\ x_2(n) = x(2n+1) \end{array} \right\} n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1 \quad (2-17)$$

因此 $x(n)$ 的傅立叶变换可写成为:

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n)W_N^{2nk} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1)W_N^{(2n+1)k} \\ &= \sum_{n=0}^{N/2-1} x_1(n)W_{N/2}^{nk} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x_2(n)W_{N/2}^{nk} \end{aligned} \quad (2-18)$$

根据上式及 W_N 的周期性与对称性,可得:

$$\begin{cases} X(k) = X_1(k) + W_N^k X_2(k), \\ X(k + \frac{N}{2}) = X_1(k) - W_N^k X_2(k), \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1 \quad (2-19)$$

式中

$$\begin{cases} X_1(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n)W_{N/2}^{nk}, \\ X_2(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1)W_{N/2}^{nk} \end{cases}$$

图 2.3 是反序输入顺序输出时间抽选基 2 的 FFT 算法信号流图。

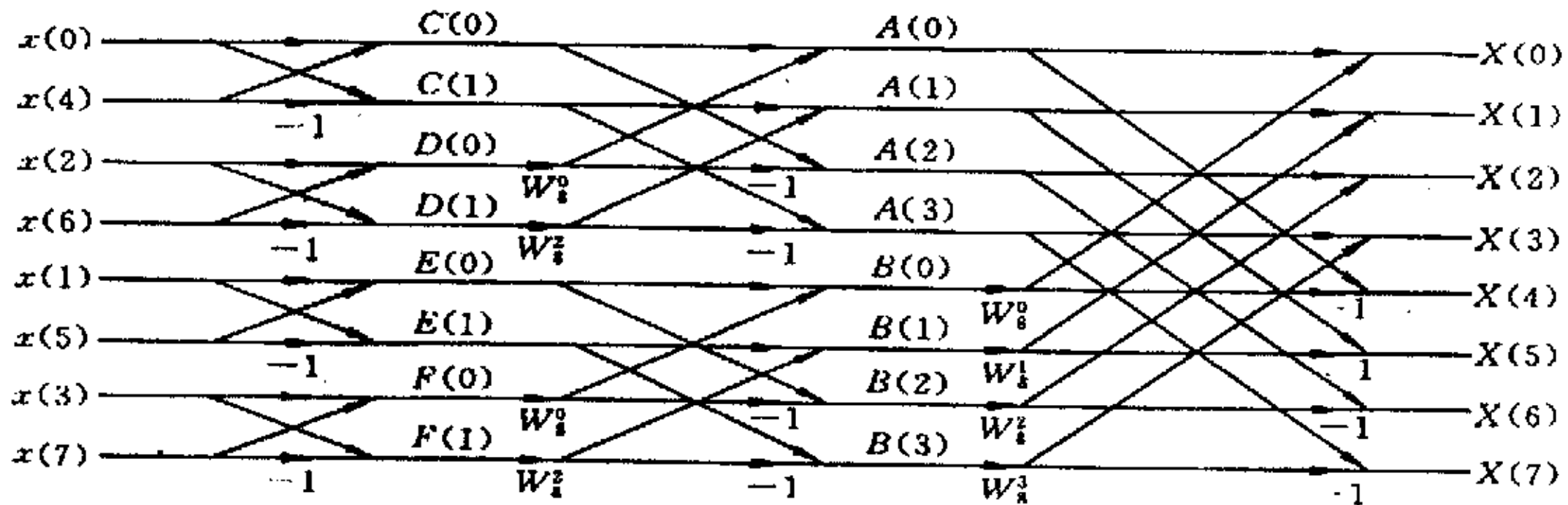


图 2.3 反序输入顺序输出时间抽选基 2FFT 算法信号流图

Fig.2.3 Flow Chart of Decimation in Time based 2FFT

2.4.3 统计分析

统计分析在数据处理中起着非常重要的作用，程序中主要采用假设检验的方法（如正态检验、T 检验等）完成时间序列的特性检验以及采用回归统计方法对磨削力实验数据进行建模等，对于统计分析的理论和方法参加资料^[16]。

2.5 软件模块测试

在软件开发的过程中，人们使用了许多保证软件质量的方法来分析、设计和实现软件，但由于人们难免在工作中会犯错误，特别是在大型软件系统中，有一些错误和缺陷非常隐蔽，如果没有排除，将会造成很大的损失。因此，软件测试在软件开发过程中具有非常重要的作用。

2.5.1 软件测试的目的和原则

1. 目的

- (1) 测试是程序的执行过程，目的在于发现错误和缺陷。
- (2) 一个好的测试用例在于能够发现未发现的错误。
- (3) 一个成功的测试是发现了至今未发现的错误的测试。

2. 原则

- (1) 尽早地和不断地进行测试。
- (2) 在设计测试用例时, 应包括合理的输入条件和不合理的输入条件。
- (3) 严格执行测试计划, 避免测试的随意性。
- (4) 避免检查自己的程序。
- (5) 妥善保存测试计划及最终分析报告。

2.5.2 软件测试的类型

软件测试包括黑盒测试和白盒测试两种类型。所谓的黑盒测试是指已知产品的功能设计规格, 测试每个实现了的功能是否符合要求; 白盒测试是指已知产品的内部工作过程, 测试每种内部操作是否符合设计规格要求。

2.5.3 信号处理模块测试

本软件的测试可以分为单元测试、组装测试和系统测试三个部分。单元测试是指对于时域分析、频域分析、统计分析等各个模块的测试, 采用白盒测试; 组装测试是指将各个模块组装成信号处理软件进行的测试, 采用黑盒测试; 系统测试是指将所有的模块按照要求组装完毕之后, 对整个信号处理软件系统进行的测试, 采用的是黑盒测试。

2.6 小结

本信号处理软件具有以下的特点:

1. 数字信号处理、时间序列分析、统计检验的常用功能。
2. 能够接收各种数据文件, 并能进行分析处理。
3. 该软件操作简单, 具备可视化功能。

第三章 工程陶瓷磨削力时间序列的检验

3.1 引言

工程陶瓷作为一种典型的硬脆材料,其磨削力信号的特性与金属及其它非金属材料有较大的差别。过去对工程陶瓷磨削力的研究大多局限于静态分量,对动态分量的研究还很少。研究表明^[17],在磨削大多数的金属材料时,动态磨削力信号是具有正态分布的平稳信号。但在磨削工程陶瓷等硬脆材料时,由于这些材料具有明显的微观结构分布不均匀的特点,使得磨削力信号呈现出很大的随机性和非线性,至今,其分布特点还不是很清楚。因此,在磨削工程陶瓷材料时,动态磨削力信号是一种随机振动信号,在时域上是不确定的,对其进行平稳性、各态遍历性、正态性及周期性检验,有助于分析磨削力信号的分布特点,进而采用适当的信号处理方法来研究硬脆材料动态磨削力信号的时域、频域特征,为进一步分析其对磨削过程的影响规律打下理论基础。本章通过对 Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷的磨削实验,采用时间序列分析和统计检验的方法,对其动态磨削力信号做出严格的检验,分析出工程陶瓷等硬脆材料磨削力信号所具有的分布特点。

3.2 实验条件与研究方法

3.2.1 实验条件

1. 工件材料

实验所选材料为 Si_3N_4 基陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷 (95 系列),其机械物理性能指标如表 3.1,表 3.2 所示。

表 3.1 Si_3N_4 陶瓷的机械物理性能指标

Tab.3.1 Mechanical and physical performance index of Si_3N_4

| 材料 | 烧结方式 | 密度 (g/cm^3) | 抗弯强度 (Mpa) | 显微硬度 (HV10) | 断裂韧性 ($\text{Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$) | 弹性模量 (Gpa) |
|-------------------------|------|----------------------------------|---------------|----------------|---|---------------|
| Si_3N_4 | 气压烧结 | 3.20 | 750 | 1600 | 8 | 310 |

表 3.2 Al_2O_3 陶瓷的机械物理性能指标

Tab.3.2 Mechanical and physical performance index of Al_2O_3

| 材料 | 氧化铝含量 (%) | 体积密度 (g/cm^3) | 硬度(莫氏) | 抗压强度 (Mpa) | 吸水率 (%) |
|---------------------------------|-----------|------------------------------------|--------|---------------|---------|
| Al_2O_3 (95 系列) | 93—96 | 3.6—3.7 | 9 | 2000 | 0.02 |

2. 实验装置

磨削实验是在远山 FC-200D PCD&PCBN 刀具磨床上进行的，实验条件如下所示：

磨削方式：端面磨削

磨削砂轮类型：树脂结合剂砂轮，其型号为 EWAG BP 102 359T，浓度 C100

砂轮直径：D=150mm

砂轮宽度： $b_s=6\text{mm}$

磨削液：水基磨削液

砂轮磨削速度： $v_s=14.06\text{m/s}$

砂轮摆动速度 $V_r=1032\text{mm/min}$

磨削深度： $a_p=30\mu\text{m}$

实验采用的测力装置由德国 Kistler 三相压电式测力仪、电荷放大器、稳压电源和配有数据采集板的微型计算机等组成。实验中，从测力仪获得的磨削力信号，首先经电荷放大器转变成电压信号，然后通过数据采集器，将模拟信号转变成数字信号，并将离散的磨削力序列以数据文件的形式存储在计算机磁盘上。实验原理示意图如图 3.1 所示。

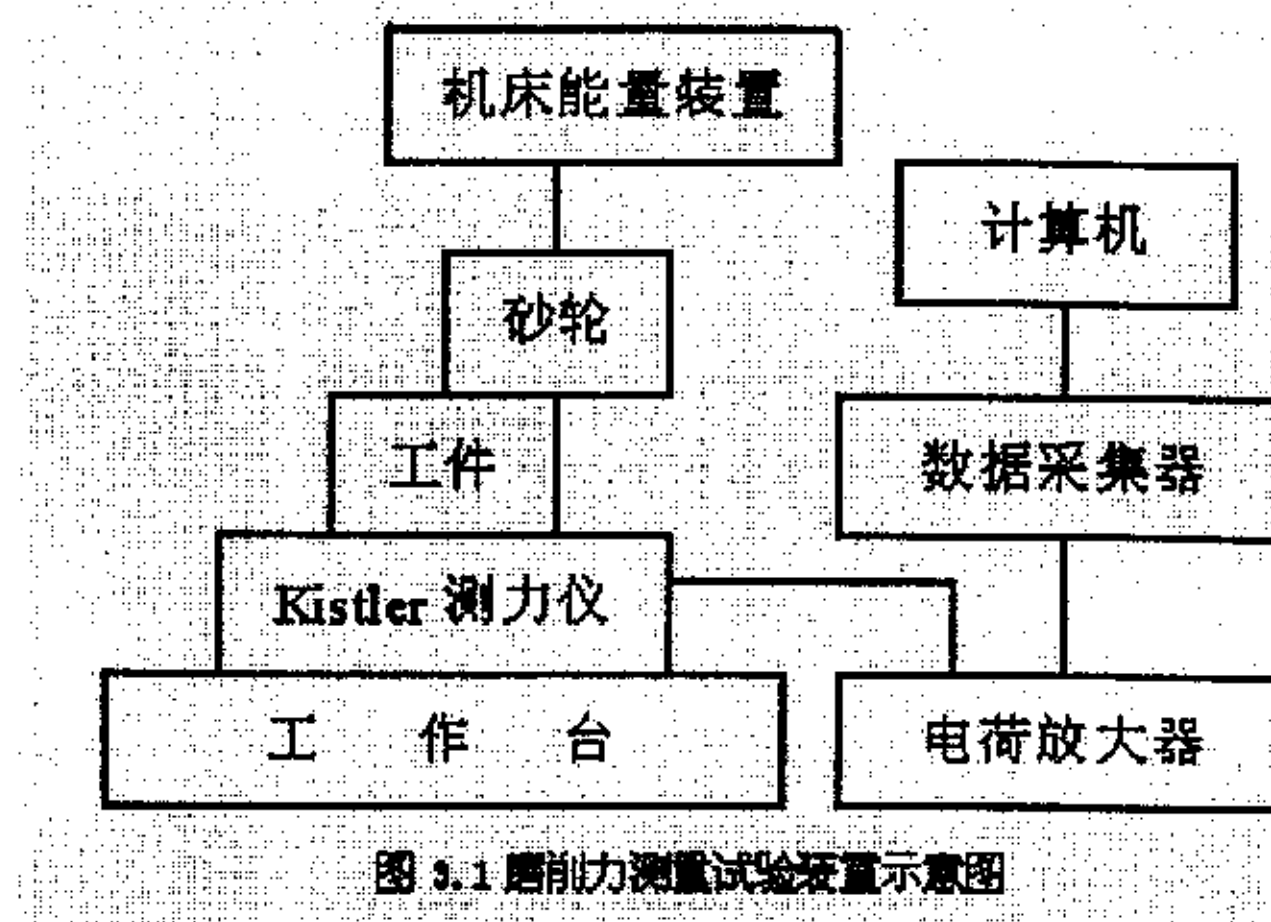


Fig.3.1 Experiment set-up during measuring grinding force in grinding ceramics

3.2.2 研究方法

1. 平稳性检验

如果一离散时间信号 $x(n)$ 的均值与时间 n 无关，自相关函数 $r_x(n_1, n_2)$ 和 n_1, n_2 的选取无关，而仅和 n_2, n_1 之差有关，则称信号 $x(n)$ 为宽平稳随机信号。平稳性检验是进行数据分析的前提，平稳数据与非平稳数据的分析方法有着很大的不同。平稳性检验可以在数模 (A/D) 转换之前对模拟信号进行，也可以在转变为数字信号之后进行，常用的方法有目视检查法、均方根检验法及轮次检验法^[18]。其中，轮次检验法是一种常用的检

验法,它属于非参数检验法。其检验方法是将采集数据等分成 N 个区间,通过判断轮次数是否在轮次区间 (R_1, R_2) 之内来检验所测信号是否为平稳信号。

2. 各态历经性检验

从理论上确定一个随机振动过程的总体是否符合各态历经的假设,要看其集合平均值是否等于时间平均值,这无论是采用模拟式分析或数字式分析都是很困难的。因此,目前对各态历经性的检验主要是靠物理判断,即若该随机过程的各个样本本身是平稳的,而且获得各个样本的基本物理因素大体相同,则认为由这些样本所代表的随机过程的总体是各态历经的^[12]。

3. 正态性检验

实际工程中的随机数据在很多情况下具有正态概率分布密度,但有时也有例外。对随机振动过程正态性检验的方法可以采用物理判断法、概率密度函数测量法和 χ^2 拟合优度检验法。其中,皮尔逊 χ^2 检验法^[19]属于非参数假设检验,即在不了解总体分布的数学形式下,关于总体的一般性推断,因此较为常用。

4. 周期性检验

随机振动信号是否具有周期性,可以根据其物理因素是否具有产生周期信号的可能性进行估计,也可以采用数据分析的方法(如自相关函数分析法、概率密度函数曲线判断法及自功率谱密度函数图形判断法)来判断。本文采用自相关函数分析法^[12]来判定 Si_3N_4 陶瓷的动态磨削力信号是否具有周期性。假设采集到的信号 $x(n)$ 是由磨削力信号 $s(n)$ 和白噪声信号 $u(n)$ 组成的,即 $x(n) = s(n) + u(n)$ 。假定 $s(n)$ 是周期的,周期为 M , $x(n)$ 的长度为 N ,且 $N \gg M$,则 $x(n)$ 的自相关函数为:

$$\begin{aligned} r_x(m) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [s(n) + u(n)][s(n+m) + u(n+m)] \\ &= r_s(m) + r_{us}(m) + r_{su}(m) + r_u(m) \end{aligned}$$

式中, $r_{us}(m)$, $r_{su}(m)$ 是 $s(n)$ 和 $u(n)$ 的互相关,这两项很小(一般噪声序列 $u(n)$ 是随机的,和信号序列 $s(n)$ 应无相关性), $r_u(m)$ 是噪声 $u(n)$ 的自相关函数,主要在 $m=0$ 处有值,当 $|m| > 0$ 时,此项衰减的很快。因此,若 $s(n)$ 是以 M 为周期的, $r_s(m)$ 也应是周期的,且周期也为 M 。

3.3 信号检验

3.3.1 实验结果

在 Si_3N_4 陶瓷的磨削实验中，记录的其中一次动态磨削力随时间的变化关系曲线如图 3.2 所示（图中表示出了三个方向的磨削力）。从图中可以看出， Si_3N_4 陶瓷的磨削力信号呈现出一定的波动性，法向磨削力 F_z 较大，切向磨削力 F_y 较小，而 F_x 在零上下波动。因此，在对工程陶瓷磨削力信号进行研究时，主要考虑法向磨削力和切向磨削力的影响。但该信号是否具有平稳性、各态遍历性、正态性及周期性，从图中很难观察出来，下面以 Si_3N_4 陶瓷的法向磨削力为例对其进行检验。

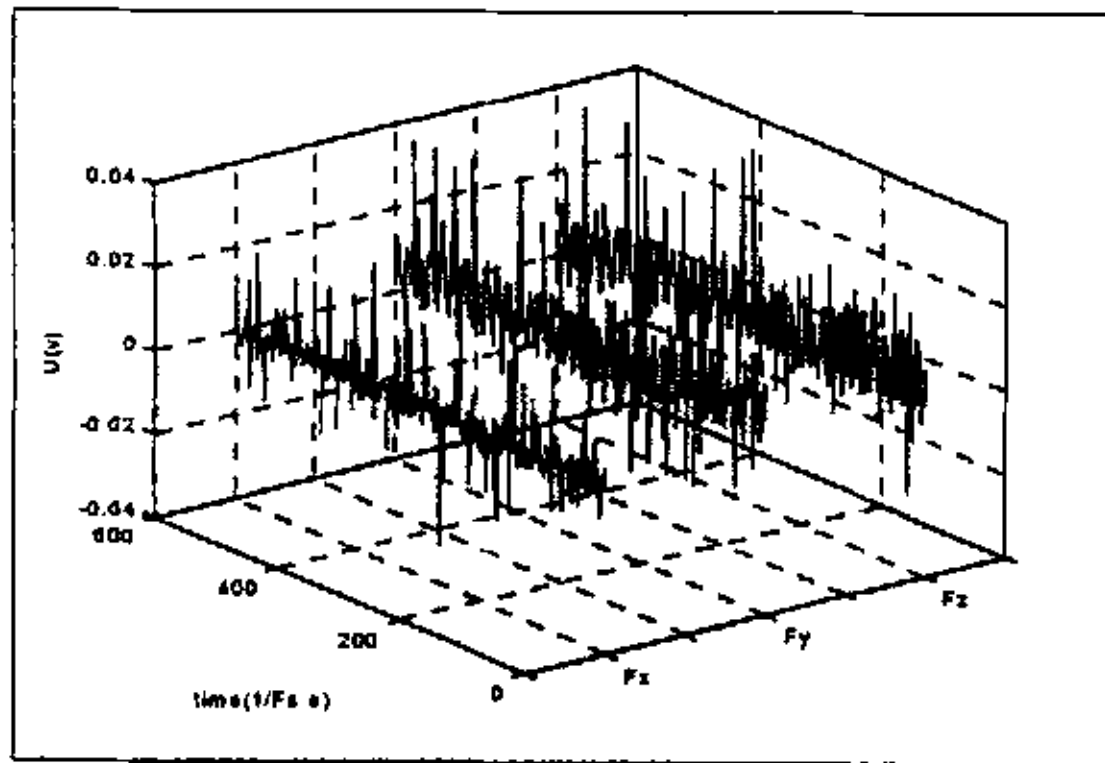


图 3.2 Si_3N_4 陶瓷动态磨削力变化曲线图
Fig.3.2 Dynamic grinding force graph about Si_3N_4

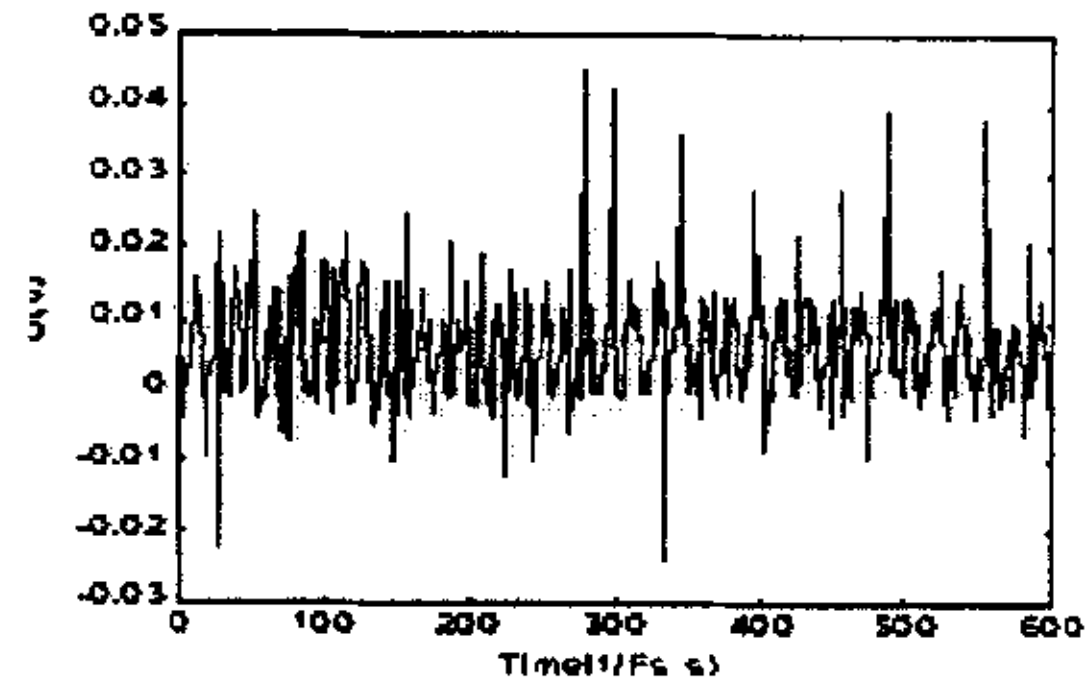


图 3.3 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力时域曲线图
Fig.3.3 Normal grinding force graph about Si_3N_4

3.3.2 信号检验

1. 平稳性检验

根据图 3.3 所示的波形特征来看，磨削力振动数据的平均值波动较小，且振动波形的峰谷变化比较均匀，频率结构比较一致。因此，推测该信号是平稳的。下面采用轮次检验法对其进行严格的检验。

在图 3.3 所测数据中，将分段数 N 设为 20，在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下，查轮次分布表 3.3 得到轮次区间 $(6, 15)$ 。作者通过轮次检验程序计算出轮次数 R 为 8，落在轮次区间之内，故接受此假设。通过对其它组数据进行相同的检验，也得出了类似的结论。这说明 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号中没有明显的潜在趋势，是平稳信号。

2. 各态历经性检验

由上述的平稳性检验可知，硬脆材料动态磨削力信号符合各态历经的假设。因此，单一样本函数随时间变化的历程可以包括该信号所有样本函数的取值经历。

表 3.3 轮次分布表
Tab3.3 Distribution of Turning

| | | | | |
|-------|-------|------|------|-------|
| n=N/2 | 0.975 | 0.95 | 0.05 | 0.025 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 9 | 5 | 6 | 13 | 14 |
| 10 | 6 | 6 | 15 | 15 |
| 11 | 7 | 7 | 16 | 16 |
| ... | ... | ... | ... | ... |

表 3.4 皮尔逊 χ^2 检验的计算表
Tab.3.4 The calculation of χ^2 verification

| 分组 (i) | 组限 (Xi) | 组限 (ui) | 概率 (Pi) | 预期频数 (nPi) | 实际频数 (fi) | $(fi-nPi)^2/nPi$ |
|--------|----------|----------|---------|------------|-----------|------------------|
| 1 | -0.005 | -2.079 | 0.0189 | 7.054 | 2 | 5.0879 |
| 2 | -0.003 | -1.68 | 0.0277 | 10.36 | 6 | |
| 3 | -5E-04 | -1.281 | 0.0574 | 21.475 | 23 | 0.1083 |
| 4 | 0.0015 | -0.882 | 0.0849 | 31.764 | 60 | 25.1004 |
| 5 | 0.0035 | -0.484 | 0.1355 | 50.685 | 53 | 0.1058 |
| 6 | 0.0055 | -0.848 | 0.1518 | 56.773 | 29 | 13.5865 |
| 7 | 0.0075 | 0.314 | 0.157 | 58.714 | 47 | 2.3372 |
| 8 | 0.0095 | 0.7127 | 0.1388 | 51.926 | 44 | 1.2099 |
| 9 | 0.0115 | 1.1115 | 0.1048 | 39.21 | 52 | 4.1718 |
| 10 | 0.0135 | 1.5102 | 0.0677 | 25.316 | 41 | 9.7165 |
| 11 | 0.0155 | 1.909 | 0.0374 | 13.98 | 11 | 0.6353 |
| 12 | 0.0175 | 2.3077 | 0.0176 | 6.597 | 3 | 1.9501 |
| 13 | ∞ | ∞ | 0.0105 | 3.935 | 3 | |
| | | | 1 | 373.87 | 374 | 64.009 |

上述的平稳性和各态历经性检验是针对工程应用中的一种近似假设的检验。实际上, 只有通过对客观振动过程的长期观察及大量的数据分析, 才能最终判定该随机过程是否符合平稳性或各态历经性的数学模型假设。但工程实际中并不如此苛求, 因此可以采用上述的方法来判断磨削力信号的平稳性和各态历经性。

3. 正态性检验

下面采用皮尔逊 χ^2 检验法对图 3.3 所示的数据进行正态性检验 (为简化计算, 取

其中一段样本, 数量为 374)。假设该随机过程在总体上服从正态分布, 采用 χ^2 检验程序计算的结果如表 3.4 所示。在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, $\chi_{0.05}^2(8) = 15.51 < 64.009 = \chi^2$ 。因此, 在 95%置信度下否定所做的统计假设, 即该随机过程在总体上不服从正态分布。作者通过对其它几组数据进行类似的检验, 也得出了同样的结论。由此可见, Si_3N_4 陶瓷的磨削力振动信号并不服从正态分布。

4. 周期性检验

对采集信号进行自相关函数分析, 得到自相关函数曲线图, 如图 3.4 所示 (为了便于绘图及观察, 图中仅给出了部分点)。由该图可以看出, 原信号的自相关函数呈现周期性的变化, 并且当 m 较大时, 幅值衰减也很小, (由于 $x(n)$ 为有限长度, $r_x(n)$ 的峰值最终将是趋向衰减的)。因此可以断定原信号中含有周期性的正弦振动信号, 其幅度约为 4.7×10^{-5} , 每个周期内有 16 点。 $r_x(0) = 8.8 \times 10^{-5}$, 说明了白噪声的自相关函数集中于原点, 在 $r=0$ 处白噪声产生的自相关函数 $r_w(0)$ 为 4.1×10^{-5} 。

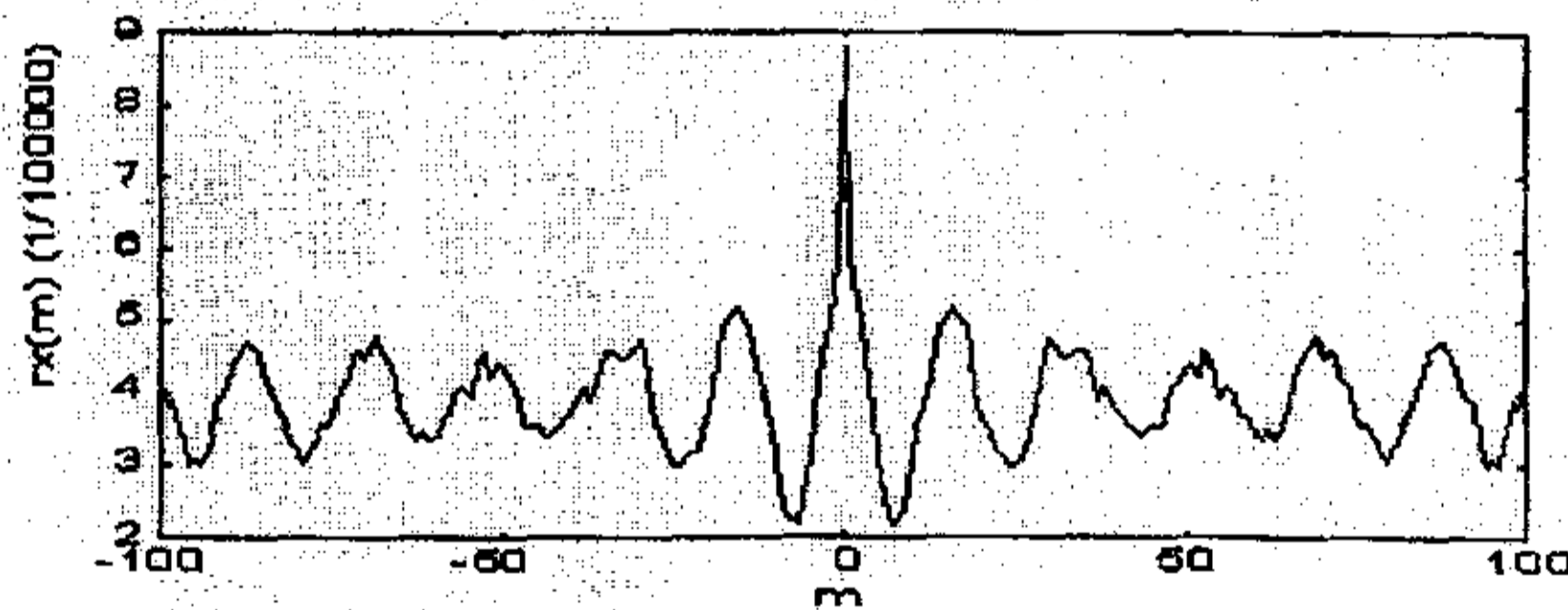


图 3.4 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号的自相关函数曲线图

Fig.3.4 The self-relation function of normal grinding force signal in grinding Si_3N_4

以上是对所采集到的 Si_3N_4 陶瓷动态法向磨削力的一个样本时间序列的检验, 通过对其它样本的检验, 也得出了类似的结论。作者采用相同的方法, 对 Si_3N_4 陶瓷动态切向磨削力时间序列、 Al_2O_3 陶瓷动态法向磨削力时间序列、 Al_2O_3 陶瓷动态切向磨削力时间序列也进行了了检验, 也得出了类似的结论。

3.4 小结

本章采用数字信号处理及统计检验的理论和方法对 Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷的动态磨削力信号进行了严格的检验, 结果如下:

1. Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷作为典型的硬脆材料，其磨削力信号的特性与金属及其它非金属材料的磨削力信号有着显著的不同。
2. Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号是一种具有平稳性，各态遍历性的周期振动信号。
3. Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷的磨削力信号在总体上并不服从正态分布。
4. 本章得出的结论及所采用的研究方法对于进一步研究硬脆材料的磨削机理及对磨削力信号进行时域、频域分析都具有重要的理论意义和参考价值。

第四章 磨削用量对工程陶瓷磨削力信号影响的研究

4.1 引言

在磨削加工中，磨削力是一项非常重要的磨削加工技术指标，它的影响因素很多，如磨削条件、工件材料的组织结构、磨削砂轮的状态、机床系统的刚度以及磨削液的选择等等。这些因素对磨削力的影响程度各不相同。其中，磨削用量直接影响着磨削力的大小及分布规律。但是，由于测量技术条件的不完善和分析方法的落后，目前，工程陶瓷磨削力的研究只限于时域、静态的分析^{[20][21][22]}，随着人们对动态磨削力认识水平的不断提高^[23]及对数字信号处理、时间序列分析方法的重视，研究深度也在逐步加大。本节通过大量的实验，从时域、频域两个方面对比分析了在磨削用量改变时， Si_3N_4 基和 Al_2O_3 基陶瓷静态、动态磨削力的分布特征和变化规律，进而为工程陶瓷超精密磨削和高效磨削提供一定的理论依据和参考资料。

4.2 实验条件与实验方案

4.2.1 实验条件

磨削实验是在远山 FC-200D PCD&PCBN 刀具磨床上进行的，实验条件如下所示：

磨削方式：采用端面磨削

磨削砂轮：选用树脂结合剂砂轮，其型号为 EWAG BP 102 359T，浓度 C100

砂轮直径：D=150mm

砂轮宽度：b_s=6mm

磨削液：水基磨削液

实验材料： Si_3N_4 基和 Al_2O_3 基陶瓷，机械物理性能指标见表 3.1 和表 3.2。

4.2.2 实验方案

本实验采用单因素实验法研究磨削用量对静态、动态磨削力的影响规律。为此安排了三组实验，即在不改变其它磨削条件的情况下，分别改变砂轮的磨削速度、砂轮摆动速度、磨削深度，对以上所选的两种工程陶瓷材料进行磨削实验，采集并记录数据。实验原理图见图 3.1，实验方案见表 4.1，表 4.2 和表 4.3。为了分析大切深（粗加工）和小切深（精加工）条件下磨削力的变化规律，增补一组实验，实验方案见表 4.4。

表 4.1 改变磨削深度测力实验

Tab.4.1 Experiments of measuring grinding force during altering grinding depth in grinding ceramics

| 砂轮种类 | 磨削速度 v_s (m/s) | 摆动速度 V_v (mm/min) | 机床预压力 | 试件材料 | 名义切深 a_p (μm) |
|-------|---------------------|------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------|
| 树脂结合剂 | 14.06 | 1032 | 3 | Si ₃ N ₄ | 20 |
| | | | | | 30 |
| | | | | | 40 |
| | | | | | 50 |
| | | | | Al ₂ O ₃ | 20 |
| | | | | | 30 |
| | | | | | 50 |
| | | | | | 80 |

表 4.2 改变磨削速度测力实验

Tab.4.2 Experiments of measuring grinding force during altering grinding speed in grinding ceramics

| 砂轮种类 | 摆动速度 V_v (mm/min) | 机床预压力 | 试件材料 | 名义切深 a_p (μm) | 磨削速度 v_s (m/s) |
|-------|------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------|---------------------|
| 树脂结合剂 | 1032 | 3 | Si ₃ N ₄ | 40 | 7.854 |
| | | | | | 10.995 |
| | | | | | 14.060 |
| | | | | | 17.279 |
| | | | Al ₂ O ₃ | 50 | 7.854 |
| | | | | | 10.995 |
| | | | | | 14.060 |
| | | | | | 17.279 |

表 4.3 改变砂轮摆动速度测力实验

Tab.4.3 Experiments of measuring grinding force during wheel oscillation speed in grinding ceramics

| 砂轮种类 | 磨削速度 v_s (m/s) | 机床预压力 | 试件材料 | 名义切深 a_p (μm) | 摆动速度 V_v (mm/min) |
|-------|---------------------|-------|--------------------------------|---------------------------|------------------------|
| 树脂结合剂 | 14.06 | 3 | Si ₃ N ₄ | 40 | 516 |
| | | | | | 1032 |
| | | | | | 1342 |
| | | | | | 1754 |
| | | | Al ₂ O ₃ | 50 | 516 |
| | | | | | 1032 |
| | | | | | 1342 |
| | | | | | 1754 |

表 4.4 改变磨削深度测力实验

Tab.4.4 Experiments of measuring grinding force during grinding depth in grinding ceramics

| 砂轮种类 | 磨削速度 v_s (m/s) | 摆动速度 V_s (mm/min) | 机床预压力 | 试件材料 | 名义切深 a_p (μm) |
|-------|---------------------|------------------------|-------|-----------|---------------------------|
| 树脂结合剂 | 14.06 | 1032 | 3 | Si_3N_4 | 5 |
| | | | | | 10 |
| | | | | | 20 |
| | | | | | 30 |

4.3 实验结果分析

4.3.1 工程陶瓷磨削力的特点

以砂轮磨削速度 $v_s=14.06\text{m/s}$ ，砂轮摆动速度 $V_s=1032\text{mm/min}$ ，磨削深度 $a_p=30\ \mu m$ 的磨削用量磨削 Si_3N_4 基和 Al_2O_3 基陶瓷，其磨削力如图 4.1 所示。由该图可见，陶瓷磨削力有如下的特点：

1. 磨削力 F_n 、 F_t 不是很大：

通常认为陶瓷的硬度很高，法向磨削力和切向磨削力应该很大。但实验表明，陶瓷的法向磨削力并不是很大，切向磨削力也很小，见图 4.1 所示。其中，断裂韧性较大的 Si_3N_4 基陶瓷的单位法向磨削力 F_n 为 8.33N/mm ，而硬度较大韧性较差的 Al_2O_3 基陶瓷的单位法向磨削力 F_n 仅为 1.73N/mm ，这说明工程陶瓷法向磨削力的大小不仅与被磨削材料的硬度有关，而主要取决于被磨材料的断裂韧性和磨削特征。

2. 磨削力比 F_n/F_t 很大：

由图 4.1 可以看出， Si_3N_4 基陶瓷和 Al_2O_3 基陶瓷的切向磨削力很小，分别为 0.67N/mm 和 0.5N/mm ，因此，两种陶瓷的磨削力比都很大，见图 4.2 所示。其中， Si_3N_4 基陶瓷的磨削力比较大，达到了 12.5，这是因为 Si_3N_4 基陶瓷的磨削层材料在砂轮磨粒的作用下，产生了类似压痕硬化的现象。 Al_2O_3 基陶瓷的力比较小，也达到了 3.45。陶瓷磨削力比较大是陶瓷磨削中的普遍现象，这说明陶瓷磨削过程以具有压痕特征的摩擦耕犁为主，切屑变形很少发生。

3. 磨削比能 u 不大：

根据公式 (1-2) 计算出陶瓷的磨削比能，见表 4.5。由此表可知， Si_3N_4 基陶瓷和 Al_2O_3 基陶瓷的磨削比能并不大。

由以上陶瓷磨削力的特点可见,若仅从磨削力和比能来评价,这两种工程陶瓷并不是很难磨削的。

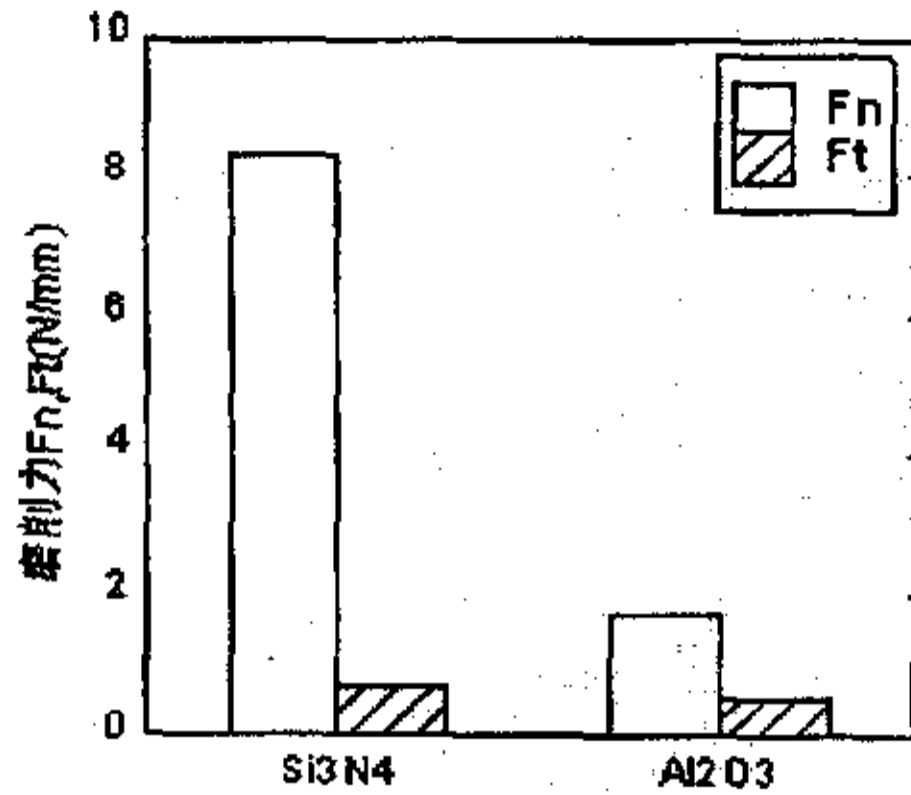


图 4.1 工程陶瓷磨削力的比较

Fig.4.1 The comparison of specific grinding force in grinding two kinds of Engineering Ceramics

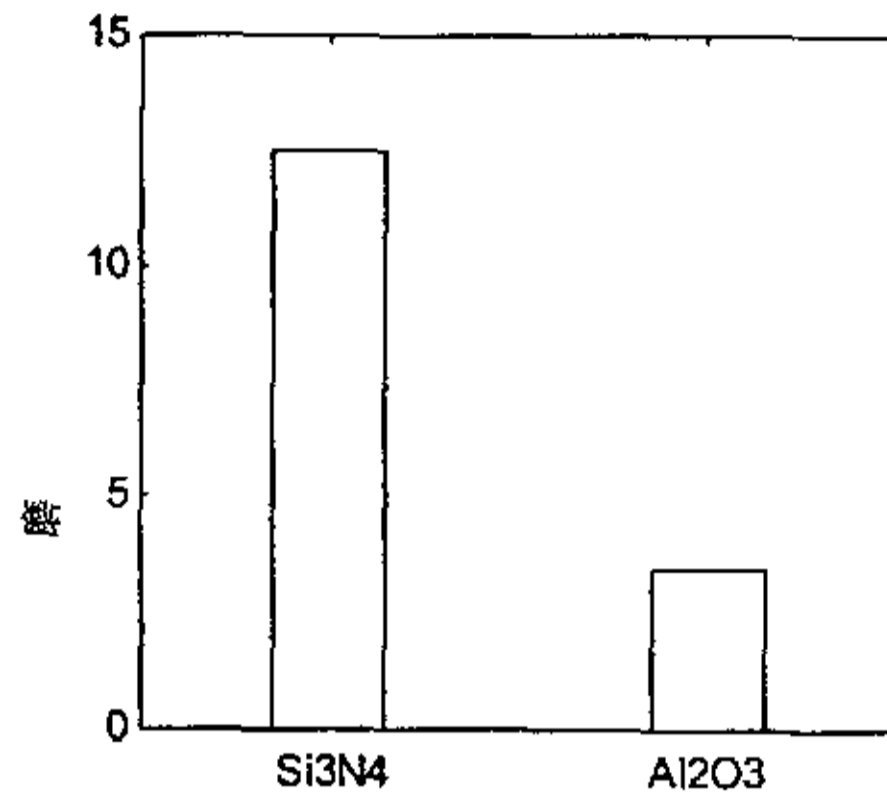


图 4.2 工程陶瓷磨削力比的比较

Fig.4.2 The comparison of grinding force ratio in grinding two kinds of Engineering Ceramics

表 4.5 工程陶瓷磨削比能的比较

Tab.4.5 The comparison of grinding energy for two kinds of Engineering Ceramics

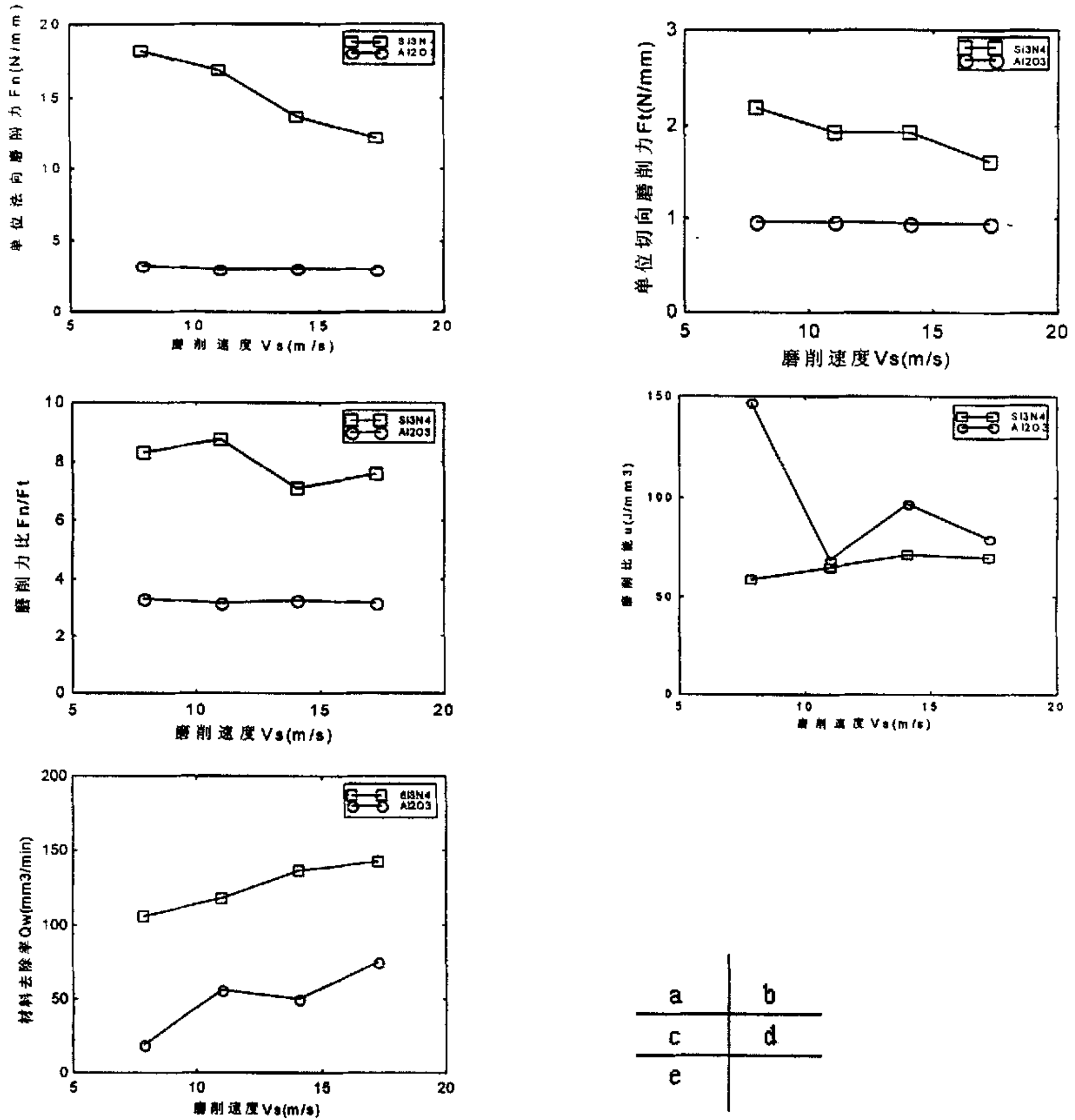
| 材料 | Si ₃ N ₄ | Al ₂ O ₃ |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 比能 (J/mm ³) | 77.85 | 136 |

4.3.2 磨削用量对工程陶瓷静态磨削力的影响

在陶瓷的磨削加工中,磨削用量是影响磨削过程的主要因素之一。改变磨削用量,可以使陶瓷的磨削机理发生变化,如在较大切深(粗加工)条件下磨削韧性很差的 Al₂O₃ 基陶瓷,其磨削特征主要以脆性断裂为主,而在小切深(延性磨削)条件下,磨削过程将转变为以显微塑性变形为主,其磨削力也发生显著的变化。

1. 砂轮磨削速度 v_s 的影响

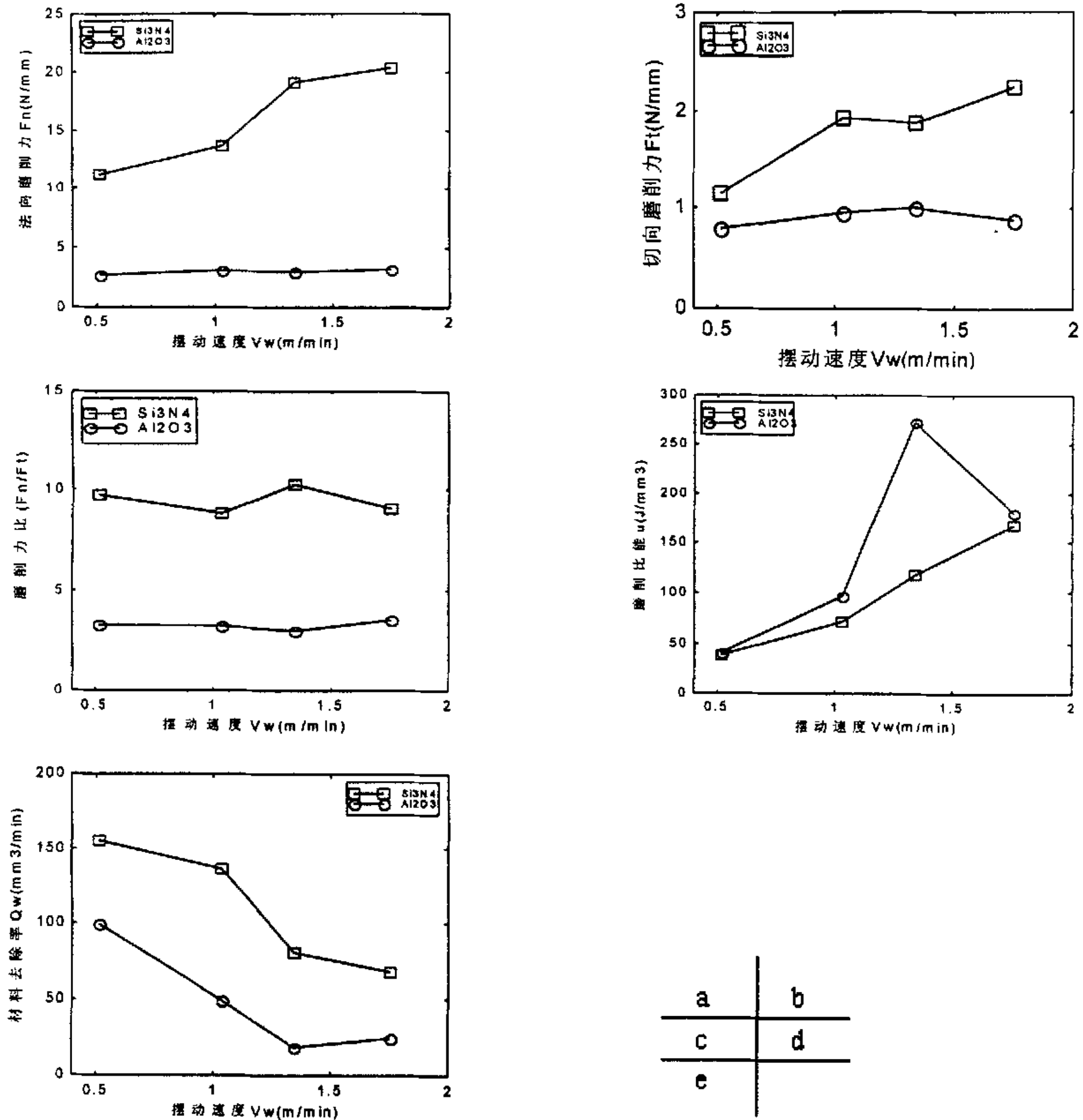
由图 4.3 (a) (b) 可见,随着砂轮磨削速度的增大, Si₃N₄ 陶瓷和 Al₂O₃ 陶瓷的法向磨削力和切向磨削力都下降,这主要是因为磨削速度的增大使得磨粒切削厚度减小而导致的。其中, Si₃N₄ 陶瓷的磨削力下降幅度较大, Al₂O₃ 陶瓷的磨削力下降趋势较为平缓。因此,适当的增大磨削速度,既有利于增大磨削效率,也有利于减小磨削力,提高工件的表面质量。由图 4.3 (c) 可见,在一定速度范围内,工程陶瓷的磨削力比随着磨削速度的增大呈下降趋势,这说明法向磨削力比切向磨削力减小的速度要快。由图 4.3 (d) 看到, Si₃N₄ 陶瓷的磨削比能随着磨削速度的增大逐渐增大,这主要是因为随着磨



磨削条件: $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=40\mu\text{m}(\text{Si}_3\text{N}_4)$ $a_p=50\mu\text{m}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.3 砂轮磨削速度 V_s 对磨削过程的影响

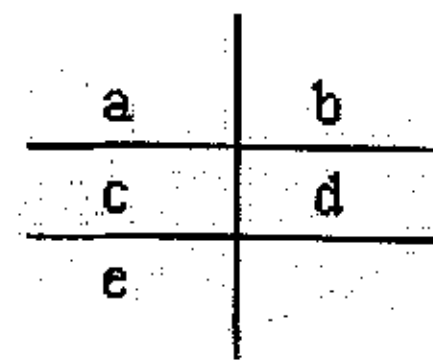
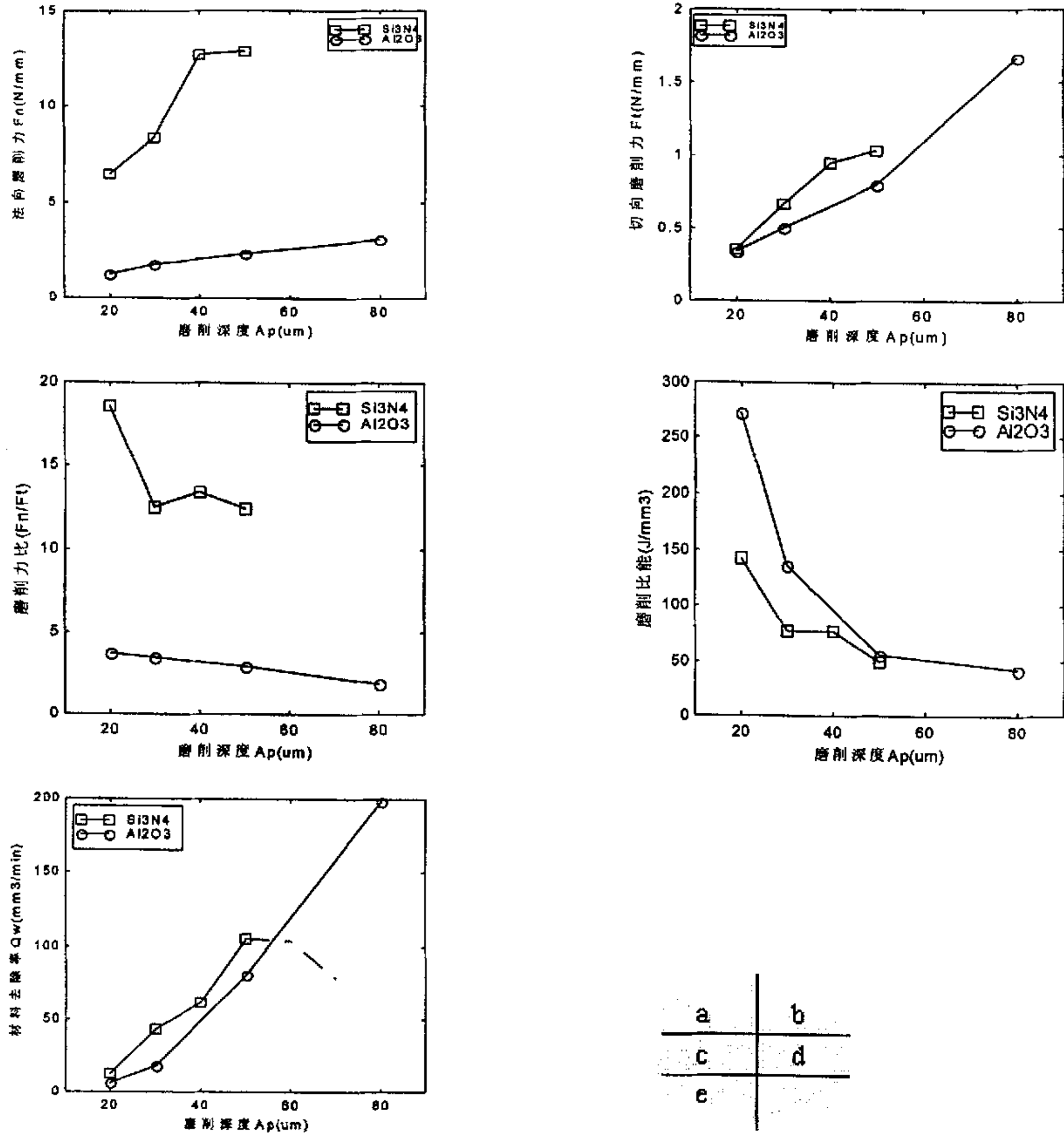
Fig.4.3 Grinding process vs. wheel grinding speed at wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si₃N₄ and Al₂O₃ with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06$ m/s $a_p=40\mu\text{m}(Si_3N_4)$ $a_p=50\mu\text{m}(Al_2O_3)$ P=3 树脂结合剂砂轮

图 4.4 砂轮摆动速度 V_w 对磨削过程的影响

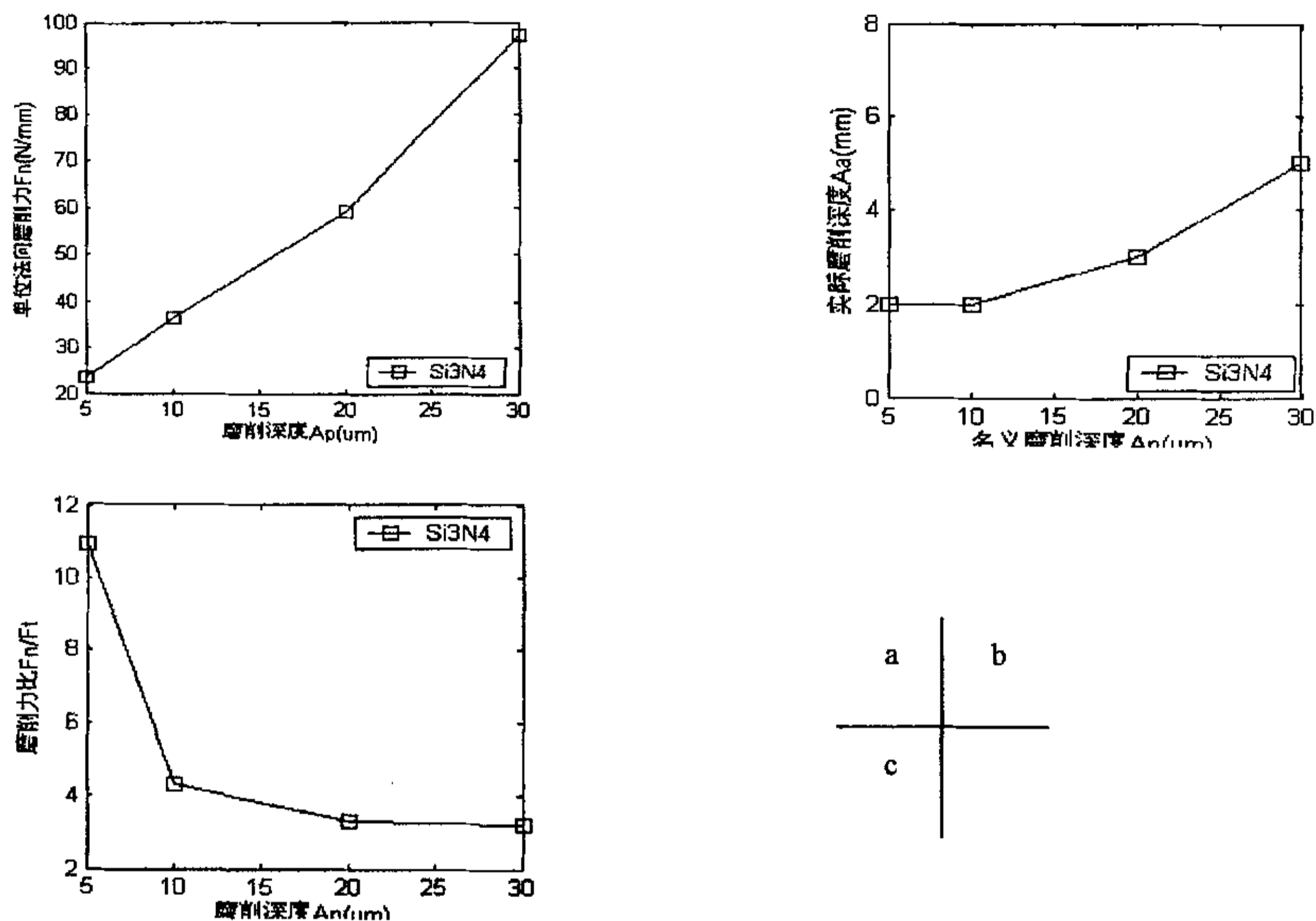
Fig.4.4 Grinding process vs. wheel oscillation speed at wheel grinding speed 14.06m/s, machine stiffness 3, in grinding Si_3N_4 and Al_2O_3 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06m/s$ $V_w=1032mm/min$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.5 磨削深度 a_p 对磨削过程的影响

Fig.4.5 Grinding process vs. grinding depth at wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 and Al_2O_3 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.6 改变磨削深度 a_p 测力实验 (Si_3N_4 陶瓷粗精加工比较)

Fig.4.6 Grinding process vs. grinding depth at wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 with vitrified wheel

削速度的增大, 磨粒实际切削厚度减小, 使得 Si_3N_4 陶瓷呈现塑性磨削趋势, 导致比能增大, 因而可以推测出, 在一定的磨削条件下, 磨削速度的增大将会提高 Si_3N_4 陶瓷工件的强度。而 Al_2O_3 陶瓷的比能随着磨削速度的增大呈减小趋势, 说明在这一范围的磨削条件下, 较大的磨削速度使得 Al_2O_3 陶瓷出现较大的脆性断裂, 导致比能下降。由图 4.3 (e) 看出, 随着砂轮磨削速度的增大, 两种陶瓷的材料去除率均呈增大趋势, 这主要是因为砂轮的自锐能力导致了材料去除率的增大, 但是当磨削速度很大或很小时, 材料的去除率都会减小, 这是由于较大的磨削速度使得磨削砂轮的温度来不及散出, 降低了砂轮的磨削能力, 而较小的磨削速度很显然会使得材料去除率较小。

因此, 在磨削工程陶瓷时, 在一定的范围内, 适当增大砂轮的磨削速度, 既增大了材料去除率, 提高了磨削效率, 又减小了磨削力, 同时在一定程度上增加了材料的塑性, 提高了磨削件的表面质量。

2. 砂轮摆动速度 V_w 的影响

砂轮摆动速度对工程陶瓷磨削力的影响比较复杂。由图 4.4 (a) (b) 可见, 随着砂轮摆动速度的增大, Si_3N_4 陶瓷的法向磨削力和切向磨削力均呈增加趋势, 而 Al_2O_3 陶瓷的法向磨削力和切向磨削力均先增大, 而后又有一定程度的减小。这主要是因为砂轮摆动速度的增大使得磨粒的磨削厚度增大, 脆性剥落增多, 导致磨削力下降。如果在实验中继续增大砂轮的摆动速度到一定数值, 可能会发现磨削力会有明显的下降, 这一现象还需要进一步的研究证明。图 4.4 (c) 表示出了陶瓷的磨削力比随着砂轮摆动速度的变化情况, 由该图可见, 陶瓷的磨削力比的变化比较复杂, 这也说明了砂轮的摆动速度对工程陶瓷磨削力的影响比较复杂。由图 4.4 (d) 看出, Si_3N_4 陶瓷的磨削比能随着砂轮摆动速度的增大而增大, 而 Al_2O_3 陶瓷的磨削比能先随着摆动速度的增大有明显的增加, 而后又有明显的减小, 这说明了在较小的摆动速度下, Al_2O_3 陶瓷的去除主要是由于发生了塑性变形, 而在较大的摆动速度下, 材料更多的发生了脆性断裂而被去除, 使得磨削比能明显的减小。从图 4.4 (e) 也可以看出, Si_3N_4 陶瓷的材料去除率随着摆动速度的增大而逐渐减小, Al_2O_3 陶瓷的材料去除率随着摆动速度的增大, 先减小后增大, 也主要是因为较小的摆动速度下材料的去除主要是因为塑性变形, 而在较大的摆动速度下, 脆性断裂占主导地位, 导致材料去除率的增大。

因此, 在对工程陶瓷进行高效磨削时, 易采用较大的砂轮摆动速度, 这样既可以提高磨削效率, 又在一定程度上减小了磨削力。但是砂轮摆动速度范围的选择是一个比较复杂的问题。

3. 磨削深度 a_p 的影响

磨削深度的改变对工程陶瓷磨削力的影响比较大, 由图 4.5 (a) (b) 可见, 随着磨削深度的增大, 陶瓷的磨削力也将明显的增大, 其中当磨削深度增大大约两倍的时候, Si_3N_4 陶瓷磨削力的增长也近似两倍, 而 Al_2O_3 陶瓷磨削力的增长幅度要较小一些。究其原因磨削深度的增大一方面使得磨粒切削厚度增加, 另一方面又使得接触弧长增大, 有效磨粒总数增多, 因此磨削力有显著的增大, 其影响程度要远远大于砂轮的磨削速度和摆动速度。又由于磨削深度的增大对脆性脱落磨削过程中的显微塑性变形的比例影响较小, 因此, 随着磨削深度的增大, Al_2O_3 陶瓷的磨削力的增长幅度要小于在同样条件下的 Si_3N_4 陶瓷磨削力的增长幅度。由图 4.5 (c) 可知, 随着磨削深度的增大, 陶瓷的磨削力比逐渐减小, 这主要是因为磨削深度增大对法向磨削力的影响程度要大于对切向磨削力的影响程度。图 4.5 (d) 表示出了磨削比能随磨削深度的变化情况, 从图中看出, 随着磨削深度的增大, 两种陶瓷的磨削比能都有大幅度的减小, 其原因是陶瓷的脆性较大, 随着磨削深度的增大, 使得材料更多的发生了脆性断裂, 使得磨削比能有较大的减小。这从另一个侧面也说明了磨削深度对陶瓷的磨削加工有较大的影响。图 4.5 (e) 表示了磨削深度对材料去除率的影响情况。图中可以看出, 随着磨削深度的增大, 陶瓷材料的去除率逐渐增大, 但是, 当磨削深度达到一定的程度, 由于砂轮磨损的影响, 材料去除率将呈现下降的趋势, 如图中虚线所示, 进一步实验可以说明这个现象。

值得注意的是, 当磨削深度很小时, 由于 Al_2O_3 陶瓷和 Si_3N_4 陶瓷主要是发生显微塑性变形, 其磨削力大小几乎相同。为此, 安排了一组实验 (见表 4.4) 来研究粗精加工时 Si_3N_4 陶瓷磨削力的变化情况。由图 4.5 (a) 和图 4.6 (a) 可以看出, 磨削深度较

大（粗加工）时，磨深对磨削力的影响较大，而在较小的磨削深度（精加工）下，磨深对磨削力的影响不大，这主要是因为磨削力作用下，加工工艺系统的变形使得磨削深度并不等于名义磨削深度，实际磨削深度并不随名义磨削深度的增加而成比例增加，见图 4.6 (b) 所示，所以磨削力变化不大。当磨削深度很小，进入延性域磨削阶段时，一个显著的特点就是磨削力比显著增大，见图 4.6 (c) 所示，这主要是由磨削加工中的“尺寸效应”引起的。多晶体陶瓷材料，晶格排列不整齐，存在着许多的杂质、微裂纹和空隙，当承受载荷时，这些晶格缺陷成为应力集中源。在粗磨的时候，这些部位将产生大量的位错，使得磨削力下降，然而在超精密磨削中，磨削深度越小，在即将被去除的一层材料中存在缺陷的几率就越小，工件的强度就越接近其理论强度，所以磨削力比显著增大，这就要求超精密加工机床的静刚度和动刚度足够高，以保证超精密磨削的质量。

4.3.3 工程陶瓷磨削力信号的频率特性分析

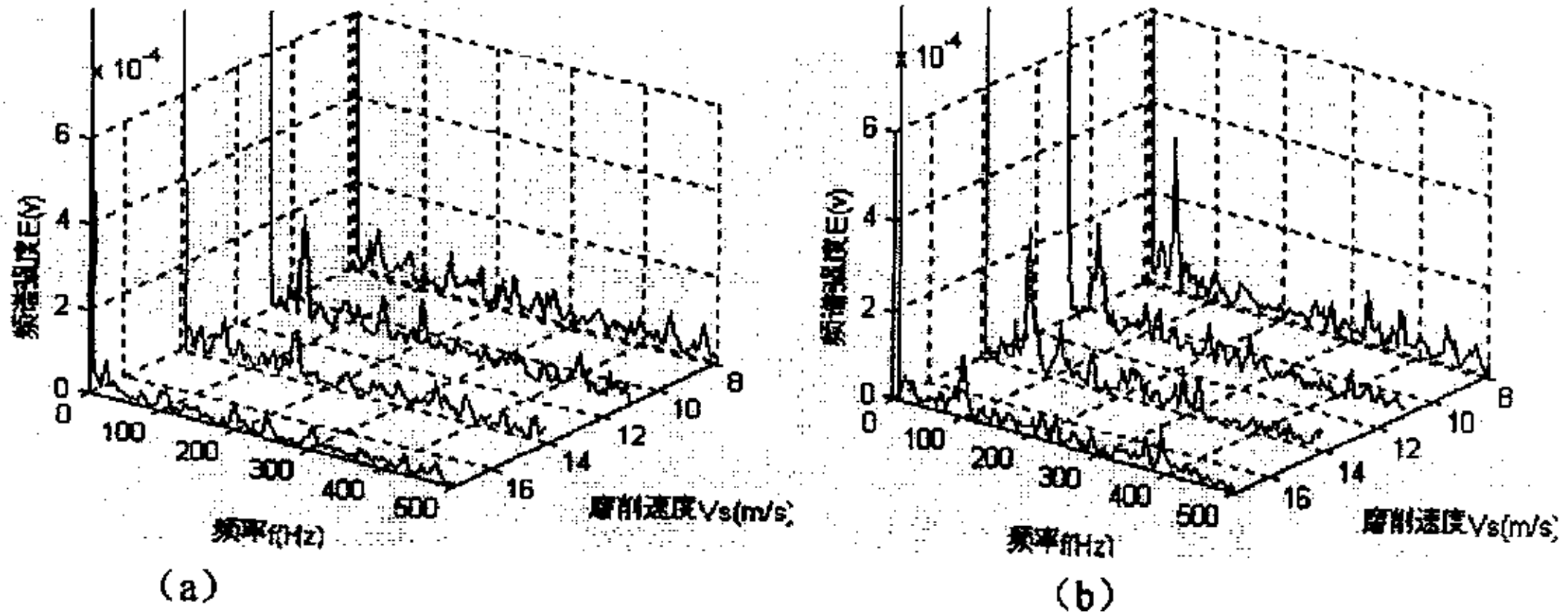
1. 砂轮磨削速度 (v_s) 对磨削力信号频谱的影响

图 4.7 (a) (b) 和图 4.8 (a) (b) 分别表示了在一一定的磨削条件下，砂轮磨削速度与 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图以及砂轮磨削速度和 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图。

图 4.7 (a) (b) 表明了 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱比较丰富，并且随着磨削速度的变化频谱主峰的分布位置、大小均有所变化。其中，法向磨削力信号的频谱没有特别明显的主峰，尖峰分布比较分散，说明了在此磨削条件下， Si_3N_4 陶瓷主要发生了脆性断裂而被去除，脆性断裂的概率并不固定，因此磨削力信号的频率比较分散，如图 4.7 (a) 所示。而切向磨削力信号的频谱虽然也比较分散，但出现了具有较大主峰的频率成分，并且该特征频率随着磨削速度的增加而有增大的趋势，如图 4.7 (b) 所示。通过以上的分析，说明了在 Si_3N_4 陶瓷的磨削中，切向磨削力同法向磨削力一样，也具有很重要的作用。从两图中还可以看出随着磨削速度的增加，磨削力信号的频谱强度有所减小，这说明了磨削速度的增大使得 Si_3N_4 陶瓷磨削时塑性去除的比例有所增加。

图 4.8 (a) (b) 表明了 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱也较为丰富，并且随着磨削速度的变化频谱主峰的分布位置、大小也有所改变。与 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号不同的是， Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号的频谱具有非常明显的主峰，并且随着磨削速度的增加，其特征频率逐渐增大，但是切向磨削力信号的频谱主峰不是非常明显，这说明了 Al_2O_3 陶瓷磨削中，法向磨削力对磨削过程的影响要比切向磨削力对磨削过程的影响更大一些。通过以上的分析，表明了在该磨削条件下， Al_2O_3 陶瓷的去除主要是由于塑性变形和脆性断裂导致的，但脆性断裂占主要作用。

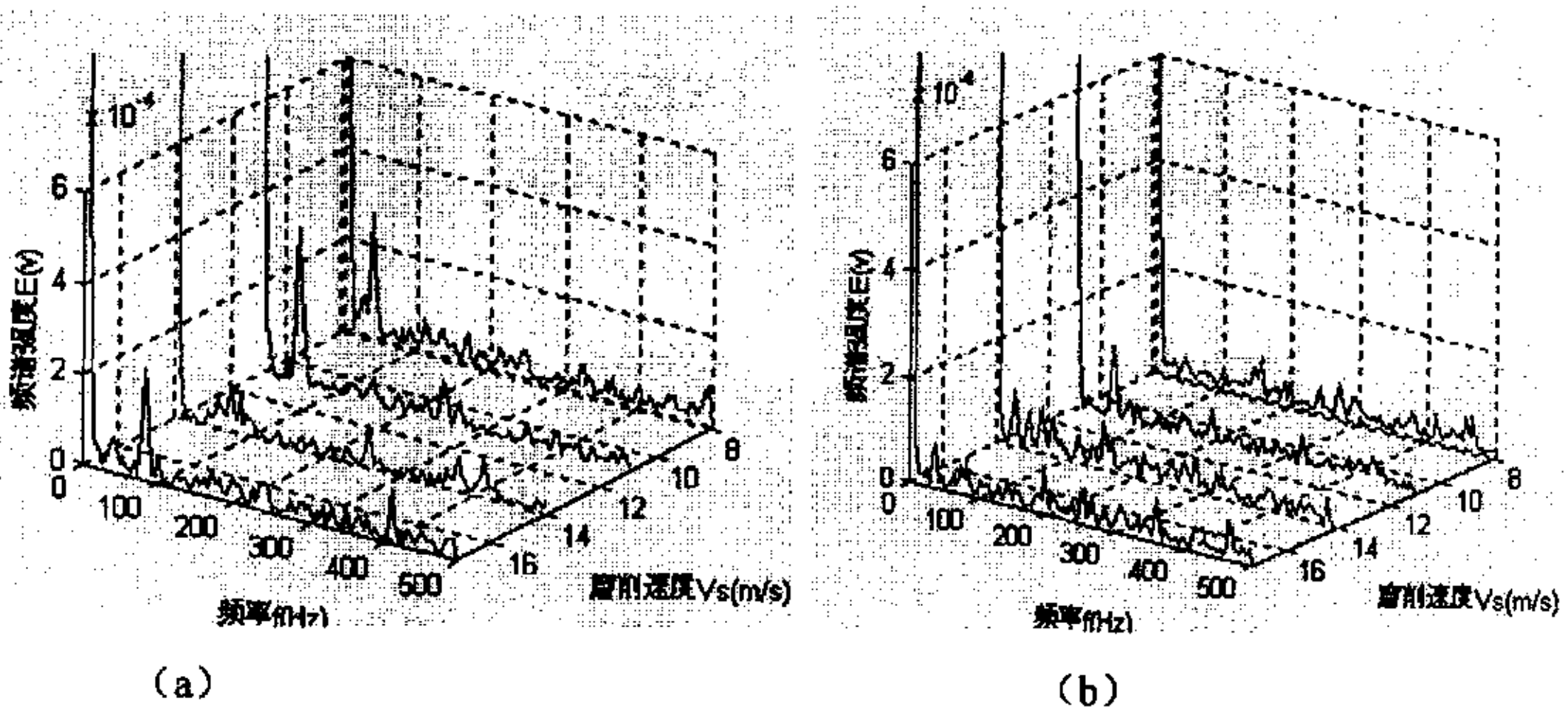
综合分析图 4.7 和图 4.8，发现了在 Al_2O_3 陶瓷和 Si_3N_4 陶瓷的磨削过程中，低频成分非常丰富，磨削速度的增加对低频成分的影响并不大，只是 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的低频成分比 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的低频成分更宽一些，进一步分析发现，砂轮振动是引起 Al_2O_3 陶瓷磨削力低频振动的因素之一。



磨削条件: $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=40\mu\text{m}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.7 砂轮磨削速度 V_s 与 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Tab.4.7 Spectrum of grinding force signal vs. wheel grinding speed at SDOC 40um, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 with vitrified wheel



磨削条件: $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=50\mu\text{m}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.8 砂轮磨削速度 V_s 与 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的频谱关系

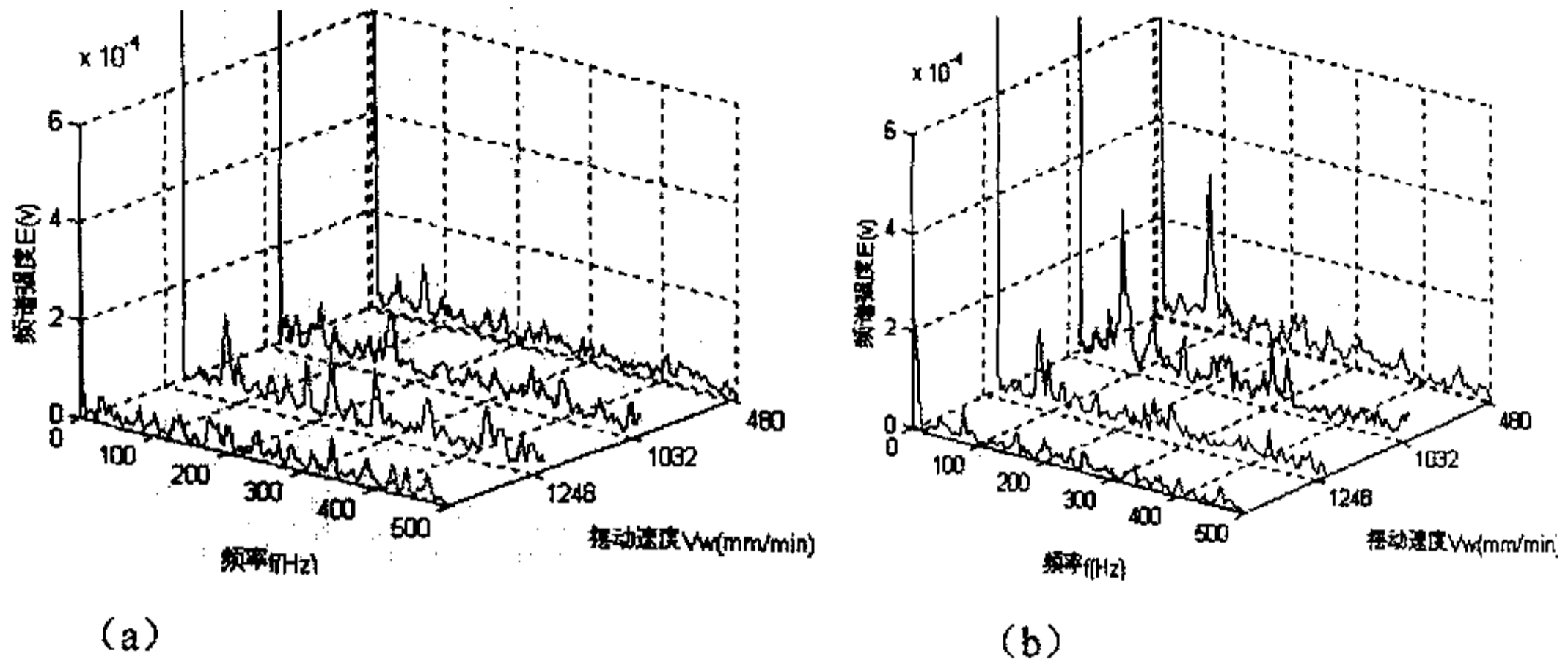
Tab.4.8 Spectrum of grinding force signal vs. wheel grinding speed at SDOC 50um, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Al_2O_3 with vitrified wheel

2. 砂轮摆动速度 (V_w) 对磨削力信号频谱的影响

图 4.9 (a) (b) 和图 4.10 (a) (b) 分别表示了在一一定的磨削条件下, 砂轮摆动速度与 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图以及砂轮摆动速度和 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图。

图 4.9 (a) (b) 表明了 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱比较丰

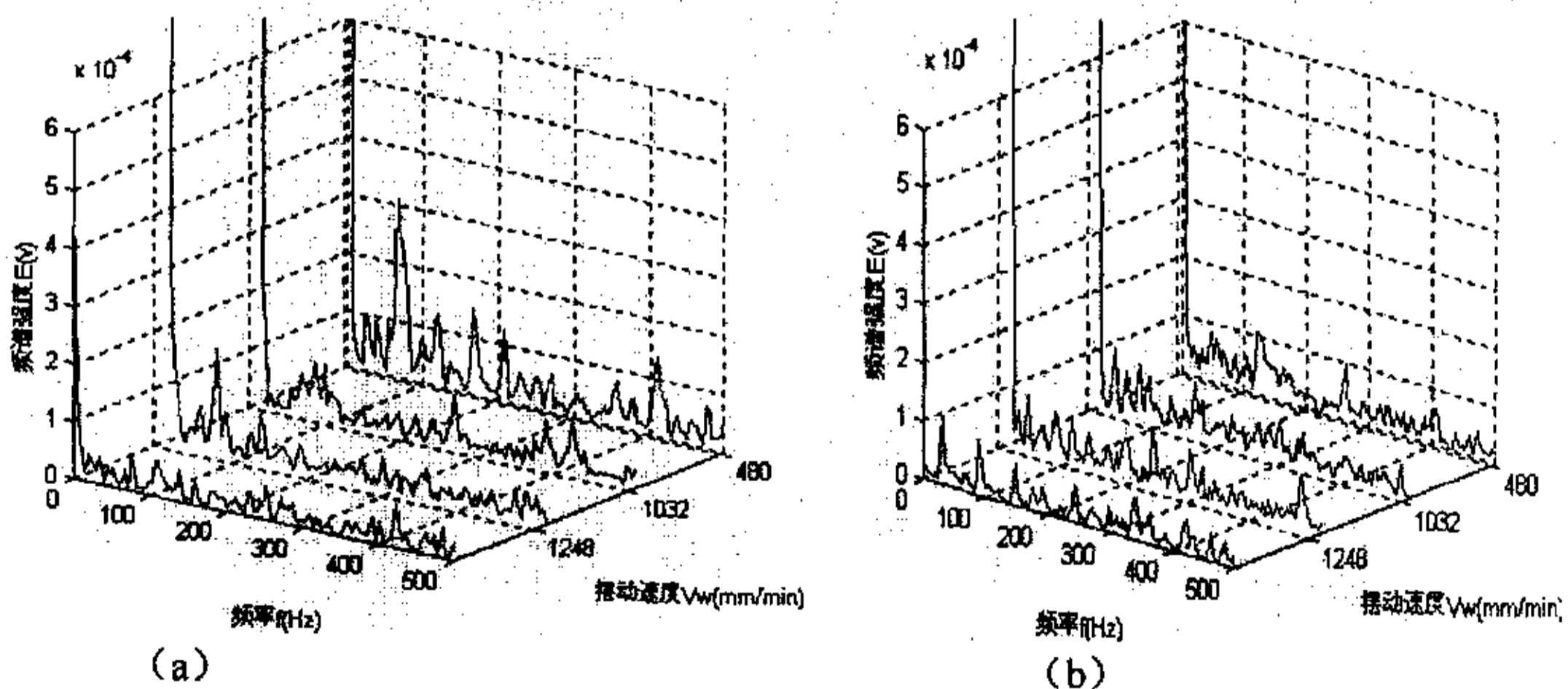
富，并且随着砂轮摆动速度的改变频谱主峰的分布位置、大小均有所变化。其中，法向磨削力信号频率成分分布比较分散，并且随着摆动速度的增加，频率成分变化的规律也不明显，如图 4.9 (a) 所示，这说明了在所选择的摆动速度下磨削 Si_3N_4 陶瓷，材料主要发生脆性断裂而被去除，并且摆动速度对法向磨削力的影响比较复杂。而切向磨削力信号的频谱虽然也比较分散，却出现了比较明显的主峰，特征频率大约为 80Hz，并且随



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $a_p=40\mu\text{m}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.9 砂轮摆动速度 V_w 与 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Tab.4.9 Spectrum of grinding force signal vs. wheel oscillation speed at SDOC 40 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $a_p=50\mu\text{m}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.10 砂轮摆动速度 V_w 与 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Tab.4.10 Spectrum of grinding force signal vs. wheel oscillation speed at SDOC 50 μm , wheel grinding speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Al_2O_3 with vitrified wheel

着摆动速度的增加,该频率成分的分布位置基本保持不变,但频谱强度有所降低,如图 4.9 (b) 所示。通过以上分析,发现砂轮摆动速度对 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的频谱的影响比较复杂。

图 4.10 (a) (b) 表明了 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱比较丰富,并且随着砂轮摆动速度的改变频谱主峰的分布位置、大小均有所变化。其中,法向磨削力信号出现了较为明显的频谱,大约为 70Hz,并且随着摆动速度的增加,频谱强度有所降低,如图 4.10 (a) 所示,这说明随着摆动速度的增加, Al_2O_3 陶瓷的脆性断裂的比例有所增加。而切向磨削力信号的频谱分布比较分散,没有明显的变化规律,如图 4.10 (b) 所示。通过以上分析可见,砂轮摆动速度对 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的频谱有着较大的影响。

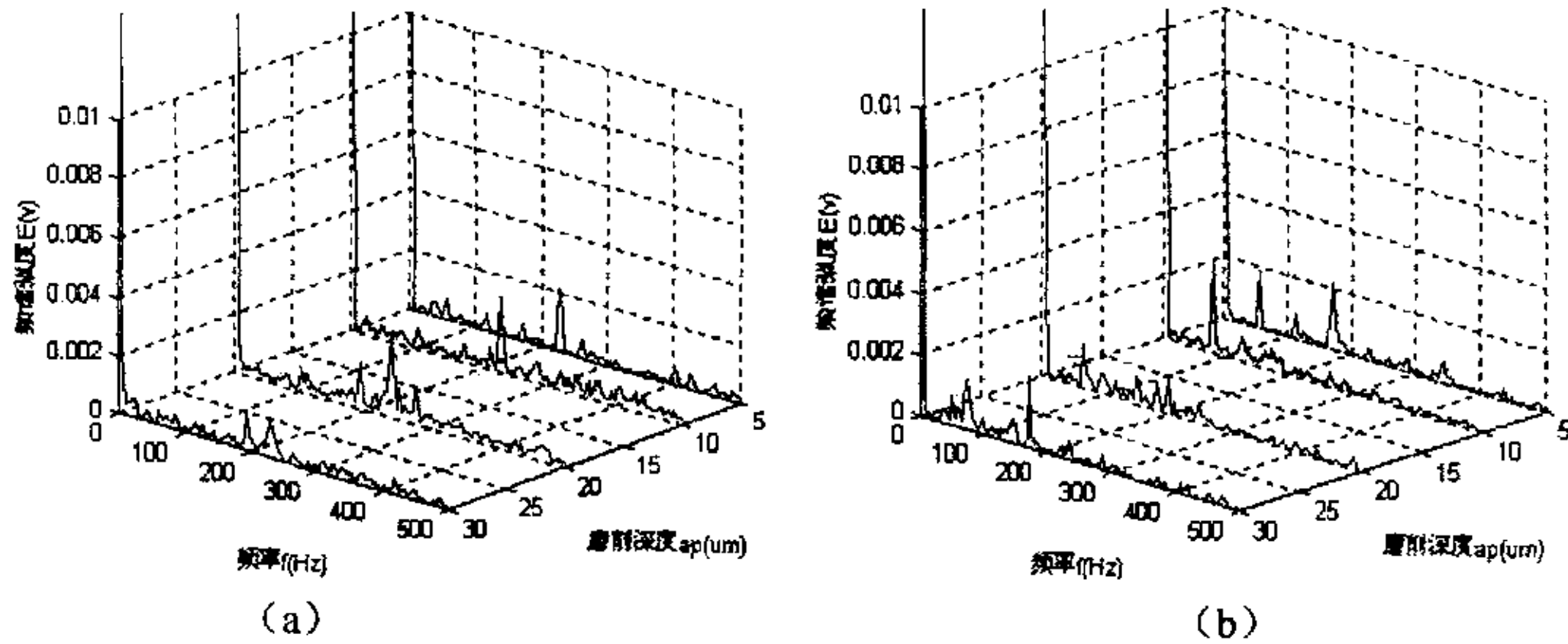
综合分析图 4.9 和图 4.10,还发现,在 Al_2O_3 陶瓷和 Si_3N_4 陶瓷的磨削过程中,低频成分非常丰富,砂轮摆动速度的增加对低频成分的影响并不大,只是 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的低频成分比 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的低频成分更宽一些,进一步分析发现,砂轮振动是引起 Al_2O_3 陶瓷磨削力低频振动的因素之一。

3. 磨削深度 (a_p) 对磨削力信号频谱的影响

图 4.11 (a) (b) 和图 4.12 (a) (b) 分别表示了在一一定的磨削条件下,磨削深度与 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图以及磨削深度和 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图。

图 4.11 (a) (b) 表明了 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱主峰比较集中,并且随着磨削深度的改变频谱主峰的分布位置、大小呈现出一定的变化规律。其中,当磨削深度为 5 μm , 10 μm 时, Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号的特征频率均为 228.5Hz,保持不变,而磨削深度增加到 20 μm 和 30 μm 时,特征频率发生变化,并且频率成分有些分散,前者的频率大约为 170.9Hz, 257Hz, 283Hz,后者的频率大约为 170.9Hz, 230Hz,如图 4.11 (a) 所示。这说明了在小切深条件下 (5 μm , 10 μm), Si_3N_4 陶瓷主要发生了塑性变形而被去除,228.5Hz 为该磨削条件下 Si_3N_4 陶瓷发生塑性变形的特征频率,而在大切深条件下 (20 μm , 30 μm), Si_3N_4 陶瓷不仅发生了塑性变形,还发生了脆性断裂而被去除,170.9Hz 为该磨削条件下塑性变形的特征频率,其它的频率成分为脆性断裂的频率。而且切向磨削力信号的频谱分布也相对比较集中,其中,磨削深度为 5 μm 时,频率成分为 57.6Hz, 171.8Hz;磨削深度为 10 μm 时,频率成分为 80Hz, 171.8Hz;磨削深度为 20 μm 时,频率成分为 67.4Hz, 149.4Hz, 181.6Hz, 198.2Hz;磨削深度为 30 μm 时,频率成分为 74.2Hz, 171.8Hz。经分析发现, Si_3N_4 陶瓷切向磨削力信号的频率在 171.8Hz 处基本保持不变,为其特征频率,而低频成分频率有所变化,这可能是由于磨削深度的增大使得砂轮振动增强引起的。

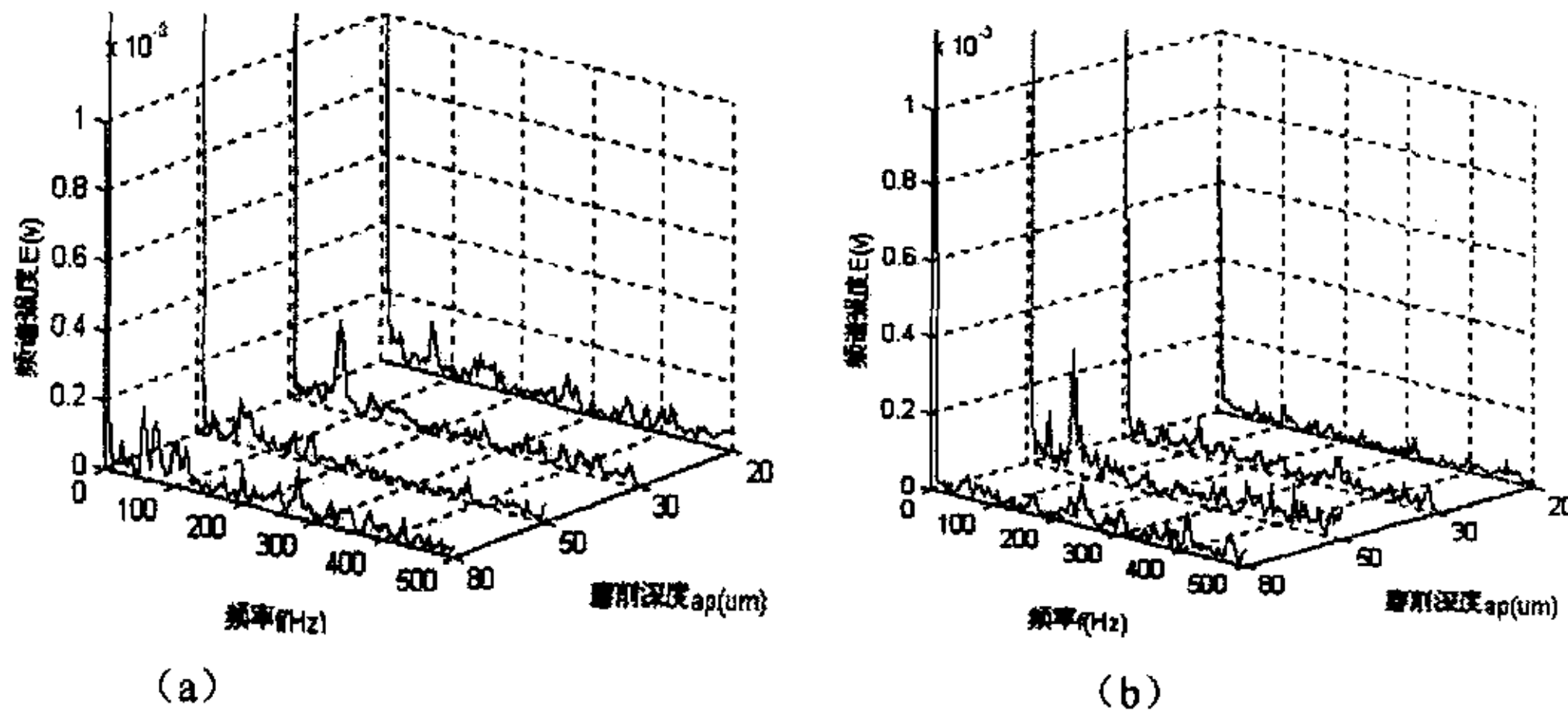
图 4.12 (a) (b) 表明了 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱分布比较丰富,并且随着磨削深度的改变频谱主峰的分布位置、大小呈现出一定的变化规律。其中,法向磨削力信号的频谱除了有一处较为明显的主峰集中在 74.2Hz,并且随着磨削深度的变化保持不变之外,其它频率成分的分布比较分散,如图 4.12 (a) 所示,这说明了在该磨削条件下, Al_2O_3 陶瓷大部分发生了脆性断裂而被去除,这些断裂使得 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号的频谱呈现出非常分散的特点。而切向磨削力信号的频谱除了分布



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.11 磨削深度 a_p 与 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Tab.4.11 Spectrum of grinding force signal vs. grinding depth at wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 4.12 磨削深度 a_p 与 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Tab.4.12 Spectrum of grinding force signal vs. grinding depth at wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Al_2O_3 with vitrified wheel

比较分散之外,也没有出现明显的主峰,这也说明了 Al_2O_3 陶瓷主要是以脆性断裂方式被去除的。

综合分析图 4.11 和图 4.12,发现在 Al_2O_3 陶瓷和 Si_3N_4 陶瓷的磨削过程中,磨削深度对磨削力信号频谱的影响非常明显,并且表现出了很强的规律性。

通过以上的分析,发现磨削速度、砂轮摆动速度和磨削深度的改变都对 Al_2O_3 陶瓷

和 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的频谱产生一定的影响。其中，磨削深度对磨削力信号频谱的影响最为明显，其次是磨削速度、砂轮摆动速度，这与在时域对磨削用量的分析是一致的。

4.3.4 工程陶瓷静态磨削力的数学建模

工程陶瓷材料磨削力信号的时域波形比较复杂，在实验分析中不容易看出实验指标与实验因素之间的关系，并且磨削过程中影响磨削力的因素很多，而回归分析是处理多变量之间相互关系的一种较为理想的数理统计方法。因此，在本论文中选用多元线性回归分析方法对实验数据进行回归分析。

1. 回归方程推导

(1) 磨削力数学模型

在工程陶瓷的端面磨削中，选用磨削速度 v_s ，砂轮摆动速度 V_w ，磨削深度 a_p 作为回归变量，根据磨削理论和以往的经验采用指数型公式作为数学模型来表征磨削力的变化规律，即：

$$F = C_F \cdot v_s^{a_1} V_w^{a_2} a_p^{a_3} \quad (4-1)$$

(2) 线性变换及回归系数求解

对多元线性模型 (4-1) 两边取对数，进行线性变换：

$$\lg F = \lg C_F + a_1 \lg v_s + a_2 \lg V_w + a_3 \lg a_p \quad (4-2)$$

令 $y = \lg F$ ； $a_0 = \lg C_F$ ，则式 (4-2) 变换为

$$y = a_0 + a_1 \lg v_s + a_2 \lg V_w + a_3 \lg a_p \quad (4-3)$$

分别以 X_1 ， X_2 ， X_3 代表 $\lg v_s$ ， $\lg V_w$ ， $\lg a_p$ ，并采用一般多元线性回归模型中常用的数据结构：

$$y_i = a_0 + a_1(x_{i1} - \bar{x}_1) + a_2(x_{i2} - \bar{x}_2) + \cdots + a_p(x_{ip} - \bar{x}_p) \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (4-4)$$

求解回归模型中的回归系数 $a_i, i=0,1,\cdots,p$ ，其中

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_i x_{ij} \quad (j=1,2,\cdots,p) \quad (4-5)$$

采用最小二乘估计，回归系数可通过以下的矩阵形式表示：

$$A \cdot a = B \quad (4-6)$$

上式中的常数项矩阵 B 和系数矩阵 A 分别为:

$$B = \begin{bmatrix} \sum_i y_i \\ l_{1y} \\ \vdots \\ l_{py} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} n & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & l_{p1} & l_{p2} & \cdots & l_{pp} \end{bmatrix}$$

其中

$$\begin{cases} l_{aj} = \sum_i (x_{ia} - \bar{x}_a)(x_{ij} - \bar{x}_j) = \sum_i x_{ia}x_{ij} - \frac{1}{n} \left(\sum_i x_{ia} \right) \left(\sum_i x_{ij} \right) & a, j = 1, 2, \dots, p \\ l_{jy} = \sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)y_i = \sum_i x_{ij}y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_i x_{ij} \right) \left(\sum_i y_i \right) & j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (4-7)$$

则回归系数

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_i y_i \\ l_{1y} \\ \vdots \\ l_{py} \end{bmatrix}$$

即:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_i y_i = \bar{y}$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = L^{-1} \begin{bmatrix} l_{1y} \\ l_{2y} \\ \vdots \\ l_{py} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

通过对矩阵 L 求逆便可得到回归系数, 进而可以建立磨削力的回归统计方程。

2. 回归方程分析

根据实验结果, 得出不同工程陶瓷材料的单位法向、切向磨削力回归方程如下:

$$\text{Si}_3\text{N}_4 \text{ 陶瓷} \begin{cases} F_n = 1.25 v_s^{-0.56} V_w^{0.53} a_p^{1.04} \\ F_t = 0.0017 v_s^{-0.51} V_w^{0.54} a_p^{2.21} \end{cases} \quad (4-9)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 陶瓷} \begin{cases} F_n = 0.43 v_s^{-0.27} V_w^{0.15} a_p^{0.64} \\ F_t = 0.012 v_s^{-0.07} V_w^{0.12} a_p^{1.16} \end{cases} \quad (4-10)$$

对以上回归方程进行假设检验, 回归是高度显著的, 证明所建立的数学模型具有实

际意义。

由上面两式可知，磨削速度、砂轮摆动速度和磨削深度对不同的陶瓷材料有不同的影响规律。分析上面回归方程的指数可见， Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷的法向、切向磨削力均随着磨削速度的增大而减小，随着砂轮摆动速度的增大而增大，随着磨削深度的增大而增大，但是磨削力对磨削深度是最敏感的，并且对磨削深度的敏感程度，切向磨削力要大于法向磨削力。这主要是因为磨削深度的增加使得陶瓷材料中不同粒径、硬度、强度等颗粒的相互作用增加，又因为陶瓷材料的脆性较大，在此磨削条件下，材料断裂裂纹的产生、扩展使得切削能量发生了变化，使得磨削力的波动较大，而磨削速度和砂轮摆动速度的改变对磨削力的影响要小一些，这与本节 4.3.2 和 4.3.3 中磨削用量对磨削力的分析情况是一致的。

从回归方程还可以看出，砂轮磨削速度对陶瓷法向磨削力的敏感程度要大于砂轮摆动速度的敏感程度，对陶瓷切向磨削力的敏感程度要小于砂轮摆动速度的敏感程度，这主要是因为摆动速度的增大使得陶瓷在切向方向承受了更大的力。

4.4 小结

本章主要研究了磨削用量对 Al_2O_3 和 Si_3N_4 陶瓷的磨削力、力比、材料去除率以及磨削比能的影响规律，并且着重从时域和频域两个方面研究了磨削用量与静态和动态法向磨削力、切向磨削力的关系：

1. 陶瓷的法向磨削力和切向磨削力不是很大，磨削比能也不是很大，但磨削力比很大。
2. 磨削用量对陶瓷的磨削过程具有重要的影响，其中磨削深度对陶瓷磨削力、材料去除率等的敏感程度要大于磨削速度、砂轮摆动速度。
3. 在小切深和大切深条件下，陶瓷材料的磨削过程表现出了不同的特点，这反映在陶瓷磨削力、材料去除率以及磨削力比的变化。
4. 陶瓷材料不同，磨削用量不同，其法向、切向磨削力信号的频谱图也呈现出不同的分布规律。
5. 采用多元线性回归分析建立了工程陶瓷法向磨削力和切向磨削力的数学模型。

第五章 机床刚度和磨削行程对工程陶瓷磨削力信号影响的研究

5.1 引言

在工程陶瓷的磨削加工中，常见的问题是磨削件的表面及亚表面损伤、强度下降及尺寸精度不高，而机床偏差正是导致出现上述问题的主要原因之一^{[24][25]}。因此，机床刚度的选择对于工程陶瓷的磨削加工有着重要的影响。另一方面，目前对工程陶瓷磨削加工的研究主要集中在单行程磨削中，而多行程磨削对于减小加工误差，提高磨削件的表面质量起着重要的作用，特别是在机床刚度不足的情况下，多行程磨削的地位更是举足轻重^[26]。但由于实验条件的限制和研究人员不够重视，国内还没有学者就机床刚度和磨削行程对工程陶瓷的磨削加工的影响规律展开研究。因此，本章的研究具有重要的理论价值和实际意义。

5.2 理论分析

本节就机床刚度和磨削行程与工程陶瓷磨削力、材料去除率等的关系进行理论分析。

5.2.1 机床刚度和磨削行程与法向磨削力 F_n 的关系

在工程陶瓷的磨削加工中，由于材料的性质、机床刚度、磨削行程等多种因素的影响，使得磨削的实际切深 a_a 并不等于名义切深 a_p 。根据文献，在第 i 次行程的实际切深可由下面的公式计算出^[27]：

$$a_a = a_p \left\{ 1 - \left(\frac{k_w}{k_s + k_w} \right)^i \right\} \quad (5-1)$$

而工程陶瓷法向磨削力 F_n 和实际切深 a_a 之间存在如下的关系^{[5][28]}：

$$F_n = F_0 + C_a a_a \quad (5-2)$$

上式中， C_a 是由磨削条件所决定的常数， a_a 是实际切深， F_0 是当 a_a 为零时的值， a_p 是名义切深， k_s 是机床刚度， k_w 是比磨削刚度， i 是磨削行程次数。

将 (5-1) 式代入 (5-2) 式，得到如下的公式：

$$F_m = F_0 + C_a a_p \left\{ 1 - \left(\frac{k_w}{k_s + k_w} \right)^i \right\} \quad (5-3)$$

公式(5-3)表示了工程陶瓷法向磨削力与机床刚度、磨削行程的关系,从该式可以看出,法向磨削力随着机床刚度的增大,磨削行程的增多而逐渐增大。由于上式中参数均为非负值,故下式成立:

$$\frac{dF_m}{dk_s} = \frac{iC_a a_p}{k_w} \left(\frac{k_w}{k_s + k_w} \right)^{i+1} > 0 \quad (5-4)$$

分析式(5-4),当机床刚度 k_s 较大时,上式趋于零;由于 $k_w/(k_s + k_w) < 1$,当 i 较大时,上式也趋于零。这说明了在较高的机床刚度下或者在磨削行程次数较多的条件下磨削工程陶瓷,法向磨削力将近似为一常数。

5.2.2 机床刚度和磨削行程与材料去除率 Q_w 的关系

根据文献^[27],机床刚度、磨削行程与工程陶瓷材料去除率 Q_w 的关系,可由下式表示:

$$Q_w = a_m b_w f_e = a_p b_w f_e \left\{ 1 - \left(\frac{k_w}{k_s + k_w} \right)^i \right\} \quad (5-5)$$

式中, f_e 为砂轮进给速度, b_w 为砂轮磨削宽度。由式(5-5)可见,材料去除率随着机床刚度的增大,磨削行程次数的增多而逐渐增大。由于式中参数均为非负值,故有下式:

$$\frac{dQ_w}{dk_s} = \frac{ia_p b_w f_e}{k_w} \left(\frac{k_w}{k_s + k_w} \right)^{i+1} > 0 \quad (5-6)$$

分析式(5-6),当机床刚度 k_s 较大时,上式趋于零;由于 $k_w/(k_s + k_w) < 1$,当 i 较大时,上式也趋于零。这说明了在较高的机床刚度下或者在磨削行程次数较多的条件下磨削工程陶瓷,材料的去除率将近似为一常数。

5.3 实验条件与实验方案

5.3.1 实验条件

磨削实验是在远山 FC-200D PCD&PCBN 刀具磨床上进行的，实验条件如下所示：

磨削方式：采用端面磨削

磨削砂轮：选用树脂结合剂砂轮，其型号为 EWAG BP 102 359T，浓度 C100

砂轮直径：D=150mm

砂轮宽度： $b_w=6\text{mm}$

磨削液：水基磨削液

实验材料： Si_3N_4 基和 Al_2O_3 基陶瓷，机械物理性能指标见表 3.1 和表 3.2。

5.3.2 实验方案

本实验采用单因素实验法研究机床刚度与磨削行程对静态、动态磨削力的影响规律。实验中，通过对机床预压力的调整来反映机床刚度的改变。为此，在不改变其它磨削条件的情况下，将机床预压力分别调整为 1, 2, 3, 4（代表机床刚度依次增大），然后在每一预压力下，分别进行八个行程的磨削，然后在进行 20 次光磨，采集并记录实验数据。实验原理图见图 3.1，实验方案见表 5.1。

表 5.1 改变机床刚度和磨削行程测力实验

Tab.5.1 Experiments of measuring grinding force during altering machine stiffness and grinding pass

| 砂轮种类 | 磨削速度 v_s (m/s) | 摆动速度 V_w (mm/min) | 试件材料 | 名义切深 a_p (μm) | 机床预压力 | 磨削行程 |
|-------|------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|-------|--------------|
| 树脂结合剂 | 14.06 | 1032 | Si_3N_4 | 40 | 1 | 8 次行程+20 次光磨 |
| | | | | | 2 | 8 次行程+20 次光磨 |
| | | | | | 3 | 8 次行程+20 次光磨 |
| | | | | | 4 | 8 次行程+20 次光磨 |
| | | | Al_2O_3 | | 1 | 8 次行程+20 次光磨 |
| | | | | | 2 | 8 次行程+20 次光磨 |
| | | | | | 3 | 8 次行程+20 次光磨 |
| | | | | | 4 | 8 次行程+20 次光磨 |

5.4 实验结果分析

5.4.1 机床刚度和磨削行程对磨削过程影响的静态分析

机床刚度和磨削行程的选择对于工程陶瓷的磨削加工有着重要的影响，图 5.1 至图 5.4 是在不同的机床刚度和磨削行程下得到的曲线图。从图中可以分析出机床刚度和磨削行程对 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷磨削力、材料去除率、磨削比能的影响规律。其中，对机床刚度影响的分析选择以下的磨削条件： $v_s=14.06\text{m/s}$ ， $V_w=1032\text{mm/min}$ ， $a_p=$

40 μm (Si_3N_4), $a_p=50\mu\text{m}$ (Al_2O_3)。另外在机床预压力为 3 的情况下分析磨削行程对磨削过程的影响。

1. 对磨削力的影响

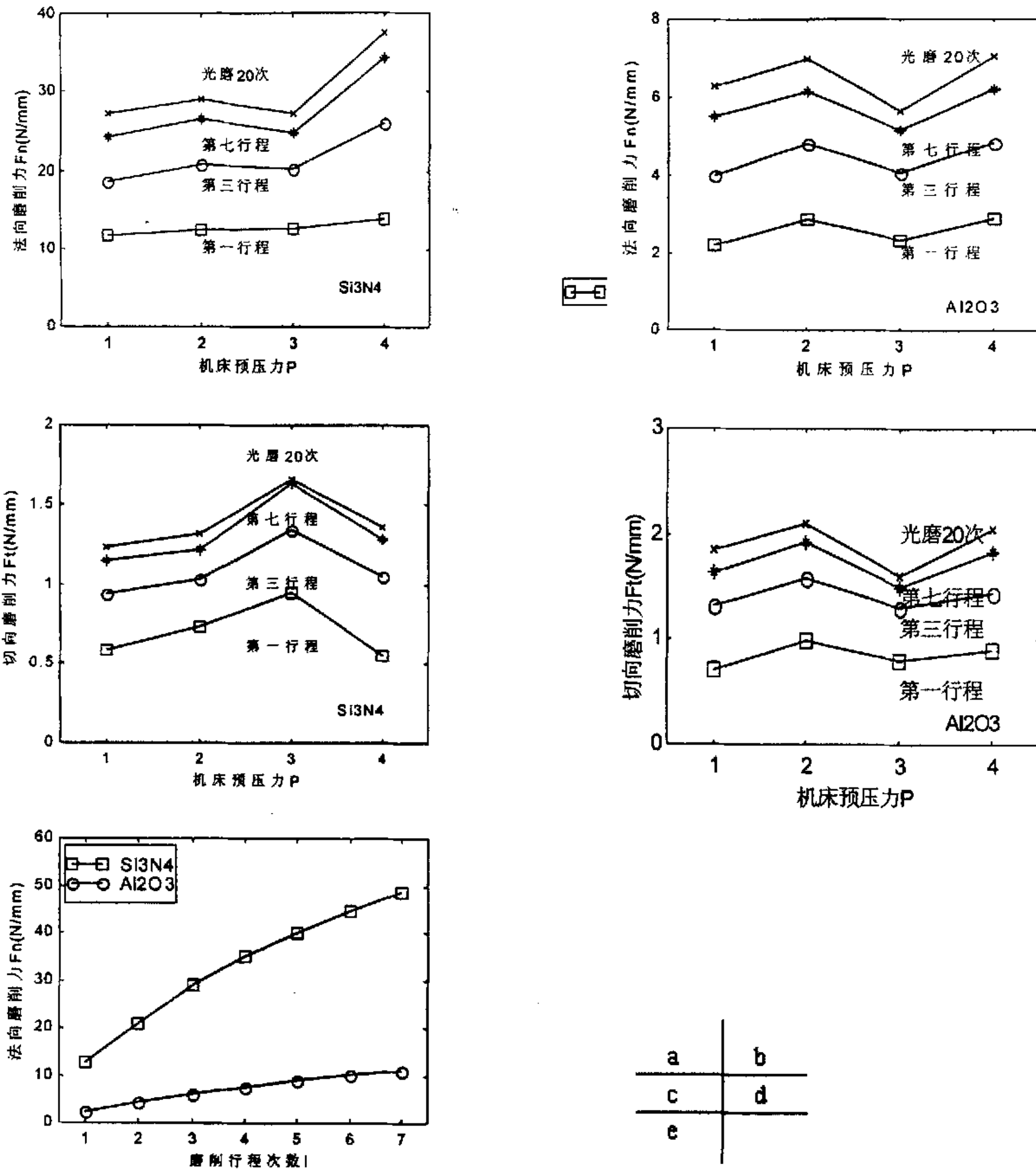
图 5.1 (a) (b) (c) (d) 表明了机床刚度和磨削行程对陶瓷单位法向磨削力、单位切向磨削力的影响情况。从图中可以看出, Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷的单位法向磨削力和单位切向磨削力总的变化趋势是随着机床刚度的增大而增大。其中, 法向磨削力只是在 $P=3$ 的情况下略有下降, 这可能是由于磨削时砂轮的磨削状态造成的误差。 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力的变化和切向磨削力的变化情况一致。而 Si_3N_4 陶瓷的法向磨削力与切向磨削力的变化情况不太一致, 这可能是由于机床误差造成的。从图中看到在较小的机床刚度下, 陶瓷的法向磨削力很小, 这主要是由于机床误差造成的。图 5.1 (e) 表明了随着磨削行程次数的增加, Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷的法向磨削力逐渐增大, 在开始的行程下, 增加幅度较大, 之后增加幅度逐渐减小, 磨削力最终趋于一定值。图 5.1 还展示了随着磨削行程的增加, 机床刚度对磨削力的影响程度逐渐减小。以上的实验结果与 5.2 的理论分析基本相符。

2. 对材料去除率的影响

机床刚度和磨削行程对陶瓷材料去除率的影响和对法向磨削力的影响情况非常类似。图 5.2 是机床刚度和磨削行程对 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷材料去除率的影响曲线图。从图 5.2 (a) (b) 可以看出, 随着机床刚度的增大, 总的来说, 材料去除率是增加的。但是在机床预压力 $P=4$ 的情况下, 材料去除率是很小的, 这主要是由于机床的制造误差引起的。因此, 在分析机床刚度和磨削行程对材料去除率的影响情况时, 剔除掉 $P=4$ 的情况。从图 (a) (b) (e) 可以看出, 随着磨削行程的增加, 材料去除率逐渐增加, 但增加的幅度逐渐减小, 最后, 达到一定值, 将不再随着磨削行程的增加而增加。但是无论选择多么高的机床刚度, 机床误差的存在都使得实际磨削深度 a_a 不等于名义磨削深度 a_p , 如在 $a_p=40\mu\text{m}$ 下磨削 Si_3N_4 陶瓷, 得到的最大实际磨削深度仅为 33 μm ; 在 $a_p=50\mu\text{m}$ 下磨削 Al_2O_3 陶瓷, 得到的最大实际磨削深度为 42 μm 。图 5.2 (c) (d) 表示出了在不同的机床刚度和磨削行程下, 实际磨削深度的变化情况。从图中可以看出, 在其它磨削条件不变的情况下, 随着机床刚度的增大, 实际磨削深度逐渐增大, 即加工误差逐渐减小。同时, 图中也展示了随着磨削行程的增加, 实际磨削深度也是逐渐增大的, 这也有利于减小加工误差, 因此, 在机床刚度不满足条件的情况下, 适当的增加磨削行程, 将有利于减小加工误差, 提高加工精度。但是当磨削行程达到一定的次数之后, 无论是材料去除率, 还是实际磨削深度, 都将达到一定值, 不会再增加。这同 5.2 的理论分析完全相符。

3. 对磨削比能的影响

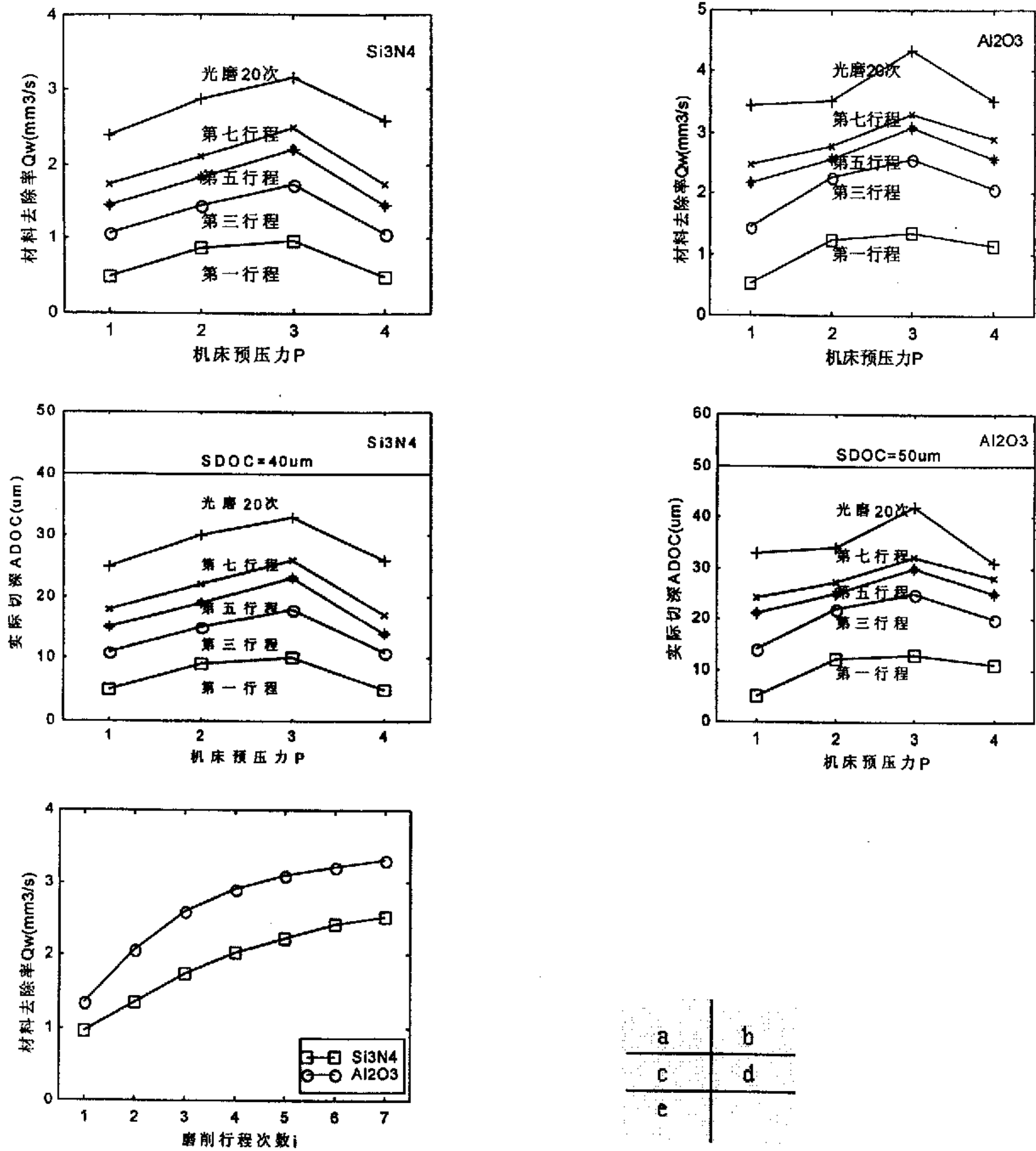
图 5.3 表示出了机床刚度对 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷磨削比能的影响情况。从图中可以看出, 随着机床刚度的增大, Si_3N_4 和 Al_2O_3 的磨削比能均呈现减小的趋势。这说明了在较大的机床刚度下, 更有利于陶瓷工件的磨削。从图中还看出, 在机床预压力 $P=3$ 的情况下加工 Si_3N_4 和 Al_2O_3 陶瓷, 其中, Al_2O_3 陶瓷消耗的比能更小一些, 这也说明了在该磨削条件下, 与 Si_3N_4 陶瓷相比, Al_2O_3 陶瓷更易加工, 这与实际的加工情况相符。



磨削条件: $V_s=14.06m/s$ $V_w=1032mm/min$ $a_p=40\mu m(Si_3N_4)$ $a_p=50\mu m(Al_2O_3)$ $P=3$

图 5.1 机床刚度和磨削行程对陶瓷磨削力的影响

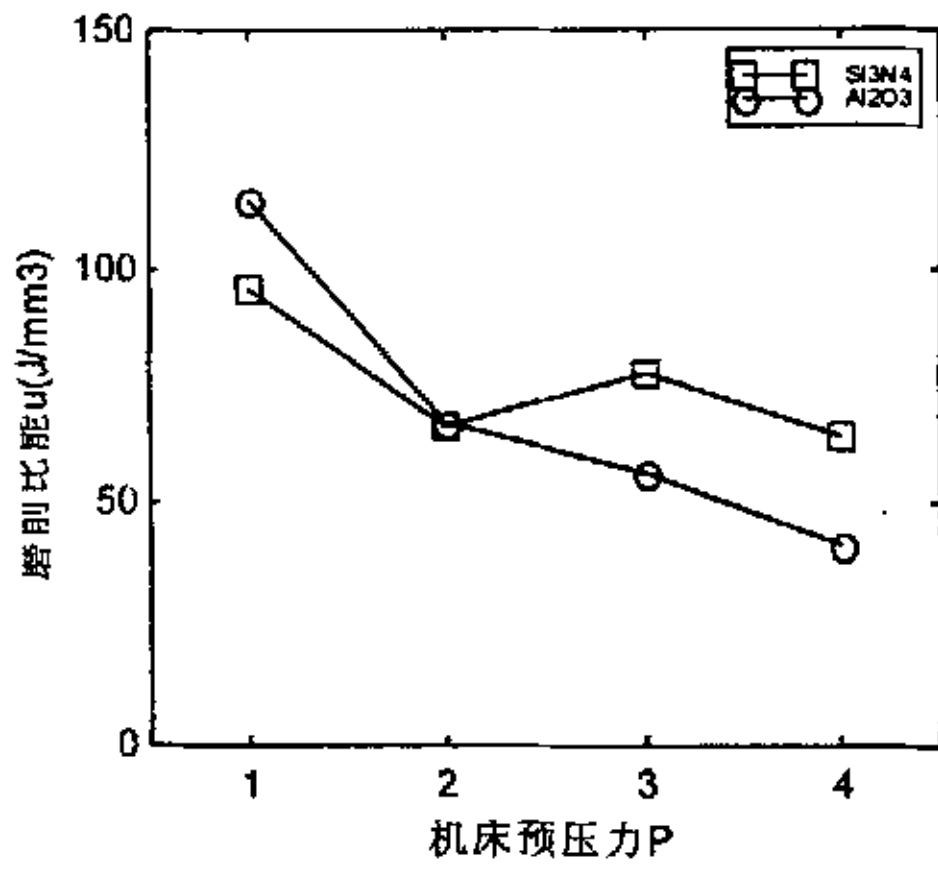
Fig.5.1 Specific grinding force vs. machine stiffness and grinding pass at wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 and Al_2O_3 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=40\mu\text{m}(\text{Si}_3\text{N}_4)$ $a_p=50\mu\text{m}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ $P=3$

图 5.2 机床刚度和磨削行程对材料去除率的影响

Fig.5.2 Stock removal rate vs. machine stiffness and grinding pass at wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 and Al_2O_3 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=40\mu\text{m}(\text{Si}_3\text{N}_4)$ $a_p=50\mu\text{m}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ $P=3$

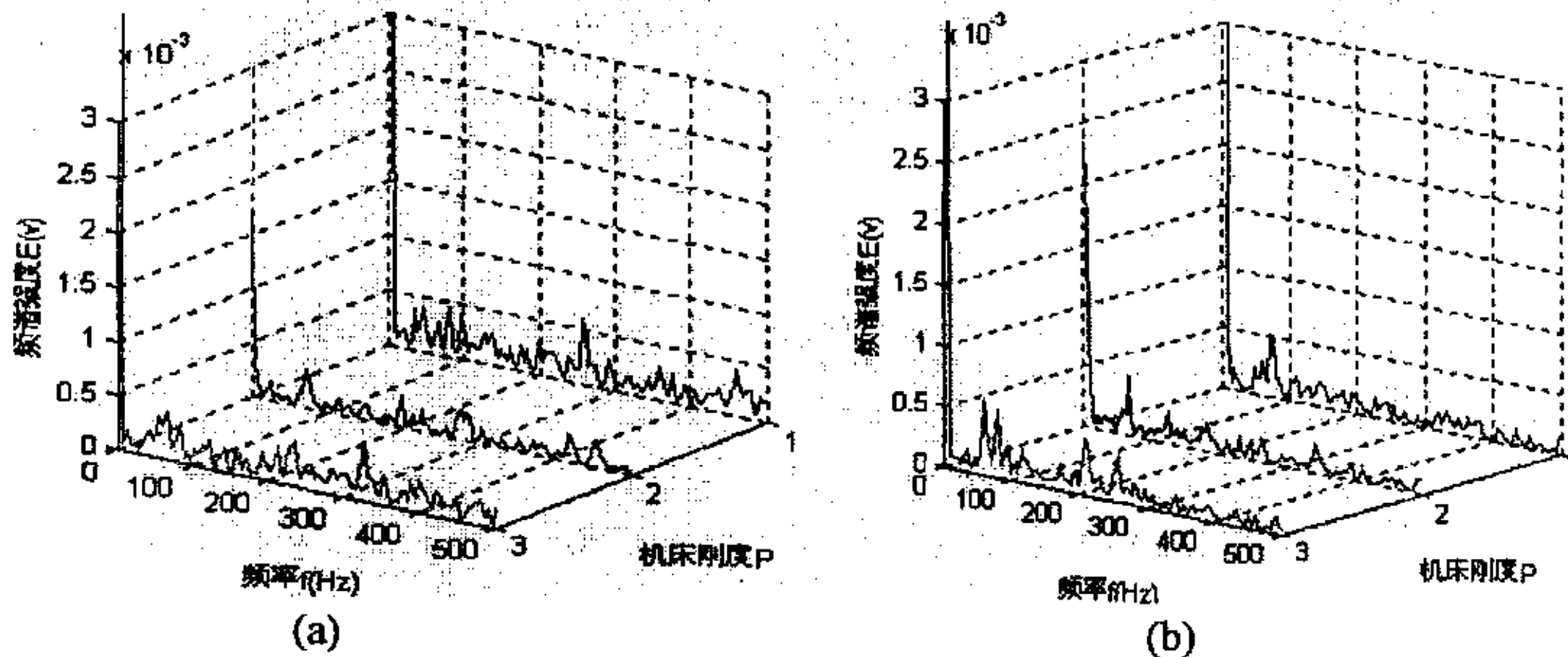
图 5.3 机床刚度对陶瓷磨削比能的影响

Fig.5.3 Grinding energy vs. machine stiffness at wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si₃N₄ and Al₂O₃ with vitrified wheel

5.4.2 机床刚度和磨削行程对磨削力信号影响的频率特性分析

1. 机床刚度对工程陶瓷磨削力信号的影响

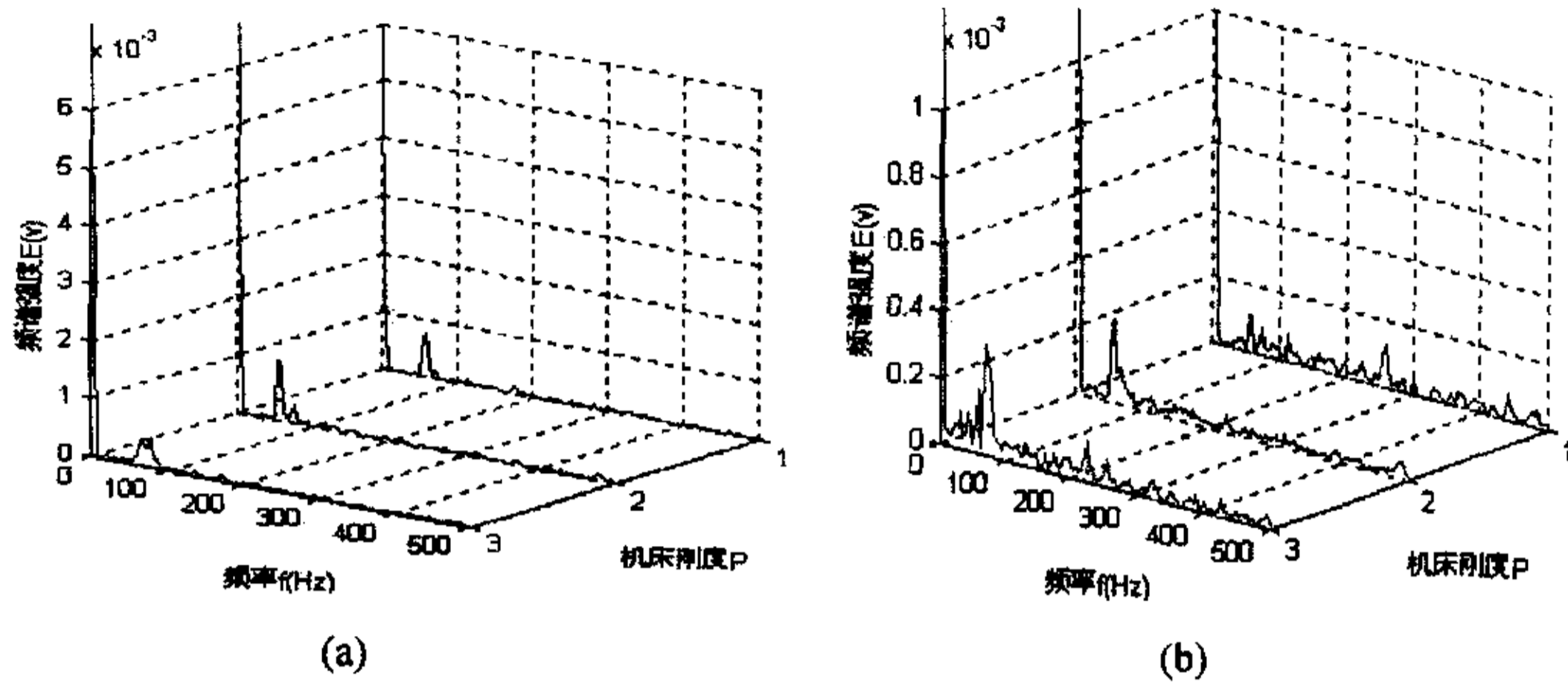
图 5.4 (a) (b) 和图 5.5 (a) (b) 表示了在小切深和大切深条件下, 机床刚度与 Si₃N₄ 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图。在小切深条件下, Si₃N₄ 陶瓷法向磨削力信号的频谱分布比较分散, 没有特别明显的主峰, 特别是在机床刚度较差



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=5\mu\text{m}$ 树脂结合剂砂轮

图 5.4 机床刚度与 Si₃N₄ 陶瓷磨削力信号的频谱关系

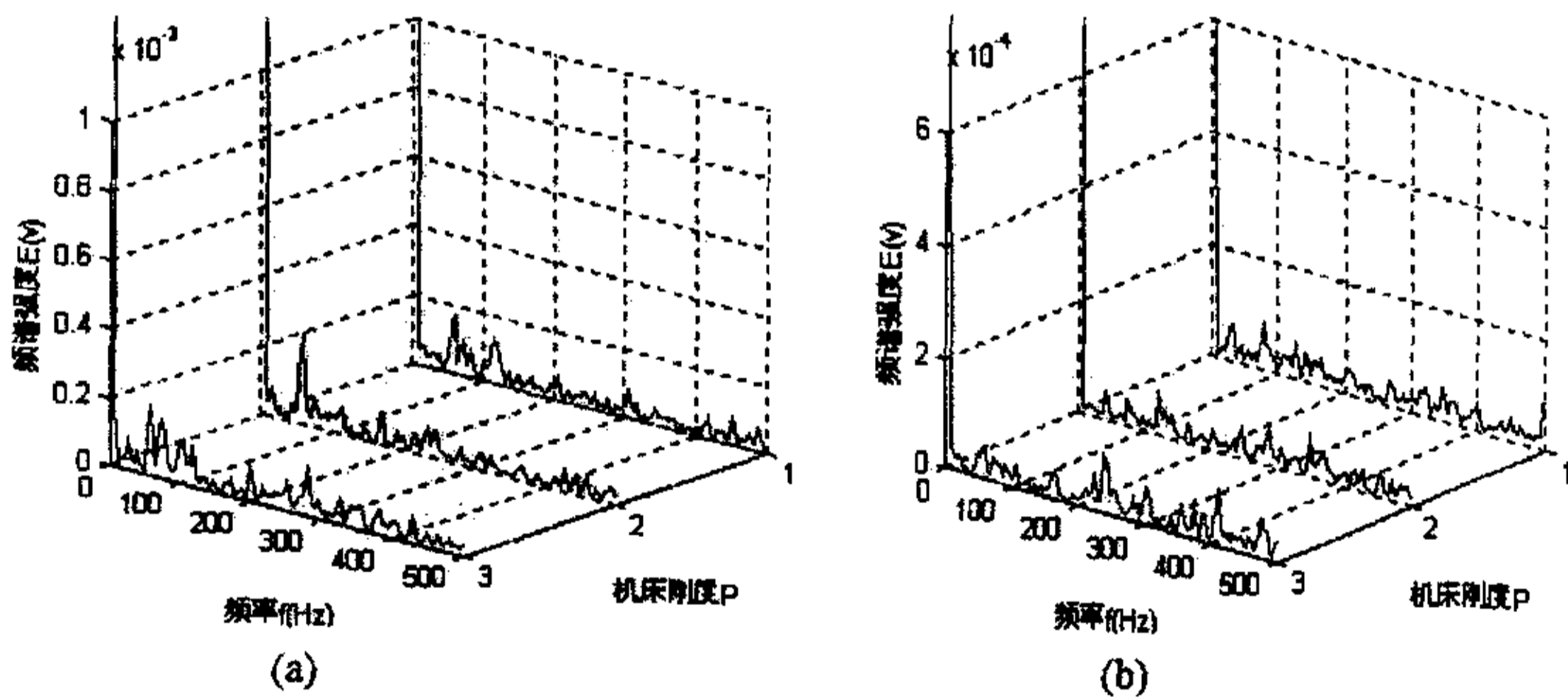
Fig.5.4 Spectrum of grinding force signal vs. machine stiffness at SDOC 5 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min in grinding Si₃N₄ with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=40\mu\text{m}$ 树脂结合剂砂轮

图 5.5 机床刚度与 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Fig.5.5 Spectrum of grinding force signal vs. machine stiffness at SDOC 40 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min in grinding Si_3N_4 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=50\mu\text{m}$ 树脂结合剂砂轮

图 5.6 机床刚度与 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Fig.5.6 Spectrum of grinding force signal vs. machine stiffness at SDOC 50 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min in grinding Al_2O_3 with vitrified wheel

的时候,这一现象更为明显,如图 5.4 (a) 所示,这说明了在 Si_3N_4 陶瓷的超精密磨削中,应尽量选择刚性较好的机床。而切向磨削力信号除了在 75Hz 出现一主峰之外,其它频率成分的分布也比较分散,如图 5.4 (b) 所示。在大切深条件下, Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号频谱均比较集中,其中在机床刚度为 1, 2 时,法向磨削

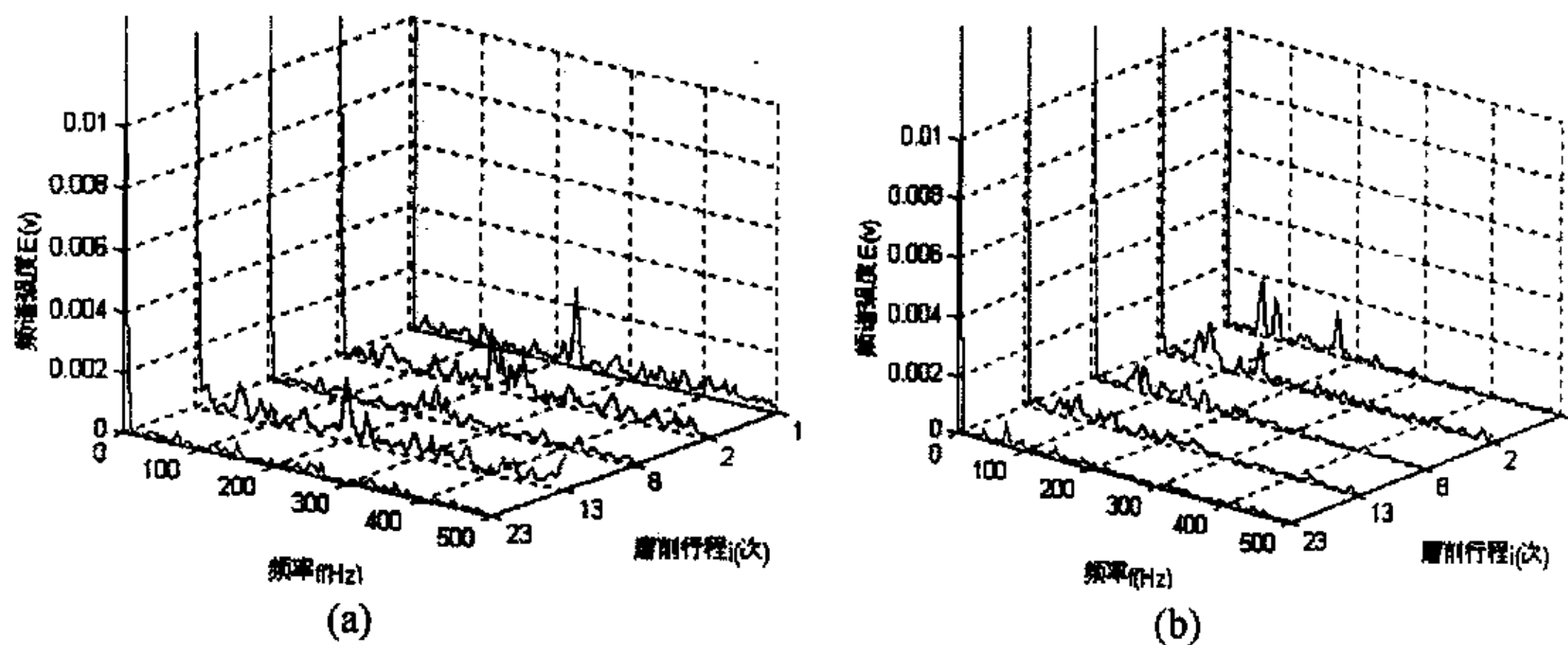
力信号和切向磨削力信号的特征频率大约都集中在 56.6Hz，在机床刚度为 3 时，特征频率大约都在 67.3Hz，如图 5.5 (a)(b) 所示，这说明了在大切深条件下磨削 Si_3N_4 陶瓷，磨削过程较为稳定，在允许的机床刚度范围内影响不大。

图 5.6 (a)(b) 表示了在大切深条件下，机床刚度与 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图。从图中可以看出，机床刚度的改变对 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱分布规律并不明显。 Al_2O_3 陶瓷的法向磨削力信号频谱除了在 58.6Hz 之外有一主峰，其它频率成分分布非常分散，如图 5.6 (a) 所示。而切向磨削力信号的频谱分布也非常分散，并且没有明显的主峰，如图 5.6 (b) 所示。这充分说明了在大切深条件下磨削 Al_2O_3 陶瓷，材料大部分发生了脆性断裂被去除，并且脆性断裂的概率并不稳定，机床刚度的改变对 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的频谱影响不大。

2. 磨削行程对工程陶瓷磨削力信号的影响

图 5.7 (a)(b) 和图 5.8 (a)(b) 表示了在小切深和大切深条件下，磨削行程与 Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图。图 5.9 (a)(b) 表示了在大切深条件下，磨削行程与 Al_2O_3 陶瓷法向磨削力信号、切向磨削力信号的频谱关系图。从图中可以看出， Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷法向、切向磨削力信号的频谱强度均随着磨削行程次数的增加呈减小的趋势，频谱强度的减小说明了在多行程磨削之后，陶瓷的磨削已近似研磨状态。

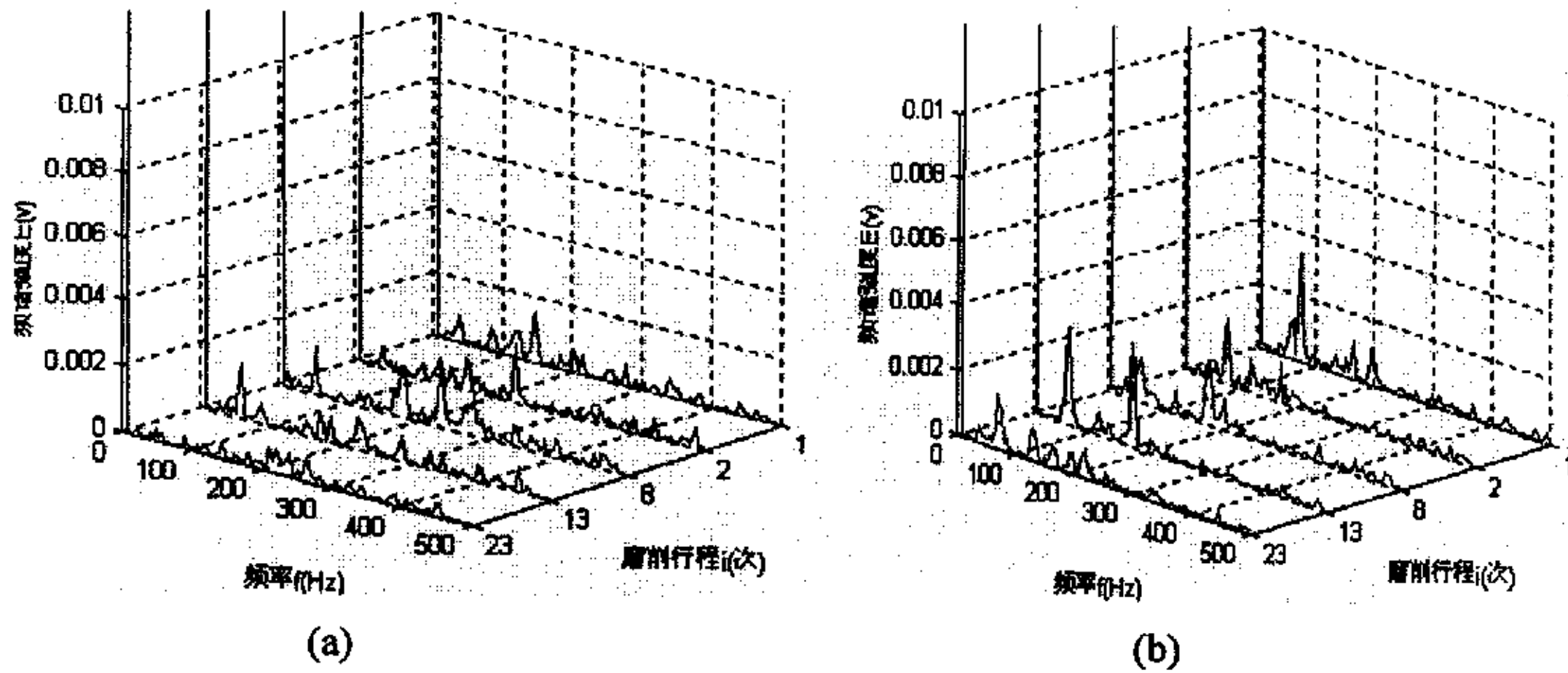
在小切深条件下磨削 Si_3N_4 陶瓷，其法向磨削力信号出现一明显的主峰，并且主峰的位置并不随磨削行程次数的增加而变化，此时特征频率为 228.5Hz，如图 5.7 (a) 所示，这说明了在小切深条件下， Si_3N_4 陶瓷主要发生了塑性变形，特别是在多行程磨削之后，磨削力信号的频谱强度已经很小。图 5.8 (b) 表明了 Si_3N_4 陶瓷切向磨削力信号存在几处明显的尖峰，随着磨削行程次数的增加，除了 80.1Hz 的频率成分位置基本保持



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=10\mu\text{m}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 5.7 磨削行程与 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的频谱关系

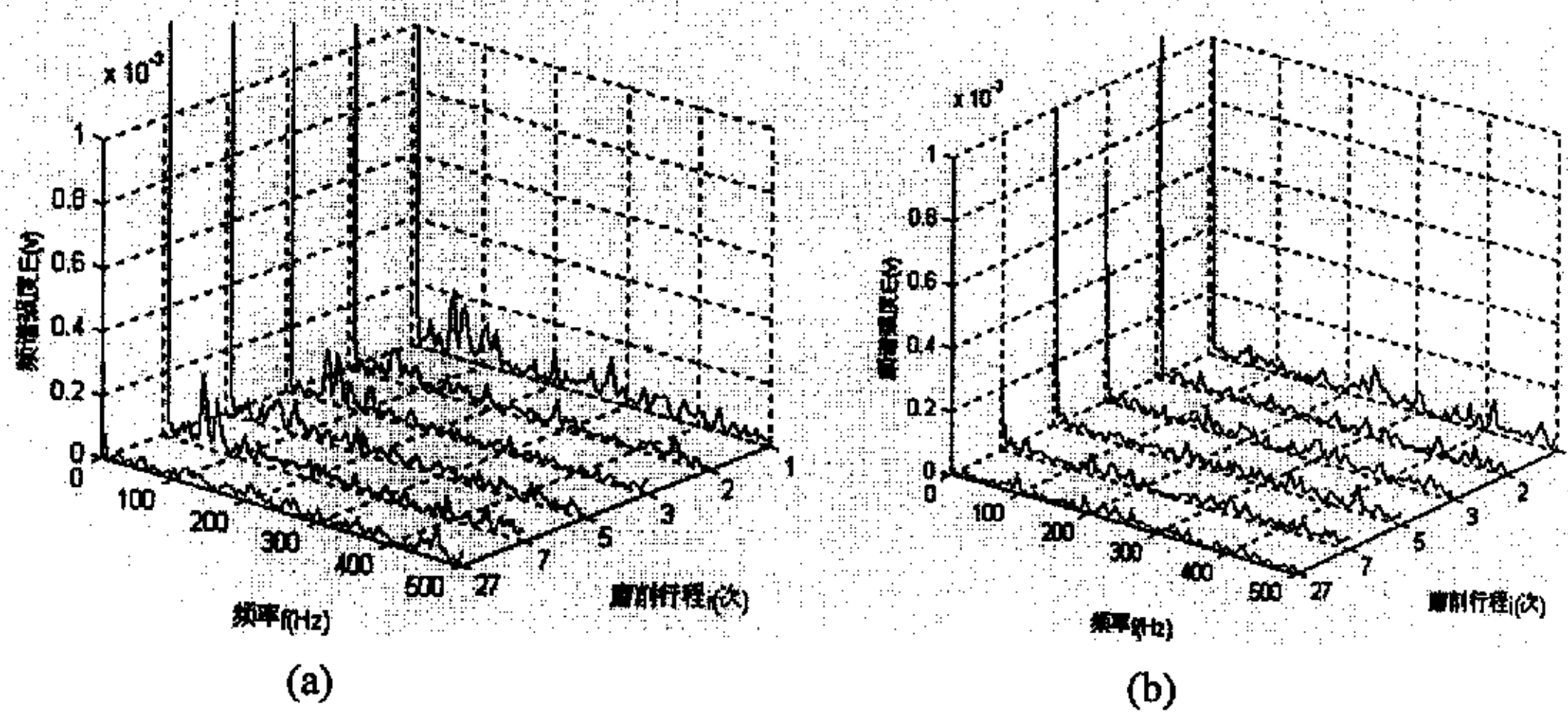
Fig.5.7 Spectrum of grinding force signal vs. grinding pass at SDOC 10 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=20\mu\text{m}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 5.8 磨削行程与 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Fig.5.8 Spectrum of grinding force signal vs. grinding pass at SDOC 20 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 with vitrified wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=50\mu\text{m}$ $P=3$ 树脂结合剂砂轮

图 5.9 磨削行程与 Al_2O_3 陶瓷磨削力信号的频谱关系

Fig.5.9 Spectrum of grinding force signal vs. grinding pass at SDOC 50 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation speed 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Al_2O_3 with vitrified wheel

不变之外, 其它尖峰位置大部分发生了变化, 这说明了在 Si_3N_4 陶瓷磨削的切向位置, 砂轮颗粒和陶瓷材料的滑擦使得切向磨削力信号的频率分布比较分散。

在大切深条件下磨削 Si_3N_4 陶瓷时, 材料不仅发生塑性变形, 而且发生脆性断裂, 此时法向、切向磨削力信号的频率成分应比较分散, 如图 5.8 (a) (b) 所示, 即使多行程磨削 (23 次磨削行程) 之后, 磨削力信号的频率分布仍比较分散, 这说明多行程之

后，陶瓷材料仍然发生了很多的脆性断裂。

在大切深条件下磨削 Al_2O_3 陶瓷时，不论在几次磨削行程之后，其法向、切向磨削力信号的频谱分布都很分散，如图 5.9 (a) (b) 所示，这说明了 Al_2O_3 陶瓷材料的磨削主要是通过脆性断裂而被去除的。

5.5 小结

本章主要研究了机床刚度和磨削行程的改变对 Al_2O_3 和 Si_3N_4 两种陶瓷材料的磨削力、力比、材料去除率以及比能的影响规律，并且着重从时域和频域两个方面分析了机床刚度和磨削行程与静态和动态法向磨削力、切向磨削力关系：

1. 陶瓷的单位法向磨削力、单位切向磨削力随着机床刚度的增大而增大，随着磨削行程次数的增加而增大，但增加幅度逐渐减小，并最终趋于一定值。随着磨削行程的增加，机床刚度对磨削力的影响程度逐渐减小。

2. 陶瓷材料的去除率随着机床刚度的增大而增大，随着磨削行程次数的增加而增大，但增加幅度逐渐减小，并最终趋于一定值。

3. 陶瓷材料实际的磨削深度随着机床刚度和磨削行程的增大而增大，但无论选择多大的机床刚度和选择多少次磨削行程，陶瓷材料实际的磨削深度都不等于名义的磨削深度，且比之要小。

4. 随着机床刚度的增大，陶瓷的磨削比能呈现减小的趋势。

5. 陶瓷材料磨削力信号的特征频率随着机床刚度和磨削行程次数的选择而呈现不同的分布规律，磨削力信号的频谱反映了陶瓷材料磨削机理（如塑性、脆性变形）的变化。

第六章 砂轮类型及砂轮振动对工程陶瓷磨削力信号影响的研究

6.1 引言

在工程陶瓷的磨削加工中,由于砂轮直接参与磨削,磨削砂轮的颗粒尺寸、粘结类型以及砂轮的磨损状态、振动都对磨削力、材料去除率、表面质量起着重要的影响[20][21][28][29],特别是在工程陶瓷的超精密加工中,这一影响更为显著。由于实验条件的限制,国内外学者很少在改变砂轮的情况下对工程陶瓷进行磨削实验。本文选择不同粘结类型、磨粒尺寸的砂轮对 Si_3N_4 陶瓷进行了对比实验,分析出不同类型的砂轮对 Si_3N_4 陶瓷磨削力的影响规律,并且通过对砂轮振动信号和磨削力信号的时域、频域分析,总结了砂轮振动的规律及其对 Si_3N_4 磨削力信号的影响情况。

6.2 实验条件与实验方案

6.2.1 实验条件

磨削实验是在远山 FC-200D PCD&PCBN 刀具磨床上进行的,采用端面磨削方式,磨削砂轮选用树脂结合剂砂轮、金属粘结剂金刚石砂轮(磨粒尺寸分别为 1000[#]、8000[#]),实验条件见表 6.1。本实验所选材料为 Si_3N_4 基陶瓷,其机械物理性能指标见表 3.1。所采用的砂轮指标见表 6.2。振动信号的测量采用大连理工大学振动工程研究所研制的 WPDM2000 系统。

表 6.1 实验条件

Tab.6.1 Experiment conditions

| | |
|--------------|-----------------------------|
| 磨削方法 | 端面磨削 |
| 砂轮磨削速度 V_s | 14.06m/s |
| 砂轮摆动速度 V_a | 1032mm/min |
| 磨削深度 a_p | 5, 10, 20, 30 μm |
| 磨削液 | 水基磨削液 |
| 工件材料 | Si_3N_4 |
| 工件尺寸 | 24mm×8.5mm×59.4mm |

表 6.2 砂轮指标

Tab.6.2 The index of wheel in grinding ceramics

| 砂轮编号 | 粘结类型 | 砂轮粒度 | 砂轮直径 | 砂轮宽度 |
|------|-------|-------------------------|-------|--------|
| No1 | 树脂粘结剂 | 120 [#] (Ger) | 150mm | 6.0mm |
| No2 | 金属粘结剂 | 1000 [#] (Jap) | 150mm | 15.3mm |
| No3 | 金属粘结剂 | 8000 [#] (Jap) | 150mm | 15.5mm |

表 6.3 改变砂轮类型测力实验

Tab.6.3 Experiments of measuring grinding force during altering wheel species

| 试件材料 | 磨削速度 V_s (m/s) | 摆动速度 V_w (mm/min) | 机床预压力 | 磨削深度 a_p (um) | 砂轮编号 |
|-----------|---------------------|------------------------|-------|--------------------|------|
| Si_3N_4 | 14.06 | 1032 | 3 | 5 | No1 |
| | | | | | No2 |
| | | | | | No3 |
| | | | | 10 | No1 |
| | | | | | No2 |
| | | | | | No3 |
| | | | | 20 | No1 |
| | | | | | No2 |
| | | | | | No3 |
| | | | | 30 | No1 |
| | | | | | No2 |
| | | | | | No3 |

6.2.2 实验方案

本实验主要研究在对 Si_3N_4 陶瓷进行粗加工和超精密加工时，不同类型的砂轮对陶瓷静态、动态磨削力的影响规律及砂轮振动信号对磨削力的影响程度及其相关性。为此安排了三组实验，在四种不同的磨削深度下，分别改变三种类型的砂轮，对所选 Si_3N_4 陶瓷材料进行磨削实验，采集并记录数据。实验原理图见图 3.1，实验方案见表 6.3。

6.3 砂轮类型对磨削过程影响的实验分析

在小切深和大切深条件下分别改变砂轮的类型进行 Si_3N_4 陶瓷的磨削实验，测得其单行程单位法向磨削力值如表 6.4 所示，材料去除率如表 6.5 所示，力比如表 6.7 所示。

6.3.1 对单位法向磨削力的影响

从表 6.4 看出, 不论选择何种磨削砂轮, 单位法向磨削力都随着磨削深度的增大而增大。在磨削深度为 5 μm 的小切深条件下, 粒度为 1000 $\#$ 的金刚石砂轮比 8000 $\#$ 的金刚石砂轮的单位法向磨削力要小, 这主要是由于随着磨粒尺寸的增大, 砂轮磨削刃的密度减小, 导致单位法向磨削力减小。而在磨削深度较大时, 粒度为 1000 $\#$ 的金刚石砂轮比 8000 $\#$ 的金刚石砂轮的单位法向磨削力要大, 这主要是因为采用粒度较小的 8000 $\#$ 金刚石砂轮进行磨削时, 砂轮打滑导致磨削力急剧减小。从该表中还可看出, 在磨削深度为 5 μm 时, 采用金属粘结剂的金刚石砂轮的单位法向磨削力要小于采用树脂结合剂的砂轮所获得单位法向磨削力, 而大切深条件下, 结果相反, 这说明采用 1000 $\#$ 的金刚石砂轮比采用树脂结合剂的砂轮更适合对 Si_3N_4 陶瓷进行超精密磨削。

由第四章可知, 在超精密磨削时, 磨削深度对陶瓷磨削力的影响并不大。从表 6.4 可知, 在小切深条件下, 砂轮粒度对磨削力的影响还是比较大的。

表 6.4 不同磨削深度和砂轮类型下测得的法向磨削力值

Tab.6.4 Specific normal grinding force at different grinding depth with different grinding wheels

| Fn (N/mm) 砂轮编号 | ap (μm) | | | |
|----------------------|-------------------------|-------|--------|--------|
| | 5 | 10 | 20 | 30 |
| No1 | 23.50 | 36.33 | 58.83 | 97.00 |
| No2 | 15.36 | 56.60 | 101.44 | 194.64 |
| No3 | 21.55 | 11.10 | 30.16 | 40.33 |

6.3.2 对材料去除率的影响:

从表 6.5 可以看到, 在较大切深条件下, 粒度为 1000 $\#$ 的金刚石砂轮磨削 Si_3N_4 陶瓷获得的材料去除率较大。在小切深 ($a_p=5\mu\text{m}$) 条件下, 采用金属粘结剂的 1000 $\#$ 金刚石砂轮获得的材料去除率小于树脂结合剂砂轮下的材料去除率。对于粒度为 8000 $\#$ 的金刚石砂轮, 在所采用的磨削条件下, 并不能去除掉任何材料。对其进一步实验, 即在不同砂轮的磨削情况下, 对试样进行多行程磨削 (12 个行程之后), 得到测量结果如表 6.6 所示。其中, 1000 $\#$ 砂轮的实际磨削深度近似等于名义磨削深度, 而 8000 $\#$ 砂轮仍不能去除掉任何材料。

6.3.3 对磨削力比的影响:

由表 6.7 可知, 采用树脂结合剂的砂轮在对 Si_3N_4 陶瓷进行磨削时, 磨削力比随着磨削深度的增加而增大, 这说明了法向磨削力比切向磨削力的增加程度要大, 而在采用 1000 $\#$ 金刚石砂轮进行磨削时, 磨削力比随着磨削深度的增加而减小。从表 6.7 还可以看出, 在采用 1000 $\#$ 金刚石砂轮对 Si_3N_4 陶瓷进行超精密磨削时, 应适当减小磨削深度

以控制磨削力比不致太大。

表 6.5 不同磨削深度和砂轮类型下测得的材料去除率值
Tab.6.5 Stock removal rate at different grinding depth with three grinding wheels

| 砂轮编号 Qw (mm ³ /s) | ap (um) | 磨削深度 | | | |
|------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5 | 10 | 20 | 30 |
| No1 | | 103.2 | 103.2 | 103.2 | 103.2 |
| No2 | | 52.6 | 157.9 | 394.7 | 552.6 |
| No3 | | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 6.6 多行程磨削时名义磨削深度和实际磨削深度的比较
Tab.6.6 The comparison of SDOC and ADOC in multi-pass grinding
at machine stiffness 3 with three grinding wheels

| 砂轮编号 aa (um) | ap (um) | 磨削深度 | | | |
|--------------------|------------|------|----|----|----|
| | | 5 | 10 | 20 | 30 |
| No1 | | 4 | 4 | 3 | 5 |
| No2 | | 5 | 10 | 19 | 29 |
| No3 | | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 6.7 不同磨削深度和砂轮类型下测得的磨削力比值
Tab.6.5 Grinding force ratio at different grinding depth with three grinding wheels

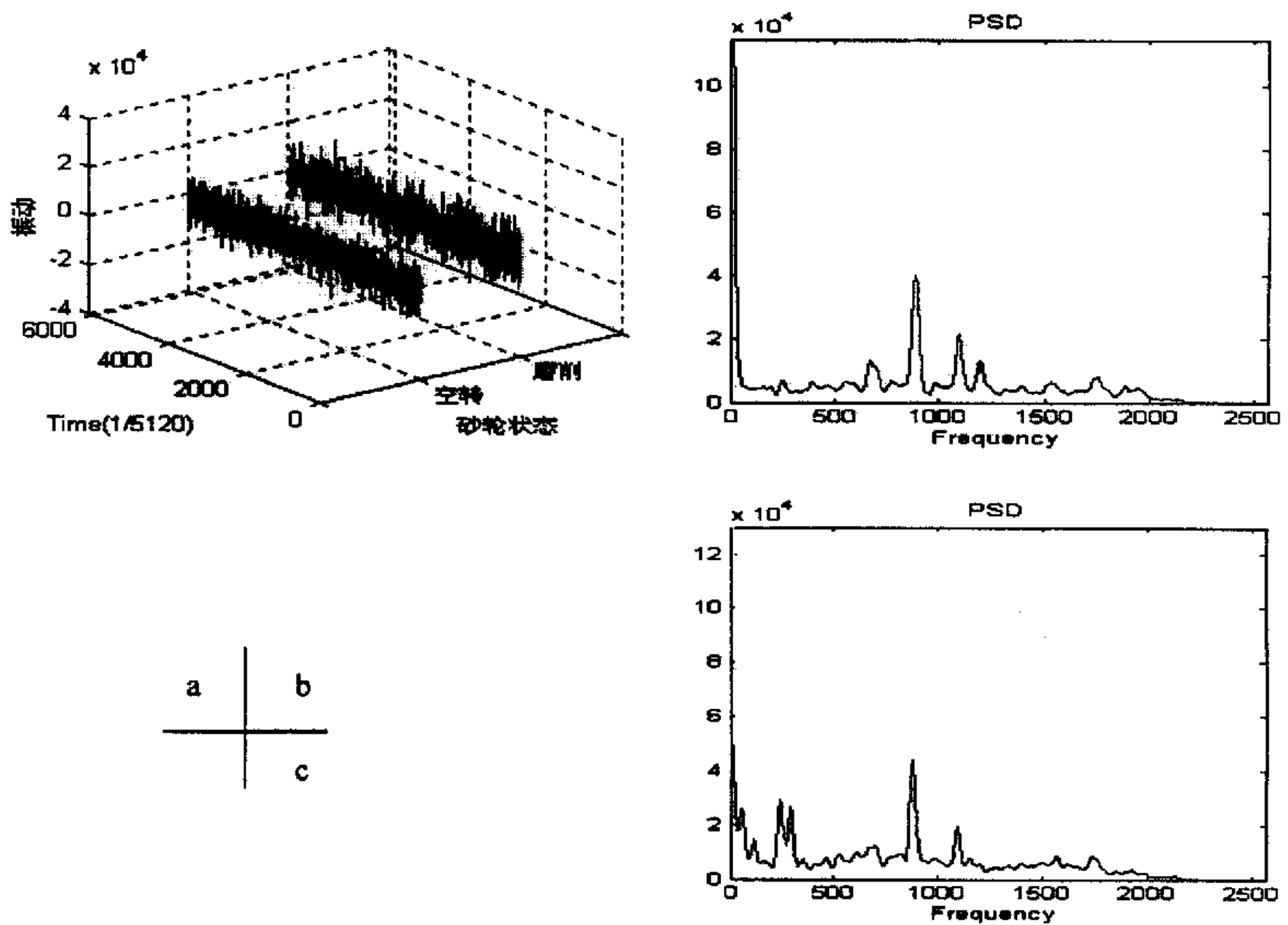
| 砂轮编号 Fn /Ft | ap (um) | 磨削深度 | | | |
|-------------------|------------|-------|------|------|-------|
| | | 5 | 10 | 20 | 30 |
| No1 | | 10.93 | 4.32 | 3.29 | 3.2 |
| No2 | | 5.42 | 8.77 | 8.56 | 12.27 |

6.4 砂轮振动对磨削过程影响的实验分析

砂轮振动是磨削加工中一种不可避免的物理现象，它对磨削过程有着重要的影响，特别是在超精密磨削时，砂轮振动将会严重的影响了磨削件的表面质量。目前，人们对金属切削中切削振动的研究已经很深入，也获得了大量的经验，建立起了很多的公式和理论。但是在工程陶瓷等硬脆材料的磨削加工中，对于砂轮振动的研究还很少。本章通过对 Si_3N_4 陶瓷的磨削实验，从时域、频域两个方面分析了砂轮振动对磨削过程的影响规律。

6.4.1 磨削砂轮的振动情况

在采集砂轮振动信号时，磨削条件如下所示： $V_s=14.06\text{m/s}$ ， $V_w=1032\text{mm/min}$ ， $a_p=20\mu\text{m}$ ，磨削砂轮为 $1000^\#$ 的金属粘结剂金刚石砂轮。使用 WPDM2000 系统分别在砂轮空转和磨削 Si_3N_4 陶瓷两种情况下采集砂轮振动信号，该振动信号的时域频域图如图 6.1 (a) (b) (c) 所示。与振动信号相对应的磨削力信号的时域频域图如图 6.2 (a) (b) 所示。

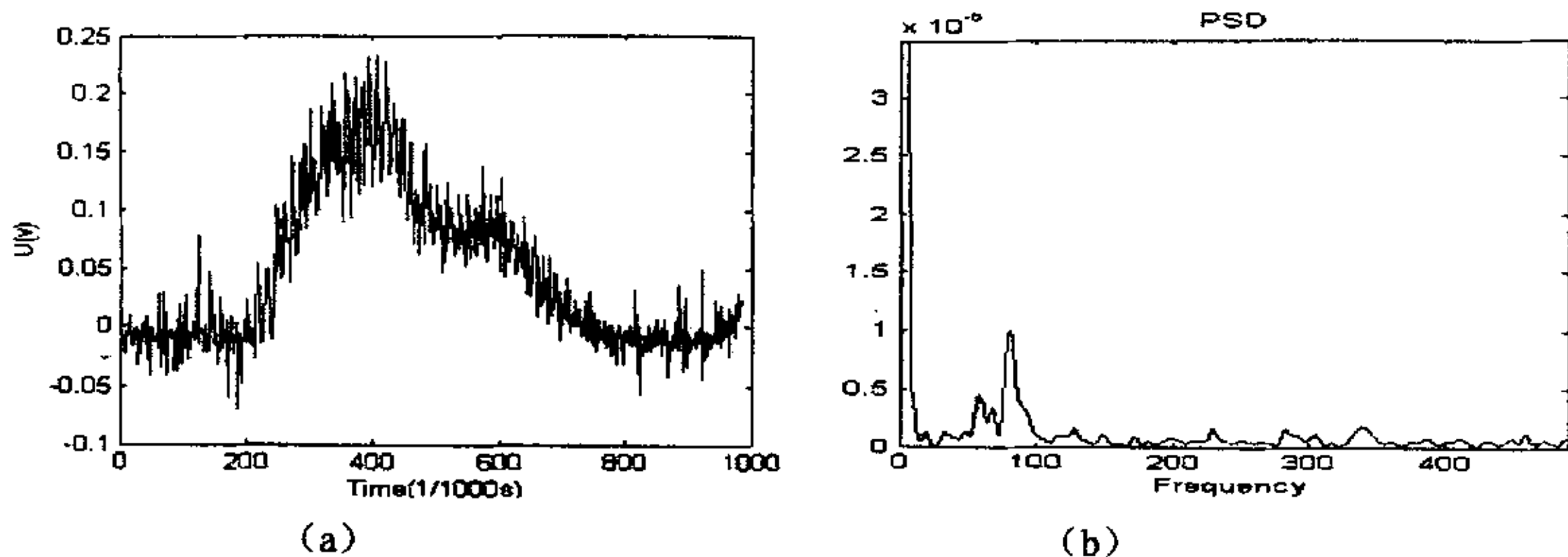


空转条件： $V_s=14.06\text{m/s}$

磨削条件： $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=20\mu\text{m}(\text{Si}_3\text{N}_4)$ $P=3$ $1000^\#$ 金刚石砂轮

图 6.1 在空转和磨削时砂轮振动的时域频域比较图

Fig.6.1 The comparison of wheel vibration in time domain and frequency domain at wheel grinding speed 14.06m/s in grinding and non-grinding with cast iron fiber diamond wheel



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=20\mu\text{m}(\text{Si}_3\text{N}_4)$ $P=3$ 1000# 金刚石砂轮

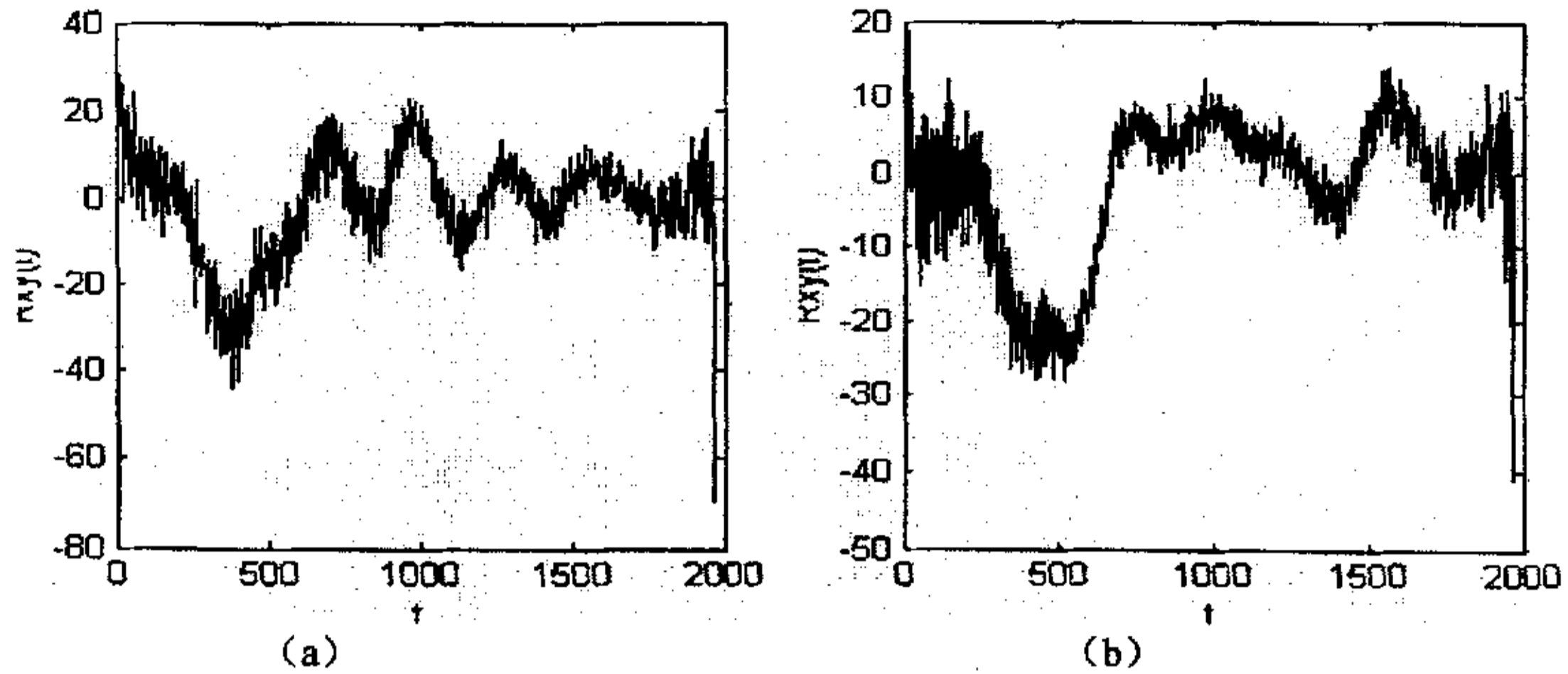
图 6.2 磨削力信号的时域频域图

Fig.6.2 Normal grinding force signal in time domain and frequency domain at SDOC 20 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 with cast iron fiber diamond wheel

从图 6.1 (a) 可以看出, 砂轮在磨削时测得的振动信号的幅值比砂轮空转时测得的振动信号的幅值要大一些。图 6.1 (b) (c) 分别表示了砂轮在磨削时和空转时测得的振动信号的频域波形图, 从图中可以看出, 砂轮振动信号的低频成分比较大, 表明在 Si_3N_4 陶瓷的磨削过程中, 砂轮振动对陶瓷的磨削干扰较大, 平稳性也比较差, 使得磨削力产生了较大的波动, 如图 6.2 (a) 所示。从图 6.2 (a) 还可以看出, Si_3N_4 陶瓷法向磨削力信号中出现许多小的尖峰, 分散性较大, 这说明了 Si_3N_4 陶瓷材料的脆性对磨削力的波动有一定地影响。通过对图 6.1 (b) (c) 进一步分析发现, 两图都存在 875Hz、1200Hz 两个尖峰, 表明了这两个频率成分是由机床所引起的, 而 (b) 图中增加了 240Hz 的频率成分, 推测该频率成分是由磨削过程引起的。经分析发现, 图 6.2 (b) 中磨削力信号的特征频率为 80Hz, 这正好与砂轮振动信号中的 240Hz 存在着倍频关系, 这充分说明了砂轮的振动对 Si_3N_4 陶瓷的磨削过程有较大的影响。

6.4.2 砂轮振动信号与磨削力信号的相关分析

图 6.3 (a) (b) 分别表示了 Si_3N_4 陶瓷的法向磨削力信号和切向磨削力信号与砂轮振动信号的相关图形。从图中可以看出, Si_3N_4 陶瓷的磨削力信号与其振动信号之间存在着一定程度的相关性, 并且相关信号的周期性比较强, 这说明了 Si_3N_4 陶瓷的磨削力信号与振动信号具有相同的频率成分或存在倍频关系。通过对 (a) (b) 两图比较发现, 法向磨削力信号与振动信号的相关性要比切向磨削力与振动信号的相关性更大一些, 这说明了在 Si_3N_4 陶瓷的磨削过程中, 法向磨削力对磨削砂轮振动的敏感程度要大于切向磨削力对砂轮振动的敏感程度, 这与实际的磨削情况非常符合。



磨削条件: $V_s=14.06\text{m/s}$ $V_w=1032\text{mm/min}$ $a_p=20\mu\text{m}$ $P=3$ 1000[#]金刚石砂轮

图 6.3 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号与砂轮振动信号的相关图

Fig.6.3 The correlation analysis of grinding force signal and wheel vibration signal at SDOC 20 μm , wheel grinding speed 14.06m/s, wheel oscillation 1032mm/min, machine stiffness 3 in grinding Si_3N_4 with cast iron fiber diamond wheel

6.5 小结

本章通过选择不同类型的磨削砂轮,研究了颗粒尺寸、粘结类型对 Si_3N_4 陶瓷的磨削力、材料去除率的影响规律,并且从时域频域两个方面分析了砂轮振动信号、磨削力信号的特点以及它们之间的相关性,总结出了砂轮振动的规律及其对工程陶瓷磨削力信号的影响情况。

1. 小切深条件下,随着磨粒尺寸的增大,单位法向磨削力逐渐减小。在相同条件下,金属粘结剂金刚石砂轮的单位法向磨削力要小于采用树脂结合剂的砂轮所获得单位法向磨削力。

2. 小切深条件下,采用金属粘结剂的金刚石砂轮在单行程磨削时获得的材料去除率小于树脂结合剂砂轮下的材料去除率。

3. 在 Si_3N_4 陶瓷的磨削过程中,砂轮振动信号的低频成分比较大,表明了砂轮的振动对磨削干扰较大。

4. Si_3N_4 陶瓷的磨削力信号与其振动信号之间存在着较强的相关性。其中,法向磨削力信号与振动信号的相关性要比切向磨削力与振动信号的相关性更强一些。

第七章 结论与展望

7.1 本文结论

本论文采用 VC++ 开发了 Win9x 环境下的磨削力数字信号处理软件, 并且通过对 Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷大量的磨削实验, 在此基础上系统的研究了工程陶瓷磨削力信号的变化规律, 所得结论如下:

1. Si_3N_4 陶瓷和 Al_2O_3 陶瓷的磨削力信号有着独特的分布规律, 它是一种具有平稳性, 各态遍历性的周期振动信号。

2. 工程陶瓷材料的高硬度和高脆性使得磨削力信号呈现出很大的波动性, 单位法向磨削力不大, 单位切向磨削力很小, 磨削比能不是很大, 但磨削力比很大。

3. 磨削用量对陶瓷磨削过程的影响比较大, 其中磨削深度对磨削力、力比、材料去除率及比能的影响要远大于磨削速度和砂轮摆动速度的影响。陶瓷材料不同, 磨削用量不同, 其法向、切向磨削力信号的频谱图也呈现出不同的分布规律。

4. 发现在小切深和大切深条件下, Si_3N_4 陶瓷材料的磨削过程表现出了不同的特点。小切深条件下, 材料主要发生了塑性变形被去除, 大切深条件下, 材料除了发生塑性变形之外, 大部分发生脆性断裂而被去除, 这可以通过陶瓷磨削力、材料去除率以及磨削力比的变化反映出来。

5. 机床刚度和磨削行程对陶瓷磨削力信号的影响规律同对材料去除率的影响规律非常类似。在陶瓷的超精密加工中, 应该选择尽可能高的机床刚度, 如果无法选择高的机床刚度, 则要增加磨削行程来减小机床刚度的影响。陶瓷材料磨削力信号的特征频率随着机床刚度和磨削行程次数的选择而呈现不同的分布规律。

6. 砂轮的颗粒尺寸及粘结剂类型对工程陶瓷磨削过程有重要的影响。初步发现, 在同样的磨削条件下磨削 Si_3N_4 陶瓷时, 1000# 的金刚石砂轮比 8000# 的金刚石砂轮得到的磨削力更小, 材料去除率更大; 数值结合剂的砂轮比金属粘结剂的砂轮更适合高效磨削。

7. 发现砂轮振动信号与 Si_3N_4 陶瓷的磨削力信号之间存在着一定程度的相关性。其中, 法向磨削力信号与振动信号的相关性要比切向磨削力与振动信号的相关性更强一些, 砂轮振动很大程度上影响着 Si_3N_4 陶瓷的超精密磨削。

7.2 展望

在本文研究的基础上, 作者认为在以下几个方面需要进行进一步的深入研究:

1. 选择力学、物理性能不同的多种工程陶瓷材料进行对比磨削实验, 研究不同成分的陶瓷材料对磨削力的影响规律。

2. 进一步研究磨削用量、机床刚度、磨削行程及砂轮类型对工程陶瓷磨削力、材

料去除率、磨削比能等的影响规律，特别是研究磨削力的特征频率与磨削条件的关系。

3. 重点研究砂轮振动对陶瓷磨削力信号的影响情况，为工程陶瓷的超精密加工奠定基础。

4. 建立工程陶瓷磨削力时间序列的数学模型，以便能够对磨削力序列做出预测与控制。

5. 建立不同磨削条件下，工程陶瓷材料磨削力、材料去除率等的优化数学模型，以实现其最优化。

参 考 文 献

- [1] 纳米尔. 工程陶瓷超精密加工技术及其表面质量的研究. 天津大学博士论文, 1999. 3
- [2] 陈永胜, 胡永强, 余雷等. 工程陶瓷材料的现状及发展趋势. 金刚石与磨料磨具工程. 1998. 2(104): 37-39
- [3] Inasaki I. Grinding of Hard Brittle Materials. Annals of CIRP. 1987, 36(21): 463-471
- [4] 王瑞刚, 潘伟, 蒋蒙宁等. 可加工陶瓷及工程陶瓷加工技术现状及发展. 硅酸盐通报. 2000(3): 27-35
- [5] K. Kitajima, G. Q. Cai, N. Kumagai, Y. Tanaka, H. W. Zheng, Study on Mechanism of Ceramics Grinding, Annals of the CIRP, Vol.41, 1992, 1: 367-371
- [6] S. Malkin, T. W. Hwang, Grinding Mechanisms for Ceramics, Annals of the CIRP, Vol. 4, 1996, 5: 569-580
- [7] Changsheng Guo, Ronald Chand, Adaptive Ceramics Machining, the Ultra hard Materials Technical Conference, Windsor, Ontario, Canada, 1998, 5: 28-30
- [8] 柯宏发, 张耀辉等. 陶瓷半延展性磨削试验研究. 金刚石与磨料磨具工程. 1998, 1 (103): 25-28
- [9] T. W. Liao, K. Li, S. B. McSpadden, Jr., L. J. O' Rourke, Wear of Diamond Wheels in Creep-Feed Grinding of Ceramic Materials I Mechanisms, Wear, 211, 1997: 94-103
- [10] I. Inasaki(2), Yocohama, Grinding of Hard and Brittle Materials, Annals off the CIRP, Vol.3, 1987, 6: pp463-471
- [11] S. Malkin, J. Ritter, Grinding Mechanism and Strength Degradation for Ceramics, Journal of Engineering for Industry, 111, 1989, 5: 165-174
- [12] 胡广书编著, 数字信号处理—理论、算法与实现, 清华大学出版社, 1997. 8
- [13] 伍尤桂, 王炜焯等编著, 应用时间序列分析, 广西师范大学出版社, 1998. 8
- [14] 徐晓刚, 高兆法, 王秀娟编著, Visual C++入门与提高, 清华大学出版社, 1999. 5
- [15] David J. Kruglinski, Scot Wingo, George Shephed, Programming Visual C++技术内幕 (第五版), 1999. 5
- [16] 滕素珍, 姜炳蔚等编著, 数理统计, 大连理工大学出版社, 1996. 7
- [17] 李玉和, 采用聚晶金刚石刀具切削加工硬脆材料的切削力研究, 大连理工大学硕士论文 1998. 3
- [18] 戴诗亮编著, 随机振动实验技术, 清华大学出版社, 1984. 4
- [19] 邓勃编著, 分析测试数据的统计处理方法, 清华大学出版社, 1995. 5
- [20] K. W. Lee, P. K. Wong, J. H. Zhang, Study on the Grinding of Advanced Ceramics With Slotted Diamond Wheels, Journal of Materials Processing Technology, 2000: 230-235
- [21] K. Li, T. W. Liao, L. J. O' Rourke, S. B. McSpadden, Jr, Wear of Wheels in Creep-Feed Grinding of Ceramics Materials II Effects on Process Response and Strength, Wear, 211, 1997: 104-112
- [22] 王长琼, 刘忠, 华勇, 工程结构陶瓷磨削力试验研究, 金刚石与磨料磨具工程, 1997, 5 (101): 18-20
- [23] 王西彬, 任敬心, 乐兑谦, 结构陶瓷磨削力的实验研究, 中国机械工程, 1996, 7 (2): 78-80
- [24] J. E. Mayer, G. P. Fang, Diamond Grinding of Silicon Nitride Ceramics, Proceedings

- of the International Conference on Machining of Advanced Materials, Gaithersburg, Maryland, 20-22 July 1993: 205-222
- [25] T. J. Strakna, S. Jahanmir, R. L. Allor, K. V. Kumar, Effect of Grinding on Strength of Silicon Nitride, Tech. Papers NAMRI/SME XX III (1995): 85-90
- [26] Bi Zhang, FuLun Yang, JieXin Wang, ZhenQi Zhu, Richard Monahan, Stock Removal Rate and Work piece Strength in Multi-pass Grinding of Ceramics, Journal of Materials Processing Technology 104(2000): 178-184
- [27] S. Malkin, Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasive, Wiley, New York, 1989
- [28] H. K. Xu, L. Wei, S. Jahanmir, Grinding Force and Micro crack Density in Abrasive Machining of Silicon Nitride. Mater. Res. 10(12)(1995): 3204-3209
- [29] Chisato Tsutsumi, Keisaku Okano, Tetsuya Suto, High Quality Machining of Ceramics Journal of Materials Processing Technology, 37, 1993: 639-654

致 谢

本论文的全部工作是在导师张弘弢教授、马勇副教授的亲切关怀和精心指导下完成的，导师严谨的治学态度、渊博的学识和求实创新的工作作风使作者受益非浅。这几年来，恩师在学习和生活上给予了悉心的关怀和照顾，并时刻激励学生前进。值此论文完成之际，谨向恩师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

在本文的研究过程中，作者得到了董海老师、李曼老师的热心指导，在此特向两位老师表示衷心的感谢！

在本文的整个实验过程中，作者得到了实验室王中建、董志深两位师傅的热心帮助和支持，在此表示感谢！

在学习期间，王适博士、刘峰斌硕士、宫文飞硕士、孙元老师给予了我很多的关心、支持和帮助，在此向他们表示诚挚的谢意！

最后衷心感谢我的家人，是他们的无私奉献和巨大支持才使我能够顺利的完成学业！

作者：贺 永
2002年6月于大连理工大学

附录：作者在硕士学习期间发表的学术论文

- [1] 贺永, 董海, 马勇, 张弘弢, “工程陶瓷磨削力的研究进展”, 中国切削与先进制造技术研讨会第七届年会暨国际先进制造技术研讨会论文集 (ISAMT), 2001 年 10 月。
- [2] 贺永, 董海, 马勇, 张弘弢, “工程陶瓷磨削力的研究现状与进展”, 金刚石与磨料磨具工程, 2002 年第 1 期。
- [3] 贺永, 董海, 马勇, 张弘弢, “工程陶瓷磨削力信号的处理方法及程序设计”, 工具技术, 2002 年第 1 期。
- [4] 贺永, 马勇, 董海, 张弘弢, “基于 DSP 的 Si_3N_4 陶瓷磨削力信号的检验”, 工具技术, 2002 年第 4 期。