

# 高效磨削技术与装备 进展及展望

Development and Prospect of High-Efficiency Grinding  
Technology and Equipment

湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心 袁巨龙 邓朝晖 熊万里 吕冰海



袁巨龙

湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心主任、浙江工业大学特种装备制造及先进加工技术教育部重点实验室副主任、博士研究生导师。兼任国际磨粒技术委员会委员、全国生产工程学会理事、全国磨粒技术委员会副主任等学术职务。担任国内外等多个学术期刊的编委。主要从事超精密加工技术与装备的研发和教学工作。担任国家科技支撑计划重大项目首席专家,主持并完成国家自然科学基金重点项目1项、面上项目4项、省部级项目20余项。取得多项原创性科研成果,获多项国家发明专利,获国家科技进步二等奖1项、省部级科技进步一等奖2项。发表学术论文200余篇,有100余篇被SCI、EI收录。出版专著1部,主编教材2部。

高效磨削加工的主要目的就是提高生产效率和加工质量,降低成本,其应用将产生巨大的经济效益和社会效益。随着我国航空航天工业、汽车工业、冶金、机械及国防工业等行业的进一步发展,高效磨削技术及装备的市场愈来愈大,其经济效益和社会效应也十分巨大。

## 高效磨削加工技术的 定义、范围和重要性

磨削加工是机械制造业中主要的加工方法,目前磨削加工机床的总量约占机械切削加工机床总量的30%。高效磨削加工的主要目的就是提高生产效率和加工质量,降低成本,其应用将产生巨大的经济效益和社会效益。随着我国航空航天工业、汽车工业、冶金、机械及国防工业等行业的进一步发展,高效磨削技术及装备的市场愈来愈大,其经济效益和社会效应也十分巨大。本文提到的高效磨削加工主要包括高速与超高速磨削、高效深切磨削、快速点磨削、缓进给深切磨削及高效研磨抛光技术等。

高速磨削技术以高效率、高质量

为目标,实现材料高效去除加工的先进加工技术,目前凡砂轮线速度 $V_s > 45\text{m/s}$ 的磨削都可称为高速磨削,通常把砂轮线速度 $V_s > 150\text{m/s}$ 的磨削称为超高速磨削,包括高效深磨、快速点磨削等技术。高效深磨是集砂轮高速度、高进给速度( $0 \sim 510\text{m/min}$ )和大切深( $0.1 \sim 30\text{mm}$ )为一体的高效率磨削技术,已被用来粗精加工一次磨削,以材料的高去除率和低成本加工高质量的氮化硅陶瓷等零件。快速点磨削技术集成了高速磨削、CBN超硬磨料及CNC柔性加工三大先进制造技术,具有优良的加工性能。

研磨、抛光一直都是精密、超精密加工最主要的加工手段,近年来,随着技术的发展,出现了一些先进的高效研抛技术,极大地提高了研磨/

抛光的加工效率,主要有砂带研抛、平面珩磨技术、磁场辅助抛光加工、化学机械磨削技术、固着/半固着磨粒加工技术和硬质材料球体的高效研磨技术等。

高效磨削加工的研发主要包括高速磨削机理、磨床设计、磨具研制、机床主轴及进给系统、磨削工艺智能数据库等方面。本文给出了近年来国内外特别是湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心在高效磨削机理、磨具、机床功能部件及整机设计等方面的新进展和所取得的科技成果,提出了高效磨削加工技术领域的未来的发展重点。

## 本领域近年来的进展 及主要成果

高效磨削技术的发展主要表现为以下方面:开发应用各类高效磨削工艺技术,如高效深切磨削工艺、快点磨削工艺、半固着磨粒加工工艺、固着/半固着磨具高效研磨工艺;高效磨削机理的理论研究、仿真研究和虚拟研究等工作将进一步深入开展;高速电主轴技术和新型高效磨具的研发将随高效磨削技术发展的需要而得到新的发展;开发与应用高效磨削机床及与高效磨床配套使用的磨削工艺智能应用系统。

### 1 高速高效磨削加工技术领域

在高速高效磨削加工技术领域,处于领先地位的主要是德国、日本及美国等国家<sup>[1]</sup>。德国的Guhring Automation公司开发了FD613超高速高效深磨平面磨床和RB625超高速高效外圆磨床,使用CBN砂轮,分别用于磨削转子槽、主轴、钻头沟槽以及齿轮槽、扳手槽、蜗杆螺旋槽等,其金属磨除率都非常高。德国Junker公司已推出多种采用快速点磨工艺技术的高速磨床,如QUICK POINT1000、QUICK POINT3000、QUICK POINT5000等多种型号,以此来满足不同种类、不同尺寸、各种

形状复杂工件磨削加工的需要<sup>[2]</sup>。美国Edgetek机床公司开发的三轴、四轴和五轴CNC高效深磨机床,采用CBN成型砂轮,可实现对淬火钢的高效深磨,表面质量可与普通磨床媲美。日本的丰田工机、三菱重工、冈本机床制作所等公司均能生产应用CBN砂轮的超高速磨床,其中三菱重工推出的CA32-U50A型CNC超高速磨床,采用陶瓷结合剂CBN砂轮,圆周速度达到了200m/s。

在高速高效磨削技术研究方面,国内主要有湖南大学、东北大学、南京航空航天大学、华侨大学和华中科技大学等研究单位在磨削机理、工艺及装备等方面开展了一些研究。由湖南大学主持完成的“高速精密磨削加工关键技术与系列高档数控磨削装备”获2007年度国家科学技术进步二等奖。

该项目在高速精密磨削理论与方法及高速精密磨削关键工艺技术的研究方面取得了创新成果:提出“四点恒线速法”使非圆轮廓表面磨削力相差十几倍造成的突变情况得到改善;提出切点跟踪磨削新方法,把曲轴连杆颈的磨削转化为典型的外圆磨削来研究,解决了曲拐、偏心圆等类零件工序分散加工造成的加工效率低和重复定位误差大的难题,实现了曲轴的高柔性磨削加工;成功开发了最高线速度可达314m/s的超高速平面磨削试验台,创新了工程陶瓷延性域磨削工艺,实现了对工程陶瓷难加工材料的低损伤高效深磨;开发了液体静动压主轴,使磨削力的波动对砂轮旋转轴心飘移的影响减少,提高了工件轮廓的精度。二次开发了CNC凸轮轴磨削软件和数控系统,研制了CNC8312高效精密数控凸轮轴磨床,CNC8312数控凸轮轴磨床可以存储20多种凸轮轴磨削所需的程序与数据,机床具有良好的柔性,能满足多品种凸轮轴加工的需要。

#### (1) 高速高效磨削机理。

关于高速磨削机理的研究,一般是用最大切屑(磨屑)厚度 $h_{\max}$ 来解释高速磨削中诸多磨削现象<sup>[3-4]</sup>。法国Werner P. G博士提出了高效深磨热机理学说,预言了高效深磨区的存在合理性。德国Bremen大学、Aachen工业大学在高效深磨领域取得先进成果,并在铝合金、钛合金、康镍合金等难磨材料方面进行高效深磨的探索<sup>[4]</sup>。国内的东北大学、湖南大学等对高效深磨技术进行了一系列理论和试验研究。东北大学提出了冲击成屑理论<sup>[5]</sup>,并对高效深磨的传热机制进行了系统的理论研究,建立了倾斜移动热源的传热模型<sup>[6-7]</sup>,对高速钢的高效深磨进行试验研究<sup>[8]</sup>。湖南大学黄含等人在工程陶瓷高效深磨方面进行了大量的工作<sup>[9-13]</sup>,探讨了工程陶瓷高效深磨磨削力和磨削能的特征及形成机理,并从断裂力学和陶瓷的显微结构等方面对磨除机理进行了分析。华侨大学徐西鹏等人也对工程陶瓷高速磨削进行了试验研究。

湖南大学在自主研制开发的314m/s超高速平面磨削试验台上分别应用CBN砂轮和金刚石砂轮对TC4钛合金进行了高效深磨试验,砂轮线速度达到150m/s。该试验发现在高效深磨条件下,钛合金单位面积法向和切向磨削力明显下降,同时也能减小比磨削能,在提高加工效率的同时获得了更好的加工质量。高效深磨钛合金时以塑性去除方式为主,材料主要以滑擦和耕犁的形式被去除,CBN砂轮更适于高效深磨钛合金<sup>[14]</sup>。

#### (2) 高速主轴单元关键技术。

依据动力学分析,机床主轴为了获得极高的快速响应(高的加速度和减速度)和高转速,必须最大限度地减小旋转部件的转动惯量,措施就是采用“电主轴”单元结构。机床电主轴结构设计应保证具有良好的动刚性、抗振性、热特性和动平衡性,在保

证其他动静特性,尤其是其高速下的动平衡性能,平衡等级必须达到G0.4以上。

目前在高效磨削领域广泛使用的主轴包括滚动轴承电主轴、空气轴承电主轴、磁悬浮电主轴和液体动静压电主轴。采用滚动轴承的主轴刚度高、制造工艺性好,但由于存在接触磨损,高转速下精度寿命有限,需定期更换的问题,目前主要应用于精度要求不高的内圆磨削领域。气静压电主轴精度高、转速高,但由于刚度低、磨削深度小,导致磨削效率很低,尚不适用于大余量的高效率磨削。磁悬浮电主轴转速高、无磨损,但难以实现高的阻尼减振性和高的动态刚度,再加上控制系统复杂,目前国内工程领域真正投入应用的还不多。

液体动静压电主轴由于具有精度高、减振性好、磨损小、寿命长以及刚性高等优点,是目前高效磨削领域普遍采用的电主轴方案。理想的液体动静压电主轴应具有以下特点:

- 高回转精度,应用于超精密加工的精度可达50nm;
- 高动态刚度和高阻尼减振性,可充分保证加工效率和工件表面质量;
- 高速度,应用于超高速磨削可支撑砂轮线速度150m/s以上;
- 寿命长,磨损小;
- 结构紧凑,可充分减少所占用的机床空间;
- 转动惯量小,可快速启动、变速

和准停;

- 振动小、噪声低;
- 调速范围宽,功率—扭矩输出特性好。

目前,在液体动静压电主轴领域,美国Moor公司、德国Hyprostatik公司、英国Taylar公司和意大利Gamfior公司处于领先地位。国内动静压电主轴的研究几乎与国际同步。近20年来,以上海磨床厂、北京第二机床厂、北京航空航天大学 and 湖南大学国家高效磨削工程中心等为代表的许多单位,广泛开发并应用了各具特色的动静压电主轴技术。图1为湖南大学开发的目前已在磨床行业广泛应用的电机直联式电主轴。我国在液体动静压电主轴领域与国际先进水平差距很小,并在深浅腔动静压轴承和反馈节流动静压轴承等方面有自己的特色和优势。液体动静压电主轴是我国电主轴领域最有希望发展自主知识产权和形成自主品牌电主轴产品,但国内产品在速度、精度及制造工艺精细程度方面还需进一步提升和完善。

(3)高速进给单元与控制技术。

高速机床对进给系统提出了新要求,为了减少非加工时间,实现高效加工,必须实现进给的高速度。为了保证轮廓磨削形状的高精度和小的加工表面粗糙度值,要求进给系统具有良好的快速响应特性,即最大限

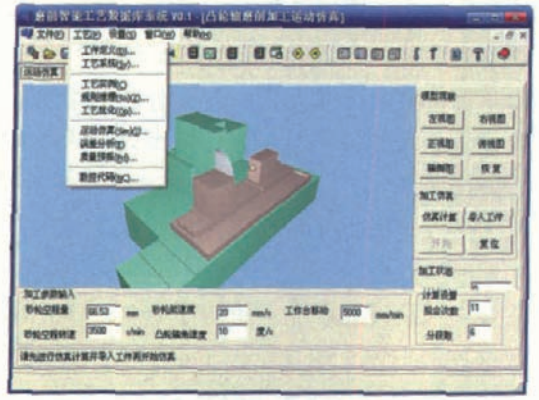


图2 凸轮轴数控磨削工艺智能应用系统软件

度地减少系统跟随误差。为此,高速机床进给系统还必须实现高的加、减速度进给,其值一般要求高达1~10g。而最理想的方案就是采用直线电机直驱的结构形式。

(4)高速高效磨削加工的工具技术及工具系统。

高速磨削用陶瓷或树脂结合剂Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiC或CBN磨料砂轮,线速度可达125m/s, CBN或金刚石砂轮的使用速度可达150m/s,而单层电镀CBN砂轮的线速度可达250m/s左右。高温钎焊砂轮因界面上的化学冶金结合而改善磨料、结合剂(钎焊合金材料)、基体三者间的结合强度,使砂轮寿命大大提高,砂轮工作线速度可达到300~500m/s以上;又由于砂轮锋利、容屑空间大,不易堵塞,因此在与电镀砂轮相同的加工条件下,磨削力、功率消耗、磨削温度会更低,甚至可接近实现冷态磨削<sup>[15]</sup>。

湖南大学<sup>[16]</sup>针对传统结构的砂轮与切削刀具各自存在的不足,提出了新型结构的磨具,采用截面尺寸为亚毫米级的方条形金刚石纤维取代传统切削刀具的刀片与砂轮的磨粒,通过纤维的定向、均匀有序排布以及对纤维的刃磨,使每个微刀具有人为控制的磨削角度与锋利的刀刃,保证较高的生产效率与加工质量。这种新型磨具加工综合了磨削与铣削的优点,具有广阔的市场空间和应用前景。

(5)高速高效磨削加工工艺智

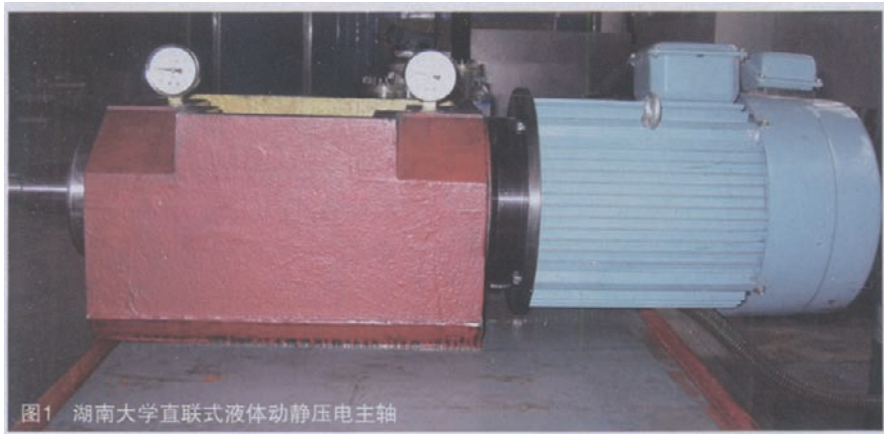


图1 湖南大学直联式液体动静压电主轴

能化数据库及仿真优化技术。

近年来,由国家高效磨削工程中心承担了高速精密磨削技术领域科学数据资源共享网的建设工作。磨削模型的多参数和磨削过程的复杂性决定了计算机仿真技术应用于磨削过程的重要性。近年来,湖南大学国家高效磨削工程中心邓朝晖等人成功地开发了具有完全自主知识产权、应用于实际生产、与磨床配套使用的凸轮轴数控磨削工艺智能应用

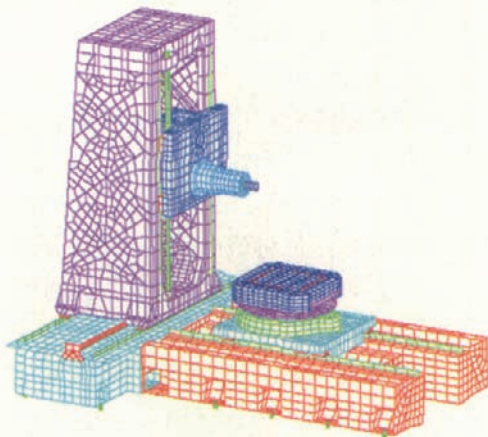


图3 高速机床机械部分有限元建模<sup>[20]</sup>

系统软件(如图2所示),可将凸轮轴加工信息、磨床和砂轮选择经验以及生产实践和试验中积累的磨削工艺参数聚集起来,为制造企业推荐合理成熟的凸轮轴磨削工艺方案(工艺参数),选择优化磨削工艺参数。并已成功试用于湖大海捷技术有限公司研制的CNC8312A型数控高速凸轮轴磨床上<sup>[17-19]</sup>。研究成果对其他典型零件磨削工艺数据库的体系构建、磨削工艺方案的智能选择及智能优化以及磨削过程的预报与仿真等理论研究工作都夯实了基础。

(6) 高速高效磨床设计技术。

磨床设计主要涉及结构设计、整机动静热特性的分析与预测,机电系统的耦合等。高速磨床的一个特点是对整机动静热特性要求更高,另一个特点是大惯量工作台的高速移动造成伺服进给系统的跟踪误差显著增大。在机床整机性能研究

方面,通常采用现有的商用软件对整机的机械部分进行建模(见图4),分析整机刚度以及动特性等问题。湖南大学针对高速高效磨削的各种加工工况和危险形式,提出了高速磨床的安全设计方法,建立了适合于高速磨削工况下各种危险产生的严重度、概率和频次的风险评价模型,确定了最优的安全措施;提出了高速磨床的动态优化设计的方法,为磨床的刚度设计、结构优化设计提供了理论依据,有效地提高了磨床的刚性,解决了高速强力磨削加工中机床的振动问题。

## 2 高效研磨/抛光技术

近几十年来出现的化学机械抛光、弹性发射加工、水合抛光、浮动抛光等先进研磨/抛光技术,已经成为获得光滑、无损伤加工表面的主要加工方法<sup>[21-22]</sup>,但传统的研磨/抛光主要采用游离磨料,材料去除率较低。近年来,随着技术的发展,出现了一些先进的高效研抛技术,如砂带研抛技术、平面珩磨技术、磁场辅助抛光加工、化学机械磨削技术、半固着磨粒加工技术、硬质材料球体的高效研磨技术,极大地提高了研磨/抛光的加工效率。

2.1 半固着磨粒加工技术<sup>[23-26]</sup>

为了防止硬质大颗粒对加工表面造成划痕等表面损伤,必须对加工环境的洁净度及磨料的尺寸一致性加以严格控制,代价十分高昂。为适应当前大批量生产中各种超精密产品的超精密高效加工要求,湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心和浙江工业大学超精密加工研究中心袁巨龙等在国内外首次提出了将固着磨粒加工优点和游离磨粒加工优点进行整合的半固着磨粒加工(Semi-Fixed Abrasive Machining, SFAM)技术。该技术的主要创新和突破如下:

### 2.1 半固着磨粒加工技术<sup>[23-26]</sup>

为了防止硬质大颗粒对加工表面造成划痕等表面损伤,必须对加工环境的洁净度及磨料的尺寸一致性加以严格控制,代价十分高昂。为适应当前大批量生产中各种超精密产品的超精密高效加工要求,湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心和浙江工业大学超精密加工研究中心袁巨龙等在国内外首次提出了将固着磨粒加工优点和游离磨粒加工优点进行整合的半固着磨粒加工(Semi-Fixed Abrasive Machining, SFAM)技术。该技术的主要创新和突破如下:

(1) 开发了具有塑性变形且较

低结合强度性能的结合剂,既保证了磨具上各磨粒加工时所承担的压力均匀,又可使磨具自锐性好。

(2) 即使有硬质大颗粒不慎进入加工区域,由于半固着磨具的塑性特性,硬质大颗粒会陷入到磨具中并与其他磨粒等高(称为半固着磨具的“陷阱”效应),不会损伤被加工表面。

(3) 采用能与被加工材料进行固相反应的软质微细磨粒,在干式或湿式(加净水)条件下均能实现超精密抛光加工。

(4) SFAM磨具不需要烧结,可以方便地制成平面、球面、非球面等形状的磨具,适合多种面形工件的超精密加工。

(5) 在普通净化环境条件下就可实现超精密无损伤加工。

(6) 由于SFAM磨具具有类似砂轮的刚性,形状精度保持性好,所以加工形状精度比游离磨粒高。

(7) 由于SFAM磨具的磨粒分布密度比传统抛光液大得多,所以加工时材料的去除率比传统抛光大,加工效率高。

(8) 抛光前道工序也可采用SFAM技术,由于加工表面质量均匀,无大的表面损伤,所以可以大幅度缩短最终抛光的时间。

### 2.2 硬质材料球体的高效研磨技术及设备<sup>[23, 27-29]</sup>

精密球作为圆度仪、陀螺、轴承和精密测量中的重要元件,需求量巨大,广泛应用于精密机械、航空航天、军事国防、石油化工等领域。国内外目前在高精度球批量制造中普遍存在加工效率低、加工精度低、批一致性不高等难题。湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心和浙江工业大学超精密加工研究中心袁巨龙、吕冰海等从理论上原创性地提出了能实现球体超精密加工的新型偏心式成球方式和双自转式成球方式,从成球原理上保证了精密球体加工的高精度、批直径变动量和批一致性。

研究表明,获得高精度和高一致球体的必要条件是:球面上的任何一点都应具有相同的切削概率。传统V形槽研磨方式下,球坯自转角(球坯自转轴与公转轴的夹角)是一恒定值,需要通过让球体不断进出研磨沟槽的“循环”方式以随机改变球体的自转角方位来形成最终球面。这必然导致各个球之间以及单个球面上各点的切削概率不均等,难以获得高球面精度和批量一致性。因此,实现理想球面加工的核心原理是,在研磨过程中如果能使球坯的自转角按一定的规律进行全方位变化,就可使研磨轨迹均匀地包络整个球面。根据对球体运动状态与成球结构运动参数关系的分析,结合工程应用实际,开发出了能够主动控制球体自转角变化,使研磨轨迹能够均匀包络球面的新型成球方式,包括偏心研磨式和双自转研磨方式。偏心式研磨机构包括上、下两块独立旋转的研磨盘,上下盘偏心。可以通过控制偏心量和上、下盘的转速组合,来实现自转角的全方位变化,进而实现球面研磨轨迹的“全包络”。双自转式研磨机构包括上研磨盘和下内外研磨盘,可以通过控制下内、下外盘的转速组合,实现自转角的全方位变化,进而实现球面研磨轨迹的“全包络”。

同时,为解决传统游离磨料加工硬质材料球体时材料去除率低的问题,开发了球体固着磨料研磨技术,有效提高了材料去除率。

在以上研究基础上开发了相应的精密球体加工设备,研制的偏心式固着磨料高效研磨机Olymball-E600与双自转式超精密球体研磨机Olymball-D600配合使用,批量加工出的钢、氮化硅和硬质合金球体的加工精度和加工效率与传统研磨技术相比大幅提高(氮化硅和硬质合金球体的加工效率提高了10倍以上,球形误差 $0.05\mu\text{m}$ ,球直径变动量 $0.05\mu\text{m}$ ,球批直径变动量 $0.08\mu\text{m}$ ,

表面粗糙度 $R_a=1\text{nm}$ )。新型球体偏心式研磨技术、双自转式研磨技术以及Olymball-E600精密球体高效研磨机、Olymball-D600超精密球体研磨机为国内外首创,项目的研究成果和产品性能达到国际领先水平。具有重要的理论意义、良好的推广应用价值和社会经济效益。

## 高效磨削技术领域 未来发展的展望

国家中长期科技发展规划已将高性能机床及基础装备列为16项重大专项之一。

高效磨削技术及数控磨床的设计制造和高效磨削加工的应用技术关系到国家安全和尖端科技的发展,获得具有自主知识产权的高效磨削加工关键技术和装备是国家的一项战略需求。

在高效磨削加工技术领域,应该在以企业为主体、产学研相结合的技术创新体系下,在以下重大关键技术及装备上优先进行突破。

(1) 高速磨削机理及工艺的研究。开展高速磨削理论研究,探索高速磨削加工过程中多场耦合和强作用的形成机制,研究工件材料(特别是难加工材料)瞬态、局部高应力、高应变、高应变率及高温下的动态行为变化规律;揭示多场强作用高速磨削材料去除过程的科学实质,为发展高速磨削加工技术和装备提供理论基础。完善高速磨削工艺,建立相应的高速磨削数据库。重点研究难加工材料和典型零件的高速/超高速磨削机理及工艺。

(2) 难加工材料的高效深磨技术。主要针对工程陶瓷、硬质合金等超硬材料、钛合金、不锈钢等耐热合金材料以及复合涂层材料等难加工材料的高效深磨加工进行系统的研究,建立其相关的理论,揭示高效深磨技术的本质。

(3) 多轴复合高效磨削加工技术

及其装备。例如,针对高精度轴套类零件的复合磨削加工需求,研究开发可在一次装夹中实现外圆、端面及内孔的高效、高精度连续磨削的复合磨削加工机床,并在生产中实现应用。

(4) 液体动静压电主轴是我国电主轴领域最有希望发展自主知识产权和形成自主品牌的电主轴产品,但国内产品在速度、精度及制造工艺精细程度方面还需进一步提升和完善。

(5) 磨削工艺智能应用系统技术。将磨削工艺智能应用系统与多功能磨床、多轴联动加工技术等结合起来,针对高性能复杂曲面零件的多轴联动磨削加工技术的迫切需求,提供多轴联动磨削加工编程平台及加工编程数据库,开发出相应的应用型软件系统。将该应用系统拓展到高速高效平面、外圆、内圆、无心、轴承、凸轮轴和曲轴磨削、高效研抛加工工艺等磨削领域,实现复杂零件的高效、高精度和智能化加工。

(6) 新型磨具及其加工机理研究。深入研发集铣/切削加工与磨削加工优点于一身的有序化超硬微刃刀具,以用于陶瓷、硅片、光学玻璃等脆硬材料以及难加工高合金材料的高速高效磨削加工与精密加工,开展有序化超硬微刃刀具的高速高效切削与精密切削理论研究,为有序化超硬微刃刀具的推广与应用提供理论基础。深入研究半固着磨粒加工技术。

(7) 系列高档专用数控研抛机床开发(风力发电机轴承、高速铁路列车轴承、高精度机床轴承和超精密切磨抛成套装备)。

(8) 大尺寸零件(平面、球面、非球面)高效超精密磨粒加工技术与装备。

本文有参考文献29篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 淡蓝)