

航空发动机零件高效精密磨削技术的发展与应用

Development and Application of High Efficiency and Precision Grinding Technology for Aeroengine Components

南京航空航天大学机电学院 丁文锋 徐九华 杨长勇 傅玉灿 苏宏华



丁文锋

南京航空航天大学机电学院教授、博士生导师。主要从事难加工材料高效精密磨削技术与应用研究,主持国家自然科学基金、航空科学基金项目,发表学术论文 40 余篇,获全国百篇优秀博士学位论文提名奖。

航空发动机被誉为“工业皇冠上的明珠”,其设计、材料与制造技术对于航空工业的发展起着关键作用。先进的航空发动机是体现一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一,发达国家历来都将它列为国家的战略性产业而加以重点发展^[1]。现阶段,为了满足超高速、高空、长航时、超远航程的新一代飞机的需要,同时也为了提高航空发动机

以缓进深切磨削、高速超高速磨削、高效深切磨削为代表的高效精密磨削技术是航空发动机研制与生产的重要技术,需要相关科研院所、生产厂家等多个单位在基础理论、应用技术、推广示范等方面协同合作,重视体系建设、系统建设和队伍建设。

的可靠性和推力,其零件(如盘、轴、叶片、齿轮、机匣等)不仅广泛选用钛合金、镍基高温合金等高强韧性难加工材料,而且结构越来越复杂,加工余量非常大,加工精度要求越来越高,为此对制造技术提出了更高的要求^[2]。传统的切削加工方法已经难以完全满足现阶段航空发动机零件高效精密加工的技术需求。

航空发动机零件高效精密磨削技术存在的主要问题

以众多磨粒在结合剂把持下实现的无数微切削、进而从宏观上完成工件材料去除的磨削加工长期以来一直属于精密加工的范畴。近年来,随着以缓进深切磨削、高速超高速磨削、高效深切磨削为代表的高效精密

磨削技术的出现,磨削与切削的这种传统的“粗切精磨”的分工模式已经发生了显著改变。磨削加工在获得零件要求的加工精度的同时所能提供的去余量能力在很多情况下可以超过通常的切削加工,甚至可使材料加工性从根本上发生难易逆转。高效精密磨削技术在以钛合金、镍基高温合金等高强韧性难加工材料为主的航空发动机零件制造中显示出广阔的应用前景。

图 1 列出了钛合金、镍基高温合金的磨削加工特点。磨削温度高、磨削力大、砂轮易粘附、磨削表面质量难以控制是现阶段普遍存在的现象,由此导致的磨削效率低、工具寿命短、质量稳定性差已成为航空发动机零件高效精密磨削加工所面临的共

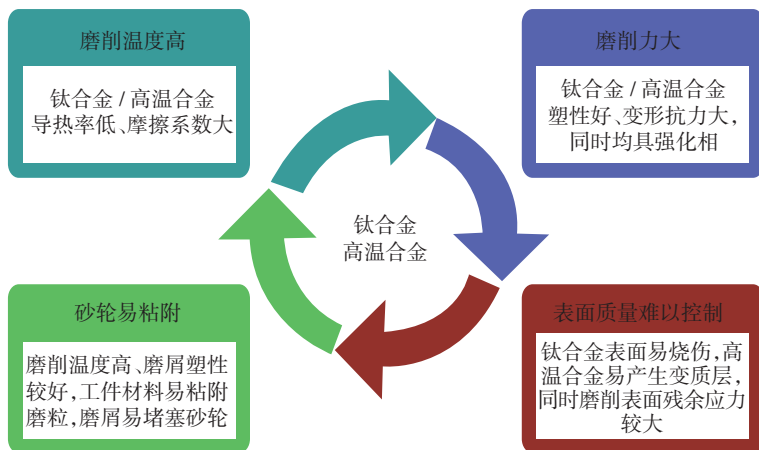


图1 钛合金、高温合金磨削加工特点

同问题。

航空发动机零件高效精密磨削技术的发展现状与应用

为实现航空发动机零件的高效精密磨削,国内外多家单位在磨床、工艺、工具、冷却等方面开展了技术研究与应用推广工作。以下将主要从工艺、工具、冷却3方面对高效精密磨削技术的发展现状进行介绍。

1 高效精密磨削工艺技术研究

所谓高效精密磨削,是指通过增大切除深度或工件进给速度而达到提高材料去除率的磨削技术。它在保证加工质量的前提下,还可以达到和车削、铣削同样的材料切除率甚至更高,通过一次装夹即可完成大余量或复杂型面的加工。表1列出了现阶段典型高效精密磨削工艺的参数范围。

(1) 缓进深切磨削。

缓进深切磨削也称蠕动磨削,是最早开发的一种高效精密磨削工

艺。采用普通的刚玉磨料砂轮,在常规磨削速度条件下,通过每次几至几十毫米的切除深度,20~300mm/min的缓慢进给速度开展磨削^[3-4]。对于钛合金、镍基高温合金材料零件而言,缓进深切磨削的加工精度可达0.001mm,表面粗糙度 R_a 可达0.4~0.2 μm ,材料去除率通常为1~5 $\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 。缓进深切磨削技术已广泛应用于加工各种成型面和沟槽,如航空发动机的叶片榫齿榫槽、齿轮等。但是,如何解决缓进深切磨削过程的突发烧伤以及砂轮剧烈磨损是主要问题。

(2) 高速超高速磨削。

20世纪30年代德国Carl. J. Salmon提出的关于切削速度与切削温度之间关系的假设为磨削加工朝着高速超高速发展指明了方向,而金刚石与CBN超硬磨料砂轮的出现则为高速超高速磨削技术的发展提供了必要条件^[5-6]。高速超高速磨削能实现现代制造技术所追求的两

大目标,即提高生产效率和改善产品质量。实践证明:若将砂轮速度由35m/s提高到80m/s时,生产效率可提高30%~60%,砂轮耐用度提高0.7~1倍,工件表面粗糙度降低50%左右。

欧洲的高速超高速磨削技术起步最早。在20世纪60年代,实验室的磨削速度已经达到200m/s以上,90年代初已实现了最高砂轮线速度350m/s的磨削试验。90年代中叶,德国亚琛工业大学F. Klocke教授进行了砂轮线速度为500m/s的超高速磨削试验。我国的高速超高速磨削研究起步较晚,相关工作主要集中在南京航空航天大学、东北大学、湖南大学、郑州磨料磨具磨削研究所等科研院所。徐九华课题组采用单颗磨粒磨削与超硬砂轮磨削相结合的方法,通过试验研究与物理仿真揭示了高速超高速磨削过程中的材料去除行为、切屑形成机制、力-热耦合作用等,为高速超高速磨削的砂轮设计、强化换热、工艺优化、生产应用等提供理论依据和基础数据^[7]。目前高速超高速磨削在航空发动机零件(如叶片、涡轮盘)生产领域的应用验证工作已取得一定成果。

(3) 高效深切磨削。

高效深切磨削由德国Bremen大学Werner教授于1980年首次提出,作为高速超高速磨削与高效率磨削有机结合的产物引起了航空制造领域的广泛关注。1983年德国Guhring Automation公司研制成功世界上第一台高效深切磨床。高效深切磨削以高砂轮线速度(80~250m/s)、高工件进给速度(0.5~10m/min)和大切深(0.1~30mm)为主要技术特征,它可以获得比普通磨削高100~1000倍的材料去除率^[8]。徐九华课题组采用CBN砂轮进行高效深切成型磨削TC4钛合金与GH4169镍基高温合金型槽,材料去除率达到50~100 $\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 。高效深切磨削是

表1 现阶段典型磨削工艺的参数范围

工艺类型	普通往复磨削	缓进深切磨削	高速超高速磨削	高效深切磨削
切深 a_p/mm	小 0.001~0.05	大 0.1~30	小 0.003~0.05	大 0.1~30
工件速度 $v_w/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	高 1~30	低 0.05~0.5	高 1.0~10	高 0.5~10
砂轮速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	低 20~60	低 20~60	高 80~200	高 80~200
材料去除率 $Z/(\text{mm}^3\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	低 0.05~2	低 1~10	中 <60	高 50~2000

当前先进磨削加工技术研究的热点和前沿,相关的砂轮设计、磨削力-热及其耦合作用、大功率磨床主轴以及材料去除行为等是主要的研究内容。

2 高效精密磨削砂轮技术研究

砂轮是磨削加工中最重要的一类工具。传统的碳化硅和刚玉普通磨料砂轮由于耐磨性差、切削能力弱已不能完全满足当前高速、高效、高精度的磨削要求,金刚石和立方氮化硼(CBN)超硬磨料砂轮的应用已成为当今磨削领域的亮点,被誉为磨料磨具行业取得的一项具有里程碑意义的突破性成果。特别是CBN磨料虽然硬度低于金刚石,但该磨料对铁族元素有较大的化学惰性,特别适合镍基高温合金、钛合金等难加工材料的磨削加工。例如,笔者前期在进行高温合金轴花键磨削工艺研究过程中,采用陶瓷刚玉砂轮进行试验,发现砂轮磨损剧烈而需频繁修整,同时砂轮左右两侧磨损不均匀,易导致花键齿型超差、磨削效率低、加工质量一致性差。通过选用新型单层CBN成型砂轮,不仅节省了砂轮修整时间,而且有效解决了砂轮磨损不均匀的问题,花键齿型磨削效率和精度满足要求,如图2所示。

当前国内外开发的CBN超硬磨料砂轮依据结合剂类型的不同,主要可分为树脂砂轮、金属砂轮、陶瓷砂轮、电镀砂轮与钎焊砂轮,几种CBN砂轮的主要特征见表2。

现阶段,尽管多层CBN砂轮在航空发动机零件的平面磨削与外圆磨削中有应用,但在叶片、齿轮等零



图2 CBN砂轮成型磨削高温合金轴花键

表2 几种CBN砂轮的主要特征

参数	多层			单层	
	树脂结合剂砂轮	陶瓷结合剂砂轮	金属结合剂砂轮	电镀砂轮	钎焊砂轮
结合剂	树脂	陶瓷	金属	金属	金属
制作工艺	热压固化	高温烧结	粉末冶金	常温电镀	高温钎焊
气孔	无	有	无	—	—
结合强度	不高	高	高	不高	高
修整	困难,整形后尚须修锐	相对容易	困难,整形后尚须修锐	无需修整	无需修整
其他	不耐温,易老化	耐温,耐腐蚀	耐温,导热性好	磨料出露高度低,约20%~30%	磨料出露高度高,约70%~80%

件的成型磨削应用中却存在局限,其中最主要的原因就是CBN砂轮工作面的形状修整极其困难。这也是普通陶瓷刚玉砂轮尽管耐磨性不佳、磨削效率低,但在现阶段成型磨削中仍获得应用的重要原因。针对此类问题,目前国内外在工具层面主要从两方面着手解决:

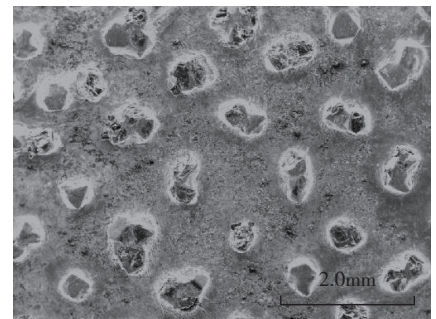
(1) 选用新型微晶刚玉磨料砂轮。微晶刚玉是棕刚玉的派生品种,通过改变刚玉的冷却结晶方式而获得。微晶刚玉磨料的特点是磨粒由微细结晶聚合而成,韧性好、强度大且自锐性好,特别适合成型磨、切入磨、精磨和重负荷磨削。徐九华等开展了微晶刚玉磨料砂轮缓进深切成型磨削镍基高温合金叶片榫头榫槽试验,材料去除率比普通刚玉磨料砂轮提高2~3倍,磨削比提高50%~100%。

(2) 研制单层电镀或钎焊CBN成型砂轮。电镀和钎焊CBN砂轮的精度主要取决于砂轮基体的加工精度,通过将基体制作为与被磨工件型面匹配的成型面,然后再电镀或钎焊一层CBN磨粒,即可直接用于成型磨削,解决了CBN超硬砂轮修整困难的问题^[9]。特别是钎焊CBN砂轮,利用高温钎焊过程在磨料、钎料和工具基体结合界面发生的化学与冶金作用,从根本上提高了砂轮对超硬磨料的把持强度,避免了磨粒的非正常脱落^[10]。除此以外,钎焊砂轮还能

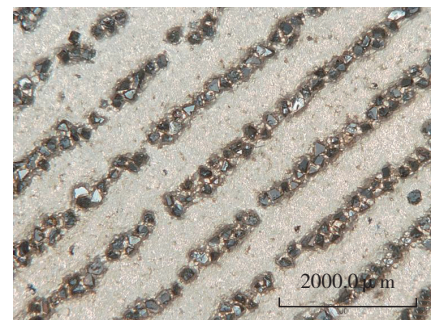
够依据加工对象和加工要求的不同,在工作面择优排布磨粒(图3),同时实现高效与精密加工。南京航空航天大学徐鸿钧、徐九华等在国内最早开始研究单层钎焊金刚石与CBN砂轮的制造机理与工艺技术,开发的单层钎焊CBN砂轮在叶片榫头、涡轮盘等的高效精密磨削加工中取得了显著成果(图4),特别是在高速超高速磨削加工中优势明显^[11]。

3 高效精密磨削强化换热技术研究

影响钛合金、镍基高温合金零件磨削效率提高与精度改善的因素主



(a) 均匀分布



(b) 成列分布

图3 单层钎焊CBN超硬砂轮磨粒有序排布



图4 CBN砂轮超高速高效磨削涡轮盘环

要是磨削热。具体而言,主要是由于磨削生成热过多以及热量不易传导出磨削弧区而造成的材料烧伤、砂轮磨损以及磨削效率低的问题。英国 Bristol 大学的 Andrew 教授在 20 世纪 70 年代通过与 Rolls-Royce 公司合作,基于热工领域传热理论解释了缓进深切磨削过程的烧伤现象,采用连续修整的方式初步解决了磨削突发烧伤的问题^[12]。Rolls-Royce 公司亦于 1980 年完成了实际生产从缓进深切磨削到连续修整缓磨工艺的改造。随后, W.B. Rowe (英国 John Moores University) 等对高效深切磨削过程中的热问题进行了研究, Johnstone 等评价了高效深切磨削工艺在镍基高温合金叶片榫齿成型加工中的综合性能优势。国内,徐鸿钧等探索了以缓进深切磨削为代表的高效精密磨削工艺过程中的材料烧伤机理,并对 Andrew 教授的研究成果进行了修正。通过对磨削弧区强化换热的理论和试验研究,发现只要采取合理的措施即可大幅度提高临界热流密度,从而实现材料去除率的进一步提高。

基于上述研究的相关结论,国内外学者提出了多种方法实现磨削弧区强化换热,其中对航空发动机零件高效精密磨削比较有意义和具有代表性的方法主要包括:径向高压射流冲击强化冷却、最小量润滑(MQL)、液氮低温冷却、低温喷雾射流冲击强化换热、热管砂轮。

(1) 径向高压射流冲击强化冷

却。

徐鸿钧等提出利用径向高压射流冲击强化冷却磨削弧区的构想,并研制了相关工艺装置^[13]。对钛合金材料的缓进深切磨削试验发现,径向高压射流冲击强化冷却方法可在普通供液早已严重烧伤工件的条件下,将工件表面温度稳定控制在极低的水平,从而在不烧伤工件前提下使材料去除率进一步提高。此外,章亮炽教授等开发了可径向供液的新型砂轮结构,陈五一教授等基于涡轮增压原理研制成功内冷却砂轮。这些工作在增强磨削弧区换热能力、控制磨削烧伤等方面取得显著效果。

(2) MQL。

MQL 技术是将压缩气体与极微量润滑油混合汽化后,喷射到磨削加工区,对砂轮和工件之间的加工部位进行有效润滑。MQL 通过在“砂轮-工件”和“砂轮-磨屑”之间形成润滑薄膜,可起到抑制磨削弧区升温、降低砂轮磨损、防止粘附和加工表面质量的作用^[14]。

(3) 液氮低温冷却。

液氮低温冷却磨削就是利用液氮使工件、砂轮或切削区处于低温冷却状态进行磨削加工的方法^[15]。Manimaran 等选用液氮低温冷却磨削不锈钢,发现磨削力比干磨和常规浇注冷却分别降低 32% 和 23%。此外,还可以形成更低的磨削表面温度,减小拉应力。Chattopadhyay 等发现液氮低温冷却磨削可以显著改善磨削表面质量。

(4) 低温喷雾射流冲击强化换热。

傅玉灿等提出了低温喷雾射流冲击强化换热的构想,其核心是凭借低温喷雾射流冲击集低温气、液两相强对流、射流冲击和充分汽化三重强化的换热优势,充分发挥冷却介质的换热潜力以获得最佳的强化换热效果^[16]。将该方法应用于 TC4 钛合金磨削加工中,显示出比低温冷风射流

和浇注冷却更好的磨削效果。

(5) 热管砂轮。

傅玉灿等提出了热管砂轮的概念,即利用旋转热管的工作原理对磨削弧区进行强化换热^[17]。利用热管和 CBN 超硬磨粒的优异导热性能,把磨削弧区产生的热量通过热管迅速传导出去,冷却的重心由工件变为工具,以降低磨削温度,能够避免工具磨损与工件烧伤问题。在砂轮速度 30m/s、工件进给速度 120mm/min 条件下进行了钛合金缓进深切磨削对比试验,结果发现,普通 CBN 砂轮在切深为 1.5mm 时磨削温度达到 1000℃ 以上,而热管 CBN 砂轮在切深为 2.0mm 时磨削温度仍可保持在 100℃ 以下。

结束语

尽管高效精密磨削技术在航空发动机零件加工中已展示出明显优势和广阔的应用前景,但其潜能并未充分发挥。分析原因,主要有如下几个问题亟待突破:(1) 高效精密磨削过程中力-热耦合作用及其影响;(2) 磨床-工件-工具-工艺之间的匹配技术;(3) 高效精密磨削技术应用技术。

以缓进深切磨削、高速超高速磨削、高效深切磨削为代表的高效精密磨削技术是航空发动机研制与生产的重要技术,需要相关科研院所、生产厂家等多个单位在基础理论、应用技术、推广示范等方面协同合作,重视体系建设、系统建设和队伍建设。

目前我国的航空发动机行业正处于发展的一个关键时刻,高效精密磨削技术的发展和应用对提高航空发动机行业研制、生产的整体水平,促进行业的跨越式发展必将起到重

本文共有参考文献 17 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小城)