

文章编号 1004-924X(2010)02-0406-06

纳米硬质合金刀具切削 Al/SiC_p 复合材料的实验

郜吉才¹, 张飞虎²

- (1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;
2. 哈尔滨工业大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对 SiC 颗粒硬度高, 切削 Al/SiC_p 复合材料时刀具磨损剧烈, 本文提出用具有较高硬度、韧性及良好抗磨损能力的 WC-7Co 制备纳米硬质合金刀具, 并对 Al/SiC_p 复合材料进行了切削实验。研究了纳米硬质合金刀具磨损机理和 Al/SiC_p 复合材料的切屑去除机理, 以及刀尖处后面磨损值。研究认为, 纳米硬质合金刀具磨损的机理为 SiC 颗粒的微切削作用引起的磨料磨损, 及 SiC 颗粒对刀尖刃口的高频、断续冲击引起的微崩刃及微破损; Al/SiC_p 复合材料的切削实质是断续切削; 去除机理为切屑的崩碎去除; 纳米硬质合金后面磨损值较普通硬质合金小 30%~50%。实验表明, 纳米硬质合金较普通硬质合金更适于加工 Al/SiC_p 复合材料。

关键词: 纳米硬质合金; Al/SiC_p 复合材料; 磨损机理; 断续切削

中图分类号: TG729; TG506.7 **文献标识码:** A

Experiments of cutting Al/SiC_p composite with nano cemented carbide tool

KUAI Ji-cai, ZHANG Fei-hu

- (1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. College of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The tool can be worn seriously when Al/SiC_p composite is machined due to the SiC particles with a higher hardness. Based on the new nano-cemented carbide characterized by his high hardness, toughness, flexural strength and higher wear resisting property, a WC-7Co nano cemented carbide tool was prepared, and the cutting experiment was carried out. The wear mechanism of nano cemented carbide tool and chip removal mechanism were studied. Results show that the wear mechanism of nano cemented carbide tool is an abrasion wear due to the micro-cutting of SiC particles and the micro-chipping and micro-breakage of cutting edge caused by interrupted impact of the SiC particles under the high frequency. The essence of cutting Al/SiC_p is interrupted cutting, and the Al/SiC_p chip removal is the breakout of chip. Experiment indicates that the flank wear value of nano cemented carbide tool is about 30%-50% less than that of common cemented carbide, which means nano cemented carbide is

收稿日期: 2009-09-05; 修订日期: 2009-11-05.

基金项目: 河南理工大学博士基金资助项目

more suitable for machining Al/SiC_p composite than common cemented carbides.

Key words: nano cemented carbide; Al/SiC_p matrix composite; wear mechanism; interrupted cutting

1 引言

Al/SiC_p 复合材料具有小的线膨胀系数,较好的尺寸稳定性,高比强度和高比刚度,高的耐磨、耐热性等优异的物理和力学性能,在仪器仪表、兵器、航空、航天、汽车、摩托车等工业领域有广阔的应用前景^[1-4]。但是 Al/SiC_p 复合材料切削加工十分困难,高速钢和普通硬质合金刀具加工 Al/SiC_p 复合材料时刀具磨损很快,往往要多次刃磨刀具才能完成一次切削过程,使加工精度难以达到要求。应用金刚石涂层镀膜复合刀具能解决上述问题,但价格较高^[5]。因此,有必要开发新型的刀具材料。

纳米硬质合金是新型材料,晶粒尺寸在 200 nm 左右,克服了普通硬质合金脆性高,易崩刃,不耐冲击的缺点,具有较高的断裂韧性和非常高的抗弯强度,同时也具有较高的硬度和良好的耐磨性,高的导热性和低的摩擦系数,适于制作各种刀具,具有广阔的应用前景^[6-9]。但应用纳米硬质合金刀具加工 Al/SiC_p 复合材料,尚未见报道。因此,探索应用纳米硬质合金刀具加工 Al/SiC_p 的可行性具有非常重要的现实意义。

耐磨性、经济性、加工效率和加工表面质量是衡量刀具切削性能的重要指标。由于研究工作的渐进性,一篇文章难以涵盖全部性能指标,本文侧重于对相同成分的纳米硬质合金与普通硬质合金刀具耐磨指标的比较以及对刀具磨损机理、切削机理的基础研究工作。制备了纳米硬质合金 WC-7Co 刀具,研究了纳米硬质合金刀具加工 Al/SiC_p 复合材料的切削性能、切削机理及刀具磨损机理,并和普通硬质合金刀具做了比较。

2 纳米硬质合金刀具制造

2.1 纳米硬质合金刀具力学性能

实验中用 SPS(放电等离子烧结法)成功制备了纳米硬质合金 WC-7Co,抛光表面后毛坯如图 1 所示^[6-7]。图 2、图 3 为所制备的纳米硬质合金的扫描电镜 SEM 分析图及透射电镜 TEM 分析图,

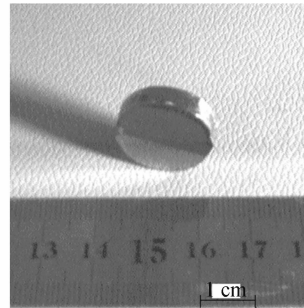


图 1 WC-7Co 烧结毛坯^[7-8]

Fig. 1 WC-7Co sintering alloy

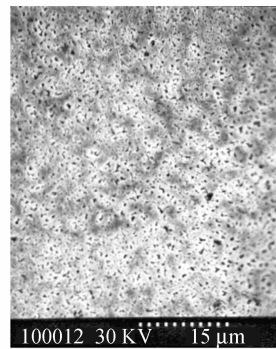


图 2 WC-7Co SEM 图

Fig. 2 SEM photo of WC-7Co

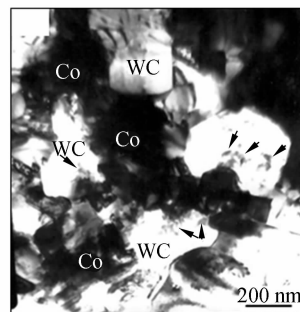


图 3 WC-7Co TEM 图

Fig. 3 TEM photo of WC-7Co

采用截距法对图中 WC 晶粒尺寸进行了测试,结果表明,纳米硬质合金 WC-7Co 的平均晶粒度在 200 nm 左右。纳米硬质合金 WC-7Co 的力学性能测试结果如表 1 所示。

用纳米硬质合金 WC-7Co 制作纳米硬质合金刀具时,首先将圆形纳米硬质合金 WC-7Co 的烧结毛坯用线切割机切成刀块,然后对刃口及前

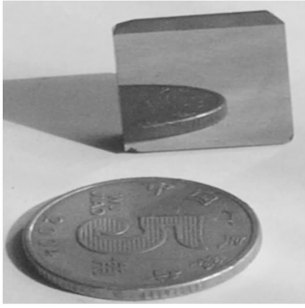


图 4 WC-7Co 刀具
Fig. 4 WC-7Co cutter

后刀面分别采用 W40、W10、W3.5、W1 金刚石砂轮在 ELID(Electrolytic In-process Dressing, 在线电解修整)超精密平面磨床上进行粗磨、精磨、超精磨及无进给磨削,最后成功制得纳米硬质合金 WC-7Co 刀块,刀具成品如图 4 所示。因照片是做完切削实验后拍摄的,所以刀尖处有崩刃。

表 1 纳米硬质合金与普通硬质合金性能对比^[7]

Tab. 1 Performance comparison of nano and common cemented carbides

硬质合金性能	YG8(普通)	WC-7Co(纳米)
硬度(HRA)	91	94.5
断裂韧性(MPam ^{1/2})	10	12.2
抗弯强度(MPa)	1 500	3 000
晶粒尺寸(μm)	1~5	0.1~0.2

2.2 刃口及前后刀面质量

用 ELID 磨削方法刃磨刀具刃口,将磨好刃口的刀具用 AFM 测试刃口质量,结果如图 5 所示^[9]。刀具前刀面测试结果如图 6 所示^[9]。

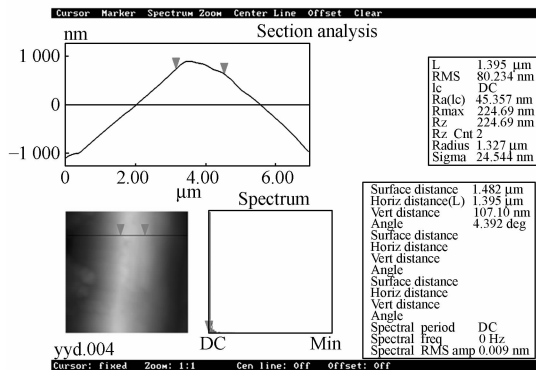


图 5 WC-7Co 刃口 AFM 照片^[9]

Fig. 5 AFM photo of cutting edge of WC-7Co

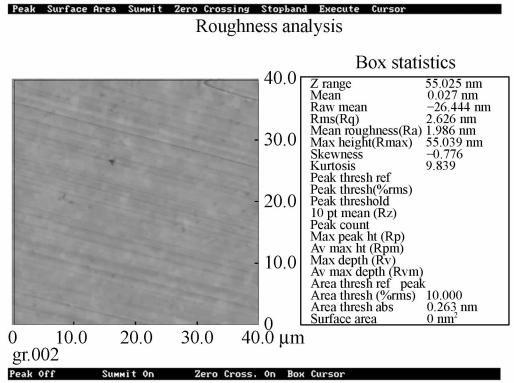


图 6 WC-7Co 前刀面 AFM 照片^[9]

Fig. 6 AFM photo of rake face of WC-7Co

3 Al/SiC_p 复合材料切削实验设计

(1)实验仪器设备:CA6140 车床;光学显微镜。

(2)刀具及工件材料:普通硬质合金 YG8, 纳米硬质合金 WC-7Co;刀具角度如表 2 所示;工件材料:Al/SiC_p 复合材料, SiC 的体积分数为 30%, 颗粒大小为 15 μm, 工件外径为 115 mm, 宽度为 40 mm;测量部位为刀尖处后刀面磨损值。

(3)实验方法:采用三因素三水平的正交实验法,如表 3 所示。实验中固定切削长度,变换切削参数,干切,根据有关资料切削速度在低速范围选取^[10]。

表 2 刀具切削角度

Tab. 2 Geometry of tool

前角	后角	刃倾角	主偏角	副偏角	刀尖圆弧	刃口半径
$\gamma_0/(^\circ)$	$\alpha_0/(^\circ)$	$\lambda_s/(^\circ)$	$K_r/(^\circ)$	$K_r'/(^\circ)$	r/mm	$r_c/\mu\text{m}$
-6.5	6.5	-6	45	45	0.8	1.3/0.7

表 3 正交试验表

Tab. 3 Orthogonal experiment parameters

水平	A 转速(r/min)	B 切深/mm	C 进给速度/(m/r)
1	48	0.1	0.1
2	75	0.2	0.2
3	96	0.3	0.3

4 实验结果与讨论

4.1 刀具磨损机理分析

图 7~图 9 为切削 Al/SiC_p 材料后的纳米硬

质合金 WC-7Co 的前刀面、后刀面及刃口图片。由于 Al/SiC_p 材料中 SiC 颗粒硬度(显微硬度值 HV=27 GPa)高于硬质合金刀具(YG 类刀具材料显微硬度值 HV=16~18 GPa, 纳米硬质合金刀具 WC-7Co 显微硬度 HV=22 GPa), 因此, 用硬质合金刀具切削 Al/SiC_p 复合材料时会很快磨损或破损。对加工后刀具前后刀面及刃口进行观察, 发现前刀面有肉眼可见的白色亮带, 显微镜下可见为平行于切屑流动方向的沟槽, 这是由于切屑中含有大量的 SiC 颗粒, 在切屑沿前刀面流动时, 切屑底层的 SiC 颗粒对前刀面产生了微切削作用, 形成了沟槽, 如图 7 所示。这和王大镇的研究结果不谋而合^[11]。

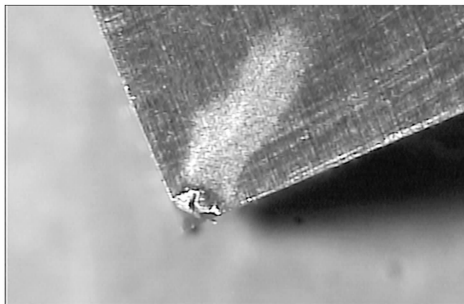


图7 前刀面磨损照片

Fig. 7 Wear photo of rake face

已加工表面的弹性恢复顶起带有微刃的 SiC 颗粒与副后刀面发生剧烈摩擦, 造成刀具副后刀面的磨粒磨损, 而 SiC 颗粒的高频冲击使 WC 晶粒疲劳脱落和微观破损, 这是刀具后刀面的主要失效形式, 如图 8 所示。观察刀尖处磨损状况, 显微镜下可见有微崩刃, 刀尖微破损的情况, 如图 9 所示。这是由于 Al 基体中含有密度极高的既硬又脆的 SiC 颗粒, SiC 颗粒在基体中分布不连续, 在切削过程中对刀尖造成高频剧烈冲击所致。因

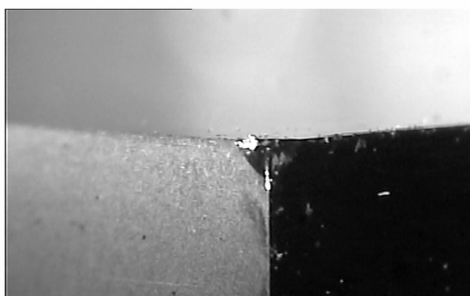


图8 后刀面磨损照片

Fig. 8 Wear photo of flank

此, Al/SiC_p 复合材料的切削实质是断续切削。有研究者研究金刚石刀具切削 Al/SiC_p 时的刀具磨损机理得到了相似的结论^[12]。

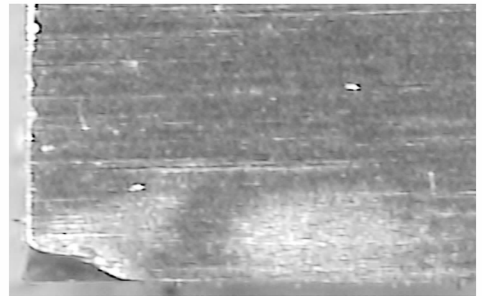


图9 刀尖微崩刃的照片

Fig. 9 Photo of micro-breakout of tool nose

4.2 复合材料去除机理研究

与普通铝材切削时形成连续带状切屑不同, Al/SiC_p 复合材料的切屑以崩碎切屑的形式脱落。基体材料中 SiC 颗粒的弥散分布使复合材料强度提高, 同时也造成 SiC 颗粒周围和远离颗粒处的应力分布不均。由于在 SiC 颗粒密集区形成的应力集中, 以及基体本身的缺陷引起微裂纹, 在切削拉应力作用下, 当应力超过材料的断裂强度, 使裂纹扩展至表面, 形成块状切屑脱落。

4.3 切削参数对刀具磨损的影响

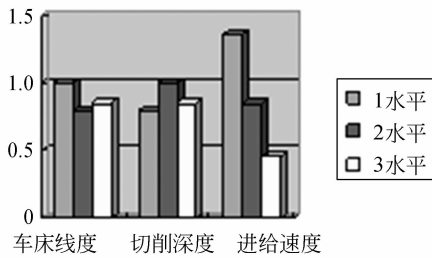
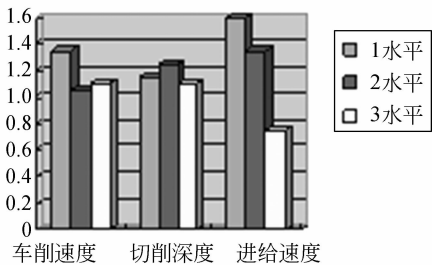
利用正交实验法, 采用表 3 中的工艺参数, 实验结果如表 4 及图 10、图 11 所示。

表4 Al/SiC_p 复合材料切削试验Tab. 4 Cutting experiment of the Al/SiC_p

实验号	A 转速 (r/min)	B 切深 (mm)	C 进给速度 (mm/r)	后刀面磨损值 y _i (mm)	
	1	2	3	WC-7Co	YG8
1	48	0.1	0.1	0.45	0.6
2	48	0.2	0.2	0.35	0.45
3	48	0.3	0.3	0.2	0.3
4	75	0.1	0.2	0.25	0.35
5	75	0.2	0.3	0.15	0.25
6	75	0.3	0.1	0.4	0.45
7	96	0.1	0.3	0.1	0.2
8	96	0.2	0.1	0.5	0.55
9	96	0.3	0.2	0.25	0.35
r _i	0.2/0.3	0.2/0.15	0.9/0.85		

注: K_i 为各水平的观察值之和, r_i 为极差。

由图 10、图 11 中可以看出, 在实验参数范围内,

图 10 纳米硬质合金 WC-7Co 各水平 K_i 值Fig. 10 K_i of nano cemented carbide WC-7Co图 11 普通硬质合金 YG8 各因素 K_i 值Fig. 11 K_i of common cemented carbide YG8

较高车削速度,高进给速度,小切深,的情况下刀具磨损值最小,相关的研究也有类似的报道^[5,13]。分析原因可以认为,在较高切削速度、高进给速度、小切深情况下,刀具切削时间较短,切削深度浅,导致刀具磨损值较小。直接观察表 4 可以看到,第 7 个实验刀具磨损最小,即第 7 个实验的工艺参数(A3B1C3)可能为最佳的加工方案。通过

参考文献:

- [1] 崔岩. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用 [J]. 材料工程, 2002(6): 3-6.
CUI Y. Aerospace applications of silicon carbide particulate reinforced aluminium matrix composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002(6): 3-6. (in Chinese)
- [2] 任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2537-2543.
REN J Y, CHEN CH ZH, HE B, *et al.*. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2537-2543. (in Chinese)
- [3] 孙德伟, 张广玉, 张其馨, 等. 石墨纤维增强铝基复

对表 4 的分析,进给速度的极差 $r_i=0.9$ 最大,表明进给速度对刀具磨损值的影响最大,其次为切削速度和切削深度。比较各因素的极差可得到影响因素显著性顺序为 $f > v_s > a_p$,应用纳米硬质合金刀具切削颗粒增强铝基复合材料的最佳方案为 A2B1C3 或 A2B3C3。

普通硬质合金刀具的磨损规律和纳米硬质合金相似,在同一切削条件下比较这两种刀具的磨损值,可见纳米硬质合金的后刀面磨损值约比普通硬质合金小 30%~50%。纳米硬质合金硬度高,韧性好,摩擦系数低,导热性能好,使其在切削时产生的切削力小,切削热少且能够很快散发出去,切削温度低,导致刀具磨损较小。

5 结 论

本文研究了纳米硬质合金刀具切削铝基复合材料的切削机理、刀具磨损机理及纳米硬质合金刀具的切削性能,得到如下结论:(1)纳米硬质合金刀具切削 Al/SiC_p 复合材料的磨损机理为 SiC 颗粒的微切削作用及高频断续冲击作用引起的磨料磨损和微崩刃、微破损,其切削实质为断续切削;(2)SiC/Al 复合材料的去除机理为块状切屑崩碎脱落;(3)纳米硬质合金的刀具磨损值约比普通硬质合金低 30%~50%;(4)在切削用量中,进给量对刀具磨损值的影响最大,其次是切削速度和切削深度;(5)纳米硬质合金刀具较普通硬质合金刀具更适于加工 Al/SiC_p 复合材料。

合材料在空间传感器镜筒结构中的应用 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 368-375.

SUN D W, ZHANG G Y, ZHANG Q X, *et al.*. Application of graphite fiber reinforced aluminum matrix composite to body tube structure in space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 368-375. (in Chinese)

- [4] 崔岩, 李丽富, 李景林, 等. 制备空间光机结构件的高体份 SiC/Al 复合材料 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1175-1180.
CUI Y, LI L F, LI J L, *et al.*. High volume fraction SiC/Al composites for space-based optomechanical structures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1175-1180. (in Chinese)
- [5] 张登友, 全燕鸣, 代民江, 等. CVD 金刚石薄膜刀具

- 加工 SiC_p/Al 复合材料时的切削磨损研究 [J]. 工具技术, 2001, 35(10): 10-12.
- ZHANG D Y, QUAN Y M, DAI M J, *et al.*. Study on tool wear when SiC_p/Al composites are machined with CVD thin film diamond coated tools [J]. *Tool Engineering*, 2001, 35(10): 10-12. (in Chinese)
- [6] 卫亭, 罗振璧, 胡宗森, 等. nm 硬质合金刀具切削性能的研究 [J]. 机械工程学报, 1999, 30(1): 57-60.
- WEI X, LUO ZH B, HU Z S, *et al.*. Study on cutting performance of nano cemented carbide cutting tools [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1999, 30(1): 57-60. (in Chinese)
- [7] ZANG F H, GUI J C, LIU Y Z, *et al.*. Experimental research on ELID grinding and cutting performance of nano cemented carbide cutters [J]. *Key Eng Mater*, 2005, 291-292: 115-120.
- [8] 邹吉才, 张飞虎, 张法明. 纳米硬质合金的摩擦磨损性能 [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(2): 67-70.
- KUAI J C, ZHANG F H, ZHANG F M. Frictional wear of nano cemented carbide [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(2): 67-70. (in Chinese)
- [9] ZHANG F H, GUI J C, LIU Y Z, *et al.*. Research on ELID grinding of nano-cemented carbide tool [J]. *Key Eng Mater*, 2007, 329: 105-110.
- [10] 章文峰, 潘晓南. PCD 刀具加工 SiC 颗粒增强铝基复合材料的合理切削速度 [J]. 材料工程, 1999 (1): 14-16.
- ZHANG W F, PAN X N. The optimum velocity of cutting SiC_p reinforced aluminium matrix composite with PCD tool [J]. *Journal of Materials Engineering*, 1999(1): 14-16. (in Chinese)
- [11] 王大镇, 刘华明, 韩荣第, 等. SiC_p 增强铝基复合材料切削加工中刀-屑摩擦模型及其磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2000, 20(2): 85-89.
- WANG D ZH, LIU H M, HAN R D, *et al.*. A Study on a friction formula between tool and chip and wear characteristics when cutting SiC reinforced aluminum composite [J]. *Tribology*, 2000, 20(2): 85-89. (in Chinese)
- [12] 葛英飞, 徐九华, 杨辉, 等. SiC_p/2024Al 复合材料超精密车削刀具磨损机理研究 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1293-1296.
- GE Y F, XU J H, YANG H, *et al.*. Single crystal diamond tool wear mechanism during ultra-precision turning of SiC_p/2024Al metal matrix composites [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(11): 1293-1296. (in Chinese)
- [13] 周育弘, 全燕鸣, 徐昊. 铝基复合材料的绿色切削加工表面试验 [J]. 现代制造工程, 2008(12): 119-121.
- ZHOU Y H, QUAN Y M, XU H. Experiment investigation on machined surface in green machining of aluminum matrix composites [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2008 (12): 119-121. (in Chinese)

作者简介:



邹吉才(1972—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,1995年于东北林业大学获学士学位,2003年、2009年于哈尔滨工业大学分别获硕士、博士学位,主要从事纳米材料超精密加工技术及超精密加工机理的研究,包括 ELID 磨削技术与装备研究,纳米材料去除机理研究,纳米刀具切削机理及其实用化研究等。
E-mail: hitgc@163.com



张飞虎(1964—),男,河北邢台人,博士,教授,博士生导师,1984年、1987年于西北工业大学分别获学士、硕士学位,1993年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事精密超精密加工与纳米技术的研究,包括超精密加工新工艺及设备(ELID 磨削、磁流变抛光等)、纳米级超光滑表面加工技术及表面质量、新型功能材料的精密和超精密加工、光学非球面加工、硬脆材料精密和高效磨削技术的研究。E-mail: zhangfh@hit.edu.cn