

文章编号 1004-924X(2016)增-0421-07

基于砂轮磨损的 SiC 陶瓷 ELID 磨削实验研究

刘立飞^{1*}, 张飞虎², 饶小双²

(1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了改善 SiC 陶瓷磨削过程中砂轮磨损状态, 提高大口径 SiC 陶瓷光学元件的加工质量和加工效率, 本文使用 ELID 磨削技术进行了 SiC 陶瓷磨削加工实验。通过和普通磨削过程进行对比分析, 研究了 ELID 磨削技术在 SiC 陶瓷磨削过程中砂轮磨削表面情况、工件磨削表面粗糙度、磨削力及磨削比方面的优势。实验结果显示: 使用 ELID 磨削技术可以使砂轮表面磨粒在 SiC 陶瓷长时间大去除量磨削过程中保持足够的锋锐度, 磨削过程中磨削力、磨削比均比普通磨削方式下有较大程度的降低, 但 SiC 陶瓷工件磨削表面粗糙度略有增加。表明 ELID 磨削可以有效缓解砂轮磨损严重导致的磨削力增加、磨削质量下降及使用寿命低的问题, 反映了 ELID 磨削技术在 SiC 陶瓷长时间大去除量磨削过程中的优势, 为大口径 SiC 陶瓷光学元件的高效高质量加工提供技术支持。

关键词: SiC 陶瓷; 砂轮磨损; ELID 磨削; 表面粗糙度; 磨削力; 磨削比

中图分类号: TG74; TH161 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0421

Experimental research of ELID grinding on SiC ceramics based on grinding wheel wear

LIU Li-fei^{1*}, ZHANG Fei-hu², RAO Xiao-shuang²

(1. School of Mechanical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: liulf_87@163.com

Abstract: Purpose: to improve the grinding wheel wear condition of SiC ceramic during the grinding process, improve the machining quality and machining efficiency of optical elements of large-caliber SiC ceramic, the ELID grinding technology is adopted in the SiC ceramic grinding experiment. Method: based on a contrastive analysis on the common grinding process, a research is conducted on the wheel grinding surface condition, workpiece grinding surface roughness, grinding force and grinding ratio during the SiC ceramic grinding process by adopting the ELID grinding technology. Results: the ELID grinding technology can keep the grinding particles in adequate sharpness after a long-time and wide-removal SiC ceramic grinding process, and compared with common grinding mode, the grinding force and grinding ratio has also been lowered to a much greater extent; but roughness of the SiC ceramic grinding surface increased slightly. Conclusion: it indicates that the ELID grinding technology

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-17.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB013202)

can effectively alleviate the problems of grinding force increase, grinding quality decrease and short service life caused by severe grinding wheel wear; reflects the advantages of ELID grinding technology in the long-time and wide-removal SiC ceramic grinding process, and such advantages provide technical support for high-efficiency and high-quality machining of large-caliber SiC ceramic optical elements.

Key words: SiC ceramic; grinding wheel wear; ELID grinding; surface roughness; grinding force; grinding ratio

1 引言

在空间光学系统中,反射镜口径越大,光学系统的分辨率和成像质量越高^[1-2]。因此大口径光学反射镜是空间光学系统重要组成部分。但对材料要求也越来越高,为适应外太空环境,要求镜坯材料具有密度小、比刚度高、热膨胀系数小、尺寸稳定性高等特点。碳化硅材料的材料特性符合空间光学反射镜对材料性能的要求,正逐步成为空间光学中最具发展前途的反射镜材料^[3-5]。且我国在 SiC 陶瓷反射镜的加工制造能力也在逐渐上升,已经能够自主生产 4 m 口径的 SiC 镜坯^[6]。另一方面,由于反射镜口径大,材料硬度和耐磨性高,加工质量和加工效率非常低,磨削加工阶段是大口径 SiC 陶瓷反射镜成形的关键阶段,磨削质量和磨削效率对反射镜加工质量和加工效率有重要影响。

因此,研究人员在 SiC 陶瓷磨削过程中引入超声振动、ELID、高速磨削等对其磨削技术进行研究改进,取得了一定的成果^[7-9]。A. B. Khoshaim 等^[10]使用不同的参数组合研究了 SiC 陶瓷 ELID 磨削过程中砂轮粒度对工件表面粗糙度的影响,并建立了相关模型以指导实际工业应用。X Yu 等^[11]通过实验发现 ELID 磨削 SiC 陶瓷可以有效降低磨削力和磨削力比,增大砂轮表面磨粒均匀性和容屑空间,使 SiC 陶瓷塑性域磨削比例增大,表面完整性得到提高。J Guan 等^[12]使用正交实验进行了 SiC 陶瓷 ELID 磨削,获得了 $R_a 0.030 \mu\text{m}$ 的粗糙度值,并给出了精加工阶段的最优参数组合。Y Dai 等^[13-14]研究了反应烧结 SiC 陶瓷 ELID 磨削过程中的磨削力特性,以及反应烧结 SiC 陶瓷非球面的 ELID 磨削加工,加工出直径为 $\Phi 360 \text{ mm}$ 的高质量 SiC 陶瓷反射

镜。在大口径 SiC 陶瓷光学元件加工过程中,砂轮磨损严重,综合上述文献, SiC 陶瓷 ELID 磨削在砂轮磨损方面的研究稍显不足。

本文使用 ELID 磨削技术进行了 SiC 陶瓷长时间大材料去除量磨削加工,通过与普通磨削(CG)方式下的磨削特性进行对比,研究了 ELID 磨削技术对改善砂轮磨损状态,提高磨削质量方面的优势,对改进大口径 SiC 陶瓷磨削技术,提高磨削效率和磨削质量具有指导意义。

2 ELID 磨削去除机理

ELID 磨削原理如图 1 所示,使用高频脉冲电源分别给金属结合剂金刚石砂轮和修整电极连接正、极,磨削时需使用专用 ELID 电解磨削液。磨削时金属结合剂与磨削液在电解作用下发生化学反应,并生成不导电的氧化物覆盖在砂轮表面。在此过程中,砂轮表面磨粒逐渐露出,磨削能力增加。当金属氧化物逐渐增多而覆盖砂轮表层后,电解作用减弱,进入休眠状态。随着砂轮表层磨粒磨损,砂轮表面的金属氧化层在与工件的相互作用中逐渐被去除,使砂轮表面导电性恢复,电解

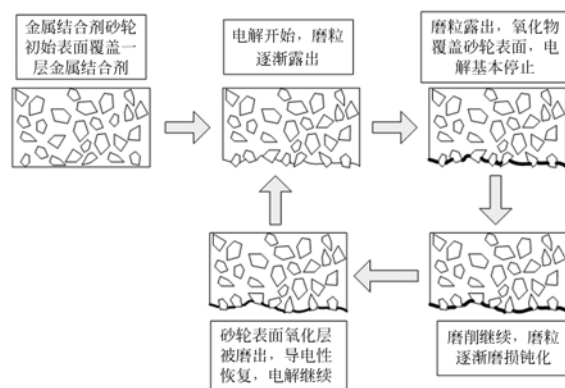


图 1 ELID 磨削加工机理示意图

Fig. 1 Schematic representation of EDG and EDDG

作用亟需,在结合剂氧化和磨削过程中,磨钝的金刚石磨粒逐渐脱落,新的锋锐磨粒逐渐露出,从而使砂轮能够持续保持较好的磨削能力。ELID 磨削过程中,砂轮表面磨粒露出高度不一,且能够有相当数量的磨粒在磨削时处于逐渐露出过程中,因此相当数量的磨粒磨削深度较小,有利于工件材料的塑性域磨削,该方法对于磨削硬脆材料更具有明显的效果。

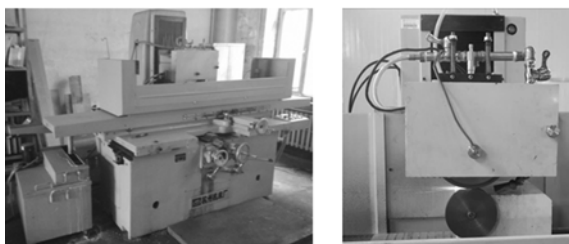
3 实验设置

3.1 实验用砂轮选择

SiC 陶瓷具有非常高的硬度和耐磨性,因此,普通磨料难以对其进行磨削,本实验中选择硬度更高的金刚石磨料;另外,金属结合剂和磨粒的结合强度高,砂轮磨损小,使用寿命长,保持形状好,能够承受较大的负荷,且使用 ELID 磨削加工技术可以有效的解决金属结合剂金刚石砂轮自锐性差,容易堵塞砂轮表面等缺点。因此,使用金属结合剂金刚石砂轮。

3.2 磨削及修整设备

利用杭州机床厂生产的 MM7120A 平面磨床,对其进行改造后可用于 SiC 陶瓷在线电解磨削(ELID)加工实验。如图 2(a)所示。在进行磨削实验前,使用电火花修整对砂轮进行精密整形,以使磨粒露出结合剂,提高砂轮的形状精度,如图 2(b)所示。



(a)ELID磨削机床 (a)ELID machine tool
(b)砂轮修整装置 (b)Dressing device

图 2 实验设备

Fig. 2 Experimental equipment

3.3 实验材料与工艺参数

使用无压烧结 SiC 陶瓷作为加工材料,其尺寸为 $\Phi 150 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$;使用的砂轮磨粒粒度为

120#,设定 ELID 磨削高频脉冲电源的电参数及磨削工艺参数如表 1 所示。

表 1 相关实验参数

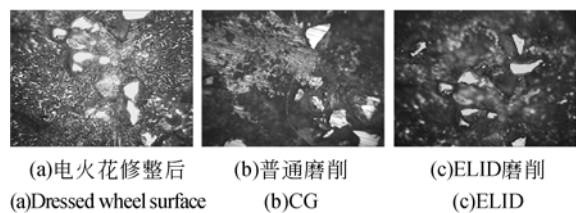
Tab. 1 Related experimental parameters

参数类型	参数名称	参数值
电参数	脉冲电压(V)	120
	脉冲放电时间(μs)	70
	脉冲间隔时间(μs)	30
非电参数	主轴转速(n/min)	3 000
	进给速度(mm/min)	102
	进给深度(μm)	5

4 结果分析与讨论

4.1 表面粗糙度

工件表面粗糙度是衡量加工表面质量的重要指标,同时也可以体现加工状态。针对 SiC 陶瓷长时间大去除量磨削,砂轮表面磨粒磨损严重的情况,首先使用超景深三维显微镜对普通磨削和 ELID 磨削两种磨削方式下砂轮磨损后的表面情况进行观察,如图 3 所示。图 3(a)所示为经过电火花修整后的金属结合剂金刚石砂轮表面,可以观察到未磨损的金刚石磨粒及金属结合剂。图 3(b)所示为普通磨削方式下磨削去除大量 SiC 陶瓷后金刚石砂轮表面情况,可以看到磨粒已经存在非常大的磨损表面,且由于金属结合剂结合强度大,不易脱落,磨粒磨损严重后金属结合剂与工件的相互作用也较为明显,如图中所示的磨削痕迹;图 3(c)所示为 ELID 磨削方式下磨削去除大量 SiC 陶瓷后金刚石砂轮表面磨损情况,磨粒表面存在较小的磨损表面,但仍具有足够的锋锐度和切削能力,且并未看到明显的金属结合剂与工件的相互作用痕迹。通过对比可以明显表现出 ELID 磨削在保持砂轮磨削能力和锋锐度方面的优势。



(a)电火花修整后 (a)Dressed wheel surface
(b)普通磨削 (b)CG
(c)ELID磨削 (c)ELID

图 3 砂轮表面形貌

Fig. 3 Surface topography of grinding wheel

图 4 所示为分别使用普通磨削和 ELID 磨削去除大量 SiC 陶瓷材料的过程中,工件磨削表面粗糙度的变化。随着砂轮磨削去除 SiC 陶瓷体积的增大,工件表面粗糙度由初始阶段的较大值迅速减小,在稳定磨削阶段粗糙度值较为恒定,波动较小,而后略有增加,且 ELID 磨削方式下,表面粗糙度比普通磨削略大。在磨削深度较小时,普通磨削时砂轮表面磨粒磨损严重而得不到改善,且金属结合剂与 SiC 陶瓷相互作用明显,使得砂轮表面容屑空间很小,金属结合剂和钝化磨粒对 SiC 陶瓷的挤压作用增强,使得 SiC 陶瓷工件表面粗糙度较低,但法向磨削力较大。

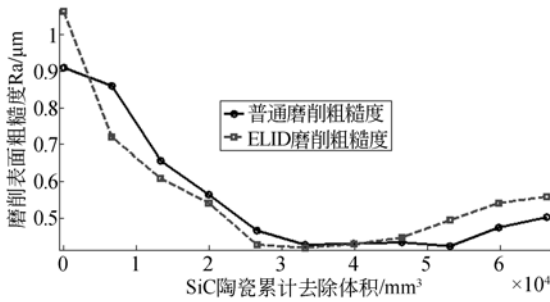


图 4 不同磨削方式下 SiC 陶瓷表面粗糙度
Fig. 4 Surface roughness of SiC workpiece

4.2 磨削力

磨削力可以反映金刚石砂轮在磨削过程中的磨削状态的转变,是观察砂轮磨削能力的重要因素。根据磨削原理^[15],砂轮磨削力由两部分组成:

$$\begin{cases} F_n = F_{nc} + F_{ns} \\ F_t = F_{tc} + F_{ts} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: F_{nc} 为磨削变形引起的法向力(N); F_{ns} 为摩擦引起的法向力(N); F_{tc} 为磨削变形引起的切向力(N); F_{ts} 为摩擦引起的切向力(N)。

根据磨削特点,磨削变形引起的磨削力和摩擦引起的磨削力分别如式(2)和式(3)所示^[15]:

$$\begin{cases} F_{nc} = K \cdot b \cdot \frac{v_w}{v_s} \cdot a_p \\ F_{tc} = \frac{\pi}{4 \cdot \tan \theta} \cdot K \cdot b \cdot \frac{v_w}{v_s} \cdot a_p \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} F_{sn} = \frac{4bp_0 \sqrt{a_p} v_w A}{\sqrt{d_s} v_s} \\ F_{st} = \frac{4\mu b p_0 \sqrt{a_p} v_w A}{\sqrt{d_s} v_s} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: K_q 为常数,可由实验得出; b 为磨削宽度(mm); v_w 为工件进给速度(m/s); v_s 为砂轮线速度(m/s); a_p 为磨削深度(mm); d_s 为砂轮当量直径(mm); θ 为磨粒顶圆锥半角(rad); p_0 为常数,可由实验得出; μ 为摩擦系数; A 为砂轮表面磨损平面面积(mm^2), $A = a \times b \times l_s$, a 为砂轮磨损平面面积率, l_s 为磨削接触弧长。

由式(1)、(2)、(3)可知,在考虑砂轮磨损的磨削过程中,金刚石砂轮磨削表面磨粒磨损造成砂轮-工件摩擦接触面增大,由于摩擦引起的磨削力逐渐增大,是动态磨削力变化过程中的重要影响因素。当金刚石砂轮经过长时间大去除量磨削后,砂轮表面磨粒磨损严重,如果表面磨粒状态不能得到及时有效地改善,磨削力会迅速增大。

图 5 所示为普通磨削和 ELID 磨削两种方式下砂轮磨损对磨削力的影响变化曲线。由 4.1 节可知,普通磨削时砂轮磨损严重,由于金属结合剂的结合强度大,砂轮表面磨损磨粒不易脱落,导致砂轮-工件接触面积逐渐增大,且得不到及时改变,因此,磨削力会随着材料磨削去除体积的增大迅速增大;而在 ELID 磨削过程中,当砂轮表面磨粒磨损严重时,结合剂与电解磨削液发生化学反应生成容易磨损脱落的氧化物,从而使磨损严重的磨粒可以及时脱落,新的锋锐磨粒逐渐露出,砂轮表面磨粒能够得到有效地更新,因此砂轮-工件磨削接触面积增加缓慢,磨削力增长速度较普通磨削方式下得到有效抑制。可以从图 5 中的磨削力变化趋势中得到验证,因此,使用 ELID 磨削可以通过及时更新砂轮磨削

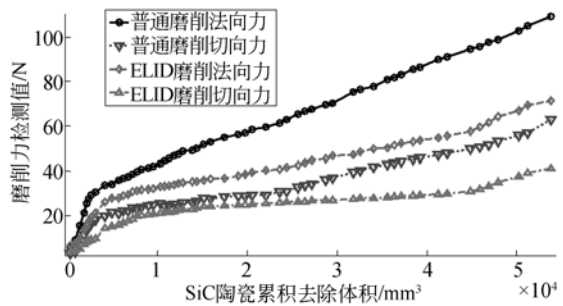


图 5 磨削方式不同时磨削力随工件材料去除体积的变化

Fig. 5 Changing trend of grinding force as removed volumes of SiC ceramics increasing

表面磨粒,改善砂轮-工件接触状态,来降低磨削力,提高工件磨削质量。

4.3 磨削比

磨削比可以表征磨削过程中去除一定体积材料时砂轮的磨损量,磨削比越大,砂轮磨损量越小。对于金属结合剂金刚石砂轮,通过对比分析普通磨削与 ELID 磨削过程中的磨削比研究 ELID 磨削对砂轮磨损量的影响,以指导实际磨削过程参数的优化选择。

本节使用的磨削参数区别于表 1,通过设定 3 组不同的磨削参数进行普通磨削,观察不同磨削参数组合对磨削比的影响,并选择其中一组磨削参数进行 ELID 磨削试验,对比不同磨削方式对磨削比的影响。磨削参数如表 2 所示:

表 2 磨削比实验参数组合

Tab. 2 Parameter combination in grinding ratio experiments

	参数 1	参数 2	参数 3
砂轮线速度/(m/h)	19.625	19.625	23.55
磨削深度/ μm	20	30	30
进给速度/(mm/min)	102	248	102

磨削时每次 SiC 理论磨耗深度为 1 mm 时,对实际工件磨削量和砂轮径向尺寸进行检测,并得到砂轮磨削比如图 6 所示:

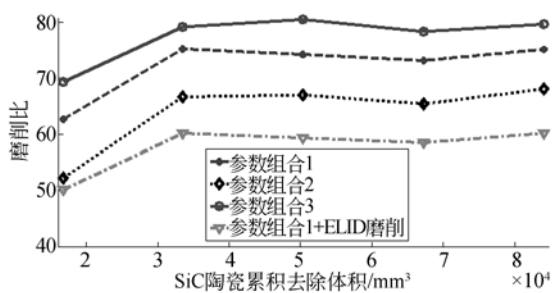


图 6 磨削比随工件去除体积变化曲线

Fig. 6 Grinding ratio with different parameter combination

从图中可以看出,砂轮修整完后,使用普通磨削和 ELID 磨削进行 SiC 陶瓷磨削过程中,除了在磨削初始阶段磨削比变化较为明显,在稳定磨削阶段磨削比较为稳定,波动较小,且相同的磨削条件下,使用 ELID 磨削时砂轮磨削比有明显降

低。究其原因,金属结合剂金刚石砂轮的结合剂强度较高,不容易发生破碎断裂,在磨削过程中砂轮磨损主要由于磨耗磨损产生,由 4.1 可知在砂轮稳定磨削阶段通过砂轮和工件相互作用砂轮的磨耗磨损量相对较小;而对于 ELID 磨削过程,稳定磨削阶段当砂轮表面磨粒磨损导致结合剂磨损严重时,金属结合剂和 ELID 磨削液在电解作用下发生化学反应,结合剂转变为较脆且相对易脱落的氧化物,使砂轮表面钝化失效的磨粒脱落。因此去除相同体积 SiC 材料时 ELID 磨削过程中砂轮体积减小量较普通磨削大,磨削比小。在使用 ELID 磨削 SiC 陶瓷工件的过程中,砂轮的磨损量和磨损速率与电解参数有着密切关系,如公式(4)所示^[16]:

$$W_m = \eta k I_c dt, \quad (4)$$

式中: W_m 为 dt 时间内的砂轮磨损量(m^3); η 为修正过程在 dt 瞬间的电流效率; k 为体积电化当量(m^3/C); I_c 为 dt 时间段内的平均电流(A)。

实验所用的 ELID 磨削高频脉冲电源通过调节电压、占空比来调节 ELID 磨削过程中的电参数。因此,在后续的研究工作中将对电解电压及占空比等因素进行优化,以控制在线电解电流及金属基金刚石砂轮的电解速度,在保证砂轮能够保持足够锋锐度的情况下尽量减小由于电解造成的砂轮磨损量,延长砂轮使用寿命。

5 结 论

本文分析了 ELID 磨削原理,通过对比实验,研究了 SiC 陶瓷的 ELID 磨削特性,分别在普通磨削和 ELID 磨削方式下对 SiC 陶瓷进行长时间大去除量的磨削加工,对比分析了砂轮磨损表面及表面粗糙度、磨削力和磨削比,对基于砂轮磨损的 SiC 陶瓷 ELID 磨削特性进行了研究,得到如下结论:在相同的磨削条件下,经过长时间大去除量磨削,ELID 磨削方式下金刚石砂轮表面磨粒始终保持足够的锋锐度和容屑空间,而普通磨削方式下金刚石砂轮表面磨粒磨损严重,且能够明显看到结合剂与工件相互作用的痕迹;在磨削过程中, SiC 陶瓷工件表面粗糙度随着工件材料去除体积的增大呈现出先下降,后保持基本不变,最后略有增加的趋势。且 ELID 磨削方式下磨削表面粗糙度略高于普通磨削;两种不同磨削方式下

磨削力均呈现出先急剧增加后平缓增加的趋势,且 ELID 磨削方式下轴向磨削力和切向磨削力均较普通磨削由明显减小;与普通磨削方式相比,在

ELID 磨削稳定磨削阶段金属基金刚石砂轮磨削比有明显下降,可通过对 ELID 磨削相关电参数进行优选电解和砂轮磨损的平衡。

参考文献:

- [1] 张学军.《非球面加工与检测技术》专题文章导读[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 527-527.
ZHANG X J. Reading Guidance of the feature article "Processing and testing technology of aspheric surface"[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 527-527. (in Chinese)
- [2] PITZEK M, STEIGER R, THALHAMMER G, *et al.*. Optical mirror trap with a large field of view [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19414-19423.
- [3] 韩杰才, 张宇民, 赫晓东. 大尺寸轻型 SiC 光学反射镜研究进展[J]. 宇航学报, 2001, 22(6): 124-131.
HAN J C, ZHANG Y M, HE X D. Optical large scale light weight SiC mirrors [J]. *Journal of Astronautics*, 2001, 22(6): 124-131. (in Chinese)
- [4] ZAWRAH M F, EL-GAZERY M. Mechanical properties of SiC ceramics by ultrasonic nondestructive technique and its bioactivity [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 106(2): 330-337.
- [5] LEE H B, SUK J Y, BAE J I. Trade study of all-SiC lightweight primary mirror and metering structures for spaceborne telescopes[C]. *SPIE Optical Engineering Applications. International Society for Optics and Photonics*, 2015: 95740D-12.
- [6] 张楠. 我国研制成功四米口径碳化硅反射镜坯[EB/OL]. 新华网. (2016-4-27) [2016-5-20]. http://news.xinhuanet.com/politics/2016-04/27/c_128937342.htm
ZHANG N. The four meters diameter mirror blank of SiC ceramics has been developed successfully in China[EB/OL]. *Xinhua Net.* (2016-4-27) [2016-5-20]. http://news.xinhuanet.com/politics/2016-04/27/c_128937342.htm (in Chinese)
- [7] 刘立飞, 张飞虎, 刘氏慧. 碳化硅陶瓷的超声振动辅助磨削[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2229-2235.
LIU L F, ZHANG F H, LIU M H. Ultrasonic assisted grinding for silicon carbide[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2229-2235. (in Chinese)
- [8] LIU J H, PEI Z J, FISHER G R. ELID grinding of silicon wafers: a literature review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(3): 529-536.
- [9] NI J, LI B. Phase transformation in high-speed cylindrical grinding of SiC and its effects on residual stresses[J]. *Materials Letters*, 2012, 89: 150-152.
- [10] KHOSHAIM A B, MARINESCU I D. The influence of wheel grain size on the surface roughness in ELID fine grinding of SiC ceramics [J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2014, 6(4): 324-335.
- [11] YU X, HUANG S, XU L. ELID grinding characteristics of SiCp/Al composites[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016: 1-7.
- [12] 关佳亮, 朱磊, 陈玲, 等. SiCp/Al 复合材料的 ELID 精密加工工艺[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(6): 823-829.
GUAN J, ZHU L, CHEN L, *et al.*. ELID Precision Processing Technology of SiCp/Al Composites[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(6): 823-829. (in Chinese)
- [13] OHMORI H, DAI Y, LIN W M, *et al.*. Force characteristics and deformation behaviors of sintered SiC during an ELID grinding process[C]. *Key Engineering Materials. Trans Tech Publications*, 2003, 238: 65-70.
- [14] ETO H, DAI Y, EBIZUKA N, *et al.*. ELID grinding of SiC ultra lightweight mirror[C]. *5th International Conference on Space Optics*, 2004, 554: 707-710.
- [15] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社. 2011.
REN J X, HUA D A. *Grinding Principle*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
- [16] 林彬, 张春河, 徐燕申. ELID 超精密镜面磨削砂轮磨损规律的研究[J]. 天津大学学报, 1999, 32

(1): 74-76.

LIN B, ZHANG CH H, XU Y Y. Study on grinding laws of ultra-precision mirror grinding

with ELID technology [J]. *Chinese Journal of Tianjin University*, 1999, 32(1): 74-76. (in Chinese)

作者简介:



刘立飞(1987—),男,山东聊城人,博士,讲师,2008年于山东大学获得学士学位,2010年、2016年于哈尔滨工业大学分别获得硕士学位、博士学位,主要从事硬脆材料精密超精密磨削加工及精密切削加工技术相关研究。Email: liulf_87@163.com



饶小双(1986—),男,湖北黄冈人,博士研究生,2011年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,2014年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料精密及超精密加工方面的研究。E-mail: rxs_cug@126.com



张飞虎(1964—),男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1984年、1987年于西北工业大学获分别获得学士学位、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: zhang-fh@hit.edu.cn