

ELID 沟道成形磨削氧化膜特性及影响作用实验

左明泽 任成祖 王志强

(天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室,天津 300350)

文 摘 针对 ELID 沟道成形磨削特点,研究了磨削过程中氧化膜的特性及其影响作用。探讨分析了氧化膜的电流表征、氧化膜在沟道成形磨削中的状态变化以及氧化膜状态对磨削力和表面粗糙度的影响。实验过程中,电解电流从 1 A 增长到 4 A,氧化膜厚度从 35.33 μm 减小到 11.07 μm ,法向磨削力从 7.06 N 增长到 36.12 N,切向磨削力从 1.62 N 增长到 4.47 N;垂直于磨削方向的表面粗糙度由 0.256 μm 增长到 0.355 μm ,平行于磨削方向的表面粗糙度由 8 nm 增长到 13 nm。结果表明,氧化膜越厚,磨削力和表面粗糙度越小;氧化膜越薄,磨削力和表面粗糙度越大。

关键词 ELID 沟道成形磨削,氧化膜,磨削力,表面粗糙度

中图分类号: TG58

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2017.04.009

Experimental on Characteristics and Effect of Oxide Layer in ELID Groove Profile Grinding

ZUO Mingze REN Chengzu WANG Zhiqiang

(Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract The characteristics and mechanism of the oxide layer in ELID groove profile grinding process were investigated. The non-uniform contact during ELID groove grinding and the effect of oxide layer on the grinding force and the surface roughness were studied. As the current increases from 1 A to 4 A, the thickness of oxide layer decreases from 35.33 μm to 11.07 μm . Meanwhile, the normal grinding force increases from 7.06 N to 36.12 N, and the tangential grinding force increases from 1.62 N to 4.47 N. R_{av} increases from 0.256 μm to 0.355 μm , and R_{ap} increases from 8 nm to 13 nm. The result indicates that as the thickness of oxide layer decreases, the grinding force and surface roughness increase, while as the thickness of oxide layer increases, the grinding force and surface roughness decrease.

Key words ELID groove profile grinding, Oxide layer, Grinding force, Surface roughness

0 引言

近年来随着科学技术的发展,硬质合金、工程陶瓷、淬火钢及光学玻璃等硬脆材料被广泛应用于航空航天、仪器仪表、机械、电子等领域。然而由于硬脆材料的高硬度和高脆性,采用传统成形磨削加工十分困难^[1-2]。将 ELID 技术应用于硬脆材料成形磨削加工,可以很好地解决磨削过程中微细磨料砂轮易堵塞和金属结合剂修锐困难等问题,既提高了形状精度,又保证了表面质量^[3]。

在 ELID 磨削过程中,由于电解作用,砂轮表面会生成一层氧化膜。氧化膜具有一定的厚度和弹性,其状态和性能对 ELID 磨削的表面质量与磨削效率

有重要影响。许多学者对氧化膜进行了研究,关佳亮^[4]通过研究刚电解生成的氧化膜,分析了氧化膜的生成机理和作用特性;DAI 等^[5]对氧化膜进行了分层,并通过实验发现氧化膜最佳厚度为 8~9 μm ;朱育权^[6]对氧化膜形成过程进行了建模与仿真,并通过实验研究了修整阶段氧化膜的形成行为,结果显示氧化膜的增长速率由快变慢,最终氧化膜厚度趋于稳定;KUAI 等^[7]利用纳米压痕技术研究了氧化膜的硬度、刚度和弹性模量;YANG 等^[8]用电流和磨削力来表征氧化膜状态,并通过模糊神经网络实现了对氧化膜的状态识别和主动控制;赵波^[9]通过超声振动辅助磨削过程单颗磨粒的运动学分析,建立了超声

收稿日期:2017-03-13

基金项目:天津市自然科学基金重点项目“基于工件阴极的轴承外圈沟道 ELID 成形磨削机理”(15JCZDJC39500)

第一作者简介:左明泽,1992 年出生,硕士,主要从事精密、超精密加工。E-mail: tjuzmz@163.com

通信作者:任成祖,1962 年出生,工学博士,教授。E-mail: renchz@tju.edu.cn

ELID 复合磨削条件下的磨削力数学解析模型,并对模型进行了分析和仿真。但上述对氧化膜的研究大部分是基于平面磨削进行的,对切入式成形磨削中氧化膜的状态变化和相关特性尚未有比较深入的实验研究。因此,本文分析了氧化膜在切入式沟道成形磨削中的状态变化,并通过 ELID 沟道成形磨削实验,观察了氧化膜的电流表征,研究了氧化膜状态对磨削力、表面粗糙度的影响。

1 氧化膜的生成与工作状态

1.1 氧化膜的生成与表征

ELID 沟道成形磨削如图 1 所示。

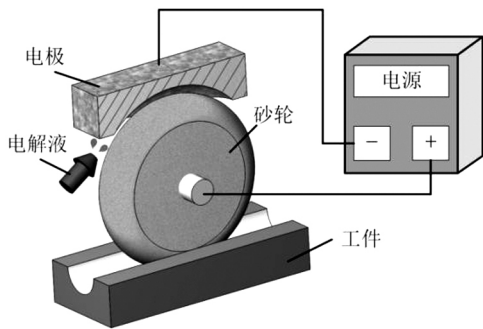


图 1 ELID 沟道成形磨削示意图

Fig.1 ELID groove profile grinding

砂轮与修整电极分别接电源的正负极,砂轮与修整电极之间空隙充满磨削液,通电后发生电解反应。铸铁结合剂砂轮在电解时,由于阳极氧化效应,结合

剂中的主要元素 Fe 氧化为 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} , 砂轮表面生成一层氧化膜,氧化膜的主要成分就是 Fe 的氧化物和氢氧化物。氧化膜本身是绝缘体,但是磨削过程中磨削液会渗透进入氧化膜层,使氧化膜有一定的导电性,整个系统组成了电解回路,电解池的电阻由电解液电阻和氧化膜电阻决定^[6],为:

$$R = R_0 + R_E = \frac{\rho_0 h_0}{A_a} + \frac{\rho_e h_e}{A_e} \quad (1)$$

式中, R_E 为电解液电阻; R_0 为氧化膜电阻,其大小与氧化膜厚度和致密性相关,氧化膜越厚越致密, R_0 越大,反之越小; h_0 为氧化膜厚度; h_e 为极间间隙; ρ_0 、 ρ_e 分别为氧化膜和电解液的电阻率; A_e 、 A_a 分别为阴极和阳极的有效面积。则氧化膜厚度的表达式:

$$h_0 = \frac{UA_a}{I\rho_0} - \frac{\rho_e h_e A_a}{\rho_0 A_e} \quad (2)$$

可以看到,氧化膜厚度受到电解过程的有效电压 U 和电解电流 I 的影响。因此,当砂轮材料、电源参数以及磨削参数一定时,电解电流可以表征氧化膜的状态。

1.2 氧化膜在沟道成形磨削过程中的状态变化

与平面磨削不同,切入式沟道成形磨削由于砂轮与工件沟道廓形半径的差异,砂轮与工件初始接触时不会均匀接触,砂轮需要通过不断的进给才能与工件廓形完全吻合。为便于分析,将砂轮与工件接触区域沿圆弧廓形分为三个部分,如图 2 所示。

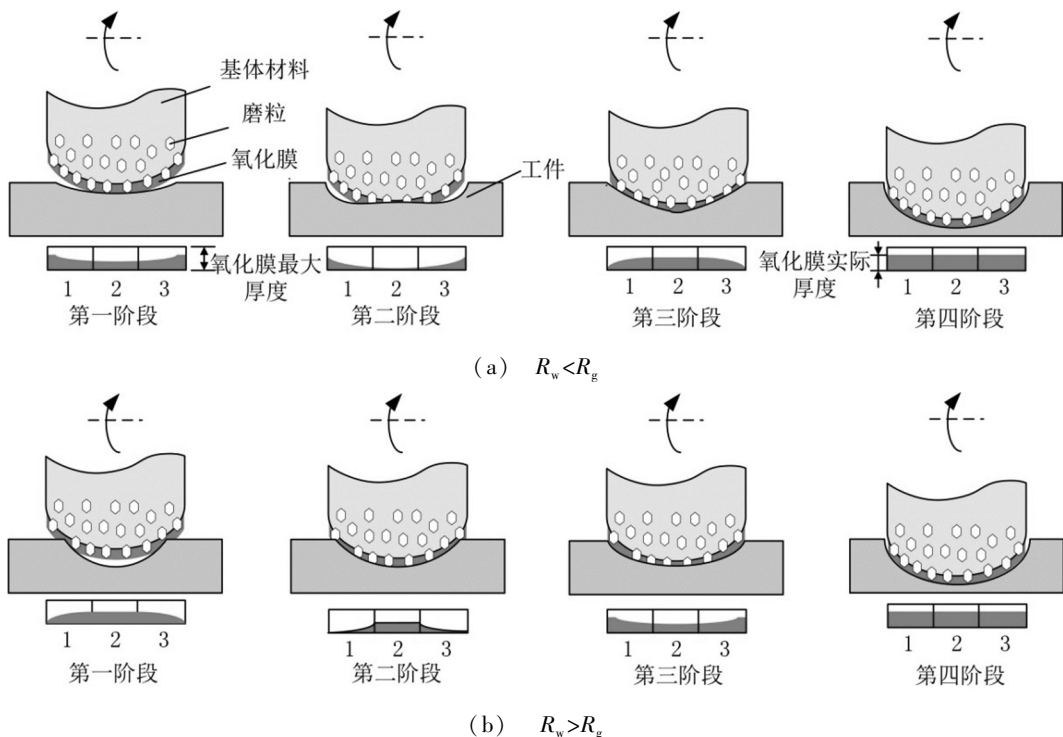


图 2 沟道成形磨削中氧化膜的状态变化

Fig.2 State of oxide layer in the groove grinding

整个磨削过程可以分为四个阶段,每个阶段下氧化膜的厚度分布都有所差异。定义砂轮的截面半径

为 R_w , 工件沟道的截面半径为 R_g , 根据 R_w 与 R_g 的相对大小对接触状态分两种情况考虑^[10]。

图 2(a) 为 $R_w < R_g$ 时的情况。第一阶段, 区域 2 首先与工件接触, 磨粒参与磨削, 氧化膜开始脱落; 区域 1 和区域 3 砂轮突出磨粒与工件表面之间仍有微小间隙, 氧化膜初始厚度不变。第二阶段, 区域 2 结合剂材料开始与工件表面直接接触, 氧化膜厚度变得非常小, 导电性增强; 区域 1 和区域 3 内的磨粒与工件表面接触。第三阶段, 区域 2 由于砂轮的自锐性, 新产生的磨粒参与磨削, 与工件表面接触, 氧化膜厚度增加; 区域 1 和区域 3 内由于氧化膜脱落, 结合剂材料与工件表面接触, 导致此区域电解作用增强。第四阶段是平衡阶段, 磨削过程达到稳定状态, 砂轮与工件廓形一致, 氧化膜的生成与去除达到动态平衡, 三个区域内氧化膜厚度均匀。图 2(b) 为 $R_w > R_g$ 时的情况, 区域 1 和区域 3 先参与磨削, 区域 2 随后与工件接触, 氧化膜厚度变化过程与图 2(a) 相反。氧化膜的存在使实际电解过程变得非线性, 氧化膜厚度与电解修整作用处于动态平衡, 实现了自适应控制; 同时氧化膜的存在减小了砂轮的形状误差, 提高了砂轮磨粒的等高性和协同性, 有助于改善表面质量。当砂轮廓形与沟道形状不完全吻合时, 不同区域的氧化膜厚度会有所差异, 这对加工表面粗糙度和形状精度均会产生影响。因此在 ELID 沟道成形磨削中, 最终必须保证砂轮与工件廓形一致, 砂轮表面氧化膜分布均匀。

2 实验设备与方法

2.1 设备与材料

为观察氧化膜与电流之间的表征关系以及氧化膜状态对磨削力及表面粗糙度的影响, 在经过改造后的 MM7120 平面磨床进行磨削实验, 电解液为 TJMX-V 型 ELID 电解液。砂轮采用 W10 铸铁基 CBN 砂轮, 外径 200 mm。工件材料为经过淬火处理的 GCr15 钢。TJCP-II 型高频直流脉冲电源有 60、90、120 V 三档可调。磨削参数为: 砂轮转速 $v_s = 1\ 500\ \text{r}/\text{min}$; 工作台进给速度 $v_w = 5\ \text{m}/\text{min}$; 磨削深度 $a_p = 2\ \mu\text{m}$ 。整个 ELID 磨削系统如图 3 所示。

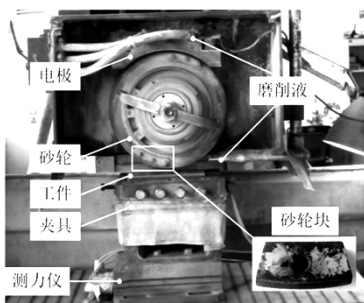


图 3 ELID 磨削系统

Fig.3 ELID grinding system

2.2 实验方法

采用主动控制策略, 以电流表征氧化膜状态, 通过研究不同设定电流下的磨削力和表面粗糙度等参数, 说明磨削时氧化膜的电流表征以及对磨削力、表面粗糙度的影响。

首先对砂轮进行预修锐和电火花整形, 然后开始磨削, 保证砂轮与工件沟道廓形完全吻合。磨削过程中电源电压设定为 90 V, 磨削条件保持不变, 设定电解电流分别为 1、2、3、4 A。当实测电流达到预定电流并保持稳定状态后, 进给 $2\ \mu\text{m}$, 光磨 5 个行程后停止磨削, 以保证对工件材料的完全去除。

磨削完成后将砂轮块取下风干, 对其截面抛光, 采用扫描电镜观察砂轮块截面以及砂轮表面氧化膜的形貌。Kistler 测力仪记录整个磨削过程中的法向磨削力和切向磨削力。采用 Form Taylorsurfi120 粗糙度轮廓仪对工件进行表面粗糙度测试, 测量不同区域的表面粗糙度 R_{av} 和 R_{ap} 。每个方向各测量三次并求平均值作为测量结果, 测量 R_{av} 时取样长度 0.25 mm, 评定长度 2 mm; 测量 R_{ap} 时取样长度 0.8 mm, 评定长度 4 mm。

3 结果与分析

3.1 氧化膜状态的电流表征

将不同设定电流下工作的砂轮块放在扫描电镜下观察氧化膜状态。图 4 表示了不同电流下氧化膜的厚度, 图中黑色部分为砂轮基体, 白色部分是氧化膜。从图 4 可以看出, 随着电流增大, 氧化膜厚度减小。根据式 (2) 求得氧化膜厚度随电解电流的理论变化曲线, 将理论值与实测值进行对比, 结果如图 5 所示, 随着电解电流的增大, 氧化膜厚度的理论值和实测值均变小。当电流为 1 A 时, 实测氧化膜厚度为 $35.33\ \mu\text{m}$, 电流增大到 4 A 时, 氧化膜厚度已经减小到 $11.07\ \mu\text{m}$, 这说明氧化膜厚度与电流大小存在对应关系。

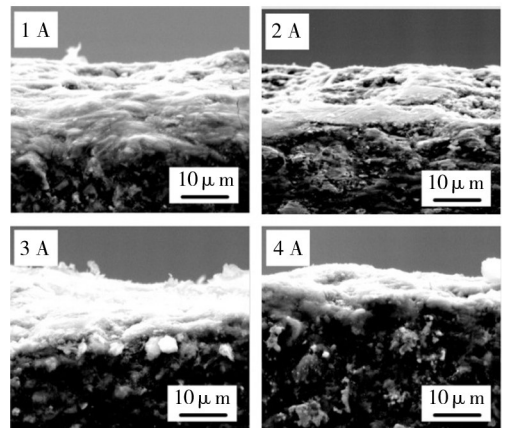


图 4 砂轮块截面 SEM 图 3000x

Fig.4 SEM image of the grinding wheel's cross section

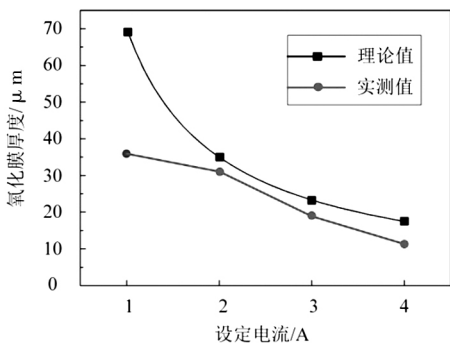


图5 氧化膜厚度实测值与理论值

Fig.5 Predicted thickness and measured thickness of oxide layer

从图5还可以发现,氧化膜厚度的实测值均小于理论值,这是因为理论曲线计算时没有考虑接触压力的影响,实际磨削中由于砂轮与工件接触压力的影响,氧化膜会变得较为紧实,厚度相应的变小。

根据 OHMORI^[5] 提出的氧化膜分层理论模型,氧化膜可以分为四层,由外向内分别为疏松层、抛光层、磨削层和界面层,如图6所示。疏松层的密度小,氧化膜比较疏松,易于去除,内部基本上没有磨粒;抛光层粘结强度较低,内部所含磨粒较少,因此加工时对工件材料的去除量小,类似于抛光加工;磨削层是氧化膜磨削加工最合适的区域;界面层和基体直接接触,硬度较高。当氧化膜厚度不同时,参与磨削的氧化膜层也有所不同。

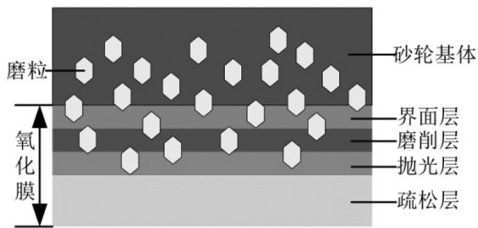


图6 氧化膜分层示意图 1000×

Fig.6 Four layers of the oxide film

图7为不同电流下的砂轮表面形貌。可以看到,设定电流为1A的情况下砂轮表面起伏较大,氧化膜的厚度不均匀,而随着电流的增大,氧化膜的厚度变得均匀,当电流到4A时,砂轮表面已经比较平坦。这是因为电流较小时,氧化膜厚度比较大,实际参与磨削的是氧化膜的疏松层,由于疏松层的致密性较差,与工件接触时不会完全紧实,所以最终观察到的砂轮表面起伏较大。当电流较大时,氧化膜的厚度变小,一方面磨削力增大,砂轮与工件之间接触压力增大;另一方面疏松层的影响作用变小,磨削时即被去除,与工件接触的是磨削层或抛光层,其致密性较好,所以砂轮表面更加平坦。

综合以上分析,氧化膜状态与电解电流之间存在对应关系,氧化膜厚度可以由电解电流进行表征。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017年 第4期

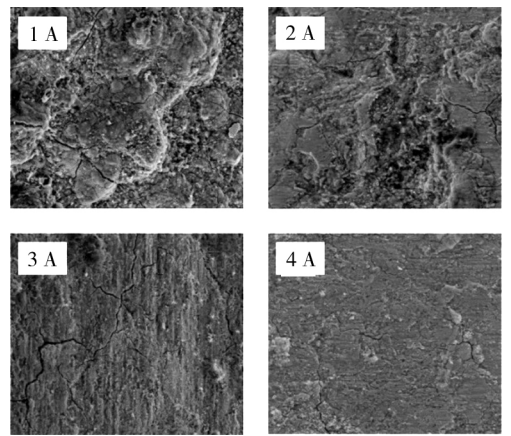
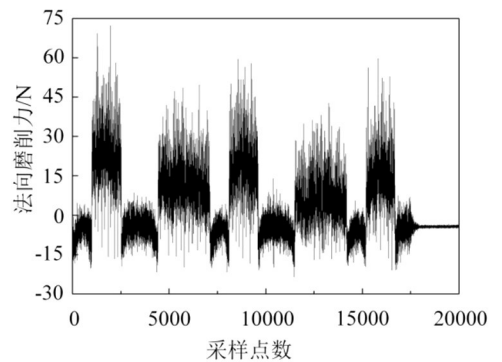


图7 砂轮块形貌 SEM图

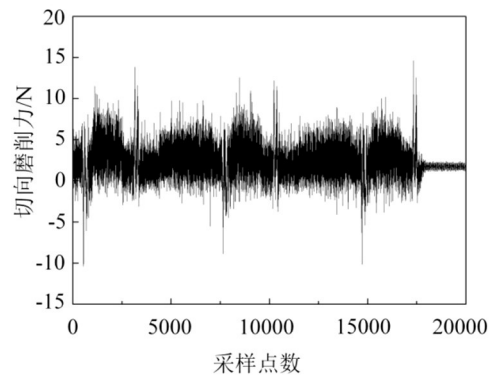
Fig.7 SEM image of the grinding wheel's morphology

3.2 氧化膜对磨削力的影响

测力仪记录下磨削过程中的磨削力,图8(a)为电解电流为3A时测得的法向磨削力,可以看出进给 $2\mu\text{m}$ 后,法向磨削力瞬间上升,此后的5个行程中,由于顺磨和逆磨的差异,法向磨削力稍有不同。图8(b)为电解电流为3A时测得的切向磨削力,可以看到切向磨削力比较平稳,变化不大。



(a) 法向磨削力



(b) 切向磨削力

图8 电流3A时所测的磨削力

Fig.8 Grinding force in 3A

将砂轮进给 $2\mu\text{m}$ 后第一个行程内的磨削力作为测力结果,计算结果如图9所示,可以看到,电流从1增长到4A时,法向磨削力随之由7.06升高到36.12N,切向磨削力由1.62升高到4.47N。

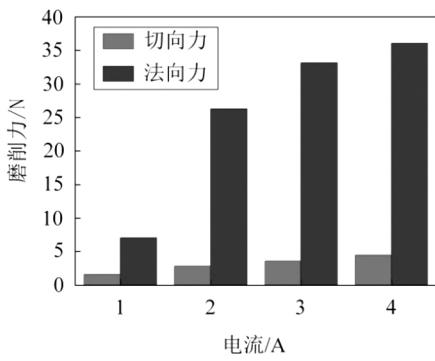


图9 电流对磨削力的影响

Fig.9 Effect of current on the grinding force

根据氧化厚度膜与电流的对应关系,电流变化对磨削力的影响实质是氧化膜厚度变化对磨削力的影响。当氧化膜厚度较大时,进给深度相对于氧化膜厚度来说较小,氧化膜与工件接触的是疏松层,而疏松层具有良好的吸震能力和弹性,使得磨削力较小;当氧化膜比较薄时,磨削深度与氧化膜厚度的比值变大,砂轮进给时已经将疏松层去除,此时与工件接触的是氧化膜的抛光层或磨削层,氧化膜这个部分比较致密,硬度较高,磨削力大。

3.3 氧化膜对表面粗糙度的影响

ELID 沟道成形磨削采用成形砂轮磨削法,首先将砂轮电火花整形成规则的圆弧形,然后在磨削过程中将砂轮形貌“复印”在工件上,因此砂轮的修整状况对表面质量有很大的影响。平面磨削时表面粗糙度的评定参数通常采用垂直于磨削方向的表面粗糙度 R_{av} ;考虑到砂轮修整条件的影响,ELID 沟道成形磨削仅靠 R_{av} 无法完全表现加工表面质量的改善,因此还需要测量平行于磨削方向的表面粗糙度 R_{ap} ,利用 R_{av} 和 R_{ap} 共同表征表面粗糙度。

图 10 为粗糙度轮廓仪探针移动方向,分别用于测量垂直于磨削方向的表面粗糙度 R_{av} 和平行于磨削方向的表面粗糙度 R_{ap} 。考虑到不同区域氧化膜厚度的差异,将工件沿沟道形分为 3 个区域,由于区域 1 和区域 3 对称分布,因此只对区域 1 和区域 2 分别测量。

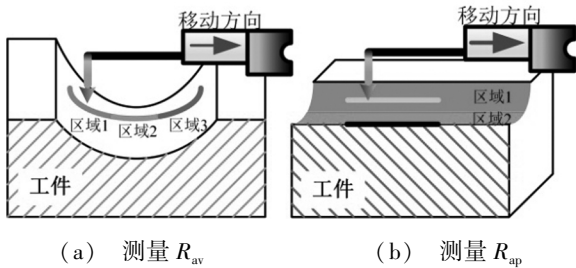
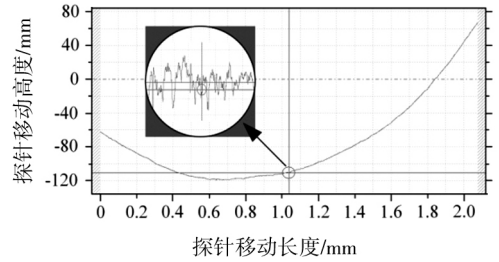


图 10 轮廓仪探针移动方向

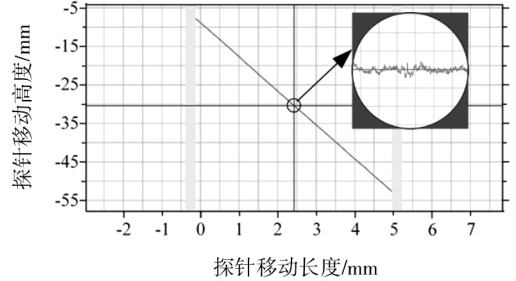
Fig.10 Moving direction of the profile stylus

图 11 为电解电流 1 A 时,在区域 2 测得的沟道形貌,垂直于磨削方向的表面轮廓波动较大,平行于

磨削方向的表面轮廓波动较小。



(a) 垂直于磨削方向



(b) 平行于磨削方向

图 11 电流 1 A 时区域 2 所测的沟道形貌

Fig.11 Groove profile of region 2 in 1 A

图 12(a) 为不同电解电流下,区域 1 和区域 2 分别测得的垂直于磨削方向的表面粗糙度 R_{av} ,可以看出,在其他条件相同的情况下,二者的 R_{av} 值均随着电解电流的增大而增大。电解电流为 1 A 时,区域 1 和区域 2 测得的 R_{av} 值分别为 0.276 和 0.256 μm ;电解电流增大到 4 A 时分别为 0.378 和 0.355 μm 。

图 12(b) 为区域 1 和区域 2 所测得的平行于磨削方向的表面粗糙度 R_{ap} ,与图 12(a) 类似,二者的 R_{ap} 值均与电解电流成正相关的关系。电解电流为 1 A 时,区域 1 和区域 2 测得的 R_{ap} 值分别为 11 和 8 nm;电解电流增大到 4 A 时分别为 14 和 13 nm。

根据氧化膜厚度与电流的对应关系,电流对表面粗糙度产生的影响实质是氧化膜对表面粗糙度的影响。氧化膜越厚,表面粗糙度越小;氧化膜越薄,表面粗糙度相应越大。这是因为未变形切屑厚度受氧化膜厚度的影响,氧化膜越厚,未变形切屑厚度越小,相应的表面粗糙度越小;氧化膜越薄,未变形切屑厚度越大,相应的表面粗糙度就越大。

从图 12 中可以发现:电流为 1 和 2 A 时,实验测得区域 1 和区域 2 的 R_{ap} 相差较大,分析认为是电流较小,电解作用较弱,导致氧化膜生成速度慢,停止磨削时氧化膜在不同区域厚度有所差别;电流为 3 和 4 A 时,区域 1 和区域 2 所测得的表面粗糙度大小基本相同,这说明磨削过程已经达到平衡阶段,砂轮廓形与沟道形状完全吻合,氧化膜分布均匀。

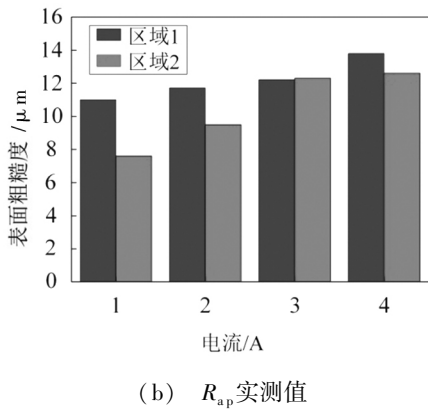
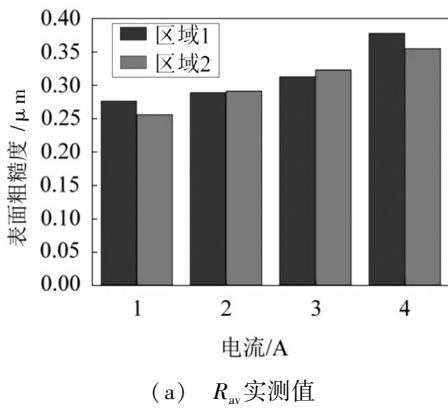


图 12 电流对表面粗糙度的影响

Fig.12 Effect of current on the surface roughness

4 结论

(1) ELID 沟道成形磨削中, 因砂轮与工件初始廓形不完全吻合, 砂轮不同区域氧化膜厚度有所差异, 磨削达到平衡阶段后, 氧化膜厚度分布均匀。

(2) 其他条件相同时, 随着电流从 1 A 增长到 4 A, 氧化膜厚度由 35.33 μm 减小到 11.07 μm , 氧化膜表面越来越平坦。

(3) 氧化膜厚度影响着磨削力的大小, 随着氧化膜厚度的减小, 法向磨削力由 7.06 N 增长到 36.12 N, 切向磨削力由 1.62 N 增长到 4.47 N。

(4) 氧化膜的状态影响着加工表面粗糙度的大小, 氧化膜越厚, 表面粗糙度越小; 氧化膜越薄, 表面

粗糙度越大。实验测得垂直于磨削方向的表面粗糙度 R_{av} 最小可达 0.256 μm , 平行于磨削方向的表面粗糙度 R_{ap} 最小可达 8 nm。

参考文献

- [1] 张飞虎, 朱波, 栾殿荣, 等. ELID 磨削-硬脆材料精密和超精密加工的新技术[J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(1): 51-55.
- [2] 关佳亮, 范晋伟, 马春敏. ELID 磨削技术在硬脆材料精密超精密加工中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(4): 486-488.
- [3] 张开飞. 球轴承套圈沟道 ELID 成形磨削试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [4] 关佳亮, 郭东明, 袁哲俊. ELID 镜面磨削中砂轮生成氧化膜特性及其作用的研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(5): 89-92.
- [5] DAI Y, OHMORI H, LIN W, et al. A Fundamental Study on Optimal Oxide Layer of Fine Diamond wheels during ELID grinding process[J]. Key Engineering Materials, 2006, 304-305: 176-180. [10.4028/www.scientific.net/KEM.304-305.176](http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.304-305.176).
- [6] 朱育权, 马保吉, D.J.Stephenson. ELID 超精密磨削砂轮表面氧化膜形成过程的建模和仿真[J]. 工具技术, 2008, 42(5): 11-14.
- [7] KUAI J C, ZHANG H L, ZHANG F H, et al. Research on Oxide Film Mechanical Properties of ELID Grinding Wheel Surface by Nanoindentation[C]. 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, Henan, IEEE, 2010: 1-5. [10.1109/ICEEE.2010.5660294](http://dx.doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5660294).
- [8] YANG L J, REN C Z, JIN X M. Experimental study of ELID grinding based on the active control of oxide layer[J]. Journal of materials processing technology, 2010, 210(13): 1748-1753. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.06.005>.
- [9] 赵波, 刘折, 郑友益, 等. 超声 ELID 复合磨削磨削力模型研究[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(4): 31-35.
- [10] WU M L, ZHANG K F, REN C Z. Study on the non-uniform contact during ELID groove grinding[J]. Precision Engineering, 2015, 39: 116-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.07.011>.