

在线电解修整磨削氧化膜研究现状及展望

伍俏平^{1,2} 郑维佳¹ 邓朝晖^{1,2} 赵恒²

1. 湖南科技大学智能制造研究院,湘潭,411201
2. 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湘潭,411201

摘要: 在线电解修整(ELID)镜面磨削加工中,电解作用会使砂轮表面生成一层具有绝缘作用的氧化膜,该氧化膜可以减缓和阻止进一步电解,避免砂轮损耗过快;同时,氧化膜可容纳、承托大量因电解而脱落的磨粒,使得砂轮的磨削类同游离磨粒的研磨、抛光作用,有利于提高磨削表面质量。氧化膜在整个磨削过程中发挥着至关重要的作用,直接影响着ELID磨削加工表面质量和磨削效率。详细阐述了ELID磨削过程中氧化膜的成膜过程及表征方法、氧化膜的物理/化学特性、氧化膜成膜影响因素等方面的研究进展,并对ELID磨削氧化膜下一步的研究重点进行了展望。

关键词: 在线电解修整磨削;氧化膜;成膜特性;电解参数

中图分类号: TG580

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2018.17.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Status and Perspectives of ELID Grinding Oxidation Films

WU Qiaoping^{1,2} ZHENG Weijia¹ DENG Zhaohui^{1,2} ZHAO Heng²

1. Institute of Intelligent Manufacturing, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201
2. Hunan Province Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult to Machine Materials, Xiangtan, Hunan, 411201

Abstracts: The oxidation films formed on the surfaces of wheels played an important role in the grinding performance during the ELID grinding processes, which might prevent further electrolysis and avoid excessive wear of the grinding wheels. And the oxidation film could accommodate a large number of abrasive particles that were dropped due to electrolysis, this made wheel grinding just like the polishing of free abrasive particles, which was beneficial to improve the grinding surface quality. The properties of oxidation film directly affected the grinding efficiency and surface quality of ELID grinding. This paper mainly introduced the formation and characterization of the oxidation films, physical and chemical properties of the oxidation films and influence factors of oxidation film formation. And the next steps of the researches of the oxidation films in ELID grinding were prospected.

Key words: electrolytic in-process dressing (ELID) grinding; oxidation film; film forming characteristic; electrolytic parameters

0 引言

在线电解修整(electrolytic in-process dressing, ELID)镜面磨削技术的提出有效解决了金属结合剂砂轮在磨削过程中存在的砂轮易堵塞、砂轮修锐困难的问题。ELID磨削技术一问世就受到了许多工业国家的高度重视,并取得了一系列的研究成果:研发出了ELID纳米级精密磨床^[1],实现了ELID磨削过程的计算机监测与控制^[2],开发了ELID专用电源^[3]和系列型专用电解液^[4]等。

ELID镜面磨削过程中,砂轮表面生成的氧化膜会直接影响ELID镜面磨削的加工性能和加工效率,且在整个磨削过程中始终发挥着至关重要的作用。砂轮表面生成的氧化膜一方面避免了砂轮结合剂与工件直接接触,减弱了砂轮对工件的振动和冲击^[5];另一方面,氧化膜可容纳、承托大量因电解而脱落的磨粒,使得砂轮的磨削类同游离磨粒的研磨、抛光效果,有利于提高磨削表面质量。国内外学者对ELID磨削氧化膜成膜性能及成膜机理等开展了一系列的研究工作。本文综述了ELID磨削砂轮表面氧化膜的研究现状,并对ELID磨削过程中氧化膜的研究重点进行了展望。

收稿日期:2017-07-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575179, 51205126);湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3073, 12JJB006)

1 氧化膜成膜过程及表征方法

1.1 ELID磨削氧化膜成膜过程

在ELID磨削过程中,金属结合剂砂轮为阳极,工具电极为阴极,电解过程中由于阳极溶解效应,砂轮表层的金属基体会被电解去除,同时在砂轮表面会形成一层具有绝缘作用的氧化膜。该氧化膜可以减缓和阻止进一步电解,使电解速度降低,避免砂轮损耗过快。随着砂轮表面磨粒磨损,出刃高度降低后,由于工件材料的刮擦,氧化膜变薄,导电性恢复,又使金属基体电解过程加快,氧化膜变厚。ELID磨削原理如图1所示^[6]。正是由于这种非线性电解作用,有效保证了加工过程中砂轮始终有突出的磨粒用以维持砂轮的锋利状态^[7]。

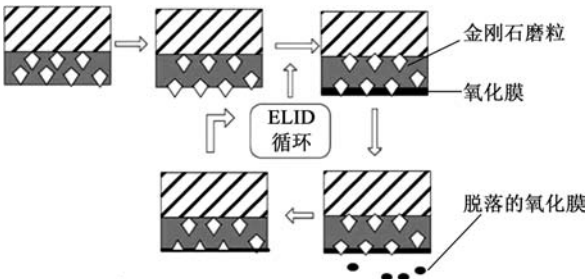
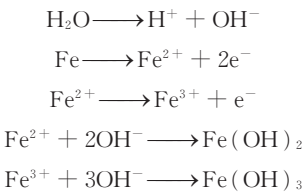


图1 ELID磨削加工机理

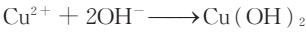
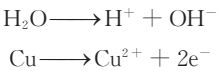
Fig.1 Mechanism of ELID grinding

一些学者对不同结合剂砂轮的氧化膜成膜过程进行了研究,如KHOSHAIM等^[8]分析了ELID磨削过程中铸铁基砂轮的氧化膜形成过程,发现ELID磨削过程中,砂轮表面主要发生了氧化还原的电解反应,其电解化学式如下:



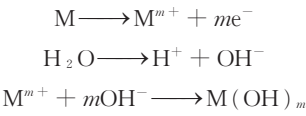
氢氧化铁在砂轮表面沉淀并氧化形成非导电氧化物层(Fe_2O_3),在形成氧化膜的反应中,最重要的就是 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 中 Fe^{2+} 的氧化以及 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的沉淀氧化形成 Fe_2O_3 。氧化和沉淀反应的速度越快,生成的氧化膜就越致密;反之,生成的氧化膜就越疏松。

青铜基砂轮虽然在氧化膜的生成速度和质量上不如铸铁基砂轮,但在砂轮制造工艺方面优于铸铁基砂轮。QIAN等^[9]分析了ELID磨削过程中青铜基砂轮的氧化膜形成过程,青铜基砂轮表面的氧化还原反应如下:



青铜基砂轮阳极在电解作用下溶解,然后 Cu^{2+} 在砂轮表面生成 $\text{Cu}(\text{OH})_2$, $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 在砂轮表面沉淀并氧化,生成不导电的氧化物层 CuO 。与铸铁基砂轮一样,氢氧化物的氧化与沉淀反应的速度越快,氧化膜的质量就越好。

此外,有学者研发了环境友好型的非金属结合剂砂轮并已应用于在线电解磨削加工。如NEMOTO等^[10]利用米糠、树脂等为主要原料试制了非金属导电结合剂砂轮,通过在高温下烧结使得树脂碳化产生导电性,从而实现了ELID磨削加工。他们利用扫描电子显微镜观测到磨削过程中在砂轮表面生成了非导电变质层,经分析认为这可能是由于磨削液成分在电解作用下逐渐在非金属结合剂砂轮表面析出,并经氧化后在砂轮表面形成非导体层,这层非导体层并不是金属氧化物膜,而是一层绝缘性的钝化膜。FATHIMA等^[11]提出了非金属结合剂砂轮的ELID反应原理氧化还原反应式:



其中,M为结合剂材料。

非金属结合剂砂轮的ELID磨削原理与金属结合剂砂轮大致相同,却又有所区别,主要表现在其钝化膜的生成速度、硬度、绝缘性等特性上与金属氧化膜有所不同。

1.2 ELID磨削氧化膜表征方法

砂轮表面生成的氧化膜主要是通过电解作用改变砂轮表层的化学和物理性质,使坚硬的砂轮结合剂外层具有一定弹性、厚度和强度,且可容纳大量微细磨料的氧化膜层^[12]。在ELID磨削过程中,通过电解作用在砂轮表面生成的氧化膜的动态平衡是实现镜面磨削的关键。由于ELID磨削过程中砂轮表面生成的氧化膜厚度及均匀性受许多因素的影响,故对氧化膜的状态进行表征分析是对氧化膜进行有效控制的前提。针对此,一些学者开展了ELID磨削氧化膜表征方法的研究。KARPUS-CHEWSKI等^[13]利用声发射技术分析了ELID磨削过程中砂轮与工件的接触状态,研究结果表明,对于不同的钝化膜厚度及致密性,声发射信号会呈现不同的频域和时域特征,信号幅值也会发生变化。当磨削加工处于稳定状态时,砂轮氧化膜的声发射信号是在小范围内周期波动,且信号的幅值较小;当磨削加工的状态改变时,氧化膜的电解平衡被打破,此时砂轮与工件之间的磨削力会产生变化,声发射信号也会随之发生明显的变化。

SALEH等^[14]根据ELID磨削过程中砂轮表面氧化膜周期生成和破损导致磨削力周期变动的规律,提出通过检测磨削力的变化来表征ELID磨削过程中的氧化膜状态。王海营^[15]认为尽管钝化膜自身不导电,但是由于其组织不致密,在磨削过程中氧化膜的空隙处渗透有导电性能良好的电解液,因而具有一定的导电性。导电性的强弱则受到钝化膜厚度及其致密性的影响,钝化膜厚、致密性好,则导电性能差;反之,则导电性能好,因此可以通过检测导电性能间接地表征氧化膜的状态。KERSS-CHOT等^[16]研究发现,在电压稳定的情况下,修整期间电解回路电阻增大,电流减小,电压保持恒定。氧化膜可以看作一个电容器和一个电阻器并联后再与一个电阻器串联的电路结构。若把整个电解回路看作一个电路,则氧化膜厚度大、致密性好时,氧化膜的总电阻值较高,整个回路总电阻较高,回路的电流较小;反之,若回路电流较大,则说明氧化膜的性能较差。可以通过检测ELID回路极间电流大小及变化来表征氧化膜状态。

2 EILD磨削氧化膜物理/化学特性

2.1 ELID磨削氧化膜的物理特性

氧化膜吸附在砂轮表面,直接与工件接触并参与磨削,氧化膜的物理性质直接影响ELID磨削的磨削效果^[17-18]。国内外学者对ELID磨削氧化膜物理特性的研究主要集中于氧化膜黏附强度、硬度、厚度、致密性、导电性和生成速度等参数。DAI等^[19]通过试验研究发现,ELID磨削过程中砂轮表面氧化膜最适宜的厚度为4~9 μm,该厚度的氧化膜增大了砂轮的电阻,抑制了砂轮的电解速度,避免了砂轮的过度电解,同时避免了砂轮的结合剂与工件直接接触,减弱了砂轮对工件的振动冲击,增加了实际参与磨削的磨粒数量,从而可提高磨削效率,延长砂轮的使用寿命。关佳亮等^[20]通过试验得出,回路电流的下降速度反映了氧化膜的生成速度,氧化膜生成达到稳定状态所需的时间为5~10 min,氧化膜的生成速度受到电解参数和磨削液的共同影响。郇吉才等^[21]通过实验发现,氧化膜的硬度会随着氧化膜中 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 含量的增加而有增大趋势,但基本在210 MPa左右,变化范围很小。杨黎健等^[22]在实验中采用胶带黏附氧化膜,计算将氧化膜全部黏附掉所需的次数来表征氧化膜的黏附强度。在1~5 A的不同电流值下,其黏附次数在5~11之间,随着电流的增大,黏附次数下降,氧化膜的厚度较大,致密性好,则黏附强度高。

此外,一些学者对氧化膜的检测方法进行了研究。如孙斌^[23]通过试验对比了橡皮擦刮擦法和胶带黏附法,认为胶带黏附法检测过程中恒定的胶带黏附力消除了人为因素的影响,黏附次数能综合反映氧化膜的厚度和致密性。FATHIMA等^[24]通过纳米压印法测量了氧化膜的弹性模量和接触刚度,其实验结果表明氧化膜的弹性模量一般在20~50 GPa之间,接触刚度为16.34 N/mm,认为氧化膜相比于基体(弹性模量为170~180 GPa)具有较低的刚度和弹性模量,使弹性变形易于发生,磨削时磨粒的等高性和协同性增强,有利于表面质量的改善。REN等^[25]通过测量ELID磨削过程中的电流来判断氧化膜的导电性,导电性侧面反映了氧化膜的致密程度,并通过ELID磨削过程中的电流变化来确定氧化膜的生成速度。MA等^[26]利用激光传感器和电涡流传感器对ELID磨削过程中的氧化膜厚度进行了动态检测,其检测结果表明,在预修锐前期,氧化膜的生成速度可达到12 μm/min,6 min后氧化膜的厚度达到了70 μm,之后氧化膜的生成速度逐渐变慢,通过调整电解电压、脉冲频率等电解参数可实现氧化膜厚度的有效控制。YANG等^[27]发明了一种新型高频脉冲电源用于氧化膜实时状态的监测和控制,该高频脉冲电源可通过大小脉冲的不断叠合来实现周期性的电解进而调节氧化膜的状态,并设计了一种模糊控制程序以控制生成的氧化膜厚度可在一定的范围内变化,从而实现了稳定的ELID磨削加工。

2.2 ELID磨削氧化膜的化学特性

ELID磨削过程中氧化膜是由砂轮结合剂中各种金属的氧化物和氢氧化物组成的混合物薄膜,其化学特性主要由砂轮结合剂、磨削液成分和电解参数所决定。ZHANG等^[28]通过研究发现,铸铁基砂轮ELID磨削氧化膜是由多种铁的氧化物和氢氧化物共同组成的,并在砂轮磨粒周围形成一个梯度分布,在磨削高温下氧化膜中 Fe_2O_3 和结晶水分解成为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$,并随着磨削温度的进一步上升,氧化铁成分从 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 完全转变为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。KUAI等^[29]结合X射线衍射、红外光谱分析和扫描电子显微镜观测等手段,详细分析了氧化膜表面的微观结构和成分,也认为EILD磨削砂轮表面氧化膜的成分是 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 以及不等含量的结晶水,其中 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 是一种仅次于铈基抛光粉的优良研磨剂,ELID研磨过程中氧化膜的抛光作用正是 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 带来的。此外,由于砂轮结合剂中不仅有铁还有铜等其他金属成分,故氧化膜中还应该有CuO、Cu₂O等氧化物成分,而在电解修整过程中,电解液中的化学物质中有部分会在砂轮表面沉积,

成为氧化膜成分的一部分。

对于青铜基砂轮,其表面的主要氧化物质是 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 及由其脱水生成的 CuO ^[30],但是,纯青铜砂轮会产生较快的阳极溶解,影响ELID磨削的效果,所以青铜基砂轮一般会采用添加了钴或铁的青铜基砂轮^[31]。KLOCKE等^[32]在使用专用磨削液进行砂轮氧化膜化学成分的试验中发现,在结合剂中添加钴和铁后,其氧化膜除了铜氧化物和其他结合剂氧化物之外,还有一部分的Mo氧化物,来自冷却剂的钼酸盐 MoO_4^{2-} 中的Mo在砂轮表面上形成了具有较强钝化作用的混合氧化物Fe-Mo-O和Co-Mo-O层,正是这层混合氧化物层增大了电解回路的电阻,弥补了单纯的青铜结合剂砂轮作为电解阳极时溶解过快的缺陷。

NEMOTO等^[10]分析了非金属结合剂砂轮在电解过程中生成的钝化膜,这层钝化膜是一层厚度约为130 μm 的变质层,该变质层的氧浓度很高,另外还观测到Mo等物质,可能是磨削液成分在电解作用下析出并经氧化后形成该非导体层,但该钝化膜具体成分和膜层结构仍有待深入分析。综上所述,ELID磨削砂轮表面氧化膜(钝化膜)是一层受各方面因素影响、化学成分复杂、既有化学物质的沉积也有结合剂电解氧化物的混合膜层。

3 氧化膜成膜影响因素研究

3.1 电解参数对氧化膜的影响

3.1.1 电解电压

电解电压主要影响电解反应氧化膜的生成速度。电解电压越高,电解反应进行的速度越快,在砂轮表面生成氧化膜的速度也就越快。但文献[33]指出,电解电压并不是越高越好。这是因为当电解电压值过高时,生成氧化膜的速度过快,电解反应生成的氧化物不能很好地沉淀在砂轮表面,氧化膜的致密性较差。ITO等^[34]通过实验提出电解电压的典型值为60~90 V,且不同磨粒粒度的砂轮对电解电压有着不同的要求。KERSSCHOT等^[35]通过研究发现,对于大粒度砂轮,电压的提升对氧化膜的形成速度和厚度的影响不大,采用较低电压即可;而对于细磨粒颗粒的砂轮,电解电压对氧化膜的成膜速度和厚度的影响较大,因此需要较高的电压来保证氧化膜的厚度和致密性。其他学者也得出了类似结论,如BAFAKEEH等^[36]采用粒度为400号的砂轮对蓝宝石进行了ELID高效磨削实验,采用了较低的修整电压70 V,以降低砂轮的损耗速度,获得了 $Ra=0.2 \mu\text{m}$ 的表面粗糙度。ZHANG等^[37]在使用粒度为4000号的砂轮对SiC涂层进行超精密磨削时,

因为磨粒的粒度较小,磨钝的速度较快,因此采用了较高的修整电压90 V以保证磨粒的锋利,并最终得到了 $Ra=7.2 \text{ nm}$ 的表面粗糙度。

3.1.2 占空比

除了电解电压以外,占空比也会对氧化膜的性能产生较大的影响^[38]。一般而言,随着占空比的增大,成膜速度加快,氧化膜的致密性增大。如LIM等^[6]通过研究发现,随着占空比的增大,磨削力减小,氧化膜的成膜速度加快,致密性提高,工件加工表面质量更好。FATHIMA等^[38]指出:对于粗磨粒砂轮而言,为了降低损耗,应采用较低的占空比;而对于细粒度砂轮,应采用较高的占空比以获得较高的表面质量。SHANAWAZ等^[39]也研究了不同占空比条件下的ELID磨削力和表面粗糙度,发现磨削力随着占空比的增大而减小,表面粗糙度随占空比的增大而降低,当占比空为60%时达到理想的加工效果。但SALEH等^[40]在随后的研究中指出,过高的占空比会大大提高砂轮的损耗速度,故ELID采用的占空比应该在25%~75%之间,这也是ELID磨削一般不采用直流持续电源的原因。ISLAM等^[41]开展了铸铁基砂轮的ELID磨削实验,实验结果也表明,当占空比为50%时,可获得理想的磨削效果,表面粗糙度可达到 $Ra=4 \text{ nm}$ 。

3.1.3 电极间距

RAHMAN等^[42]通过实验发现电极间距影响氧化膜的成膜速度和成膜质量,一般原则是在保证电极不与砂轮接触的情况下,取较小的电极间距,尤其在精磨、采用较小的电解电压时尽量使电极间距减小。肖强等^[43]通过研究发现,随着电极间距的逐渐减小,电流密度增大,氧化膜生成速度增大,电极间距较小的情况下,能有效提高电极间的电压梯度和密度,减少杂散腐蚀,从而提高生成氧化膜的均匀性。一般电极间距控制在0.1~0.3 mm左右^[44]。

3.2 电解液对氧化膜的影响

ELID磨削电解液的成分、流速及其pH值也是影响砂轮表面氧化膜特性的主要因素,它们对砂轮表面氧化膜的致密性,抗刮擦能力以及绝缘性等均有着非常重要的影响。

3.2.1 电解液成分

ELID磨削电解液中的电解质浓度决定了氧化膜的成膜速度,在一定的范围内,如果电解液中电解质浓度增大,电解反应速度也会提高,对生成氧化膜的速度和质量有促进作用;但如果电解质浓度过高,电解液就会失去成膜特性,无法生成氧化膜。这是因为电解反应速度过高,虽然在砂轮表面

形成了较厚的氧化膜层,但氧化膜自身的黏附强度太低,很容易在电解液的冲击以及磨削力作用下从砂轮表面脱落^[45]。一般来说,ELID磨削电解液通常采用弱电解质,与强电解质相比,采用弱电解质不但所形成的氧化膜的致密性更加良好,还能大大降低电解质对机床的腐蚀^[20]。除此之外,还可通过向电解液添加不同的添加剂,如防锈剂、消泡剂、极压添加剂等,达到相应的电解效果^[46]。

3.2.2 电解液流速

ELID电解液流入电极与砂轮间隙处的流速也会影响氧化膜的相关性能。IRANI等^[47]指出砂轮结合剂及电解液的成分不同,对电解液的注入流速有着不同的需求。对于氧化膜厚度较厚、成膜速度较快的ELID磨削加工,应该采用较小电解液注入速度,这是因为电解液注入速度越快,它对砂轮表面的冲击作用就越大,这种冲击力可能会使砂轮氧化膜被电解液冲击带走,降低氧化膜的黏附性;而在氧化膜较薄、成膜速度较慢的ELID磨削加工过程中,应选择较高的流速以增大电解液的穿透力,使阳极生成的金属阳离子与ELID磨削液中的阴离子结合生成沉积于砂轮表面的氧化物增多,以提高成膜速度和成膜厚度。如ISLAM等^[48]应用CG7型磨削液对硅片进行ELID磨削加工时,采用的流速较低,仅为31.4 L/h。该流速与其他相对较高的流速相比,生成的氧化膜更致密,在磨削时产生的磨削力也更小。而OHMORI等^[49]在采用AFG-M型磨削液对陶瓷进行ELID磨削时,选择的电解液流速达到了20~30 L/min,实际结果也证明在该流速下砂轮表面氧化膜的致密性好、厚度适中,最终实现了纳米级精度的表面粗糙度加工。

3.2.3 电解液的pH值

电解液的pH值也会对氧化膜性质产生影响。研究表明大部分金属在中性和弱碱性环境中的氧化速度比在酸性环境中的氧化速度快,而且大部分金属与酸生成的盐的溶解性大于在碱性环境反应生成的氢氧化物。最适宜ELID磨削氧化膜生长的电解液pH值在9~10之间^[50-51]。

3.3 砂轮结合剂成分对氧化膜的影响

除了ELID电解液外,砂轮结合剂成分也会对氧化膜造成一定的影响。ELID磨削使用的砂轮主要为金属结合剂砂轮。关佳亮等^[52]提出金属结合剂砂轮胎体成分主要是铸铁粉、铁粉和铜粉。结合剂中铁、铜的比例决定着结合剂的强度指标和电解成膜的速度及质量。其中,铜粉含量影响着结合剂电解速度,其含量越高,电解速度越快;铁粉和铸铁粉的含量决定着结合剂的强度、硬度以及

生成氧化膜的质量。铁的含量过高,结合剂难以电解,生成的氧化膜质量差。除此之外,在金属结合剂中添加适量的银、镍、锡、锌、铅等金属添加剂,可以提高结合剂的强度指标,改善热学性能及电解速度和成膜质量。金卫东^[53]通过实验发现,铸铁、铁和铜三种成分的氧化物和氢氧化物,都属于难溶化合物,这些氧化物和氢氧化物在金属基砂轮上沉积覆盖形成致密氧化膜。此外,OHMORI等^[54]对铸铁结合剂砂轮和青铜结合剂砂轮进行了ELID磨削对比研究,其结果表明铸铁结合剂砂轮成膜速度快、膜层较厚且均匀,在ELID镜面磨削中的加工精度稳定性好;青铜结合剂砂轮在电解时,表面不易生成氧化膜。这是因为铸铁中含有大量的石墨,石墨能促进铸铁的钝化,有利于在铸铁表面形成致密且附着牢固的氧化膜。申泽骥等^[55]对铸铁基砂轮的ELID磨削研究的结果也显示,铸铁中石墨、磷、硅等元素化合物的存在,会对形成的氧化膜起到钉扎作用,阻碍氧化膜的剥落,因此,在ELID磨削中大多采用铸铁结合剂砂轮。

此外,研究人员也开展了非金属结合剂砂轮的ELID磨削研究。非金属结合剂砂轮在磨削液的电解作用下并不是产生氧化膜,而是产生一层具绝缘性的钝化膜,但这层钝化膜的作用与金属基砂轮ELID磨削产生的氧化膜的作用是一样的。如耿宝功^[56]以竹炭粉、酚醛树脂、陶瓷为原料在高温下进行碳化处理,制备了新型的竹炭陶瓷砂轮,竹炭陶瓷砂轮的有机化合物在高温下热分解为碳和其他产物,增加了砂轮的导电性,而电解液中的物质被竹陶瓷所吸附并生成相应的氧化物进而形成一层变质层(钝化膜),磨削实验表明这种竹炭陶瓷砂轮电解速度快,修锐时间短,取得了较好的磨削效果。ITO等^[57]研发出了一种环境友好型的非金属结合剂砂轮,砂轮材料成分主要有树脂、碳粉和磨粒等,并利用8000号该结合剂金刚石砂轮开展了单晶硅的ELID磨削实验,实验结果表明磨削过程中砂轮表面生成了一层钝化膜,磨削表面粗糙度达到了30 nm。目前国内外针对非金属结合剂砂轮钝化膜的成分分析以及成膜机理方面的研究还比较少,但非金属结合剂砂轮制备工艺简单,环境友好,势必成为未来ELID磨削发展的一大主题。

4 研究展望

ELID氧化膜是影响ELID磨削加工性能和加工效率的重要因素。目前,国内外学者已在ELID磨削氧化膜特性以及影响因素等方面取得了一系列的研究进展,但ELID氧化膜的生成是一个复杂的过程,氧化膜的成膜机理及其有效控制方面仍有

待进一步深入研究。对此,笔者认为有以下几方面值得重点关注:

(1)进一步开展ELID磨削氧化膜成分以及物理/化学等特性研究,深入分析氧化膜的影响因素及其变化规律,建立不同结合剂砂轮的氧化膜特性数据库。

(2)系统分析ELID氧化膜特性指标与影响因素之间的对应关系,并建立氧化膜与电解工艺参数之间的数学模型,实现电解工艺参数的优化选取。

(3)采用新型传感器技术和检测方法,设计ELID磨削氧化膜物理/化学性能实时监测平台,深入分析氧化膜成膜过程及成膜机理。

(4)开展非金属结合剂砂轮及绿色环保新型砂轮的ELID磨削氧化膜研究,对其成膜成分、成膜特性及成膜质量等进行深入研究,实现绿色化的ELID镜面磨削加工。

参考文献:

- [1] OHMORI H, LIN W, KATAHIRAI K, et al. Developmental History and Variation of Precision and Efficient Machining Assisted with Electrolytic Process Principle and Applications[C]//The First International ELID Grinding Conference. Changsha, 2008:1-5.
- [2] YIN S H, OHMORI H, DAI Y T, et al. ELID Grinding Characteristics of Glass-Ceramic Materials [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49:333-338.
- [3] 尹韶辉, 曾宪良, 范玉峰, 等. ELID 镜面磨削加工技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2010, 21(6):750-755. YIN Shaohui, ZENG Xianliang, FAN Yufeng, et al. Research Progress of ELID Mirror Grinding Technology [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(6):750-755.
- [4] EBBRELL S, WOOLLEY N H, TRIDIMAS Y D, et al. The Effects of Cutting Fluid Application Methods on the Grinding Process [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40 (2):209-223.
- [5] 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.
- [6] LIM H S, FATHIMA K, KUMAR A S, et al. A Fundamental Study on the Mechanism of Electrolytic In-process Dressing(ELID) Grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 935-943.
- [7] SALEH T, RAHMAN M S, LIM H S, et al. Development and Performance Evaluation of an Ultra Precision ELID Grinding Machine [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192(10): 287-291.
- [8] 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 Abrasive Technology, 2014, 6 (4): 324-335.
- [9] QIAN J, OHMORI H, LIN W. Internal Mirror Grinding with a Metal/Metal-Resin Bonded Abrasive Wheel [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(2):193-208.
- [10] NEMOTO A, ITOH N, KATOH T, et al. Development of R. B. Ceramics Bonded Diamond Wheel for Eco-friendly ELID Grinding[J]. Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 2005, 48 (10):578-583.
- [11] FATHIMA K, SCHINHAERL M, GEISS A, et al. Wear Analysis of Electrolytically Dressed Wheels for Finishing Substrate Materials [J]. Tribology International, 2010, 43(2):245-251.
- [12] KIM H Y, AHN J H, SEO Y H. Study on the Estimation of Wheel State in Electrolytic In-process Dressing (ELID) grinding [C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Pusan, 2001:1615-1618.
- [13] KARPUSCHEWSKI B, WEHMEIER M, INASAKI I. Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2000, 49(1): 235-240.
- [14] SALEH T, BISHWAS I, RAHMAN M. Efficient Dressing of the Wheel in ELID Grinding by Controllable Voltage with Force Feed Back [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(1/4): 123-130.
- [15] 王海营. ELID磨削砂轮表面钝化膜状态表征与控制[D]. 天津:天津大学, 2007. WANG Haiying. Characterization and Control of Passivation Film Surface of ELID Grinding Wheel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [16] KERSSCHOT B, QIAN J, REYNAERTS D. On the Dressing Behavior in ELID Grinding [J]. Procedia CIRP, 2013, 6:632-637.
- [17] ZHANG F H, QIU Z J, KANG G W, et al. High Efficiency ELID Grinding of Garnet Ferrite [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129:41-44.
- [18] ZHANG K F, REN C Z, YANG L J, et al. Precision Internal Grinding of Bearing Steel Based on the State Control of Oxide Layer with Electrolytic In-process Dressing [J]. Journal of Materials Pro-

- cessing Technology, 2012, 212:1611-1621.
- [19] DAI Y, OHMORI H, LIN W M, 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.
- [20] 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.
GUAN Jialiang, GUO Dongming, YUAN Zhejun. Study on Properties and Effects of Grinding Wheel in ELID Mirror Grinding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(5):89-92.
- [21] 邹吉才, 张飞虎, 张勇, 等. ELID 磨削砂轮表面氧化膜力学性能 [J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 8(5):447-451.
KUAI Jicai, ZHANG Feihu, ZHANG Yong, et al. Mechanical Properties of ELID Grinding Wheel Surface Oxide Film [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2010, 8(5):447-451.
- [22] 杨黎健, 任成祖, 靳新民. ELID 磨削砂轮表面氧化膜状态的表征 [J]. 工具技术, 2011, 45(6):40-43.
YANG Lijian, REN Chengzu, JIN Xinmin. Study on the State of Oxide Film on ELID Grinding Wheel [J]. Tool Technology, 2011, 45(6):40-43.
- [23] 孙斌. ELID 磨削砂轮表面氧化膜状态表征 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
SUN Bin. Characterization of Oxide Film Surface of ELID Grinding Wheel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [24] FATHIMA K, RAHMAN M, KUMAR A S, et al. Modeling of Ultra-precision ELID Grinding [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2007, 129(2): 296-302.
- [25] REN C Z, CHE J M, WANG T Y, et al. ELID Grinding Based on the State Control of Passivating Films [J]. Key Engineering Materials, 2006, 315/316:225-229.
- [26] MA B J, WANG Y X. Principle and Method for Oxidation Layer Measurement in Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding [J]. Advanced Materials Research, 2011, 301/303(1):515-519.
- [27] 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: 1748-1753.
- [28] ZHANG H L, KUAI J C. Forming Mechanism of α -Fe₂O₃ in the Oxide Films on Iron-Bonded Diamond Wheel Surface by ELID Grinding [J]. Key Engineering Materials, 2016, 723:434-438.
- [29] KUAI J C, ARDASHEV D V, ZHANG H L. Study of α -Fe₂O₃ Formation and Its Measurement in Oxide Films of Wheel Surface during ELID Grinding Process [J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31(4):597-606.
- [30] 王树启. 砂轮在线电解修锐 (ELID) 技术在工程陶瓷高速磨削中的应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
WANG Shuqi. The Research on the Application of Electrolytic In-process Dressing Technology in High Speed Grinding of Advanced Ceramics [J]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [31] BIFANO T, KRISHNAMOORTHY R, FAWCETT H, et al. Fixed-load Electrolytic Dressing with Bronze Bonded Grinding Wheels [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1999, 121(1):20-27.
- [32] KLOCKE F, KLINK A, HENERICHS M. ELID Dressing Behaviour of Fine Grained Bronze Bonded Diamond Grinding Wheels [J]. International Journal of Abrasive Technology, 2009, 2(4):358-367.
- [33] 关佳亮, 郭东明, 周曙光, 等. ELID 镜面磨削技术——砂轮快速修整技术的研究 [J]. 制造技术与机床, 2001(4):18-20.
GUAN Jialiang, GUO Dongming, Zhou Shuguang, et al. ELID Mirror Grinding Technology—Grinding Wheel Rapid Trimming Technology Research [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2001(4):18-20.
- [34] ITOH N, OHMORI H, MORIYASU S, et al. Finishing Characteristics of Brittle Materials by ELID-Lap Grinding Using Metal-resin Bonded wheels [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998, 38(7):747-762.
- [35] KERSSCHOT B, QIAN J, REYNAERT D. Growth and Properties of the Passivation Layer in ELID Grinding [J]. The Third International Conference on Nano-manufacturing, 2012, 3:414-417.
- [36] BAFAKEEH O T, KHOSHAIM A B, MARI-NESECU I D. ELID Fine Grinding of Sapphire Rollers with Emphasis on Roughness and Material Removal Rate [J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 1249-1264.
- [37] ZHANG C H, OHMORI H, KATO T, et al. Evaluation of Surface Characteristics of Ground CVD-SiC Using Cast Iron Bond Diamond Wheels [J]. Precision Engineering, 2001, 25(1): 56-62.
- [38] FATHIMA K, KUMAR A S, RAHMAN M, et al. A Study on Wear Mechanism and Wear Reduction Strategies in Grinding Wheels Used for ELID Grinding [J]. Wear, 2003, 254(12):1247-1255.
- [39] SHANAWAZ A M, SUNDARAM S, PILLAI U T S, et al. Characteristics of Electrolysis In-pro-

- cess Dressing Grinding of Al/SiC_p Composite Materials[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(3):357-367.
- [40] SALEH T, RAHMAN M. In-Process Truing for ELID (Electrolytic In-Process Dressing) Grinding by Pulse Width Control[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2011, 8(2): 338-346.
- [41] ISLAM M M, KUMAR A S, BALAKUMAR S, et al. Characterization of ELID Grinding Process for Machining Silicon Wafers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198:281-290.
- [42] RAHMAN M, KUMAR A S, LIM H S, et al. Nano Finish Grinding of Brittle Materials Using Electrolytic In-process Dressing (ELID) Technique[J]. Sadhana, 2003, 28(5):957-974.
- [43] 肖强, 千学明, 沈云波, 等. ELID 镜面磨削硬质合金的工艺参数实验研究[J]. 制造技术与机床, 2007(4):75-79.
- XIAO Qiang, QIAN Xueming, SHEN Yunbo, et al. Experimental Study on Technological Parameters of ELID Mirror Grinding Carbide [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2007(4): 75-79.
- [44] YU X L, HUANG S T, XU L F. ELID Grinding Characteristics of SiC_p/Al Composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86:1165-1171.
- [45] 朱育权, 马保吉, STEPHENSON D J. ELID 超精密磨削砂轮表面氧化膜形成行为的实验研究[J]. 铸造技术, 2008, 29(8):1113-1115.
- ZHU Yuquan, MA Baoji, STEPHENSON D J. Experimental Study on the Formation Behavior of ELID Ultra-precision Grinding Wheel Surface Oxidation Film [J]. Foundry Technology, 2008, 29(8): 1113-1115.
- [46] 伍俏平, 王煜, 瞿为, 等. 在线电解修整磨削液研究现状及其展望[J]. 中国机械工程, 2017, 28(9):1118-1125.
- WU Qiaoping, WANG Yu, QU Wei, et al. Research Status and Perspectives of ELID Grinding Fluid[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(9): 1118-1125.
- [47] IRANI R A, BAUER R J, WARKENTIN A. A Review of Cutting Fluid Application in the Grinding Process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(15):1696-1705.
- [48] ISLAM M M, KUMAR A S, BALAKUMAR S. Performance Evaluation of a Newly Developed Electrolytic System for Stable Thinning of Silicon Wafers[J]. Thin Solid Films, 2006, 504(1):15-19.
- [49] OHMORI H, TAKAHASHI I, BANDYOPAD-
- HYAY B P. Ultra-precision Grinding of Structural Ceramics by Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 57(3/4):272-277.
- [50] KATAHIRA K, OHMORI H, UEHARA Y, et al. ELID Grinding Characteristics and Surface Modifying Effects of Aluminum Nitride (AlN) Ceramics[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(7/8): 891-896.
- [51] OHMORI H, KATAHIRA K, AKINOU Y, et al. Investigation on Grinding Characteristics and Surface-Modifying Effects of Biocompatible Co-Cr Alloy [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2006, 55(1):597-600.
- [52] 关佳亮, 郭东明, 周曙光, 等. ELID 镜面磨削技术——金属结合剂砂轮的研制[J]. 制造技术与机床, 2001(3):25-27.
- GUAN Jialiang, GUO Dongming, ZHOU Shuguang, et al. ELID Mirror Grinding Technology—Metal Binder Grinding Wheel Development [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2001(3): 25-27.
- [53] 金卫东. 硬脆材料氮化硅陶瓷的 ELID 超精密磨削技术研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
- JIN Weidong. ELID Ultra-precision Grinding Technology of Hard and Brittle Silicon Nitride Ceramics[D]. Tianjing: Tianjin University, 2005.
- [54] OHMORI H, NAKAGAWA T. Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1995, 44(1): 287-290.
- [55] 申泽骥, 苏贵桥. 铸铁的电化学腐蚀机理[J]. 现代铸铁, 2002(1):13-16.
- SHEN Zeji, SU Guiqiao. Electrochemical Corrosion Mechanism of Cast Iron [J]. Modern Cast Iron, 2002(1): 13-16.
- [56] 耿宝功. 竹陶瓷砂轮的电化学性能及新型 ELID 磨削液的研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2010.
- GENG Baogong. The Electrochemical Performance of Bamboo Ceramic Grinding Wheel and the New ELID Grinding Fluid [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
- [57] ITOH N, NEMOTO A, KATOH T, et al. Eco-Friendly ELID Grinding Using Metal-Free Electro-Conductive Resinoid Bonded Wheel[J]. JSME International Journal, 2004, 47(1):72-78.

(编辑 卢湘帆)

作者简介:伍俏平,男,1981年生,副教授。研究方向为新型工具制备及高效精密加工。获发明专利10余项。发表论文40余篇。E-mail:meishan11@sina.com.