

中间相炭微球对多层钎焊金刚石砂轮电解修整磨削性能的影响

刘 伟^{1,2*} 常佳起^{1,2} 李博鑫^{1,2} 严 灿^{1,2} 邓朝晖³ 万林林^{1,2}

1. 湖南科技大学机电工程学院,湘潭,411201

2. 湖南科技大学难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湘潭,411201

3. 华侨大学制造工程研究院,厦门,361021

摘要:大粒度多层钎焊金刚石砂轮在电解修整时氧化膜成膜质量差、厚度不足,进而导致磨削性能不佳,在磨料层中加入中间相炭微球(MCMB)可以改善这种状况。开展了不同 MCMB 含量对砂轮性能及其电解修整磨削特性影响的试验研究,结果表明:MCMB 能显著改善砂轮的电解成膜能力,氧化膜厚度最大达到 104 μm ,氧化膜的致密性与黏附性均有改善;含 MCMB 试验组的工件磨削表面形貌完整性更高,脆性破碎凹坑较少;当工件进给速度为 40 mm/s、磨削深度为 15 μm 时,体积分数为 5% 的 MCMB 试验组相比不含 MCMB 的试验组表面粗糙度 R_a 下降 29.8%;在工件进给速度 30 mm/s、磨削深度 20 μm 时,体积分数为 5% 的 MCMB 试验组相比不含 MCMB 的试验组亚表面损伤深度减小 47.9%。

关键词:多层钎焊砂轮;电解修整磨削;中间相炭微球;氧化膜;亚表面损伤

中图分类号: TG74; TG580.6

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influences of MCMBs on Electrolytic Dressing and Grinding Performances of Multi-layer Brazed Diamond Grinding Wheels

LIU Wei^{1,2*} CHANG Jiaqi^{1,2} LI Boxin^{1,2} YAN Can^{1,2} DENG Zhaohui³ WAN Linlin^{1,2}

1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201

2. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201

3. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian, 361021

Abstract: The oxide film of large particle size multi-layer brazed diamond grinding wheel had poor quality and insufficient thickness during electrolytic dressing, which led to poor grinding performances. MCMB were added to the abrasive layers to improve this situation. The effects of different MCMB contents on the performances of the grinding wheel and the electrolytic dressing grinding characteristics were investigated. The results show that MCMB may significantly improve the electrolytic film-forming ability of the grinding wheel, the maximum thickness of the oxide film is as 104 μm , and the compactness and adhesion are improved. The ground surface morphology of the test groups containing MCMB has higher integrity and fewer fracture pits. Compared with the test groups without MCMB, the values of surface roughness R_a of the MCMB test groups with a volume fraction of 5% decrease by 29.8% when the workpiece speed is as 40 mm/s and the grinding depth is as 15 μm , and the subsurface damage depth is reduced by 47.9% when the workpiece speed is as 30 mm/s and the grinding depth is as 20 μm .

Key words: multi-layer brazed grinding wheel; electrolytic dressing grinding; mesocarbon microbead(MCMB); oxide film; subsurface damage

0 引言

磨削通常用于加工硬质合金、工程陶瓷、光学玻璃等难加工材料,砂轮对磨粒把持能力的强弱

很大程度上决定了被磨削工件的表面质量^[1]。由于对磨粒的把持能力有限,传统固结磨料砂轮在磨削过程中很容易出现“掉砂”现象,不仅影响磨削精度,还会缩短砂轮的使用寿命。由钎焊技术制备的金属结合剂砂轮对磨粒的把持能力较强,能够避免磨粒过早脱落^[2]。在钎焊过程中,合金钎料中的 Ti、Cr 等活性元素会与金刚石磨粒表面

收稿日期:2024-11-07

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U23A20634);湖南省自然科学基金(2023JJ30251);湖南省学位与研究生教学改革研究项目(2023JGSZ091)

发生反应,实现化学冶金结合,有效防止磨粒的过早脱落,进而提高磨削精度与效率^[3]。

目前常用的钎焊砂轮主要为单层钎焊砂轮,即在砂轮表面仅有一层磨粒。DAI 等^[4]采用单层钎焊金刚石砂轮对 SiC 陶瓷进行磨削试验,发现采用高速、蠕变进给和深度磨削的方法可以实现对 SiC 陶瓷的高效、低损伤磨削。LI 等^[5]制备了一种含有微槽和微孔的微织构单层钎焊金刚石砂轮,该砂轮在 SiCp/Al 复合材料磨削表面上产生的磨屑小, SiC 颗粒的断裂、压碎和脱落也少。由于磨粒磨钝后无法更新,因此单层钎焊砂轮寿命较短,为解决此问题,课题组前期研制了对磨粒把持能力强的多层钎焊金刚石砂轮,配合在线电解修整(electrolytic in-process dressing, ELID)技术,实现了超细晶粒硬质合金高效精密磨削^[6]。伍俏平等^[7]在对大粒度砂轮电解修整时发现,与普通电解液相比,多壁碳纳米管的加入增强了电解液电解能力,氧化膜厚度增加了 40 μm ,此时更多金属结合剂被溶解,磨损磨粒脱落更容易;同时,由于氧化膜厚度的增大能够容纳更多的碳纳米管,氧化膜的黏附性得以提高,而黏附性较强的氧化膜有着良好的研抛性能,能提高工件的磨削表面质量。ALQAHTANI 等^[8]指出,为防止氧化膜厚度不一致,在电解修整时应确保电解液在电极间隙中均匀流动,同时电解电压也需严格控制,否则容易导致氧化膜烧伤,影响磨削性能。此外,万林林等^[9]发现,要保证电解修整时氧化膜的致密性,必须控制合理的电极间隙。课题组前期试验发现,钎料中 Ti 元素生成的自钝化膜会隔绝磨料层与电解液的接触,影响砂轮的阳极溶解,导致电解修整过程生成的氧化膜厚度薄、质量较差^[10]。对于大粒度磨粒砂轮,由于磨粒在基体中的嵌入深度大,电解修整不充分时会造成磨钝磨粒无法及时脱落,严重影响磨削效果。因此,改善砂轮的电解修整性能,进一步优化大粒度多层钎焊砂轮的在线电解修整磨削效果很有必要。

金属材料在发生石墨化腐蚀时表现为腐蚀速率增大,能有效提高氧化膜的黏附性与致密性^[11]。在砂轮电解修整时能发生石墨化腐蚀现象的常见碳族材料有碳纳米管、石墨烯、石墨以及中间相炭微球(mesocarbon microbeads, MCMB)等。碳纳米管和石墨烯由于摩擦学性能和导电性良好、抗载荷能力强,在磨削加工中应用广泛^[12],但这两种材料的分散效果不佳,与钎料合金粉末的混合难度较大,而且含 Ti 钎料在长时间的球磨分散后可能会氧化,影响钎焊效果。石墨的层片状结构在受到剪切载荷时容易产生破坏,导致砂

轮基体的抗弯强度大幅下降,加剧断裂裂纹的扩展^[1]。而 MCMB 具有优良的导电、导热、化学稳定性及润滑性,且力学性能良好,在载荷作用下不易变形、破坏^[13]。因此,本文为了研究不同 MCMB 含量对多层钎焊金刚石砂轮节块性能及电解修整的影响,将 MCMB 添加到砂轮结合剂中,分析了 MCMB 含量对砂轮电解成膜性能的影响,包括电电信号、氧化膜厚度与黏附强度、微观形貌,并开展了多层钎焊金刚石砂轮 ELID 磨削试验,从表面形貌、表面粗糙度、亚表面损伤等角度进行磨削性能对比。

1 砂轮节块制备及其性能分析

1.1 砂轮节块制备

本文所用 MCMB 由广州纳诺化学技术有限公司提供,粒径为 10 μm 。金刚石磨粒由河南万磨金刚石有限公司提供,型号为 WMD760,粒度为 80/100;合金钎料粉末 Cu-Sn-Ti 由长沙天久金属材料有限公司提供,各组分质量比为 75 : 10 : 5,粒度为 300 目。制备了 0.5%、10% 三种不同 MCMB 含量(体积分数)的混合粉末以备后续研究,其中金刚石浓度为 100%。将金刚石磨粒、合金粉末、MCMB 以及甘油混合后装入 DWH-10 三维混料机以 100 r/min 的速度混合 30 min。其中丙三醇为成形剂,添加量为 1.5%(质量分数)。

采用模压成形技术制备不同 MCMB 含量的多层钎焊金刚石砂轮节块生坯,并用真空钎焊工艺烧出节块成品试样。使用 WHY-600 压力试验机与自制分离式模具对混料进行模压成形。在此之前,需喷涂干性脱模剂以便顺利脱模。图 1 所示为模压成形试验装置。设置加载速度为 0.25 kN/s,成形压力为 100 MPa,保压时间为 10 min。炉内真空钎焊在 GSL-1400X 管式炉中进行,升/降温速度为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,钎焊温度为 920 $^{\circ}\text{C}$,保温 10 min。图 2 所示为烧结后的两种钎焊试样。长方形试样用于力学性能及内部形貌测试,弧形试

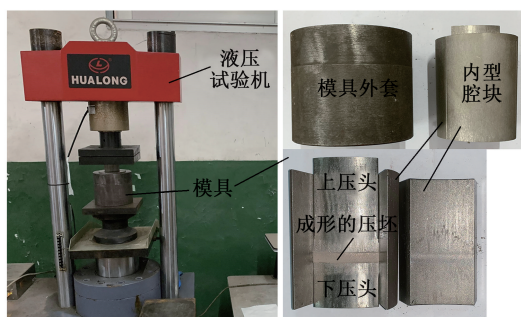


图 1 模压成形试验装置与模具

Fig.1 Compression molding test system and mold

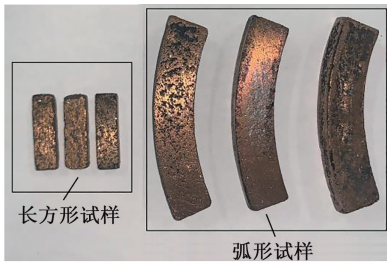


图 2 制备的试样

Fig.2 Prepared specimens

样用于电解成膜及ELID 磨削试验。

1.2 砂轮节块性能

采用三点抗弯法测试不同 MCMB 含量试样的抗弯强度。试验中夹具两支点间跨距为 12.5 mm,加载速率为 0.5 mm/min,记录节块断裂时的最大压力值。每组试验重复三次,结果如表 1 所示。当添加体积分数为 5% 的 MCMB 后,节块的抗弯强度由 248.44 MPa 提高到 402.47 MPa,这是因为均匀分布在磨料层中的 MCMB 由于力学性能良好,外部施加载荷时不易被压溃,并且会阻碍节块表面载荷及裂纹向内部延伸;当 MCMB 体积分数达到 10% 后,抗弯强度显著下降,这是因为 MCMB 与 Ti 元素反应生成 TiC 时会消耗基体中大量的 Ti 元素,造成与磨粒表面反应的 Ti 元素减少,影响钎焊效果,使得节块抗弯强度下降^[14]。此外,MCMB 含量过高时,会相当于“杂质点”,降低节块的致密化程度,这是因为合金钎料在烧结过程中的熔融混合受到了阻碍。

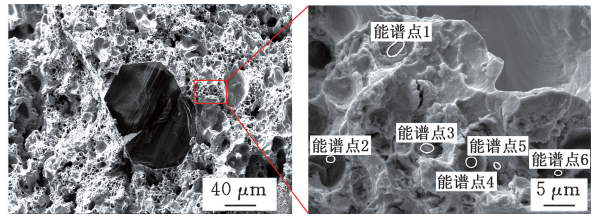
表 1 不同 MCMB 含量砂轮节块的抗弯强度

Tab.1 Bending strength of grinding wheel segments with different MCMB content

| 序号 | MCMB 体积分数 $\varphi_{MCMB}/\%$ | 平均抗弯强度 σ/MPa |
|----|-------------------------------|---------------------|
| 1 | 0 | 248.44 |
| 2 | 5 | 402.47 |
| 3 | 10 | 196.63 |

在完成抗弯强度测试后,试样被完全破坏,利用 EVO MA10 扫描电子显微镜与 X-MAX 50 能谱仪观察、分析试样断口处的形貌与元素分布情况,结果如图 3 所示。图 3a 所示为体积分数为 10% 的 MCMB 砂轮节块试样的断口形貌。黑色点状物质 MCMB 在金属结合剂中的分布较为均匀,无明显团聚现象;合金钎料熔化充分,金刚石磨粒边缘被结合剂紧密包裹,基体致密性高。图 3b 所示为图 3a 的局部放大与能谱点位置,可以看出,断面上的 MCMB 与基体紧密结合,并未发生破坏。表 2 所示为图 3b 的能谱分析结果,验证了图中黑色点状物质为 MCMB。

图 4 所示为金刚石磨粒焊接接头处的 EDS 分层放大图像,在金刚石磨粒附近有明显的 Ti 元



(a)断口形貌

(b)能谱点位置

图 3 试样的断口形貌与能谱点位置

Fig.3 The fracture morphology and energy spectrum point position of the specimen

表 2 能谱成分分析结果

Tab.2 Results of energy spectrum composition analysis

| 能谱点 | 各成分质量分数 $w/\%$ | | | |
|-----|----------------|-------|------|-------|
| | C | Cu | Sn | Ti |
| 1 | 25.90 | 41.56 | 8.14 | 24.31 |
| 2 | 56.83 | 22.45 | 4.30 | 16.42 |
| 3 | 31.27 | 45.26 | 6.03 | 16.99 |
| 4 | 81.82 | 6.30 | 1.80 | 10.08 |
| 5 | 67.31 | 13.15 | 6.89 | 12.65 |
| 6 | 73.54 | 18.07 | 0 | 8.39 |

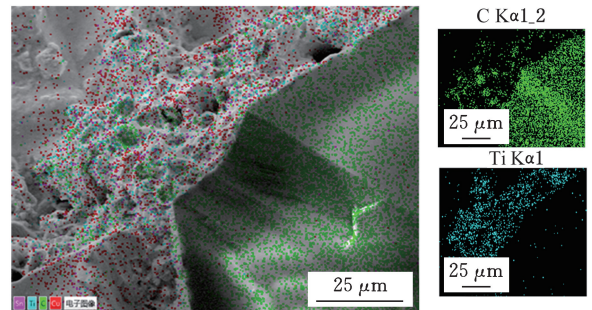


图 4 磨粒接头处的 EDS 分层放大图像

Fig.4 EDS layered enlarged image at the abrasive joint

素聚集现象,同时 C 元素也有较大的分布区域,表明结合剂与金刚石磨粒实现了化学冶金结合,这也能间接验证表 2 中的能谱分析结果。

2 MCMB 对砂轮电解成膜性能影响

通过对电解电流、氧化膜厚度与黏附性、微观形貌的检测与分析,研究 MCMB 对多层钎焊金刚石砂轮电解成膜性能的影响。电解修整试验中使用的电解液基于本课题组前期研究成果^[7],主要成分为去离子水,其余成分如表 3 所示。其中

表 3 电解液添加成分及比例

Tab.3 Electrolyte additive composition and proportion

| 主要成分 | 质量分数 $w/\%$ |
|-----------|-------------|
| 二水合钼酸钠 | 8 |
| 十二水合磷酸氢二钠 | 1.5 |
| 十水合四硼酸钠 | 0.5 |
| 甘油 | 0.5 |
| 氯化钠 | 0.3 |
| 磷酸三丁酯 | 0.2 |

钼酸钠与磷酸氢二钠作为缓蚀剂,防止电解修整过度;甘油起到润滑作用;四硼酸钠用于机床防锈;氯化钠在电解液中可以水解出氯离子,能将 Ti 元素形成的自钝化膜点蚀去除,避免影响氧化膜的生成;磷酸三丁酯用作消泡剂。

图 5 所示为电解修整试验系统,采用 HD-MD-V 高频脉冲电源为电解修整提供电能。相关电解工艺参数如表 4 所示^[7,9-10]。

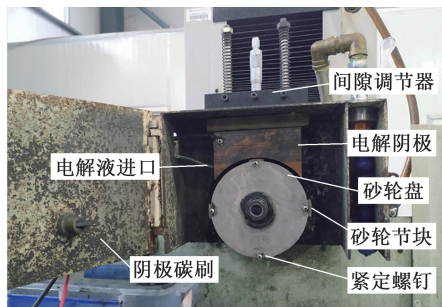


图 5 电解修整试验系统

Fig.5 Electrolysis dressing test system

表 4 电解修整工艺参数

Tab.4 Electrolytic dressing process parameters

| 电解修整参数 | 参数数值 |
|--|---------|
| 回路电压/V | 90 |
| 脉冲周期/ μs | 10 |
| 占空比/% | 50 |
| 电极间距/mm | 0.4~0.5 |
| 电解液流量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) | 1.5 |

2.1 电解电信号

电信号能够很好地表征电解修整过程中氧化膜的成膜状态,其值可通过在电解回路中的阴阳两极之间串联万用表测得,测量间隔为 20 s。不同体积分数的 MCMB 节块的电解电流测量结果如图 6 所示。

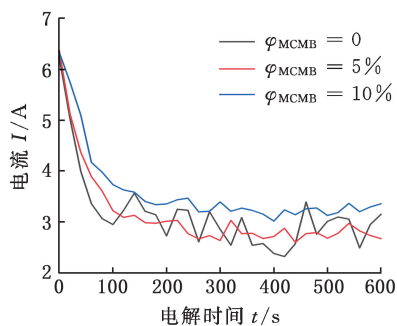


图 6 电解电流变化

Fig.6 Electrolytic current changes

在电解反应刚开始时,三种不同 MCMB 含量的砂轮节块初始电流值基本相同。在电解反应初期,电流下降速率略有不同,其中零含量 ($\varphi_{\text{MCMB}}=0$) MCMB 的节块下降最快,达到了 2.04 A/min。这是因为 MCMB 在电解反应区域充当强阴极相,在电解修整中发生了石墨化腐蚀,增强

了电解效果,使更多的金属结合剂在电解修整过程中被去除。

在 300~600 s 阶段内,电解修整基本完成,此时的电流值趋于平稳。选用 300~600 s 内间隔为 20 s 的 16 个电流采样点计算平均电流及总体标准偏差,体积分数分别为 0、5%、10% 的 MCMB 电解平均电流分别为 2.78 A、2.88 A、3.29 A,总体标准偏差值分别为 0.34 A、0.11 A、0.09 A,如图 7 所示。此时 MCMB 被包裹在氧化膜内部,未受到电解反应的影响,反而增加了氧化膜的强度与致密性。当 MCMB 体积分数达到 10% 后,电解后期的平衡电流趋于稳定。此时氧化膜的存在阻碍了电解反应的进行,导致电解电流减小,但由于氧化膜中的微小孔隙能够容纳电解液,这部分电解液可与导电性能优异的 MCMB 共同形成导电通路,增大了稳定电流值。在两者的共同作用下,电解电流趋于稳定。

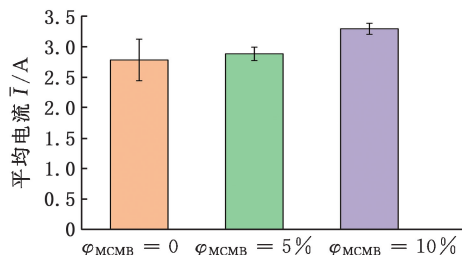


图 7 平均电流偏差对比

Fig.7 Comparison of average current deviation

2.2 氧化膜厚度及黏附性

在电解修整过程中,氧化膜的存在能防止砂轮修整过度,同时还能承载破碎磨料,起到一定的研磨抛光作用,因此氧化膜需要具有足够的厚度。在一定范围内,氧化膜越厚,ELID 磨削后工件的表面质量越好^[7,15]。

在电解修整完成后,将试样侧面打磨平整,使用超景深显微镜观测氧化膜厚度,以分析不同 MCMB 含量对电解生成氧化膜厚度的影响,试验结果如图 8~图 10 所示。零含量 MCMB 的节块在电解 10 min 后生成的氧化膜厚度仅为 56 μm ,大部分磨粒出刃高度较低,导致砂轮表面容屑空间不足。而当 MCMB 体积分数为 5% 时,氧化膜厚度增加至 104 μm ,金属结合剂被有效去除,磨粒出刃高度和容屑空间都显著增加。此时出露的多数磨粒都被氧化膜包覆,而氧化膜对磨粒把持能力较弱,在磨削力作用下,磨粒磨钝后能够及时脱落,砂轮可以一直保持较高的锋利度^[16]。较厚的氧化膜在磨削中还能起到减振抛光作用。当 MCMB 体积分数为 10% 时,氧化膜厚度略有减小,为 95 μm ,氧化膜成膜厚度减小是由于 MC-

MB 的含量增加时,MCMB 颗粒会沉积在氧化膜表面的微孔中,阴阳两极间的离子交换将受到抑制,导致金属结合剂不能有效溶解。

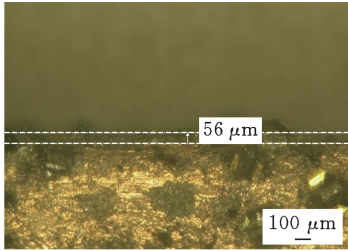


图 8 无 MCMB 砂轮节块电解氧化膜厚度

Fig.8 Thickness of electrolytic oxide film on grinding wheel segment without MCMB

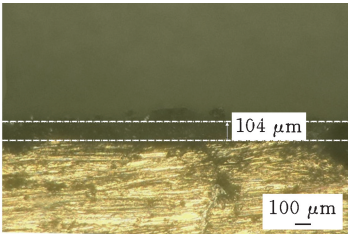


图 9 体积分数为 5% MCMB 砂轮节块电解氧化膜厚度

Fig.9 Thickness of electrolytic oxide film on grinding wheel segment containing 5% volume fraction MCMB

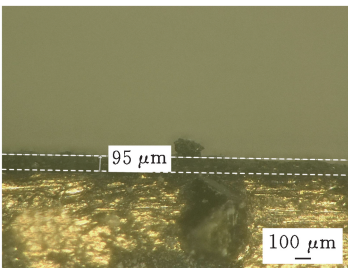


图 10 体积分数为 10% MCMB 砂轮节块电解氧化膜厚度

Fig.10 Thickness of electrolytic oxide film on grinding wheel segment containing 10% volume fraction MCMB

本文使用胶带黏附法测试 MCMB 含量对氧化膜黏附性的影响^[17]。零含量 MCMB 试验组的黏附次数为 8,而体积分数为 5%、10% MCMB 试验组的黏附次数分别为 11 次和 10 次。分布在氧化膜中 MCMB 由于分散强化作用,有效保持了膜层的稳定性,进而改善了氧化膜的致密性和黏附强度,减少了其脱落的可能性。

2.3 氧化膜微观形貌

使用扫描电子显微镜观察零含量 MCMB 的节块与体积分数为 5% MCMB 的节块电解 10 min 后生成的氧化膜微观组织 SEM 图像,结果如图 11、图 12 所示。

由图 11 可以看出,不含 MCMB 的氧化膜微观表面形貌孔隙较多,表面凹凸不平,致密性差且质地松散。氧化膜的这种松散结构在 ELID 磨削时会因为黏附强度差而导致局部破损和过早脱

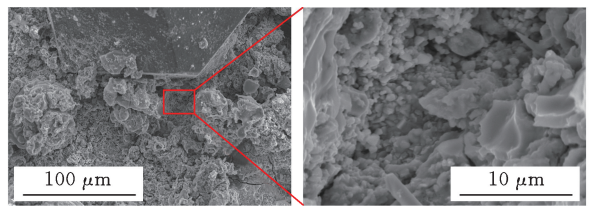


图 11 无 MCMB 试验组氧化膜 SEM 图像

Fig.11 SEM images of oxide film in the experimental group without MCMB

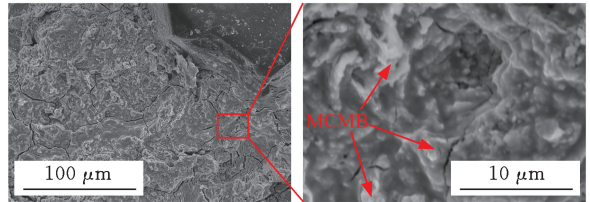


图 12 含 MCMB 试验组氧化膜 SEM 图像

Fig.12 SEM images of oxide film of experimental group containing MCMB

落,降低磨削过程的稳定性并增大砂轮损耗。相反,由图 12 可以看出,由于 MCMB 的参与,氧化膜厚度增加,减少了表面孔隙数量,氧化膜的致密性得以提高。这一现象进一步解释了含 MCMB 试样电解电流较为稳定的原因。

2.4 MCMB 对电解修整过程的影响

图 13 为含 MCMB 的砂轮节块在电解修整时氧化膜生长示意图。磨料层中析出的金属离子能与电解液中的氢氧根离子反应沉淀在砂轮表面,生成氧化膜^[18]。电解反应初期,在电解反应区域的 MCMB 能够使电解修整过程发生石墨化腐蚀,加快金属结合剂电解腐蚀过程,生成更厚的氧化膜,此时金刚石磨粒的出刃高度也更高。结合剂中的 MCMB 在电解修整时会被释放到电解液中,进而被氧化膜包裹,作为骨架又能提高氧化膜的致密性与强度。

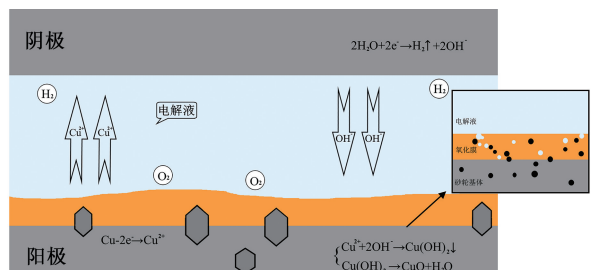


图 13 含 MCMB 砂轮节块电解氧化膜生成示意图

Fig.13 Schematic diagram of electrolytic oxide film formation of grinding wheel segments containing MCMB

3 MCMB 对砂轮 ELID 磨削的影响

使用 $\varphi_{MCMB} = 0$ 、 $\varphi_{MCMB} = 5\%$ 的 MCMB 砂轮节块对超细晶硬质合金开展 ELID 磨削试验,两

试验组磨削工艺参数相同,如表 5 所示。试验材料为 GU25UF 超细晶粒硬质合金,磨削试验在 MGK7120×6F 磨床上进行,电解修整参数与前一节相同。使用图 14 所示夹具将砂轮节块安装到磨床主轴上。在磨削试验开始之前使用 ELID 电源配备的电火花整形装置对砂轮进行修整。

表 5 ELID 磨削试验工艺参数

Tab.5 ELID grinding test process parameters

| 参数 | 取值 |
|--|------------|
| 砂轮线速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 20 |
| 工件进给速度 $v_w / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ | 20,30,40 |
| 磨削深度 $a_p / \mu\text{m}$ | 5,10,15,20 |
| 磨削方式 | ELID 磨削 |

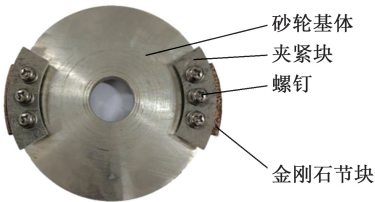


图 14 砂轮节块夹具

Fig.14 Grinding wheel segment fixture

3.1 表面形貌

图 15、图 16 所示分别为零含量 MCMB 与 $\varphi_{\text{MCMB}} = 5\%$ MCMB 试验组在 $v_w = 40 \text{ mm/s}$ 时的工件表面超景深显微镜观测结果。

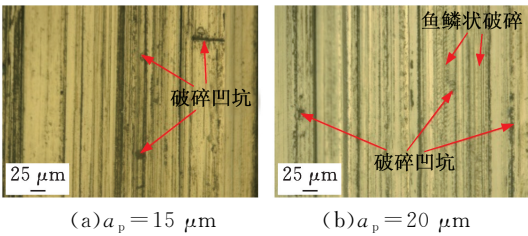


图 15 零含量 MCMB 试验组的工件表面形貌

Fig.15 Surface morphology of the workpiece in the test group without MCMB

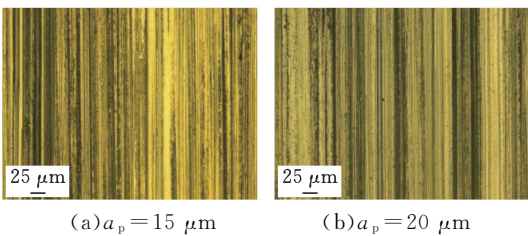


图 16 体积分数为 5% MCMB 试验组的工件表面形貌

Fig.16 Surface morphology of the workpiece in the test group containing 5% volume fraction MCMB

在零含量 MCMB 试验组中,随着磨削深度增大,工件表面划痕变宽,这是由于层厚不足、不够均匀的氧化膜在磨削力的作用下会逐渐减薄甚至破损,而且其再生速度小于磨损速度,导致磨钝磨粒无法及时脱落,与工件接触面积增大,出现更

宽的划痕,加工表面也变得更粗糙。当 $a_p = 15 \mu\text{m}$ 时,由于氧化膜厚度不均,局部磨削力会增大,在滑擦和耕犁作用下,工件表面会产生破裂凹坑;当 $a_p = 20 \mu\text{m}$ 时,材料去除方式以脆性去除为主。磨削深度的增大会导致磨削力和磨削温度升高,材料内部会产生较大的热应力,容易在表面产生微裂纹,裂纹拓展时会形成鱼鳞状破碎。

在体积分数为 5% MCMB 试验组中,工件表面质量得到改善,破碎凹坑和鱼鳞状破碎显著减少。由于 MCMB 的加入,砂轮表面产生了更厚、黏附性更强的氧化膜,能使磨粒始终保持较高的锋利度,减少了划痕的宽度和深度,从而使工件表面更加光滑。当 $a_p = 20 \mu\text{m}$ 时,工件表面形貌比零含量 MCMB 试验组的更好,未观察到鱼鳞状破碎。这是由于氧化膜能有效防止磨粒直接作用于工件表面,起到缓冲支撑作用,能减轻工件表面的局部应力集中,从而减少脆性材料的破裂倾向。MCMB 也能提高电解液的润滑性和散热性,减少摩擦热,避免了因热应力引发的表面破裂。此外,氧化膜中存在的破碎微磨粒能起到研磨抛光作用,使表面形貌得到改善。

3.2 表面粗糙度

使用 TR200 表面粗糙度仪测量加工表面粗糙度,图 17、图 18 显示了不同磨削参数下的表面粗糙度值 R_a 。可以看出, R_a 值会随着 v_w 和 a_p 的增大而增大,当 $v_w = 40 \text{ mm/s}$ 且 $a_p = 15 \mu\text{m}$ 时,与未添加 MCMB 相比,MCMB 的加入使 R_a 值减小了 29.8%。出现这种差异的原因是不含 MCMB 时,氧化膜层厚不足且致密性不佳,导致磨粒直接作用于工件表面,磨损过后不能及时脱落。此时的材料去除更多依赖于挤压摩擦,会导致工件表面形成划痕和凹坑,表面粗糙度变差。而加入 MCMB 后,成膜质量显著提高,氧化膜有效隔离了金属结合剂与工件表面的直接接触,减缓了磨粒的磨钝过程,还能促使磨钝磨粒脱落,始

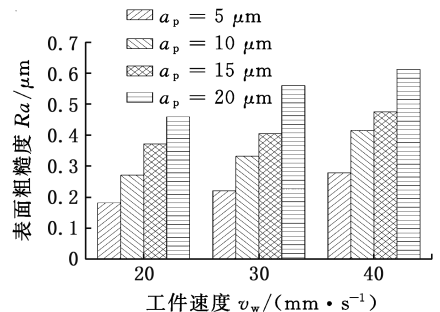


图 17 零含量 MCMB 试验组的工件表面粗糙度

Fig.17 Surface roughness of the workpiece in the test group without MCMB

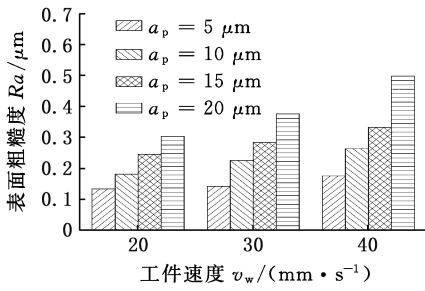


图 18 体积分数为 5% MCMB 试验组的工件表面粗糙度

Fig.18 Surface roughness of workpieces in the test group containing 5% volume fraction MCMB

始终保持有效切削磨粒的数量。其次,氧化膜厚度的增加能容纳更多的 MCMB 和破碎磨粒,对加工表面起到研磨润滑作用。因此,加入 MCMB 后工件的表面粗糙度值更小。

3.3 亚表面损伤

使用体积分数为 1% 氢氟酸溶液对两个试验组的工件端面进行酸蚀处理,以去除端面在研磨抛光后出现的塑性层,并检测其亚表面损伤深度,结果如图 19、图 20 所示。在 $v_w = 30 \text{ mm/s}$, $a_p = 20 \mu\text{m}$ 时,含 MCMB 试验组的亚表面损伤深度 ($9.28 \mu\text{m}$) 显著小于不含 MCMB 的试验组 ($17.82 \mu\text{m}$),由裂纹延伸导致的块状脱落也更少。这是因为在磨削过程中氧化膜起到了缓冲和支撑作用,减少了磨钝磨粒对工件表面的反复冲击,降低了微观裂纹和缺陷的产生。此外,氧化膜的抛光

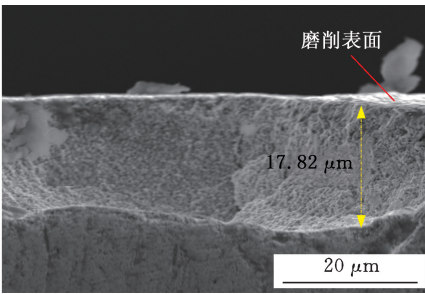


图 19 不含 MCMB 试验组的工件亚表面

Fig.19 Subsurface of the workpiece in the test group without MCMB

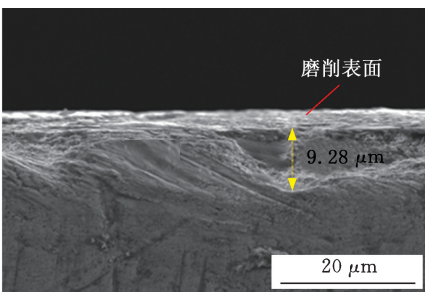


图 20 含 MCMB 试验组的工件亚表面

Fig.20 Subsurface of the workpiece in the test group containing MCMB

作用以及 MCMB 良好的润滑效果也有助于减小磨削亚表面损伤深度。

4 结论

通过在 Cu-Sn-Ti 合金粉末中添加中间相炭微球(MCMB),配合模压成形技术和真空烧结工艺,制备了不同含量 MCMB 的多层钎焊金刚石砂轮,并开展了不同含量 MCMB 对砂轮性能及其电解修整磨削特性影响的试验研究。结果表明:

1) MCMB 含量的增加使砂轮节块的抗弯强度先增强后减弱,在体积分数为 5% 时达到最大值 402.47 MPa。经 EDS 分析发现,结合剂与金刚石磨粒实现了化学冶金结合,基体致密度较高。

2) 添加体积分数为 5% 的 MCMB 能有效改善砂轮电解成膜性能,成膜厚度最大达到了 $104 \mu\text{m}$,致密性与黏附性均有改善,能使氧化膜有效发挥研磨抛光作用。

3) MCMB 有效促使了磨钝磨粒的及时脱落,改善了磨削表面形貌,提高了磨削表面的完整性。当工件进给速度 $v_w = 40 \text{ mm/s}$ 、磨削深度 $a_p = 15 \mu\text{m}$ 时,体积分数为 5% 的 MCMB 试验组 Ra 值比不含 MCMB 的试验组 Ra 值减小 29.8%;当 $v_w = 30 \text{ mm/s}$ 、 $a_p = 20 \mu\text{m}$ 时亚表面损伤层深度达到了 $9.28 \mu\text{m}$ 。在一定范围内,氧化膜厚度越高,对磨削亚表面造成的损伤越小。

参考文献:

[1] MIAO Q, DING W F, FU D K, et al. Influence of Graphite Addition on Bonding Properties of Abrasive Layer of Metal-bonded CBN Wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5):2675-2684.

[2] 张曦, 李本凯, 丁文锋. 钎焊 CBN 砂轮与陶瓷 CBN 砂轮磨削粉末冶金高温合金的加工性能对比研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(4):64-71.

ZHANG Xi, LI Benkai, DING Wenfeng, et al. Comparative Study on Machining Behavior of Brazed CBN Wheel and Vitrified CBN Wheel during Grinding Powder Metallurgy Superalloy[J]. Diamond & Abrasive Engineering, 2021, 41(4):64-71.

[3] 赵鹏程. Cu-Sn-Ti 钎料陶瓷金刚石砂轮的研制与性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.

ZHAO Pengcheng. Research and Development of Cu-Sn-Ti Cermet Diamond Grinding Wheel [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[4] DAI J B, CAO S Y, WANG Z B, et al. Experimental Investigation on the Feasibility of High-efficiency and Precision Grinding of Silicon Carbide Ceramics

- with Monolayer Brazed Diamond Wheel[J]. Materials Today Communications, 2023, 37:107037.
- [5] LI K J, LIAO Y L, ZHOU Y M, et al. Study on-Grinding of SiCp/Al Composites by Micro-textured Monolayer Brazed Diamond Wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(9):4607-4615.
- [6] YU X L, HUANG S T, XU L F. ELID Grinding Characteristics of SiCp/Al Composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5):1165-1171.
- [7] 伍俏平, 欧阳志勇, 阳慧, 等. 碳纳米管对大粒度多层钎焊金刚石砂轮电解修整磨削性能的影响研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(7):231-239.
- WU Qiaoping, OUYANG Zhiyong, YANG Hui, et al. Influence of Carbon Nanotubes on Electrolytic Dressing Grinding Performance of a Multi-layer Brazed Coarse-grained Diamond Wheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(7):231-239.
- [8] ALQAHTANI B, ZHANG M M, MARINESCU I, et al. Microscopic Characterization and Modeling of Oxide Layer for Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding with Focus on Voltage, Electrode-wheel Gap, and Coolant Flow[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(12):4853-4862.
- [9] 万林林, 罗晔, 邓朝晖, 等. ELID磨削预修锐与氧化膜成膜的影响因素[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(3):410-416.
- WAN Linlin, LUO Ye, DENG Zhaohui, et al. Influencing Factors of Pre-dressing and Oxide Film Formation in ELID Grinding[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(3):410-416.
- [10] WU Q P, LI B X, OUYANG Z Y, et al. Precision Grinding of Cemented Carbides Based on a Multi-layer Brazed Diamond Wheel Using an Electrolyte Containing Carbon Nanotubes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114:2899-2909.
- [11] CHIKAODILI A V, IKENNA C V, VINOETHET S, et al. Sulfur-doped Graphitic Carbon Nitride(S-G-C3N4) as an Efficient Corrosion Inhibitor for X65 Pipeline Steel in CO₂-saturated 3.5% NaCl Solution: Electrochemical, XPS and Nanoindentation Studies[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 164:715-728.
- [12] ABRAHAM A R, GEORGE S C, HAGHI A K. Carbon Nanotubes: Functionalization and Potential Applications[J]. Tribology & Lubrication Technology, 2023, 79(2):80.
- [13] ALAZEMI A A, DYSART A, POL V G. Experimental Investigation of the Mechanical and Surface Properties of Sub-micron Carbon Spheres[J]. Lubricants, 2020, 8:77.
- [14] 蒋梦玲, 龙文元, 季松, 等. 烧结温度对 Ti-TiC/Ti 层状复合材料组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(10):10-17.
- JIANG Mengling, LONG Wenyuan, JI Song, et al. Effect of Sintering Temperature on Microstructure and Properties of Ti-TiC/Ti Laminated Composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(10):10-17.
- [15] 左明泽, 任成祖, 王志强. ELID 沟道成形磨削氧化膜特性及影响作用试验[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(4):42-47.
- ZUO Mingze, REN Chengzu, WANG Zhiqiang, Experimental on Characteristics and Effect of Oxide Layer in ELID Groove Profile Grinding[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(4):42-47.
- [16] 伍俏平, 郑维佳, 邓朝晖, 等. 在线电解修整磨削氧化膜研究现状及展望[J]. 中国机械工程, 2018, 29(17):2023-2030.
- WU Qiaoping ZHENG Weijia, DENG Zhaohui, et al. Research Status and Perspectives of ELID Grinding Oxidation Films[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(17):2023-2030.
- [17] 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. State Characterizing of Oxide Layer on Surface of ELID Grinding Wheel[J]. Tool Engineering, 2011, 45(6):40-43.
- [18] 邹吉才, 段云乾, ARDASHEV D V. 在线电解修整砂轮氧化膜界面反应及复合磨粒形成机理[J]. 光学精密工程, 2023, 31(20):2975-2985.
- KUAI Jicai, DUAN Yunqian, ARDASHEV D V. Interfacial Reactions and Forming Mechanism of Composite abrasive Grains in Oxide Film on ELID Wheel[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(20):2975-2985.

(编辑 王艳丽)

作者简介:刘 伟*,男,1986年生,博士、副教授。研究方向为高精度精密智能磨削技术。发表论文40余篇。E-mail:lw1986tiger@163.com。

本文引用格式:

刘伟,常佳起,李博鑫,等.中间相炭微球对多层钎焊金刚石砂轮电解修整磨削性能的影响[J].中国机械工程,2025,36(6):1151-1158.

LIU Wei, CHANG Jiaqi, LI Boxin, et al. Influences of MCMBs on Electrolytic Dressing and Grinding Performances of Multi-layer Brazed Diamond Grinding Wheels[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1151-1158.