DOI: 10.3901/JME.2020.07.231

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*

伍俏平^{1,2} 欧阳志勇² 阳慧² 宋琨² 邓朝晖^{1,2}

(1. 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学智能制造研究院 湘潭 411201)

摘要: 制备了一种含碳纳米管电解液以用于大粒度多层钎焊金刚石砂轮的电解修整,并分析了碳纳米管对电解氧化膜特性及电解修整磨削性能的影响。研究表明碳纳米管能显著提高电解液的电解能力,电解氧化膜厚度增大了56.3%~80.2%,这有利于磨损磨粒的顺利脱落;螺旋卷曲状的碳纳米管在电解过程中能吸附、分布于氧化膜中,氧化膜的粘附强度增大了30%~50%,这能充分发挥氧化膜的研磨、抛光效果。含碳纳米管电解液电解修整大粒度多层钎焊金刚石砂轮磨削力比普通电解液电解修整磨削力降低了30%以上;磨削表面粗糙度小,且增长幅度相对平缓,即使当进给速度为30 mm/s,磨削深度为16 μm 时,表面粗糙度也仅为0.15 μm 左右;含碳纳米管电解液电解修整大粒度多层钎焊金刚石砂轮磨削加工表面完整性较好,没有出现破碎、裂纹等加工缺陷,可有效实现超细晶硬质合金等难加工材料的高效精密磨削加工。

关键词: 碳纳米管; 大粒度多层钎焊金刚石砂轮; 电解修整; 超细晶硬质合金; 氧化膜; 磨削性能

中图分类号: TG521

Influence of Carbon Nanotubes on Electrolytic Dressing Grinding Performance of a Multi-layer Brazed Coarse-grained Diamond Wheel

WU Qiaoping^{1,2} OUYANG Zhiyong² YANG Hui² SONG Kun² DENG Zhaohui^{1,2}

(1. Hunan Province Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult to Machine Materials, Xiangtan 411201;

2. Institute of Intelligent Manufacturing, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract: An electrolyte containing carbon nanotubes (CNTs) is prepared for electrolytic dressing of a multi-layer brazed coarse-grained diamond grinding wheel, and the influence of CNTs on the characteristics of oxide film and the electrolytic dressing grinding performance are investigated. The results indicated that CNTs could significantly improve the electrolytic capacity of electrolyte, and the thickness of oxide film increased by 56.3% to 80.2%, which allowed the worn diamond grits to fall off smoothly. CNTs are adsorbed and distributed in the oxide film during electrolytic dressing, and the adhesion strength of the oxide film increases by 30%-50%, which could improve the polishing effect of the oxide film. The grinding experiment results shows that the grinding force of the multi-layer brazed coarse-grained diamond wheel after electrolytic dressing with electrolyte containing CNTs decreased by 30%. The grinding surface roughness is small and the increase rate is relatively gentle. When the feed speed is 30 mm/s and the grinding depth is 16 μm , the surface roughness is just about 0.15 μm . Moreover, the integrity of surface ground by the brazed wheel after electrolytic dressing with electrolyte containing CNTs is good, there are no cracks and other defects. It could effectively realize the high efficiency and precise grinding of ultra-fine cemented carbide and other difficult-to-cut materials.

Key words: carbon nanotubes; multi-layer brazed coarse-grained diamond wheel; electrolytic dressing; ultra-fine cemented carbide; oxide film; grinding performance

* 国家自然科学基金(51575179, 51205126), 湖南省自然科学基金(2017JJ3073, 12JJB006)和湖南省教育厅重点项目(18A182)资助项目。
20190711 收到初稿, 20191209 收到修改稿

0 前言

砂轮是磨削加工技术中使用最为广泛的加工工具,但传统工艺制造的固结磨粒砂轮和电镀砂轮均存在磨粒把持强度不够,磨粒在磨削过程中易过早脱落的问题^[1]。特别是对于金刚石超硬磨粒砂轮而言,由于金刚石与大多金属之间的物理、化学性能差异很大,二者之间存在很大的界面能,砂轮结合剂仅靠机械包埋力或物理吸附作用来把持磨粒,在磨削过程中常出现非正常脱落现象,这无疑会引起加工表面质量的降低和金刚石资源的浪费等问题^[2-3]。

为了克服传统砂轮存在的磨粒过早脱落的不足,国内外相关学者开发了单层钎焊超硬磨粒砂轮^[4-5]。单层钎焊超硬磨粒砂轮是利用活性金属元素(如 Ti、Cr、Mo 等)在超硬磨粒界面处形成化学冶金结合,大大提高砂轮结合剂对磨粒的把持强度,磨粒的出刃高度可达到磨粒自身高度的 2/3 左右,有效提高了砂轮的锋利性和容屑空间,砂轮不易堵塞^[6]。目前,单层钎焊超硬磨粒砂轮常用于硬质合金、工程陶瓷等难加工材料的高效精密磨削加工中。如 CHEN 等^[7]利用单层钎焊金刚石砂轮进行了氧化铝陶瓷磨削试验,试验结果表明磨削过程中钎焊砂轮金刚石把持强度高,磨粒不易脱落,并能获得良好的加工效果;徐正亚等^[8]利用单层钎焊金刚石砂轮开展了硬质合金材料的磨削试验,研究结果表明钎焊金刚石砂轮的磨削温度远低于电镀金刚石砂轮,且磨削温度随磨削深度和工件进给速度的增大而上升较为平缓,磨削时可采用较大的磨削深度和进给速度,易于实现硬质合金的高效加工。但单层钎焊超硬磨粒砂轮存在磨削工作层过薄,磨粒磨损后没有后续磨粒补充,砂轮使用寿命有限等不足。

在作者的前期研究中,利用模压成型技术和真空钎焊技术制备出了磨粒把持力大、加工性能优良的大粒度多层钎焊金刚石砂轮^[9]。制备的大粒度多层钎焊金刚石砂轮具备以下特点:① 真空钎焊技术提高了金刚石的把持强度,金刚石利用率高;② 金刚石磨粒是多层分布的,克服了单层钎焊砂轮存在磨削工作层过薄,使用寿命有限的问题。但钎焊工艺的引入也使得金刚石磨料失去切削能力后很难脱落,磨损磨粒会引起磨削力和磨削温度的增大,从而影响加工表面质量。为了使砂轮重新获得理想的容屑空间和锋利性,必须对其进行修整。常用的机械修整法存在修整速度慢,劳动条件恶劣,砂轮损耗大等缺陷。特别对于钎焊金刚石砂轮来说,由于其磨粒把持强度大、金属基体组织致密,采用机械

修整法进行修整难度更大,频繁的修整修锐也极大地影响了磨削效率的进一步提高。为了解决此问题,作者采用在线电解修整技术以促使磨钝磨粒脱落,使钎焊砂轮在磨削过程中始终保持锋利性。并探索性开展了基于多层钎焊金刚石砂轮在线电解修整技术的精密磨削性能研究^[9]。

但在研究过程中发现,由于钎焊砂轮基体材料中包含有 Ti 等活性元素,其极易与空气中的氧气反应而在钎焊砂轮表面生成致密的钝化层 TiO_2 。该钝化层极大阻碍了电解液与砂轮基体材料的接触,砂轮的阳极溶解作用受到影响,从而造成氧化膜的成膜速度较低,生成的氧化膜厚度有限。而大粒度多层钎焊金刚石砂轮的磨粒粒径较大,磨粒包埋于基体材料中的深度较深,当氧化膜厚度较小时,会造成磨损磨粒不能及时脱落,从而严重影响到磨削加工表面质量。因此,如何有效提高电解液的电解能力,及时有效地实现大粒度多层钎焊金刚石砂轮磨损磨粒的顺利脱落是值得深入研究的课题。

本文拟通过在电解液中添加碳纳米管(Carbon nanotubes, CNTs)以提高电解液的电解性能。碳纳米管为单层或多层石墨片围绕中心轴按一定的螺旋角卷曲而成的纳米级管,其具有极其优异的比强度、比刚度、密度小、导电性能优良等特性^[10-11]。将其加入电解液中,可有效提高电解液的电解能力,这对提高电解成膜速度和成膜厚度是极为有利的。因此,本文制备了一种含碳纳米管电解液以用于大粒度多层钎焊金刚石砂轮的电解修整,深入探讨碳纳米管对大粒度多层钎焊金刚石砂轮电解氧化膜绝缘性、氧化膜厚度、粘附强度、氧化膜微观形貌等的影响;并进一步开展了大粒度多层钎焊金刚石砂轮的电解修整磨削试验,分析了碳纳米管作用下的大粒度多层钎焊砂轮的电解修整磨削性能。

1 含碳纳米管电解液的配制

电解液中各成分对电解修整磨削加工性能的影响很大,一般而言,电解液的主要成分包括主电解质、润滑剂、极压添加剂、消泡剂、表面活性剂等^[12]。其中,为了有效腐蚀多层钎焊金刚石砂轮表面的 TiO_2 钝化层以促进电解反应的顺利进行,电解液中应含有能腐蚀 TiO_2 钝化层的成分。相关文献报道 NaCl 溶液中的 Cl^- 离子能有效点蚀致密的 TiO_2 钝化层并形成点蚀坑,点蚀坑可使得溶液进一步渗透至钝化层内层,促进电化学反应的持续进行^[13-14]。因此,试验采用氯化钠作为电解液的主电解质。另外,采用磷酸氢二钠作为钝化剂以缓解电解反应的剧烈

程度,防止生成的氧化膜过于疏松而出现非正常脱落;四硼酸钠作为防锈剂添加到电解液中,防止电解液对机床的腐蚀;丙三醇作为表面活性剂,可显著提高磨削液的渗透能力;磷酸三丁酯充当润滑剂,以提高磨削液的润滑性能。电解液各组分及其质量配比为:氯化钠 0.3%、钼酸钠 10%、四硼酸钠 0.5%、磷酸氢二钠 1.0%、丙三醇 0.5%、磷酸三丁酯 0.2%,余量为去离子水。

加入的碳纳米管是以重油残渣为碳源,经化学气相沉积法(Chemical vapor deposition, CVD)法制备而成。但 CVD 法制备的碳纳米管化学性质稳定且不溶于水和有机溶剂,这会极大限制其应用。因此,有必要对碳纳米管进行表面处理,在其表面引入大量的极性官能团以提高其在溶剂中的分散性。目前,常采用热酸氧化法对碳纳米管进行表面活化处理以引入羟基和羧基等含氧官能团,改善其在溶剂中的分散性和可溶性。具体操作为^[15]:将碳纳米管加入到混酸(50%硫酸+50%硝酸)试剂中,在 110 ℃温度下回流 9 h 后,将混合物进行抽滤;采用去离子水洗涤至滤液 PH 值不变;将产物进行烘干、收集而得到氧化处理的碳纳米管。热酸氧化法处理后的碳纳米管被氧化侵蚀,表面粗糙,存在明显沟壑,这有利于功能性官能团在其表面形成,亲水性得到了大幅提高^[16];且表面的极性官能团在电解液中可发生电离而带负电荷^[17]。表面带负电荷且分散性优良的碳纳米管对大粒度多层钎焊金刚石砂轮的电解修整具有如下作用:① 碳纳米管具有良好的导电性能,在电解过程中能吸附于阳极钎焊砂轮的氧化膜中,能一定程度提高氧化膜的导电性,延长电解反应的持续时间,有效提高其成膜速度和成膜厚度;② 碳纳米管具有长径比大、螺旋蜷曲结构,其在氧化膜中的分布可显著提高氧化膜的吸附强度,氧化膜不容易在砂轮离心力和电解液的冲刷等外力作用下而脱落,可充分发挥氧化膜的研磨、抛光作用。

目前,热酸氧化法制备具有良好亲水性的碳纳米管已在国内有关企业中得到了应用发展。本文试验用热酸处理碳纳米管为南京吉仓纳米科技有限公司提供,其主要的物理性能如表 1 所示。试验对比分析了普通碳纳米管、热酸氧化处理后碳纳米管在电解液中的分散行为,如图 1 所示。从中可看到,普通碳纳米管(标签 A)大部分沉于电解液水底,表现为疏水性;而氧化处理后的碳纳米管(标签 B)在电解液中的分散性得到了大幅度改善,形成了均匀的黑色混合液,即使静置 24 h 后电解液基本没变化,表现出良好的亲水性。这表明热酸氧化处理的碳纳米管可均匀分散于

电解液中,这能有效改善电解液的电解能力。在本试验中,碳纳米管在电解液中的加入量为 1.0 mg/mL。

表 1 CNTs 材料物理性能参数

参数	数值
纯度	>95%
羧基化质量分数(%)	4
直径/nm	<8
长度/ μm	10-30
比表面积/(m^2/g)	>500
导电率/(s/cm)	>100

图 1 普通碳纳米管 A 与热酸处理后碳纳米管 B 在电解液中的分散情况

2 含碳纳米管的电解成膜性能

含碳纳米管电解液制备后,开展了钎焊金刚石试件的电解修整试验,通过检测有/无碳纳米管电解液作用下的电解氧化膜绝缘性、氧化膜厚度、粘附强度以及微观形貌等,分析碳纳米管对电解氧化膜成膜性能的影响。考虑到钎焊金刚石砂轮尺寸较大,不便于扫描电子显微镜等对其表面氧化膜的观测,故设计制作了一种电解修整装置以便于钎焊件的电解与分析。该装置主要包括卡盘、紧定螺钉、金刚石钎焊节块等。其中,卡盘圆周面开有凹槽,凹槽深度为 5 mm;4 个钎焊节块对称分布并放置于凹槽中,并用紧定螺钉固定;然后将卡盘安装于机床主轴上用于电解修整,电解工艺参数为:电解电压 90 V,占空比 0.5,主轴转速 2 500 r/min。电解修整结束后,将金刚石钎焊节块取下以分析其氧化膜的相关物理性能。电解修整装置及实物如图 2 所示。电解试验中,采用电流计检测电解电流变化以分析碳纳米管对氧化膜绝缘性的影响,利用超景深显微镜观测电解氧化膜厚度,利用扫描电子显微镜观测氧化膜的微观形貌,利用能谱仪分析氧化膜中的主要元素分布,采用胶带粘附法检测氧化膜的粘附强度等,多方面分析碳纳米管对大粒度多层钎焊金刚石砂轮电解成膜性能的影响。

2.1 碳纳米管对氧化膜绝缘性的影响

试验记录了有/无碳纳米管电解液电解修整 16 min 过程中的电解电流变化情况, 其中, 每间隔 1 min 记录一次数据。图 3 为有/无碳纳米管电解液作用下的电解电流变化情况。从中可看到, 当电解液中不含碳纳米管时, 电解电流下降速度较快, 当电解时间为 8 min 时, 电解电流已从 2.5 A 快速下降至 0.30 A; 当电解时间达到 12 min 后, 电解电流下降至 0.06 A 并趋于稳定。这说明电解液能有效实现钎焊试件基体材料的电解修整, 在砂轮表面生成了一层绝缘性的氧化膜, 阻止了电解反应的继续进行。对比来看, 电解修整过程中含碳纳米管电解

液的电解电流变化相对平缓, 当电解修整 12 min 后, 电解电流仍保持在 0.68 A 右; 即使进一步延长至 16 min 时, 电解电流仍有 0.26 A。产生此现象的主要原因是碳纳米管在电解过程中能吸附于阳极钎焊试件表面氧化膜中, 其本身具有优异的导电性, 在氧化膜中的分布可显著降低氧化膜的绝缘性, 使得电解反应的时间延长, 促进了电解反应的持续进行, 这对提高氧化膜的生成速率和氧化膜厚度是极为有利的。特别对于大粒度多层钎焊金刚石砂轮而言, 其磨粒粒径较粗, 磨粒包埋于基体材料中的深度大, 为了使磨损磨粒顺利脱落, 加入碳纳米管以提高电解液的电解能力是很有必要的。

(a) 示意图

(b) 实物

图2 电解修整试验装置示意图及其实物

图3 有/无碳纳米管电解液电解电流的变化趋势

2.2 碳纳米管对氧化膜厚度的影响

为探明碳纳米管对电解氧化膜厚度的影响, 试验分析了有/无碳纳米管电解液电解作用 4 min、8 min、12 min 和 16 min 后的氧化膜厚度, 如图 4 所示。从中可看到, 氧化膜的厚度随电解时间的延长而增大, 但无碳纳米管电解液生成的氧化膜厚度增长幅度较平缓, 特别是当电解时间达到 12 min 后, 氧化膜的厚度已无明显变化, 这说明绝缘性的

图4 氧化膜厚度随电解时间的变化趋势图

氧化膜已阻碍了电解反应的持续进行, 此时的氧化膜厚度维持在 43.2 μm 左右。由于生成的氧化膜厚度有限, 不足以使大粒度多层钎焊金刚石砂轮的磨粒顺利脱落, 磨粒底部仍被钎料基体紧密把持, 如图 5a 所示。在相同条件下, 含碳纳米管电解液的电解成膜厚度增大了 56.3%~80.2%, 当电解 12 min 后, 氧化膜的厚度达到了 75.3 μm, 如图 5b 所示。此时磨损磨粒基本被疏松的氧化膜所包埋, 磨粒把持力大大

降低, 在磨削过程中可顺利脱落, 这能有效提高砂轮的锋利性和容屑空间。当电解时间进一步延长到 16 min, 氧化膜厚度变化较小(为 79.1 μm)。这说明碳纳米管确实可提高电解液的电解能力, 生成的氧化膜厚度较厚, 但当氧化膜的厚度增大到一定值时, 氧化膜的绝缘性已处于主导地位, 此时的电解反应程度已大幅度降低, 电解成膜效果不再明显。

图 5 电解修整 12 min 后无碳纳米管电解液生成氧化膜厚度和含碳纳米管电解液生成氧化膜厚度

2.3 碳纳米管对氧化膜吸附强度的影响

试验采用胶带粘附法测量了有/无碳纳米管电解液电解生成的氧化膜粘附强度。胶带粘附法的具体操作为: 钎焊试件电解后, 放置于室温下干燥 2 h, 利用胶带对氧化膜进行粘附, 记录将氧化膜完全粘掉而露出金属基体所需要次数, 粘附次数的多少间接表征氧化膜的吸附强度^[18]。图 6 为有/无碳纳米管电解液生成的氧化膜粘附强度随电解时间的变化趋势。从中可看到, 初期阶段无碳纳米管电解液电解氧化膜的粘附强度随着电解时间的延长而逐渐增大, 但当电解时间达到 16 min, 粘附强度反而有所下降。这是因为经过一定时间的电解作用, 钎焊砂轮表面生成了一层绝缘性氧化膜, 该氧化膜会阻碍电解反应的继续进行, 电解成膜作用已基本停止, 但电解液的浸泡及冲刷作用却使氧化膜的粘附强度有所降低。对比而言, 含碳纳米管电解液生成的氧化膜吸附强度增大了 30%~50%, 这主要是因为碳

图 6 氧化膜粘附强度随电解时间的变化趋势图

纳米管的加入有效提高了电解液的电解成膜能力, 且氧化膜呈螺旋卷曲状, 其吸附、分布于氧化膜中能显著提高氧化膜的粘附强度, 氧化膜不容易出现非正常脱落现象。但当电解时间达到 16 min 后, 含碳纳米管电解液生成的氧化膜粘附强度也有所下降, 这可能是因为长时间的持续电解和浸泡, 氧化膜变得相对疏松, 这一定程度上影响了氧化膜的粘附强度。因此, 综合考虑电解成膜质量及电解效率, 电解时间 12 min 能达到较理想的电解效果。

2.4 碳纳米管对氧化膜微观形貌的影响

图 7a、7b 分别为无/有碳纳米管电解液电解作用 12 min 后钎焊件表面氧化膜的微观形貌。从中可看到, 当电解液中不含碳纳米管时, 钎焊件表面生成了一层均匀的氧化膜, 且氧化膜表层分布有大小不一的孔洞, 这是电解液中的氯离子腐蚀 TiO_2 钝化层形成的点蚀坑, 这些点蚀坑使得电解液顺利渗透至钎焊件基体材料的内层, 促进了电解液与基体材料的充分接触而产生持续电解反应, 这也是钎焊砂轮实现电解修整的关键。相对而言, 含碳纳米管电解液电解生成的点蚀坑尺寸更大, 且深度更深。这是因为碳纳米管的加入大幅度提高了电解液的电解能力, 其电解反应的剧烈程度也随之增大, 由此产生的点蚀坑尺寸更大。图 8 为含碳纳米管电解液电解产生的点蚀坑放大 6 000 倍的扫描电子显微镜图。从中可看到, 碳纳米管交织分布在氧化膜中, 并与氧化膜形成“网状”连接, 这可显著提高氧化膜的致密性和吸附强度。试验采用能谱仪沿氧化膜表层至基体材料进行了线扫描分析, 结果如图 9 所示。这表明氧化膜中除了基体材料的 Cu、Sn、Ti 以及 O 元素外, 还有明显 C 元素峰, 这很好证明了电解过程中, 表面带有负电荷的碳纳米管能有效吸附于钎焊件表面的氧化膜中。并从图 9b 中可发现, C 元素在基体材料与氧化膜界面处的峰值最大, 后面峰值逐渐减小。这是因为初始电解阶段, 阳极吸附作用最强, 碳纳米管的含量最多; 但随着绝缘性氧化膜的生成, 碳纳米管的吸附量会逐渐减少, 这也是造成电解电流持续降低, 以及氧化膜生成速度有所下降的原因。

图 7 无碳和含碳纳米管电解液电解氧化膜形貌

图8 碳纳米管在氧化膜中的分布情况

(a) 含碳纳米管电解液电解氧化膜

(b) 线扫描能谱图

图9 含碳纳米管电解液电解氧化膜和线扫描能谱图

3 CNTs 对电解修整磨削性能的影响

试验进一步开展了大粒度多层钎焊金刚石砂轮的电解修整磨削试验。磨削试验是在高精度卧轴矩台

平面磨床 MGK7120×6/F 上进行的, 电解修整用 HDMD-V 型高频脉冲电源为哈尔滨工业大学提供, 电解修整磨削试验系统如图 10 所示。试验所用砂轮为前期制备的大粒度多层钎焊金刚石砂轮, 砂轮尺寸为: 直径 200 mm×宽 10 mm, 砂轮粒度为 140 目。试验材料为厦门金鹭特种合金有限公司提供的 GU25UF 型超细晶硬质合金。其主要的物理性能参数如下: Co 含量 12wt.%, 硬度 HRA92.5, 密度 14.2g/cm^3 , WC 平均粒径 $0.4\text{ }\mu\text{m}$, 抗弯强度 4200 MPa。超细晶硬质合金试件尺寸为 $12\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 。磨削工艺参数如表 2 所示。试验利用 Kistler9257B 三向压电晶体测力仪测量磨削力; 利用 TR200 型高精度表面粗糙度仪测量加工表面粗糙度; 利用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜观测超细晶硬质合金磨削表面形貌。为了确保试验结果的准确和可靠, 每组试验数据均为 3 次测试结果的平均值。通过对比有/无碳纳米管电解液电解修整钎焊砂轮磨削力、磨削表面粗糙度、磨削表面形貌等, 分析了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。

图10 电解修整磨削试验装置

表2 试验条件及试验参数

类型	内容
磨削方式	切入式干磨
砂轮主轴转速 $v_s/(\text{r/min})$	2 500
工件速度 $v_w/(\text{mm/s})$	20, 30, 40
切深 $a_p/\mu\text{m}$	4, 8, 12, 16

3.1 磨削力

图 11、12 分别为无/有碳纳米管电解液电解修整钎焊砂轮的磨削力情况。从中可看到, 磨削力随磨削深度的增大呈增大趋势, 这是因为增大磨削深度, 单颗磨粒的切削深度增大; 且砂轮与工件的接触弧长增大, 参与磨削的有效磨粒数增多, 因此磨削力是增大的。在相同磨削条件下, 含碳纳米管电解液电解修整钎焊砂轮磨削力小于普通电解液的电

解修整磨削力。如工件进给速度为 30 mm/s, 磨削深度为 12 μm 时, 含碳纳米管电解液电解修整磨削法向力为 10 N, 切向磨削力为 4.7 N, 比普通电解液作用产生的磨削力分别降低了 30.1%和 31.9%左右。这主要是因为含碳纳米管电解液的电解能力更强, 生成了氧化膜的厚度更大, 有力促进了磨钝磨

粒的顺利脱落, 保持了砂轮的锋利性和良好的容屑空间, 由此产生的摩擦力和切削力更小; 此外, 钎焊砂轮表面生成的弹性氧化膜厚度更大, 其吸振效果更好, 有效避免了砂轮结合剂与工件的直接接触, 减缓了砂轮对工件的振动和冲击, 这也能显著降低磨削力。

图 11 无碳纳米管电解液电解修整后钎焊砂轮的法向磨削力和切向磨削力

图 12 含碳纳米管电解液电解修整后钎焊砂轮的法向磨削力和切向磨削力

3.2 磨削表面粗糙度

图 13、14 为无/有碳纳米管电解液电解修整钎焊砂轮的磨削表面粗糙度。从中可发现, 加工表面粗糙度随磨削深度的增大而增大, 这是因为增大磨削深度将增加单颗磨粒的切削深度, 材料变形及划痕更加明显, 这无疑会引起加工表面粗糙度的增大。比较而言, 含碳纳米管电解液电解修整钎焊砂轮磨削表面粗糙度较小, 且增长幅度相对平缓。当进给速度为 30 mm/s, 磨削深度为 16 μm 时, 表面粗糙度为 0.15 μm 左右; 而无碳纳米管电解液电解修整磨削加工表面粗糙度为 0.36 μm 。这主要是因为无碳纳米管电解液的电解成膜厚度有限, 磨损磨粒不能及时脱落, 磨损磨粒会对加工表面产生挤压、摩擦作用而导致沟槽和划痕的出现, 造成加工表面粗糙度的增大。而电解液中加入碳纳米管后, 其电解

成膜能力得到大幅度提升, 砂轮基体材料不断被电解生成均匀、厚实的氧化膜, 磨粒由致密的基体材

图 13 无碳纳米管电解液电解修整后大粒度多层钎焊金刚石砂轮磨削加工表面粗糙度

料高强度把持转变为相对疏松的氧化膜包埋作用, 其把持力大大降低, 磨钝磨粒能顺利脱落; 另一方面, 含碳纳米管电解液的电解氧化膜的厚度和吸附强度得到显著提升, 氧化膜的研磨、抛光作用得以充分发挥, 这对提高超细晶硬质合金的加工表面质量也是极为有利的。

图 14 含碳纳米管电解液电解修整后大粒度多层钎焊金刚石砂轮磨削加工表面粗糙度

3.3 磨削表面形貌

图 15、16 为砂轮转速为 2 500 r/min, 工件进给速度为 30 mm/s 时, 无/有碳纳米管电解液电解修整磨削加工表面形貌图, 从中可看到, 当磨削深度较小时, 电解修整磨削加工表面光滑平整, 磨削划痕很浅, 且划痕两侧的材料隆起较少; 但随着磨削深度的增加, 无碳纳米管电解修整磨削表面的沟痕更为明显, 局部出现了由磨损磨粒挤压、刮擦作用引起的碎裂小凹坑, 如图 15d 所示。对比来看, 含碳纳米管电解液电解修整钎焊砂轮磨削加工表面完整性更好, 即使当磨削深度增至 16 μm 时, 加工表

图 15 无碳纳米管电解液电解修整后的多层钎焊砂轮加工表面形貌

图 16 含碳纳米管电解液电解修整后的多层钎焊砂轮加工表面形貌

面的变化也较平稳, 没有出现破碎、裂纹等加工缺陷。这是因为前面所述的含碳纳米管电解液能有效保证钎焊砂轮的锋利性; 且均匀、厚实的氧化膜的研磨、抛光作用对提高加工表面质量也具有促进作用。由此可见, 含碳纳米管电解液可用于大粒度多层钎焊金刚石砂轮的电解修整, 能有效实现超细晶硬质合金等难加工材料的高效精密磨削加工。

4 结论

(1) 制备了一种含碳纳米管电解液以用于大粒度多层钎焊金刚石砂轮的电解修整, 电解液主要成分及质量配比为: 氯化钠 0.3%、钼酸钠 10%、四硼酸钠 0.5%、磷酸氢二钠 1.0%、丙三醇 0.5%、磷酸三丁酯 0.2%, 余量为去离子水; 碳纳米管的加入量为 1.0 mg/mL。

(2) 碳纳米管能显著提高电解液的电解能力, 氧化膜厚度增大了 56.3%~80.2%, 促进了磨损磨粒的及时脱落; 且螺旋卷曲状的碳纳米管在电解过程中能吸附、分布于氧化膜中, 氧化膜的粘附强度增大了 30%~50%, 能有效发挥氧化膜的研磨、抛光效果。

(3) 含碳纳米管电解液电解修整钎焊砂轮磨削力比普通电解液电解修整磨削力降低了 30%以上; 磨削表面粗糙度小, 且增长幅度相对平缓。即使当进给速度为 30 mm/s, 磨削深度为 16 μm 时, 表面粗糙度也仅为 0.15 μm 左右。

(4) 含碳纳米管电解液电解修整多层钎焊金刚石砂轮的磨削加工表面完整性好, 加工过程也较平稳, 没有出现破碎、裂纹等加工缺陷, 可有效实现超细晶硬质合金等难加工材料的高效精密磨削加工。

参 考 文 献

- [1] 伍俏平, 邓朝晖, 潘占, 等. 金刚石纤维砂轮的制备及磨削表面质量研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50 (11): 205-212.
WU Qiaoping, DENG Zhaohui, PAN Zhan, et al. Preparation and grinding surface-quality of a new diamond fiber wheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (11): 205-212.
- [2] XIAO H Z, XIAO B, WU H H. Interfacial characteristics and mechanical properties of the vacuum brazing diamond grains segment with Ni-Cr composite active filler and tungsten carbide reinforcement[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 226-234.
- [3] WU Q P, LUO Z, WANG Y, et al. Effects of rare earth Ce on the brazing performance of high energy mechanical milling Cu-based alloy powder[J]. Metals, 2018, 495, 8: 1-12.
- [4] DING W F, ZHU Y J, ZHANG L Z, et al. Stress characteristics and fracture wear of brazed CBN grains in monolayer grinding wheel[J]. Wear, 2015, 332: 800-809.
- [5] CHATTOPADHYAY A K, CHOLLET L, HINTERMANN H E. On the performance of brazed bonded monolayer diamond grinding wheel[J]. CIRP Annals, 1991, 40(1): 347-350.
- [6] LU J B, CAO Z Y, QI F J, et al. Evolution of interface carbide diamond brazed with filler alloy containing Cr[J]. Diamond & Related Materials, 2018, 90: 116-125.
- [7] CHEN J Y, HUANG H, XU X P. An experimental study on the grinding of Alumina with a monolayer brazed diamond wheel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41: 16-23.
- [8] 徐正亚, 徐鸿钧, 傅玉灿. 钎焊金刚石砂轮磨削硬质合金温度的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30 (6): 65-69.
XU Zhengya, XU Hongjun, FU Yucan. Experimental study on grinding temperature of cemented carbide with brazed diamond grinding wheel[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30 (6): 65-69.
- [9] 伍俏平, 王煜, 赵恒, 等. 基于多层钎焊金刚石砂轮在线电解修整技术的超细晶硬质合金精密磨削研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 212-220.
WU Qiaoping, WANG Yu, ZHAO Heng, et al. Precision grinding of ultra-fine cemented carbide based on electrolytic in-process dressing of a multi-layer brazed diamond wheel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 212- 220.
- [10] HAN T, NAG A, MUKHOPADHYAY S C. Carbon nanotubes and its gas-sensing applications: A review[J]. Sensors and Actuators A, 2019, 291: 107-143.
- [11] FIYADH S S, ALSAADI M A, JAAFAR W Z, et al. Review on heavy metal adsorption processes by carbon nanotubes[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 23: 783-793.
- [12] 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): 1118-1124.
WU Qiaoping, WANG Yu, QU Wei, et al. Research status and perspectives of ELID grinding fluid[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28 (9): 1118-1124.
- [13] LIU W D, ZHANG H, LUO Z, et al. Electrochemical micromachining on titanium using the NaCl-containing ethylene glycol electrolyte[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 784-794.
- [14] HE Y F, XIAO H X, GAN W M, et al. The electrochemical dissolution behavior research of titanium alloy under different electrolyte[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 751-756.
- [15] 杨永珍. 碳微球表面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
YONG Yongzhen. Surface chemistry of carbon microbeads[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [16] DATSUKV, KALYVA M, PAPAGELISK, et al. Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes[J]. Carbon, 2008, 46: 833-840.
- [17] CHO J, KONOPKA K, ROZNIATOWSKI K, et al. Characterization of carbon nanotube films deposited by electrophoretic deposition[J]. Carbon, 2009, 47: 58-67.
- [18] 伍俏平, 郑维佳, 邓朝晖, 等. 在线电解修整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, 2017, 2018, 29 (17): 2023- 2030.

作者简介: 伍俏平(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新型工具体备及难加工材料高效精密加工技术。

E-mail: meishanzil1@sina.com