

基于界面调控的真空钎焊金刚石复合涂层制备与温度影响机制研究

杨英¹ 张晓龙¹ 郑军¹ 于华² 孙志鹏³ 张泽洋^{4,5} 詹华^{4,5} 汪瑞军^{4,5}

(1. 安徽工业大学先进金属材料绿色制备与表面技术教育部重点实验室, 马鞍山 243002;

2. 河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳 471003; 3. 中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司, 宁波 315700;

4. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 5. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 新疆地区土壤以砂石混合质地为主, 农机触土部件在作业过程中常面临严重的磨粒磨损问题, 导致其使用寿命缩短和作业效率降低。为解决传统耐磨涂层结合强度低、易剥落等问题, 本研究采用真空钎焊技术, 在 34MnB5 钢基体上制备了由 Ni60AA 钎料与金刚石颗粒复合的耐磨涂层, 并系统研究了不同钎焊温度 (1010 ~ 1110℃) 对涂层界面结构、硬度及耐磨性能的影响机制。实验结果表明, 随着钎焊温度的升高, 涂层中的金刚石颗粒出现上浮现象, 并且金刚石与钎料界面处逐渐形成由 Cr_3C_2 和 Cr_7C_3 组成的碳化物过渡层。当温度达到 1050℃ 时, 金刚石与钎料的界面结合最为理想, 此时涂层硬度达到 68.2 HRC, 磨损失量降至最低 (9.3 mg), 表明在该温度下涂层的耐磨性能最好。当钎焊温度过低时 (如 1010℃), 金刚石与钎料的界面反应不充分, 导致结合力弱, 磨损加剧; 而当温度过高时 ($\geq 1070^\circ\text{C}$), 金刚石表面石墨化现象加剧、碳化物层过厚, 从而导致金刚石与钎料的界面结合强度降低, 涂层硬度与耐磨性能也随之下降。本研究揭示了真空钎焊温度通过调控界面碳化物的形成以及金刚石的石墨化行为, 显著影响了涂层的力学性能与耐磨性。

关键词: 真空钎焊; 金刚石复合涂层; 钎焊温度; 耐磨性; 触土部件

中图分类号: TG74

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)19-0170-09

OSID:



Fabrication of Vacuum Brazed Diamond Composite Coatings via Interface Regulation and Temperature Influence Mechanism

Yang Ying¹ Zhang Xiaolong¹ Zheng Jun¹ Yu Hua² Sun Zhipeng³ Zhang Zeyang^{4,5}
Zhan Hua^{4,5} Wang Ruijun^{4,5}

(1. Key Laboratory of Green Fabrication and Surface Technology of Advanced Metal Materials, Ministry of Education, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China

2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

3. China Academy of Machinery Ningbo Academy of Intelligent Machine Tool Co., Ltd., Ningbo 315700, China

4. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

5. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil in the Xinjiang region is predominantly a sandy-loam mixture, which subjects agricultural machinery components in contact with the soil to significant abrasive wear, thereby shortening their service life and reducing operational efficiency. To address the issues of low bonding strength and delamination in traditional wear-resistant coatings, vacuum brazing technology was employed to fabricate the composite wear-resistant coating consisting of Ni60AA brazing alloy and diamond particles on the 34MnB5 steel substrate. The effects of various brazing temperatures (1010 ~ 1110℃) on the coating's interface structure, hardness, and wear resistance were systematically investigated. The results indicated that as the brazing temperature increased, the diamond particles in the coating exhibited a tendency to rise, and a carbide transition layer composed of Cr_3C_2 and Cr_7C_3 gradually formed at the interface between the diamond and the brazing alloy. At a brazing temperature of 1050℃, the interface bond

收稿日期: 2026-04-23 修回日期: 2026-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFB3714100)

作者简介: 杨英 (1983—), 女, 高级实验师, 博士, 主要从事材料表面处理研究, E-mail: yangying@ahut.edu.cn

通信作者: 汪瑞军 (1967—), 男, 研究员, 博士, 主要从事先进表面工程制备技术与再制造技术研究, E-mail: 13701380963@163.com

between the diamond and brazing alloy was found to be optimal, resulting in a coating hardness of 68.2 HRC and the lowest wear loss (9.3 mg), corresponding to the best wear resistance. At lower brazing temperatures (e. g. , 1 010℃), the interface reaction between the diamond and the brazing alloy was incomplete, resulting in weak bonding and increased wear. Conversely, at higher brazing temperatures ($\geq 1\ 070^{\circ}\text{C}$), the diamond surface experienced more pronounced graphitization, and the carbide layer became overly thick, leading to a weakened interface bond strength and, consequently, a decrease in both coating hardness and wear resistance. The research result revealed that the brazing temperature significantly influenced the mechanical properties and wear resistance of the coating by controlling the formation of interface carbides and the graphitization behavior of the diamond.

Key words: vacuum brazing; diamond composite coating; brazing temperature; wear resistance; soil-engaging components

0 引言

在农机农耕作业中,触土部件受到土壤颗粒的冲击,极易发生磨损和断裂失效^[1]。特别是在新疆地区,土壤多为砂石混合质地,磨粒硬度高、含量大,导致农机触土部件(如犁铧、旋耕刀、耙片等)在作业过程中承受更为严重的磨损,使用寿命显著缩短,进而严重制约了当地农业机械化作业效率与经济效益^[2]。为了提高触土部件的耐磨性能,国内外学者先后采用堆焊、热喷涂、热处理等表面工程技术,在部件表面制备了以 WC、TiC 等硬质相为增强体的耐磨涂层,并取得了一定的成效^[3-7]。然而,这些方法普遍存在涂层与基体结合强度低、涂层内部热应力集中、硬质相分布不均等问题,导致在强冲击和高应力工况下,涂层容易发生剥落、开裂等早期失效现象^[8]。

金刚石是已知的最坚硬的材料,具有显著提高涂层硬度和耐磨性的潜力。钎焊金刚石涂层技术凭借能够实现高强度冶金结合的优势,在耐磨涂层领域引起了广泛关注^[9-11]。在工艺优化与涂层性能提升方面,已有一系列重要研究成果。吴奇隆等^[12]采用感应钎焊工艺制备金刚石耐磨复合涂层,金刚石颗粒在涂层中呈弥散分布,钎料与基体间形成了约 5 μm 的冶金结合界面,研究发现其磨损机制主要表现为钎料的磨损与金刚石颗粒的脱落。Jin 等^[13]在感应钎焊镍基金刚石复合涂层过程中添加稀土元素 Nd,研究发现,当 Nd 的质量分数为 1.0% 时,非晶钎料钎焊的金刚石晶形更完整、热损伤更低、表面更光滑。Yang 等^[14]研究了激光钎焊金刚石复合涂层的工艺窗口,确定了实现良好结合的线能量密度范围,并指出界面形成的 Cr_3C_2 碳化物层是实现高强度冶金结合的关键。Zhu 等^[15]结合有限元模拟与机器学习技术,明确了激光钎焊金刚石复合涂层的最佳温度区间(1 100 ~ 1 140℃),并量化了各工艺参数对峰值温度的敏感度。Zhu

等^[16]指出,激光钎焊金刚石复合涂层的裂纹主要来源于热失配所产生的残余应力,并系统总结了通过优化钎料、工艺等途径来抑制裂纹的策略。

目前,钎焊金刚石的研究主要集中于激光钎焊、真空钎焊与感应钎焊 3 种工艺。激光钎焊具备热源集中、加工效率高的优势,但极快的升/降温速率易在涂层-基体界面处诱发较大残余应力,进而增加涂层开裂与剥落风险^[17]。感应钎焊虽加热迅速且能耗较低,然而对于犁铧、旋耕刀等复杂曲面农机触土部件,其温度场均匀性难以精准把控,易造成局部钎焊缺陷。相较之下,真空钎焊在高真空环境中进行,能有效抑制 Cr 等活性元素的氧化失效,保障钎料对金刚石颗粒的良好润湿与牢固冶金结合;同时,该工艺的整体均匀加热特性与精准控温能力,有助于形成厚度均匀、成分稳定的界面反应层,确保涂层力学性能的一致性^[18]。因此,真空钎焊是系统研究金刚石复合涂层界面结合机制的理想技术手段。

本研究基于上述背景,聚焦于农机触土部件在严苛服役工况下的耐磨性提升需求,针对现有表面技术中涂层结合强度不足、硬质相分布不均等瓶颈问题,选取真空钎焊工艺作为金刚石复合涂层的制备方法,系统探究钎焊温度对涂层界面结合、组织形貌及耐磨性能的影响规律。旨在开发兼具高强度界面结合与优异抗冲击磨损性能的金金刚石复合涂层,为提升农机触土部件在极端工况下的使用寿命与作业效率。

1 实验材料与方法

1.1 钎焊金刚石复合涂层制备

钎涂基体选用尺寸为 57 mm × 25.5 mm × 6 mm 的 34MnB5 钢,钎料采用天津铸金公司生产的 Ni60AA 型镍基钎料,主要化学成分见表 1。金刚石颗粒选用黄河旋风公司提供的 MD-S 级单晶金刚石破碎料,粒度规格为 120/140 目。

在真空钎焊之前,使用 SiC 砂纸对基体进行研

表 1 Ni60AA 钎料的质量分数

Tab.1 Mass fraction of Ni60AA brazing filler metal							
元素	C	O	B	Si	Cr	Fe	Ni
质量分数/%	0.85	0.01	3.23	4.37	17.18	4.26	Bal

注: Bal 表示余量。

磨,以去除表面氧化物及铁锈。接着,对金刚石颗粒和钢基体进行超声波清洗。将镍基钎料与金刚石颗粒按质量比 9:1 混合称量,并加入由宁波中集松兰工具科技有限公司生产的商用粘结剂,使用搅拌机充分混合均匀。将混合均匀的涂层材料预制在 34MnB5 钢基体表面,形成厚度约 1 mm 的预制层,随后在 120℃ 下烘干并保温 1 h,烘干后进行真空加热处理。真空加热使用 ZM-40-15 型真空热处理装备,工艺参数设置如下:首先,在 45 min 内将真空热处理炉升温至 300℃;随后以 10℃/min 的速率加热至预定温度(1 010、1 030、1 050、1 070、1 090、1 110℃);在该温度下保温 20 min 后,随炉冷却至室温。

1.2 钎焊金刚石复合涂层性能表征

涂层样品的截面形貌和磨损后的表面形貌通过扫描电子显微镜(SEM,Tescan Mira)进行观察,元素组成分析使用牛津 ULTim Max 能谱仪。采用 X 射线衍射仪(XRD,ULTIMALV)进行涂层截面的物相分析,扫描角度为 25°~80°。在进行拉曼测试之前,采用王水侵蚀样品表面,以使金刚石颗粒更为裸露,从而便于通过拉曼光谱(Labram HR Evolution)分析金刚石表面的石墨化程度。涂层硬度测量采用 HR-150A 型洛氏硬度计,加载载荷设定为 120 N,每个试样至少测量 5 次,并以至少 3 个试样的平均值作为最终硬度值。采用干砂橡胶轮测试涂层耐磨性,实验参数为:橡胶轮转速 240 r/min;橡胶轮硬度 70 HS;载荷为 70 N;磨料为 50~70 目的石英砂;预磨 1 000 r;正式实验 2 000 r。最后,使用精度为 0.1 mg 的电子天平对样品质量进行称量,正式实验前后样品的质量差即为样品的磨料磨损损失量。

2 结果与分析

2.1 涂层微观结构

图 1 为不同真空钎焊温度下金刚石复合涂层截面的 XRD 结果。分析表明,涂层主要由金刚石、γ-Ni、Ni₆Si₂B 及若干铬的碳化物组成。其中,铬的碳化物衍射峰随钎焊温度变化尤为明显。在 1 010℃ 时,可检测到 Cr₇C₃ 的衍射峰,推测其源于钎料中的铬元素与金刚石颗粒之间的反应。当温度升高至 1 030℃ 时,开始出现微弱的 Cr₃C₂ 衍射峰;随着温度进一步上升,Cr₃C₂ 与 Cr₇C₃ 的衍射峰数量增加,且强度显著增强。

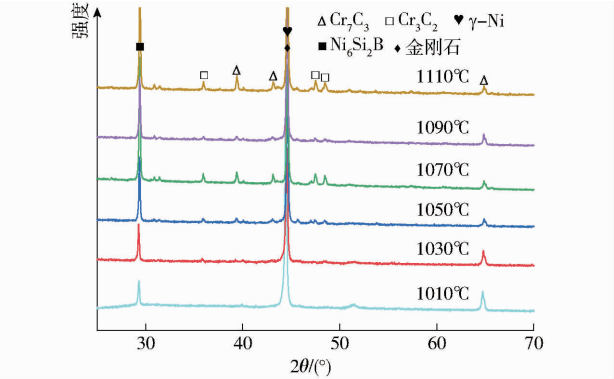


图 1 不同真空钎焊温度涂层截面 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of coating cross-sections at different vacuum brazing temperatures

图 2 展示了在不同真空钎焊温度下制备的金刚石复合涂层的截面形貌,其中蓝色虚线标示了涂层与钢基体之间的界面。由图可知,涂层与基体间界面清晰,结合良好,金刚石颗粒在 Ni-Cr 基钎料中分布较为均匀。其中,涂层在 1 030℃ 制备条件下厚度偏大,主要归因于手工涂敷过程中产生的厚度误差。此外,钎焊温度对金刚石颗粒在熔体中的上浮行为也具有显著影响。当钎焊温度超过 1 050℃ 时,金刚石颗粒出现明显的上浮现象。这是因为金刚石密度(约 3.5 g/cm³)低于镍铬合金的密度(7.9~8.4 g/cm³)。在钎焊过程中,Ni60AA 钎焊材料熔化形成高温熔池,未熔的金刚石颗粒因密度差异而以固态形式上浮。更高的钎焊温度会增强合金熔体的流动性,从而加快金刚石的上浮速率,该现象与 Wu 等^[19]在研究感应钎焊工艺参数(包括温度与保温时间)对金刚石/Ni 基复合涂层组织与性能影响时所得结论一致。金刚石颗粒的上浮行为直接影响涂层的均匀性,从而显著影响其整体性能。力学性能方面,表层富集的金刚石形成高硬度“耐磨壳层”,在提升表面承载能力的同时,其梯度分布有助于缓解应力集中;然而,这种非均匀分布导致涂层底部出现金刚石匮乏区,形成了典型的“硬壳软基”结构,限制了涂层的整体变形协调能力。耐磨性能方面,表层富集层赋予了涂层优异的初始耐磨性能,其梯度过渡区域能有效缓冲载荷,避免涂层发生脆性剥落或突发性失效。然而,涂层的有效服役寿命依赖于富集层的厚度。一旦磨损突破表层进入底部的金刚石贫乏区,涂层的抗磨损能力将显著恶化,影响金刚石复合涂层长期服役可靠性。

此外,在 1 010℃ 与 1 110℃ 两种钎焊温度下,在图 2a 与图 2f 中的白色方框区域均观察到明显孔洞。钎焊温度为 1 010℃ 时,由于钎焊温度相对较低,钎料的流动性与铺展性不足,难以在金刚石颗粒间充分填充,且钎料与金刚石之间难以形成连续碳

化铬层。而在 1 110℃ 条件下,涂层中出现大量微裂纹,这是因为金刚石与钎料热膨胀系数不匹配,在较高温度下引发较大的残余应力。该应力易在钎料与

基体界面,以及金刚石与钎料的结合处萌生裂纹,并在持续加热过程中扩展,最终导致涂层出现较多的微观裂纹。该现象与 Sun 等^[20]的研究结果一致。

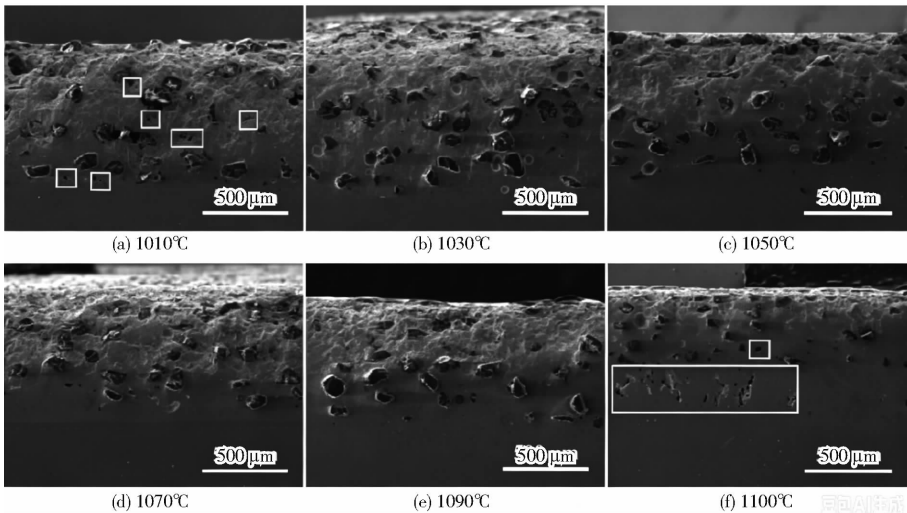


图 2 不同钎焊温度下金刚石复合涂层截面形貌

Fig. 2 Cross-sectional morphologies of diamond composite coatings brazed at different temperatures

图 3a 显示了在 1 030℃ 下制备的金刚石复合涂层的截面整体形貌。对该截面中蓝色及红色标记区域(其放大图分别为图 3b 与图 3c)进行了成分点扫描与线扫描分析。点扫描结果见表 2,线扫描结果见图 3d。根据表 2 的 EDS 结果(Point 1),可确认图 3c 中左上角的黑色区域为金刚石颗粒;钎料基体中的深灰色区域(Point 2 和 Point 3)主要含有 Cr 元素和 C 元素,为铬的碳化物聚集区^[21]。由于 Ni 是典型的溶碳元素,在高温下不仅能吸引金刚石表面的碳原子脱离晶格、扩散进入 Ni 基体,还对金刚石表面具有强烈的催化石墨化效应^[22],致使 Point 2

和 Point 3 中含有大量 C;浅灰色区域(Point 4 和 Point 5)主要含有 Ni 元素和 C 元素,基于 XRD 分析结果(图 1),推测该区域主要由 γ -Ni 及 $\text{Ni}_6\text{Si}_2\text{B}$ 等镍基化合物构成。此外,涂层中可见少量弥散分布的黑色颗粒(Point 6),结合 EDS 结果推测其为 SiC 颗粒。值得注意的是,在金刚石颗粒周围可观察到一层连续分布的富 Cr 碳化物区(图 3c 中 A 区域)。该界面结构实现了金刚石颗粒与钎料合金之间的冶金结合,有助于提高两者间的界面结合强度。结合图 3b 和图 3d 可知,涂层与基体结合紧密且无裂纹。钎料中的主要元素 Ni 与钢基体中的 Fe 发生了明显的互扩散,形成厚度约为 5 μm 的扩散层。这表明金刚石复合涂层与 34MnB5 钢基体之间实现了良好的冶金结合,有利于防止涂层在使用中发生剥离。

表 2 图 3c 中 EDS 成分分析结果

Tab. 2 EDS compositional analysis of area marked in Fig. 3c

位置	原子百分数/%					可能物相
	C	Cr	Ni	Si	Fe	
1	100					金刚石
2	60.96	37.85	0.71		0.48	C、Cr _x C _y
3	48.82	48.92	1.27			C、Cr _x C _y
4	35.76	2.06	47.18	11.53	3.46	γ -Ni
5	24.33	3.66	60.48	5.75	5.78	γ -Ni
6	52.85	1.25	2.49	43.41		SiC

针对图 2 中观察到的金刚石颗粒在较高钎焊温度下上浮的现象,对钎焊温度为 1 030℃ 和 1 050℃ 的试样截面进行了 EDS 面扫描分析,结果如图 4 所

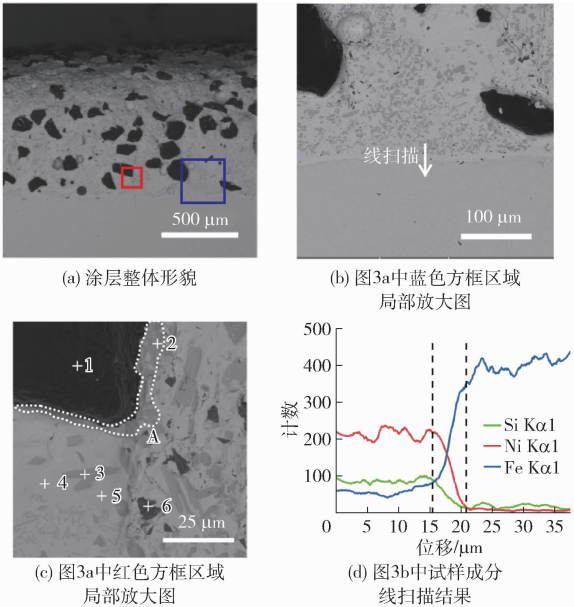


图 3 1 030℃ 钎焊温度下涂层截面微观形貌

Fig. 3 Cross-sectional microstructures of coating brazed at 1 030℃

示。当钎焊温度为 1 030℃ 时,金刚石颗粒没有发生明显的上浮,且各元素均匀分布在涂层中。当温度升至 1 050℃ 时,金刚石颗粒出现明显上浮。与此同时,Cr 元素在涂层中发生偏聚,向上迁移并富集于上浮金刚石颗粒周围,而在不含金刚石的区域则形成 Cr 的贫乏区;其余元素(如 Ni、Si 等)在涂层中仍保持相对均匀分布。Cr 作为钎料中的关键活性元素,与 C 之间具有强烈的化学亲和性,在钎焊过程中会优先向金刚石颗粒表面迁移并富集,进而促进界面碳化物的形成。从热力学角度来看,Cr 作为一种强碳化物形成元素,在钎焊过程中能与 C 反应生

成 Cr_3C_2 和 Cr_7C_3 ,该反应伴随自由能的降低^[23],是 Cr 向金刚石颗粒迁移的根本驱动力。Xu 等^[24]采用第一性原理计算,系统研究了 Ni 基钎料合金中常见元素(Ni、Cr、B、Si)在金刚石(111)表面的吸附与扩散行为。结果表明,各元素的吸附能大小顺序为 B、Cr、Si、Ni,其中 B 的吸附能最高,但其向金刚石的扩散能垒也最大。相比之下,Cr 兼具较强的吸附能力和较好的扩散性能,有助于其向界面迁移并形成碳化物,从而增强界面结合。Lu 等^[21]的实验也进一步证实,Cr 在钎焊过程中优先向金刚石表面迁移并富集。

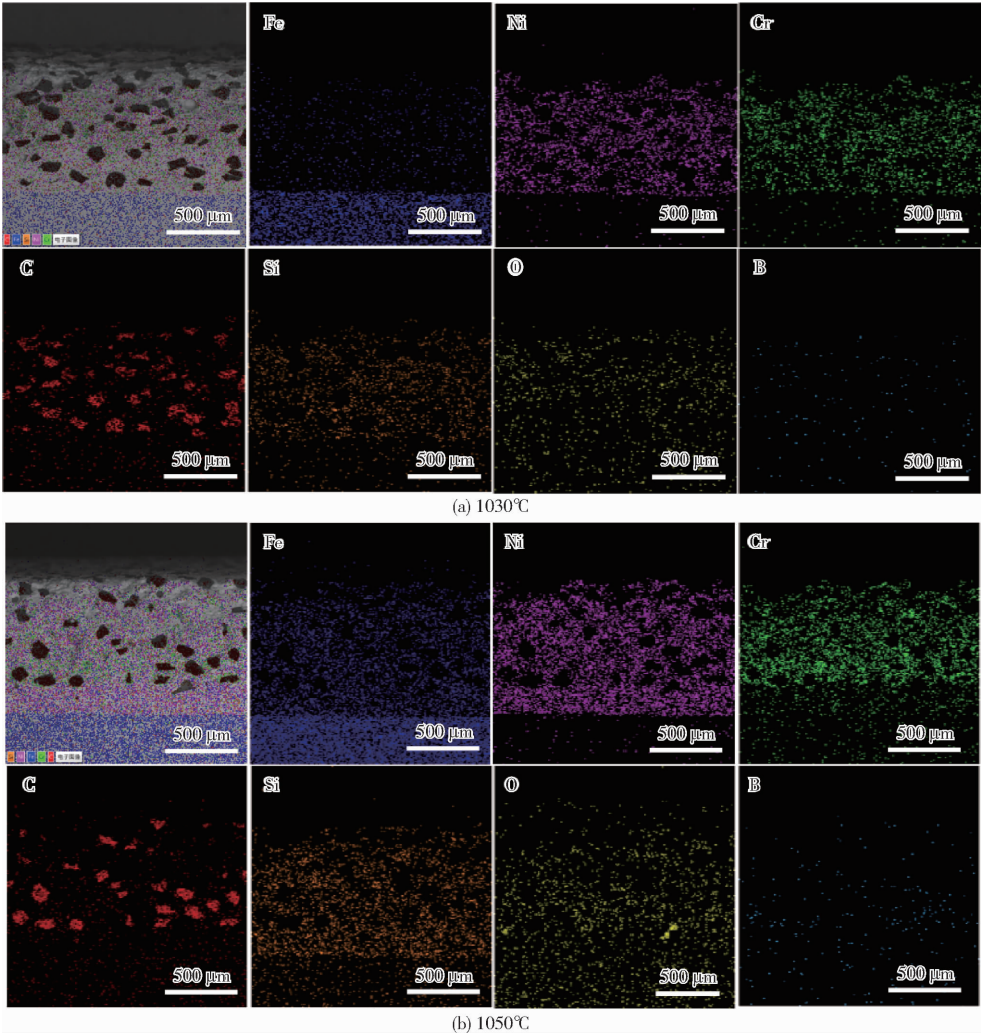


图 4 不同真空钎焊温度下金刚石复合涂层截面面扫描结果

Fig. 4 Cross-sectional EDS elemental mapping of diamond composite coatings brazed at different temperatures

图 5 展示了不同钎焊温度下金刚石颗粒周围 Cr 元素的分布特征。在 1 010℃ 的较低温度下,Cr 元素在涂层中呈均匀分布状态,仅存在极少量的铬碳化物聚集区。当温度升至 1 030℃ 时,金刚石颗粒周围开始出现铬碳化物的局部富集,并形成尺寸较小的连续碳化物层。进一步提高温度至 1 050℃,涂层中铬碳化物的含量进一步增加。随着钎焊温度升高,钎料中 Ni 元素对碳的固溶度加强,吸引金刚石

表面的碳原子脱离晶格,并使其扩散进入 Ni 基体^[25],导致钎料基体中的碳含量相应增加。当温度超过 1 050℃ 后,Cr 元素向金刚石颗粒周围迁移的趋势更为显著,与碳元素反应后,在金刚石颗粒周围形成宽厚而连续的碳化物富集层;相应地,远离金刚石颗粒的区域中 Cr 元素的含量则显著降低。活性元素 Cr 与金刚石(C)反应生成碳化物,是一个需要足够热激活能驱动的扩散与化学反应过程。较低的

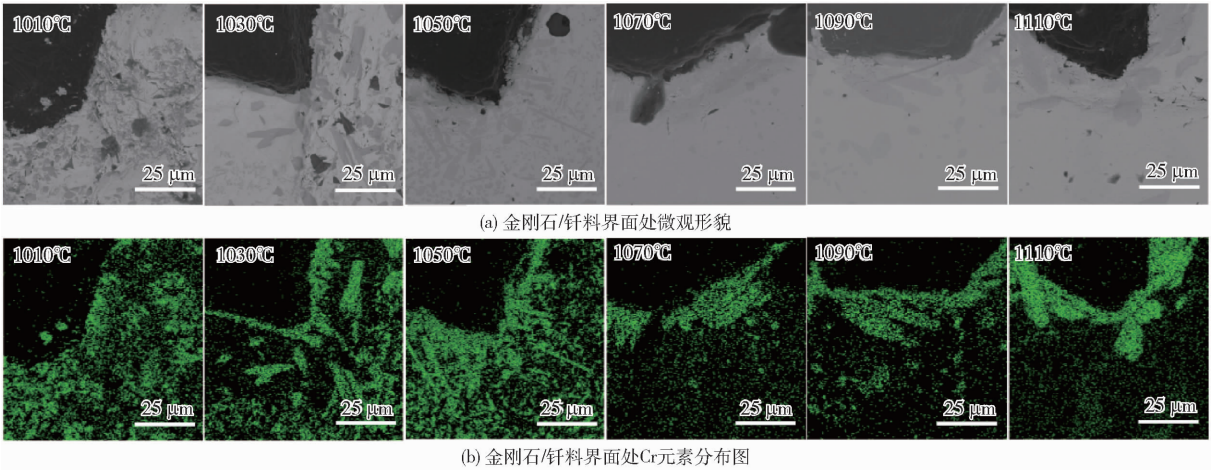


图5 不同钎焊温度下金刚石/钎料界面处的微观形貌与 Cr 元素分布图

Fig. 5 Cr element distribution maps at diamond/filler interface at different brazing temperatures

钎焊温度下,Cr 原子在钎料熔体中的扩散速率较慢,且反应驱动力不足,难以完全克服反应能垒,导致碳化物生成不充分。更高的温度增强了扩散驱动力与原子迁移率,促进了 Cr 元素向金刚石颗粒周围的富集,提高了碳化物形成的反应驱动力,最终在金刚石周围形成更宽、更连续的碳化物层^[26]。Zheng 等^[27]在 1 030 ~ 1 110℃ 的钎焊温度下观察到,金刚石颗粒周围自发生成了 Cr_3C_2 、 Cr_7C_3 及 Cr_{23}C_6 等 Cr_xC_y 型碳化物,该结果进一步支持了上述结论。

在反应热力学分析中,体系行为遵循热力学第二定律。通常采用吉布斯自由能 ΔG_T (kJ/mol) 作为判断反应自发性的依据:若 $\Delta G_T > 0$,表明反应无法自发进行;而 $\Delta G_T < 0$,则意味着反应具有自发性^[19]。热力学分析进一步表明,在高温条件下,金刚石颗粒内部可发生石墨化转变,同时金刚石中的 C 也可向钎料中溶解扩散^[13]。图 6 展示了不同钎焊温度下涂层中金刚石颗粒的石墨化演变过程。拉曼光谱分析显示,与碳相关的特征峰分别位于 $1\,331.20\text{ cm}^{-1}$ (对应金刚石 sp^3 键振动)、 $1\,351.26\text{ cm}^{-1}$ (D 峰,反映碳材料中的无序结构或缺陷)、 $1\,583.05\text{ cm}^{-1}$ (G 峰,对应石墨 sp^2 键振动)以及 $1\,622.72\text{ cm}^{-1}$ (D2 峰,反映碳材料中的高度无序结构或缺陷)^[28]。在 $1\,010^\circ\text{C}$ 钎焊温度下,光谱仅在 $1\,331.20\text{ cm}^{-1}$ 处出现明显特征峰,表明金刚石结构保持完整,未发生明显石墨化。当温度升至 $1\,050^\circ\text{C}$ 和 $1\,070^\circ\text{C}$ 时, $1\,331.20\text{ cm}^{-1}$ 处金刚石特征峰强度逐渐减弱,同时在 $1\,351.26$ 、 $1\,583.05$ 、 $1\,622.72\text{ cm}^{-1}$ 处出现明显信号;其中 D 峰和 D2 峰的出现说明金刚石颗粒表面因高温作用发生结构损伤并开始向无序碳转变,G 峰的出现则证实表面已形成石墨化层。当温度升至 $1\,110^\circ\text{C}$ 时, $1\,331.20\text{ cm}^{-1}$ 处的金刚石特征峰完全消失,仅保留 D 峰($1\,351.26\text{ cm}^{-1}$)、D2 峰

($1\,622.72\text{ cm}^{-1}$) 与 G 峰($1\,583.05\text{ cm}^{-1}$),表明金刚石颗粒表面已发生彻底的石墨化转变。上述结果说明,随着钎焊温度升高,金刚石特征峰强度逐渐降低,石墨相关特征峰逐渐增强,金刚石表面石墨化程度相应提高。这将更有利于碳原子在熔池中扩散,并与游离的铬原子反应生成铬碳化物,在熔池中形成了一个碳-铬反应体系。

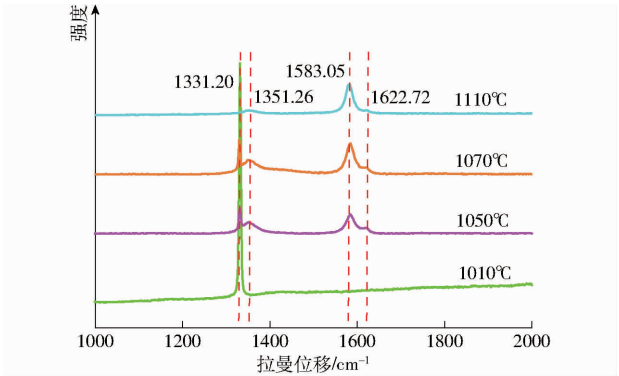


图6 不同真空钎焊温度下复合涂层中金刚石颗粒的拉曼光谱图

Fig. 6 Raman spectra of diamond particles in composite coatings vacuum brazed at different temperatures

2.2 涂层硬度

图 7 展示了不同真空钎焊温度下制备的金刚石复合涂层的洛氏硬度演变规律。随着钎焊温度从 $1\,010^\circ\text{C}$ 升高至 $1\,090^\circ\text{C}$,涂层硬度呈现先显著上升后小幅下降的趋势。在 $1\,010^\circ\text{C}$ 时,涂层硬度仅为 25.2 HRC。这主要归因于该温度下液态钎料流动性不足,活性元素 Cr 与金刚石之间的界面反应不充分(图 5a),未能形成连续、致密的碳化物层,导致金刚石与钎料之间以机械嵌合为主,界面结合较弱。随着温度升高,碳化物含量逐渐增加(图 5),涂层硬度持续上升,在 $1\,050^\circ\text{C}$,涂层硬度提升至 68.2 HRC,并在 $1\,070^\circ\text{C}$ 时达到峰值

(73.0 HRC)。温度进一步升至 1 090℃ 时,硬度下降至 67.0 HRC。参照拉曼光谱(图 6),随着温度的升高,位于 $1\,351.26\text{ cm}^{-1}$ (D 峰)、 $1\,622.72\text{ cm}^{-1}$ (D2 峰)和 $1\,583.05\text{ cm}^{-1}$ (G 峰)处的特征峰会逐渐增强,表明金刚石表面已发生明显的石墨化转变,生成了大量低硬度的石墨相。这些软质相在界面处富集,不仅削弱了界面结合强度,也降低了涂层的整体承载能力,从而导致硬度下降。崔长春等^[29]通过向镍铬钎料中适量添加石墨烯,有效降低了钎焊金刚石的石墨化程度及残余应力等热损伤,显著改善了钎焊层的显微硬度与摩擦磨损性能。这也证实了金刚石石墨化产生的低硬度石墨相会削弱涂层硬度。总体而言,当钎焊温度高于 1 030℃ 时,涂层硬度始终维持在 65.0 HRC 以上,展现出优异的力学性能。

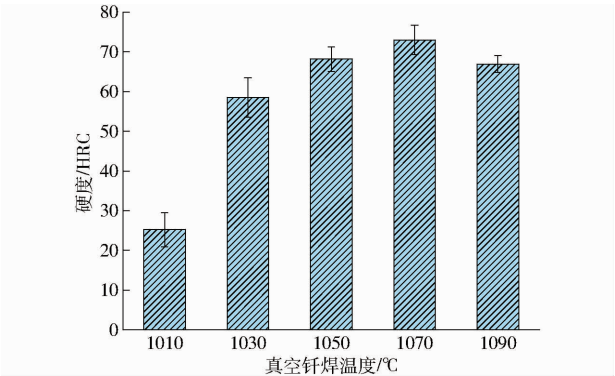


图 7 不同真空钎焊温度下复合涂层的洛氏硬度
Fig.7 Rockwell hardness of composite coatings vacuum brazed at different temperatures

2.3 涂层耐磨性能

图 8 展示了不同真空钎焊温度下试样的橡胶轮摩擦磨损实验结果。如图可见,涂层磨损量随钎焊温度升高呈先显著降低后逐渐上升的趋势。当钎焊温度为 1 010℃ 时,磨损量最高,达到 106.3 mg。随

着温度升高至 1 050℃,磨损量逐渐下降至最低值 9.3 mg,表明该温度下涂层耐磨性最优;此后继续升高温度,磨损量呈现回升趋势,在 1 090℃ 时增至 68.3 mg,涂层耐磨性相应下降。由图 7、8 可见,金刚石复合涂层的硬度与耐磨性随温度的变化趋势具有一致性,但二者最优值对应的钎焊温度存在一定差异。在 1 050℃ 条件下,金刚石界面处形成了薄而连续的碳化物层,实现了钎料与金刚石之间的强冶金结合,有效锚固金刚石颗粒,使磨损量达到最低值 (9.3 mg)。而当温度升至 1 070℃ 时,尽管涂层硬度进一步提升,但金刚石石墨化加剧,且碳化物层过厚导致界面脆性增加,金刚石颗粒在磨损应力下更易脱落,从而削弱了涂层硬度提升所带来的正面效应,导致磨损量增加。

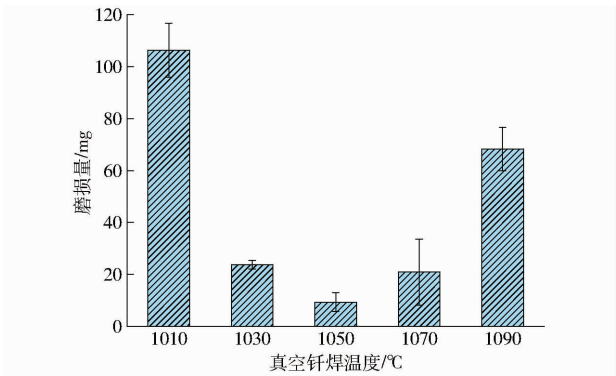


图 8 不同钎焊温度下金刚石复合涂层磨损量
Fig.8 Wear mass loss of diamond composite coatings brazed at different temperatures

钎焊金刚石复合涂层的失效行为主要受金刚石颗粒的分布状态、自身强度及其与镍铬合金基体间的界面结合强度共同影响,其失效模式主要表现为磨粒磨损。该过程本质上是“钎料基体磨损→金刚石颗粒磨损→金刚石颗粒脱落或断裂”这一循环的持续进行^[9]。图 9 展示了不同真空钎焊温度下试样

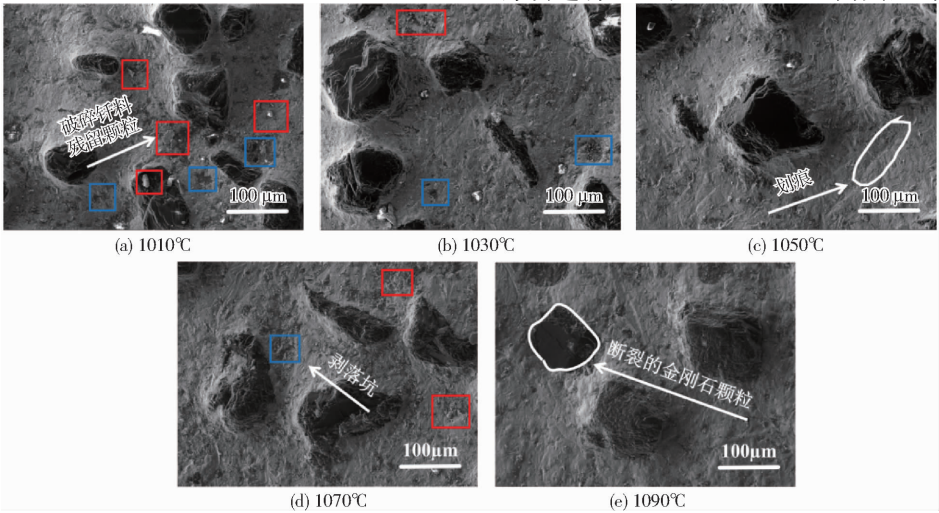


图 9 不同钎焊温度下制备的金刚石复合涂层磨痕形貌

Fig.9 Wear track morphologies of diamond composite coatings prepared at different brazing temperatures

磨损后的表面形貌。当钎焊温度为 1 010℃ 时, 涂层表面可见大量尺寸较大、边缘清晰的剥落坑(如图中蓝色方框所示), 并伴有破碎钎料的残留颗粒(如图中红色方框所示)。这些脱落颗粒在后续磨损过程中可作为硬质磨粒, 进一步加剧表面的磨粒磨损。随着温度升至 1 030℃, 剥落坑的数量与尺寸均显著减少。这主要是由于该温度下金刚石周围开始形成铬碳化物聚集区, 同时钎料基体中生成少量铬碳化物(见图 5), 从而改善了涂层的整体力学性能与耐磨性。在 1 050℃ 下, 涂层获得最佳的界面结合状态, 金刚石颗粒被钎料充分包裹。磨痕表面较为平整, 仅可见轻微划痕。结合图 5c 可知, 在该温度下, 金刚石周围形成了细小且均匀分布的铬碳化物过渡层。该结构不仅显著增强了界面结合强度, 还有效缓解了局部应力集中, 使得金刚石颗粒在磨损过程中难以脱落, 从而充分发挥其耐磨磨架作用, 使涂层表现出最优的耐磨性能。然而, 当钎焊温度进一步升高至 1 070℃ 和 1 090℃ 时, 涂层表面的剥落坑数量再度增加。特别是在 1 090℃ 钎焊温度下, 可观察到金刚石颗粒发生断裂的现象。钎焊金刚石复合涂层的耐磨性能与热输入量密切相关。一方面, 较低的热输入量(体现为较低的钎焊温度与较短的保温时间) 会导致金刚石与基体之间形成的冶金结合层过薄, 界面结合强度不足。在磨损过程中, 此薄弱界

面不足以固定金刚石颗粒, 导致颗粒更易发生脱落或位移, 从而削弱涂层的整体耐磨性^[30]。另一方面, 过高的钎焊温度则会引发金刚石显著的石墨化转变, 削弱了其结合力。同样地, 这会使金刚石颗粒在磨损载荷下更易发生位移甚至脱落, 最终导致涂层的耐磨性能下降。

3 结论

(1) 随着钎焊温度升高, 金刚石颗粒因密度差异出现上浮现象。同时, 活性 Cr 元素向金刚石表面聚集, 与之反应生成 Cr_3C_2 与 Cr_7C_3 碳化物过渡层, 实现了金刚石与钎料基体的强冶金结合。

(2) 涂层硬度随钎焊温度升高呈现出先升高后降低的趋势。在 1 030 ~ 1 070℃ 区间内, 得益于充分的碳化物强化效应与强界面结合, 涂层硬度较高; 当温度过高时, 金刚石表面石墨化加剧及界面脆性相增多, 从而导致硬度下降。

(3) 涂层耐磨性对钎焊温度极为敏感, 其中 1 050℃ 为最优工艺参数。在此温度下, 涂层磨损量最低(9.3 mg), 表现出最优的综合性能。在较低钎焊温度下, 金刚石与基体间的冶金结合层较薄、界面结合强度不足; 而温度过高则会引发金刚石明显石墨化, 导致界面脆性增加。这两种情况均会造成金刚石在磨损中脱落, 降低涂层耐磨性。

参 考 文 献

- [1] 齐江涛, 杨宇超, 丁文瑞, 等. 播种作业触土部件研究综述[J]. 农业机械学报, 2026, 57(11): 15–35.
Qi Jiangtao, Yang Yuchao, Ding Wenrui, et al. Review of research on soil-engaging components in seeding operations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 15–35. (in Chinese)
- [2] 郝建军, 张鹏浩, 罗殿宇, 等. 农机触土部件减粘脱附研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2026, 57(11): 36–50.
Hao Jianjun, Zhang Penghao, Luo Dianyu, et al. Research status and prospects of reducing adhesion and facilitating detachment on ground-contact components of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 36–50. (in Chinese)
- [3] Niranatumpom P, Sukhonket C, Nakgoenthong J. Wear resistant surface treatment of pulverizer blades[J]. Wear, 2013, 302(1–2): 878–881.
- [4] Zhang Yongsheng, Zhu Gen, Qi Shiming, et al. The effect of TiC on the microstructure and properties of Ni-based alloys[J]. Electric Welding, 2026, 56(1): 27–34.
- [5] 王海淞, 马跃进, 李建昌, 等. 深松铲氩弧熔覆 TiC/Ni 复合涂层组织和性能研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(14): 127–129, 132.
Wang Haisong, Ma Yuejin, Li Jianchang, et al. Study on microstructure and properties of TiC/Ni composite coating on sub-soling shovel prepared by argon arc cladding[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(14): 127–129, 132. (in Chinese)
- [6] 李开杰, 谢建华, 郑炫, 等. 不同合金耐磨层对犁铲尖耐磨性能与冲击韧性的影响[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 208–213.
Li Kaijie, Xie Jianhua, Zheng Xuan, et al. Effect of different alloy wear-resistant layers on wear resistance and impact toughness of plow share tip[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 208–213. (in Chinese)
- [7] 李碧晗, 王彦民, 马小斌, 等. 低速重载下 GCr15 表面超声振动复合电火花沉积 WC 涂层的摩擦磨损性能[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 420–426.
Li Bihan, Wang Yanmin, Ma Xiaobin, et al. Friction and wear performance of ultrasonic vibration composite electro-spark deposition WC coatings on GCr15 surface with heavy load at low speed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 420–426. (in Chinese)

- [8] 詹华, 张艳静, 郑军, 等. 农业机械触土部件材料研究与应用进展综述[J]. 农业机械学报, 2026, 57(11): 1–14.
Zhan Hua, Zhang Yanjing, Zheng Jun, et al. Review of research and application progress of materials for agricultural machinery soil-contact components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 1–14. (in Chinese)
- [9] Wu Qilong, Sun Huawei, Zhao Hongwei, et al. Optimized strategy for induction cladding of diamond/Ni-based wear-resistant coatings[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 150: 111776.
- [10] 朱晨颖, 张雷, 孙志鹏, 等. 感应钎涂工艺在旋耕刀上的应用研究[J]. 电焊机, 2022, 52(10): 23–30.
Zhu Chenying, Zhang Lei, Sun Zhipeng, et al. Application research of induction brazing coating technology on rotary blade[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(10): 23–30. (in Chinese)
- [11] 司浩, 秦建, 钟素娟, 等. 钎涂技术的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊2): 333–340, 345.
Si Hao, Qin Jian, Zhong Sujuan, et al. Research progress of brazing coating technology[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 333–340, 345. (in Chinese)
- [12] 吴奇隆, 张雷, 孙华为, 等. 钎涂金刚石在盾构刀具再制造中的应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(5): 9–13.
Wu Qilong, Zhang Lei, Sun Huawei, et al. Application of brazed coating diamond in remanufacturing of shield cutters[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(5): 9–13. (in Chinese)
- [13] Jin Tian, Zhang Chunxia, Zhong Sujuan, et al. Comparative study on induction brazing of diamond with rare earth Nd-doped crystalline and amorphous Ni-based filler alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 1084–1093.
- [14] Yang Zhibo, Liu Aiju, Yang Ruiyun. Analysis of laser-brazed diamond particle microstructures[J]. Materials Science, 2015, 21(4): 616–621.
- [15] Zhu Hongtao, Qin Jian, Song Xinyi, et al. Research on laser brazing diamond coating process based on temperature field finite element simulation and machine learning[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 149: 111647.
- [16] Zhu Hongtao, Qin Jian, Long Weimin, et al. Research status of crack problem in laser brazing diamond[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(10): 2329–2343.
- [17] Huang Jiankang, Yang Maohong, Liu Jian, et al. Residual stress field analysis of Al/steel butt joint using laser welding-brazing[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(17): 2053–2063.
- [18] Zhang Liang. Filler metals, brazing processing and reliability for diamond tools brazing: a review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 651–668.
- [19] Wu Qilong, Sun Huawei, Zhao Hongwei, et al. Fabrication of wear-resistant diamond/Ni-based composite coatings via induction brazing[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2025, 129: 107098.
- [20] Sun Baojun, Xiao Bing. Effects of process parameters on interfacial microstructure, residual stresses, and properties of tunnel furnace brazed diamonds[J]. Diamond and Related Materials, 2018, 85: 98–103.
- [21] Lu Jinbin, Cao Ziyang, Qi Fangjuan, et al. Evolution of interface carbide diamond brazed with filler alloy containing Cr[J]. Diamond and Related Materials, 2018, 90: 116–125.
- [22] Duan Duanzhi, Li Changsheng, Sun Lin, et al. Microstructure and performance of brazed diamonds with Ni–Cr + multilayer graphene composite alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 816: 152630.
- [23] Kleykamp H. Thermodynamic studies on chromium carbides by the electromotive force (emf) method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2001, 321(1): 138–145.
- [24] Xu Qi, Zhang Jian, Hu Yongle, et al. Adsorption and diffusion behaviors of Ni-based filler elements on diamond surface[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 822: 153652.
- [25] Cheng Wei, Liu Zhuo, Lin Qiaoli, et al. Towards tailorable interface microstructure through solid-state interface reaction between synthetic diamond grits and sputtered Ni–Cr binary alloy[J]. Applied Surface Science, 2022, 596: 153531.
- [26] Xu Lei, Wei Chenlong, Li Wei, et al. Microwave-assisted molten-salt facile synthesis of chromium carbide (Cr_3C_2) coatings on the diamond particles[J]. High Temperature Materials and Processes, 2019, 38(2019): 370–379.
- [27] Zheng Xin, Zheng Ke, Chang Jiannan, et al. Microstructure, mechanical properties and reciprocating wear properties of diamond grits-reinforced NiCrBSi composite coatings on 42CrMo[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 445: 128703.
- [28] Yuan Ruichuan, Guo Yiwen, Gurgan L, et al. Raman spectroscopy analysis of disordered and amorphous carbon materials: a review of empirical correlations[J]. Carbon, 2025, 238: 120214.
- [29] 崔长春, 李奇林, 谈志东, 等. 石墨烯改性 Ni–Cr 合金激光钎焊金刚石界面组织与力学性能研究[J]. 表面技术, 2025, 54(7): 109–117.
Cui Changchun, Li Qilin, Tan Zhidong, et al. Interface structure and mechanical properties of laser-brazed diamond of graphene-modified Ni–Cr alloy[J]. Surface Technology, 2025, 54(7): 109–117. (in Chinese)
- [30] Wang Shuyi, Xiao Bing, Xiao Haozhong, et al. Interface microstructure and bonding performance of brazed W-coated diamonds using Ni–Cr alloy[J]. Ceramics International, 2022, 48(7): 9864–9872.