DOI:10.20038/j.cnki.mra.2024.000512



Y元素对Ni-Cr非晶钎料钎焊金刚石组织和性能的影响

冯帅帅^{1,2}, 王邦伦², 陈志浩², 王朋波^{1,2}, 张雷³, 钟素娟³, 李家茂¹, 徐东^{2,3*} (1. 安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽马鞍山 243002; 2. 安徽工程大学材料科学与工程学院, 安徽 芜湖 241000; 3. 郑州机械研究所有限公司新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:钎焊金刚石工具因化学冶金结合方式而具备较高的结合强度,在陶瓷、半导体和玻璃等硬脆性材料 的加工行业及轨道交通、航空航天等领域中拥有广泛的应用前景。虽然Ni基钎料钎焊金刚石工具在结合 强度、耐磨性及服役环境方面具有一定的优势,但是较高的钎焊温度和化学侵蚀会对金刚石磨粒造成较为 严重的热损伤,从而影响金刚石工具的工作效率和服役寿命。为了降低钎焊过程中金刚石的热损伤,采用 掺杂Y元素的Ni-Cr非晶钎料钎焊金刚石,通过SEM研究了钎焊金刚石试样的界面微观形貌,使用拉曼光 谱仪分析了钎焊金刚石试样的石墨化程度,同时还探究了钎焊金刚石试样的力学性能。结果表明,当Y元 素的质量分数为0.8%时,钎焊试样的金刚石形貌最为完整,钎焊层硬度最高为533 HV_{0.1},金刚石出露度 较高为76.2%且石墨化程度较低。另外,Y元素的添加细化了碳化物的尺寸,降低了碳化物微裂纹的产 生。相较于未添加Y元素的钎焊试样,添加Y元素的金刚石钎焊试样的抗压强度提升了约50.4%,磨削性 能提高了43.5%,金刚石的脱落数量最少。表明,用Y元素掺杂的Ni-Cr非晶钎料可成功制备出钎焊金刚 石试样,同时还降低了钎料中的触媒元素对金刚石的侵蚀作用,改善了热损伤和磨削性能。本研究为非晶 钎料在钎焊金刚石工具领域中的应用提供了可靠的理论支持,并为相关工业生产提供了新的技术路径,在 降低生产成本和推动绿色生产方面具有一定的实际意义。

关键词:Ni-Cr非晶针料;钎焊金刚石;热损伤;磨削性能;微观形貌;抗压强度;Y元素;石墨化
 中图分类号:TG425
 文献标志码:A
 文章编号:1673-9981(2024)05-0787-09

引文格式:冯帅帅,王邦伦,陈志浩,等.Y元素对Ni-Cr非晶钎料钎焊金刚石组织和性能的影响[J].材料研究与应用,2024,18 (5):787-795.

FENG Shuaishuai, WANG Banglun, CHEN Zhihao, et al. Effect of Element Y on the Organization and Properties of Ni-Cr Amorphous Filler Alloy Brazed Diamond[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(5):787-795.

0 引言

金刚石颗粒具有较高的强度、硬度及耐磨等特性,是一种天然的优秀加工工具^[1-2],被广泛应用于陶瓷、半导体和玻璃等硬、脆性材料的加工行业^[3-6],以及钢轨^[7]、航空航天^[8]等领域。常见的金刚石工 具制备方式包括热压烧结^[9]、电镀^[10-11]及钎焊^[1,12-13]。 相较于机械结合方式(如热压烧结和电镀)制备的金 刚石工具,化学冶金结合方式制备的钎焊金刚石工 具具有较高的结合强度,受到人们的广泛青睐^[14]。 近年来,随着非晶制备技术的快速发展,非晶态材料 在钎焊领域中也得到了应用。非晶钎料具有成分均 匀、润湿性好及熔点低等优点^[15],在钎焊金刚石领 域中有着广泛的应用前景。

目前,Ni基钎料钎焊金刚石工具拥有优良的结 合强度、良好的耐磨性及广泛的服役环境等优势,吸 引了较多研究者的注意^[16-17]。然而,Ni基钎料在钎 焊金刚石时,较高的钎焊温度和化学侵蚀会对金刚 石磨粒造成较为严重的热损伤,从而影响金刚石工 具的服役寿命和工作效率^[18]。马伯江等^[19]利用非 晶Ni基钎料和晶态Ni基钎料钎焊金刚石,分析了 非晶钎料对钎焊金刚石组织及性能的影响。研究表 明,非晶钎料的熔化温度范围比晶态钎料的熔化温 度范围低 30℃,对钢基体的润湿能力是晶态钎料的 1.34倍,且磨削性能也优于晶态钎料。Duan等^[20]通 过在Ni-Cr钎料中引入CuCe合金进行钎焊金刚石, 研究了Ce元素的引入对钎焊金刚石的形貌和热损 伤的影响。结果表明,扩散到CuCe合金液体中的 Ni原子会与Cu和Ce原子结合,形成富含NiCu的区 域及Ce₂Ni₇和CeNi₂相,稀土相的生成降低了金刚 石磨粒受到的热损伤。Zhang等^[21]在Ni-Cr钎料中

通信作者:徐东,博士,教授,研究方向为异质材料连接。E-mail:frank@shu.edu.cn。

收稿日期:2024-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52271017);安徽省重点研究与开发计划项目(2022i01020008);安徽工程大学启 动基金项目(2022YQQ038)

作者简介:冯帅帅,硕士研究生,研究方向为异种材料连接。E-mail:2855939301@qq.com。

添加 La 和 Ce 元素钎焊金刚石,利用计算机模拟来 探索 La 和 Ce 元素对金刚石热损伤的影响。模拟结 果表明,界面区掺杂的 Ce 和 La 元素可以隔离金刚 石与 Ni 元素,降低 Ni 原子对金刚石的侵蚀作用,进 一步验证了 Ce 和 La 元素可对金刚石的石墨化起到 抑制作用。

钇(Y)是地壳中含量较为丰富的稀土元素之一,在Cu-Cr合金中添加适量的稀土Y可以细化晶粒尺寸和阻碍位错运动^[22],在一定程度上改善合金的非晶形成^[23]。因此,稀土Y能够起到改性合金性能的作用,是一种较为优良的改性元素。目前,研究者大多将目光集中于晶态Ni-Cr钎料,而对Ni-Cr非晶钎料的研究较少。因此,为降低钎焊过程中金刚石热损伤,本文研究了Y掺杂Ni-Cr非晶钎料钎焊金刚石的微观形貌和钎焊质量,为非晶钎料钎焊金刚石的应用提供理论支撑。

1 试验部分

1.1 试验原料

本试验所用的人造金刚石磨粒(见图1)为黄河



图 1 钎焊前金刚石形貌 Figure 1 Diamond morphology before brazing

旋风股份有限公司生产的HHD60系列(GB/ T23536—2009),其粒度径为300—425 μm,表面结 构完整、棱角分明,无明显缺陷,品质较好。钢基体 采用45号钢,尺寸为15 mm×10 mm×6 mm。Ni-Cr 钎料的原材料包括纯镍(质量分数99.90%,下同)、 纯铬(99.90%)、纯硼(99.90%)、纯硅(99.90%)、纯 铁(99.90%)和纯钇(99.99%),均由长沙天久金属 材料有限公司提供。表1为Ni-Cr 钎料的成分 配比。

表 1 Ni-Cr 钎料的成分配比表 Table 1 Composition ratios of Ni-Cr filler alloys

钎料名称	含量 w/%					
	Cr	В	Si	Fe	Y	Ni
0号钎料	7	3	4.1	3	0	余量
1号钎料	7	3	4.1	3	0.4	余量
2号钎料	7	3	4.1	3	0.8	余量
3号钎料	7	3	4.1	3	1.2	余量

1.2 试验方法

首先对 Ni-Cr 钎料的原材料进行超声波清洗, 以去除表面油污和氧化物等杂质,然后在高真空熔 炼炉中以氩气作为保护气对其反复熔炼 3—5次,得 到 Ni-Cr 母合金铸锭,最后将母合金铸锭表面打磨 光亮,在亚稳态成型机中制备成条带。图 2 为钎料 性能及试样示意图。从图 2(a)和(b)可见,所制条 带为非晶条带,且熔点较低。将金刚石磨粒/Ni-Cr 非晶钎料/钢基体,按照图 1(c)所示的三明治结构 粘结在一起做成试样。试样烘干后放置真空感应炉 中,在真空度为1×10⁻² Pa、钎焊温度为1000 ℃、保 温时间为 5—8 min条件下进行钎焊,随炉冷却至室 温,最终获得钎焊试样。



(a)—XRD spectrum of filler alloys. ;(b)—DSC of filler alloy;(c)—specimen diagram.

图2 钎料性能及试样示意图

Figure 2 Filler alloy properties and specimen diagram

使用光学显微镜(OM,型号 Zeiss AXIO),观测 钎焊层的宏观形貌。利用扫描电镜(SEM,型号 JSM6510),观察钎焊金刚石及其碳化层的微观形貌。 利用拉曼光谱仪(型号 INVIA)对钎焊金刚石的拉曼 峰进行检测,分析金刚石的石墨化程度。使用维氏硬 度计(型号 HMV-2T),对钎焊层进行硬度测试。选 择多功能摩擦磨损测试仪(型号 MFT-3 000)对钎焊 金刚石试样进行磨削实验(见图 3),瓷砖作为被磨件, 分析其去除量并通过 SEM 统计多组金刚石磨粒脱



图 3 磨削实验示意图 Figure 3 Diagram of the grinding test

落的平均数,其中摩擦载荷为100 N、摩擦转速为200 r·min⁻¹、摩擦时间为2 min。用王水刻蚀焊后试样,得到焊后金刚石磨粒,使用静压强度测试仪(型号HP603)检测其抗压强度,从每组试样中选择40颗刻蚀后金刚石磨粒进行测量,最终取其平均值^[24]。

2 试验结果与分析

2.1 Y元素对非晶Ni-Cr钎料钎焊金刚石钎焊质量 的影响

在高温(1050℃)真空钎焊过程中,金刚石磨 粒会受到热损伤(如化学侵蚀、石墨化和残余热 应力)^[25]。图4为不同Y含量的Ni-Cr非晶钎料在 1000℃下钎焊金刚石的SEM图。从图4可以看 出,含有Y元素的Ni-Cr非晶钎料钎焊的金刚石试 样中金刚石磨粒的边缘较为完整,且表面较为光滑。 表明,暴露在真空气氛中的金刚石表面没有受到较 大的热损伤。从图4(a)可见,当Y质量分数为0% 时,纯Ni-Cr非晶钎料的钎焊界面较为粗糙,更易出 现孔洞和裂纹等缺陷,金刚石的部分切削刃被腐蚀, 出现面积较大的腐蚀坑。这是因为在加工过程中, 金刚石在外力的诱导下首先在腐蚀坑部位发生晶间 断裂,从而影响钎焊金刚石工具的使用寿命和加工 效率。从图4(b)和(c)可见,当Y质量分数为0.4% 和0.8%时,Ni-Cr非晶钎料的钎焊界面变得更为光



(a)—w(Y)=0%;(b)—w(Y)=0.4%;(c)—w(Y)=0.8%;(d)—w(Y)=1.2%。
 图4 不同Y含量下的钎焊金刚石试样的形貌图
 Figure 4 Morphology of brazed diamond specimens with different Y contents

滑,钎料和金刚石之间的界面没有明显的裂纹,金刚 石获得了较好的暴露,另外金刚石表面腐蚀坑的面 积大大降低。结果表明,适当暴露的金刚石磨粒可 以确保金刚石工具在加工过程中有效地去除材料。 从图4(d)可见,当Y质量分数为1.2%时,Ni-Cr非 晶钎料的钎焊金刚石表面出现多道同一方向的腐蚀 痕,金刚石的晶粒并不完整。结果表明,金刚石受到 了严重的损伤。相比之下,当Y的质量分数为0.8% 时,Ni-Cr非晶钎料的钎焊金刚石表现出合适的暴 露,金刚石晶粒完整,界面处没有明显的裂纹和孔 洞。这是由于Y元素的加入占据了金刚石磨粒周围 一定数量的Ni原子位置,从而降低了Ni原子对金刚 石磨粒的侵蚀作用。根据热力学原理,两种元素之 间的混合焓为负数时,该两种元素之间容易反应生 成化合物,并且负值越大越容易反应。由于Ni元素 和Y元素之间的混合焓为-31 kJ·mol⁻¹,因此二者 之间很容易发生反应并生成金属间化合物。

金刚石是C-C键以sp³杂化的方式形成的正四 面体结构。石墨是金刚石的同素异形体,是C-C 键以sp²杂化的方式形成的平面状结构^[26]。图5为 不同Y含量金刚石表面的拉曼光谱图。从图5(a) 可见,当Y质量分数为0%时,纯Ni-Cr非晶钎料钎 焊的金刚石约在1332和3122 cm⁻¹处出现较强的 衍射峰。一般而言,位于约1332 cm⁻¹处的拉曼峰 对应金刚石峰,而约在1582和3122 cm⁻¹处的拉曼 峰对应的是石墨峰^[27-28]。结果表明,纯Ni-Cr非晶钎 料钎焊的金刚石在钎焊过程中发生了较为严重的石 墨化。石墨峰是由于sp³杂化的C-C键转变成具有 sp²杂化的C-C键,该峰的出现表明金刚石表面发 生石墨化转变。随着Y元素的加入,石墨峰的强度



Figure 5 Diamond Raman results at different Y contents

减弱,表明金刚石磨粒石墨化程度降低。从热力学 方面来看,在1000℃的钎焊温度下金刚石向石墨转 变的吉布斯自由能△G=-1100-4.64 $t^{[26]}$,式中t为温度(℃),在此钎焊温度下石墨化的吉布斯自由 能为-5740 J·mol⁻¹,表明金刚石具有较高的石墨化 倾向。金刚石石墨化会严重削弱金刚石的力学性 能,尤其是石墨区域会成为缺陷的源头,随着缺陷不 断扩展长大,最终导致金刚石破碎。从图5(b)和 (c)可见,随着Y质量分数由0.4%增加至0.8%,在 约3122 cm⁻¹处的石墨衍射峰强度逐渐下降,这是 由于Y和Ni的结合降低了钎料对金刚石的化学腐 蚀。结果表明,Y的加入并不能阻止Ni-Cr非晶钎 料钎焊金刚石石墨化,但可降低石墨化程度。从图 5(d)可见,随着Y质量分数增加到1.2%,石墨衍射 峰强度增强。表明,过量Y元素的添加降低了对钎 焊金刚石试样石墨化的改善效果。

图 6 为通过王水蚀刻去除钎料和基体后钎焊金 刚石形貌、出露度和碳化物尺寸统计图。从图6可

见,嵌入钎料的金刚石表面上附着一层白色化合物 层,该化合物层主要为 Cr_3C_2 和 Cr_2C_3 相^[29],随着Y质 量分数的增加化合物层的爬升高度逐渐降低。这是 在钎焊过程中,Ni-Cr非晶钎料中的Cr原子发生固 态扩散并迁移到金刚石表面,并与C原子反应,在金 刚石表面形成Cr-C化合物。由于金属键合钎焊层 很难直接润湿共价键合的金刚石,而具有金属键合 的Cr-C化合物更容易被液体填料润湿,因此Cr-C 复合物起到桥梁作用,使钎料和金刚石达到了有效 结合。图 6(e)-(h)为刻蚀金刚石上碳化物的典型 形貌图。从图 6(e)-(h)可见,块状碳化物上分布 着长短不一的裂纹,稀土Y元素的引入降低了裂纹 出现的倾向,并使得碳化物的生长方向更加多元化。 这是由于稀土Y降低了钎焊接头的热应力导致的。 图 6(i)为 Ni-Cr-Y 非晶钎料钎焊试样上金刚石的出 露度。从图 6(j)可以看出,随着稀土 Y 的引入,金刚 石的出露度呈先稍有上升后下降的趋势。出露度的 上升,也是钎焊金刚石热损伤降低的另一因素。此



(a)-w(Y)=0%时金刚石磨粒;(b)-w(Y)=0.4%时金刚石磨粒;(c)-w(Y)=0.8%时金刚石磨粒;(d)w(Y) = 1.2%时金刚石磨粒;(e)一图(a)的局部放大;(f)一图(b)的局部放大;(g)一图(c)的局部放大;(h)一图 (d)的局部放大;(j)一金刚石出露度;(k)一碳化物尺寸。

(a) -w(Y) = 0% diamond grit; (b) -w(Y) = 0.4% diamond grit; (c) -w(Y) = 0.8% diamond grit; (d) -w(Y) = 0.4% diamond grit; (d) -w(Y) = 0.4%w(Y)=1.2% diamond grit; (e)-partial enlargement of Figure (a); (f)-partial enlargement of Figure (b); (g)partial enlargement of Figure (c); (h)—partial enlargement of Figure (d); (j)—diamond outcropping; (k)—carbide size.

图 6 刻蚀金刚石及表面碳化物的 SEM 图和钎焊金刚石出露度及碳化物尺寸统计



外,更细的碳化物可以减少金刚石与钎料之间,热膨胀系数不匹配而导致的应力集中和裂纹形成^[30]。 图 6(k)为Y不同质量分数的刻蚀金刚石上碳化物 的长度和宽度图。从图 6(k)可以看出,随着Y质量 分数的增加,碳化物的长度明显降低,宽度也稍有下 降。当Y的质量分数为0.8%时,刻蚀金刚石的碳 化物更为细小致密。这可以为钎料层和金刚石起到 更好的桥梁作用。

2.2 Y元素的加入对非晶钎料钎焊金刚石碳化层 和强度的影响

为了研究添加Y元素对Ni-Cr非晶钎料钎焊层 微观结构及其硬度的影响,通过OM观察不同质量 分数Y的钎焊层的形貌,并测量钎焊层的平均硬 度。图7为钎焊层的形貌.从图7可以看出,稀土Y 的加入使钎焊层表面更加平整,组织更加细小。说 明,非晶钎料在钎焊过程中发生了元素的充分扩散。 图8为钎焊层硬度测试结果。从图8可以看出,Y元



(a)-w(Y)=0%; (b)-w(Y)=0.4%; (c)-w(Y)=0.8%; (d)-w(Y)=1.2%



图 7 钎焊层的 OM 形貌 Figure 7 OM organization of the brazed layer

素的加入提高了钎焊层硬度。说明,这种较为充分 的扩散可有效提升钎焊层的硬度,在一定程度上增 加钎焊层对金刚石颗粒的保护效果,当Y元素的质 量分数为0.8%时,钎焊层的硬度值最大。这是由 于随着Y元素的添加,促进了组织的细化,从而产生 了细晶强化,提高了钎焊层的硬度。

金刚石颗粒的强度通常影响金刚石工具的磨削 能力和工作寿命。为了研究不同质量分数Y元素对 刻蚀金刚石颗粒强度的影响,进行了抗压强度测量, 结果如图9所示。从图9可见,纯Ni-Cr非晶钎料的 刻蚀金刚石颗粒强度仅为原始金刚石的53.4%。 这是由于严重的石墨化打破了金刚石的sp³结构,大 量的sp²结构会成为金刚石破碎的开始点。表明,Y 元素通过降低金刚石的石墨化程度的同时,提高了 金刚石的强度。



图 9 不同质量分数 Y 元素的刻蚀金刚石的抗压强度结果 Figure 9 Compressive strength results of etched diamond with different Y content

2.3 不同质量分数Y元素对非晶钎料钎焊金刚石 磨削性能的影响

为了研究不同质量分数Y元素对Ni-Cr-Y非晶 钎料钎焊接头的结合强度影响,对钎焊试样进行摩 擦磨损试验。图10为不同质量分数Y元素的钎焊 试样对被磨材料的去除量及磨削后金刚石的脱落 数。从图10可以看出,Y元素的添加,提高了被磨 工件的去除量,金刚石脱落数呈现先下降后上升的 趋势。这与接头的结合强度的提高相对应,然而过 高的含量会导致接头强度降低。接头的结合力可以 通过促进更理想的反应和有益润湿来提高。由于Y 元素的添加,影响了碳化物的形貌和尺寸进而促进 了反应,从而提高了金刚石颗粒的结合力。当钎料 碳化层的结合力较弱时,金刚石颗粒便会脱落^[31]。 当Y元素的质量分数0.8%时,钎焊试样的磨削性 能提高了43.5%,金刚石的脱落数最低。这是因为 Y元素的添加提高了金刚石的出露度并降低了其热 损伤,使得切削刃数量大且完整,从而提高了金刚石 磨削效率。此外,钎料对金刚石磨粒把持力的提高 及接头处Cr-C化合物的产生,使得金刚石颗粒难以 从宏观上破碎和拔出。





samples with different Y content

在摩擦磨损试验早期,钎焊试样上金刚石颗粒 均参与磨削,同时都也受到显著的冲击载荷。在金 刚石颗粒内部残余应力和磨削过程中施加载荷的共 同作用下,界面裂纹的快速扩展最终导致金刚石颗 粒的脆性晶间断裂,最终金刚石的颗粒通过解理断 裂被破坏。然而,金刚石的断裂分为小面积断裂和 大面积断裂^[32]。当金刚石的强度较高时,金刚石颗 粒在外力载荷下的断裂面较为粗糙,通过自锐反而 增加了切削刃的数量(见图11(a)),金刚石颗粒更 加锋利。在摩擦磨损试验后期,金刚石钻头的磨损 累积到一定程度,金刚石颗粒的有效切削行为转化 为低效的滑动和犁耕(见图11(b)和(c)),当金刚石 颗粒内部热应力和外部石墨化较大时,金刚石颗粒 在外力载荷下的断裂面较为光滑,块状宏观断裂成 为最常见的磨损模式,随着金刚石颗粒的磨损率逐 渐增加,最终发展为完全断裂,但金刚石颗粒的根部 仍保留在钎料合金中(见图11(d))。当碳化层爬升 高度讨低且钎焊接头附近缺陷较多时,钎料对金刚 石的把持效果很弱,金刚石在磨削载荷下不会断裂, 而是直接从金属基体上全晶粒脱落,表现为钎焊界 面处出现一个深坑(见图11(e)),此时钎焊试样的 磨削效率和服役寿命势必降低。



(a)—晶间断裂形貌;(b)—型耕形貌;(c)—断裂形貌;(d)—磨平形貌;(e)—脱落。
(a)—intergranular fracture morphology;(b)—plough morphology;(c)—fracture morphology;(d)—smoothing profile;(e)—fall out.

图 11 Ni-Cr-Y 非晶钎料钎焊金刚石试样的摩擦磨损形貌



3 结论

(1)Y元素的加入,降低了金刚石磨粒在钎焊过 程中受到的热侵蚀和石墨化程度,并减少了微裂纹 的产生。同时,金刚石磨粒的出露度略微提高,碳化 物的尺寸变得更加细小。

(2)随着Y元素的加入,钎焊层表面变得更加 细小平整,其硬度明显升高,最高可达533 HV_{0.1}。

(3)Y元素的加入,降低了金刚石颗粒的脱落数

和大面积破碎的可能性。另外,在界面处生成的更加细小均匀的碳化物,可有效地提高界面的结合强度。当Y的质量分数为0.8%时,钎焊金刚石具有最优的磨削性能。

参考文献:

- [1] YIN X H, XU F, MIN C Y, et al. Promoting the bonding strength and abrasion resistance of brazed diamond using Cu-Sn-Ti composite alloys reinforced with tungsten carbide [J]. Diamond and Related Materials, 2021, 112: 108239.
- [2] 李志伸, 罗鑫. 表面终端金刚石场效应晶体管的研究 进展[J]. 材料研究与应用, 2023, 17 (3): 367-380.
- [3] 王龙, 汪刘应, 刘顾, 等. 硬脆材料切削加工碎裂损伤 研究进展[J]. 工具技术, 2021, 55(10): 3-8.
- [4] 王龙, 汪刘应, 唐修检, 等. 硬脆材料磨削加工机理研 究进展[J]. 制造技术与机床, 2021, 712(10): 26-31.
- [5] 刘凯,李兴斐,熊文亮.金刚石涂层刀具干铣削TC4 切削性能研究[J].机械工程与自动化,2019(5): 157-158.
- [6] 邵国栋, 史振宇. 钎焊金刚石磨粒钻钻削 C/SiC 陶瓷 基复合材料孔时切屑对钻削过程的影响[J]. 金刚石与 磨料磨具工程, 2022, 42(3): 348-355.
- [7] 浦一子,肖冰,高睿,等.钢轨打磨用钎焊金刚石砂轮研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(3): 325-331.
- [8]梁巧云,单坤,李兆瑞,等.航发钛合金叶片金刚石砂 带磨削的磨粒磨损研究[J].金刚石与磨料磨具工程, 2020,40(4):59-64.
- [9] ZEREN M, KARAGZ A. Sintering of polycrystalline diamond cutting tools [J]. Materials & Design, 2007, 28(3): 1055-1058.
- [10] WU Y P, LUO J B, WANG Y, et al. Critical effect and enhanced thermal conductivity of Cu-diamond composites reinforced with various diamond prepared by composite electroplating [J]. Ceramics International, 2019, 45(10): 13225-13234.
- [11] 庞继伟,李升,郭明波,等.C/SiC复合材料微孔的电 镀金刚石钻头钻削加工[J].金刚石与磨料磨具工程, 2023,43(1):90-95.
- [12] 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.
- [13] 王楠,张雷,纠永涛,等.钎焊温度对Cu-Sn-Ti-Ga钎 料钎焊金刚石接头组织及性能的影响[J].材料研究 与应用,2023,17(6):1125-1133.
- [14] HUANG G Q, WANG Y D, ZHANG M Q, et al.

Brazing diamond grits onto AA7075 aluminium alloy substrate with Ag-Cu-Ti filler alloy by laser heating [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(6): 67-78.

- [15] 马伯江, 王镇, 王超. 非晶 Ni 基合金感应钎焊微粉金 刚石的研究[J]. 硬质合金, 2020, 37(6): 417-422.
- [16] 王朋波,石梦阳,张雷,等.Cr元素对Ni基无硼钎料 钎焊金刚石的组织及性能影响[J].金刚石与磨料磨 具工程,2022,42(4):421-427.
- [17] ZHAO J, GUO M, HU S P, et al. Brazing of large synthetic diamond grits using graphene nanoplatelets reinforced Ni-Cr composite fillers [J]. Diamond and Related Materials, 2020, 109: 108004.
- [18] LI X, ZHANG J, XU Q, et al. Effect of CeSi₂ addition on microstructures of brazed layers and interfacial characteristics of brazed diamonds with Ni-Cr filler alloy [J]. Diamond and Related Materials, 2022, 130: 109486.
- [19] MA B J, YANG G L, BU F N. Study of brazed diamond micro-powder burs fabricated using induction brazing with either an amorphous or a crystalline Nibased filler alloy [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 62: 58-63.
- [20] DUAN D Z, LI C S, DING J J, et al. Microstructure and performance of brazed diamond segments with NiCr-x (CuCe) composite alloys [J]. Ceramics International, 2020, 46(9): 13180-13188.
- [21] ZHANG J, LI X, XU Q, et al. Effects of Ce and La elements on interfacial bonding, thermal damage and mechanical performance of brazed diamonds with Ni-Cr filler alloy [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 98; 105571.
- [22] 张成功,乔振兴,史志铭,等. 纪对高强高导 Cu-Cr-Zr 合金组织与性能的影响 [J].中国稀土学报,2024, 42(2):294-303.
- [23] 李正坤,秦鑫冬,刘丁铭,等.Y、Gd、La和Ce对Zr (-Ti)-Cu-Ni-Al非晶形成能力和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2018,47(9):2755-2760.
- [24] 陈冰威,杨雪峰,朱振东,等.氧化铈刻蚀金刚石表 面形貌表征[J].粉末冶金技术,2022,40(4):318-324.
- [25] ZHANG L. Filler metals, brazing processing and reliability for diamond tools brazing: A review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 651-668.
- [26] 陈燕, 徐鸿钧, 傅玉灿, 等. Ni-Cr合金真空钎焊金刚 石的表面石墨化 [J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 21-24.
- [27] ZHANG M J, LI K W, HUANG Y B, et al. Impact of ultrasonic vibration on microstructure and mechanical properties of diamond in laser brazing with Ni-Cr filler alloy [J]. Ceramics International, 2022, 48

(3): 4096-4104.

- [28] MA W, XIAO H Z, WANG S Y, et al. Interface characteristics and mechanical properties of vacuumbrazed diamond with Ni-Cr+W composite filler alloy [J]. Vacuum, 2022, 198; 110897.
- [29] DUAN D Z, MA Y S, DING J J, et al. Effect of multilayer graphene addition on performance of brazed diamond drill bits with Ni-Cr alloy and its mechanism
 [J]. Ceramics International, 2020, 46 (10) : 16684-16692.
- [30] WANG S Y, XIAO B, XIAO H Z, et al. Microstructure and mechanical properties of the

diamond/1045 steel joint brazed using Ni-Cr+Mo composite filler [J]. Diamond and Related Materials, 2023, 133: 109691.

- [31] SI S H, DING Z C, ZUO R Z, et al. Adding Hf element to improve the strength and wear resistance of diamond brazed with Ni-based boron-free brazing filler metal [J]. Diamond and Related Materials, 2022, 121: 108723.
- [32] WANG S Y, XIAO B, XIAO H Z, et al. Interface microstructure and bonding performance of brazed Wcoated diamonds using Ni-Cr alloy [J]. Ceramics International, 2022, 48(7): 9864-9872.

Effect of Element Y on the Organization and Properties of Ni-Cr Amorphous Filler Alloy Brazed Diamond

FENG Shuaishuai^{1,2}, WANG Banglun², CHEN Zhihao², WANG Pengbo^{1,2}, ZHANG Lei³, ZHONG Sujuan³, LI Jiamao¹, XU Dong^{2,3*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Brazed diamond tools, characterized by their high bonding strength due to chemical metallurgical bonding, have broad application prospects in the processing of hard and brittle materials such as ceramics, semiconductors, and glass, as well as in rail transportation, aerospace, and other fields. Although Ni-based brazing filler metals have certain advantages in terms of bonding strength, wear resistance, and service environment, the high brazing temperature and chemical erosion can significantly cause thermal damage to diamond abrasive particles, affecting the work efficiency and service life of diamond tools. To reduce the thermal damage of diamond during brazing, Ni-Cr amorphous brazing filler metals doped with Y element were used to braze diamond. The microstructure of the brazed diamond sample interface was studied by SEM, and the graphitization degree of the brazed diamond sample was analyzed using a Raman spectrometer. The mechanical properties of the brazed diamond sample were also investigated. The results showed that when the mass fraction of Y element was 0.8%, the diamond morphology of the brazed sample was the most complete, with the highest hardness of the brazing layer being 533 $HV_{0,1}$, a higher exposure rate of 76.2%, and a lower graphitization degree. In addition, the addition of Y element refined the size of carbides and reduced the tendency of carbide microcracks. Compared with the brazing sample without Y element, the compressive strength of diamond increased by about 50.4%, the grinding performance improved by 43.5%, and the number of diamond detachment was the least. Therefore, Y-doped Ni-Cr amorphous brazing filler metals can successfully prepare brazed diamond samples, which reduce the erosion effect of catalyst elements in the brazing filler metals on diamond, improve thermal damage and grinding performance. This study provides reliable theoretical support for the application of amorphous brazing filler metals in the field of brazed diamond tools, and provides a new technical path for related industrial production, which has certain practical significance in reducing production costs and promoting green production.

Keywords: Ni-Cr amorphous filler metal; brazed diamond; thermal damage; grinding properties; microstructure; compressive strength; Y-element; graphitization

(学术编辑:罗永皓)