

DOI: 10.3901/JME.2023.12.225

金刚石粒度及添加量对大气环境感应钎涂层耐磨性的影响^{*}

龙伟民^{1,2,3} 刘大双⁴ 吴爱萍¹ 钟素娟² 王德成⁵

(1. 清华大学机械工程学院 北京 100084;

2. 郑州机械研究所有限公司 郑州 450001;

3. 中机智能装备创新研究院(宁波)有限公司 宁波 315700;

4. 合肥工业大学材料科学与工程学院 合肥 230009;

5. 机械科学研究总院集团有限公司 北京 100044)

摘要: 金刚石是自然界中最坚硬的物质,因其具有良好的耐磨性能,广泛应用于切削、磨削等行业。利用钎涂技术制备金刚石工具,具有独特优势。钎涂层中的金刚石粒度及添加量是影响涂层耐磨性的关键因素,为此,试验研究金刚石添加量及粒度对大气环境感应钎涂层界面组织及耐磨性的影响规律,探讨金刚石钎涂层的耐磨机制。结果表明,Cr元素在金刚石微粒/Ni基钎料合金界面处形成了宽度约2 μm的富集带。当金刚石添加量达到15%时,可原位生成一定比例的碳化物,且碳化物类型为Cr₇C₃。同质量分数添加金刚石微粒(210~280 μm)的钎涂层耐磨性要优于添加颗粒(700~840 μm)的钎涂层。对于添加不同含量金刚石微粒的钎涂层而言,金刚石添加量为20%时涂层耐磨性最优,当金刚石添加量超过20%,耐磨性不增反降。钎涂层中金刚石在磨损过程中,呈现完整、钝化、裂纹、破碎、脱落等形式。

关键词: 金刚石; 钎涂; 感应加热; 耐磨性

中图分类号: TH425

Influence of Size and Content on the Wear Resistance of Induction Brazing Diamond Coating in Air

LONG Weimin^{1,2,3} LIU Dashuang⁴ WU Aiping¹ ZHONG Sujuan² WANG Decheng⁵

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001;

3. China Innovation Academy of Intelligent Equipment (Ningbo) Co., Ltd., Ningbo 315700;

4. School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

5. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044)

Abstract: Diamond is the hardest material in nature. Because of its good wear resistance, it is widely used in cutting, grinding and other industries. Using brazing technology to prepare diamond tools has unique advantages. The diamond content and particle size in the brazing coating are the key factors affecting the wear resistance of brazing diamond. Therefore, the effects of diamond size and content on the interface structure and wear resistance of induction brazing coating in air were studied, and their wear resistance mechanism was discussed. The results show that Cr element forms a width of 2 μm enrichment zone at the interface between diamond particles and Ni based solder alloy. When the addition of diamond reaches 15%, the proportion of Cr₇C₃ carbide in nickel base brazing coating reaches the maximum. Under the test conditions, the wear resistance of brazing coating with the fraction of diamond particles (210-280 μm) is better than that with particles (841/707 μm). With the increase of diamond content, the wear resistance of diamond

^{*} 国家自然科学基金(U2004186)和河南省重大科技专项(191110111000)资助项目。20210914收到初稿,20230401收到修改稿

brazing coating becomes better. When the diamond content is 20%, the wear resistance of coating is the best. When the diamond content exceeds 20%, the wear resistance decreases. During the wear process, diamonds are forms of integrity, passivation, cracking, breaking and falling off.

Key words: diamond; brazing coating; induction heating; wear resistance

0 前言

在盾构刀具刀盘、石油钻头钻具、煤炭地质钻具、农机装备等核心部件中有大量易磨损件, 由于长期经受砂土和石块的磨粒磨损, 不仅增加作业成本, 且大大降低作业效率和质量^[1]。目前, 在国内外提高易磨损件主要有以下三种方法^[2]: ① 使用高硬度、高耐磨性的新材料; ② 部件结构的优化设计; ③ 表面改性和表面涂层。其中, 表面涂层是提高部件表面耐磨性的有效方法, 用以制备表面涂层的钎涂技术具有独特优势。张启运等^[3]概述了钎涂技术的工艺方法, 指出钎涂层具有耐磨性的原因在于钎涂的致密性好, 孔隙率低于热喷涂层, 且热应力低。陆善平等^[4]发现 BNi-2 钎涂层与母材间具有很强的冶金结合强度, 而涂层自身硬质颗粒与钎料的结合强度可达 100~140 MPa。侯立宁等^[5]研究了气保护 Ni-WC 钎涂层的组织及性能。MA 等^[6]通过氩气保护在农用刀具表面制备了 WC-Ni 单面钎涂涂层。张小红等^[7]以 WC/Ni82CrSiB 合金为钎料, 利用真空钎涂的方法, 在不锈钢基体表面制备出表面光滑、有金属光泽、性能良好的耐磨涂层, 涂层硬度达到 316L 不锈钢基体硬度的 6 倍以上。

金刚石是目前已知的世界上最为坚硬的物质, 其硬度和耐磨性远超 WC、TiC 等硬质颗粒, 是一种理想的切削、磨削材料。感应钎涂作为一种新型的钎涂方法, 能够快速实现基体和涂层的冶金结合, 提高基体对金刚石的把持力, 金刚石出露度高、锋利度好, 颗粒之间的容屑空间大, 降低金刚石在使用过程中的损伤, 因此钎涂金刚石工具具有巨大的应用潜力^[8]。目前金刚石真空钎涂较为常见。李明等^[9]以 Ag-Cu-Ti 为钎料, 通过真空钎焊的方法实现了以 MBD 型金刚石颗粒为增强相(平均粒径 100 μm , 体积分数 60%)的金刚石/Cu 复合材料与金刚石膜的圆片之间的有效连接。陈世隐等^[10]以 BNi82CrSiBFe 为钎料, 40Cr 为基体, 在加热温度为 1 030 $^{\circ}\text{C}$, 保温 10 min 的工艺参数下真空钎焊金刚石, 实现了基体、钎料和金刚石的有效结合。卢

金斌等^[11-12]以 Ni-Cr、Ag-Cu-Ti 合金粉末为钎料, 45 钢为基体, 真空钎焊金刚石, 实现了金刚石磨粒(粒度: 300~350 μm)与 45 钢的高强度连接。SUN 等^[13]以 1045 钢为基体, Ni-Cr 合金为钎料, 在 1 020 $^{\circ}\text{C}$, 保温 20 min 的工艺条件下真空钎焊金刚石。但上述方法加热速度慢、生产效率低, 焊后需要进行热处理, 增加生产成本^[14]。有报道^[15]指出金刚石的粒度直接影响在磨粒磨损过程中磨削力的大小, 粒度越小, 磨削力越小, 而耐磨性越好。张国青等^[16]则认为大粒度的金刚石有助于提高耐磨涂层的加工效率。此外, 钎料合成方法很多^[17], 需要选择合适的钎料来钎涂金刚石。

为了进一步提高钎涂金刚石的效率和质量, 提出了非真空钎涂金刚石的技术设想, 并采用激光钎涂的方法制备金刚石涂层^[18-19]。我们在前期工作中, 还探讨了大气环境感应钎涂粉末熔融及传热机制^[20], 并研究了铝微粉对大气环境感应钎涂金刚石涂层性能的影响^[21]。本文采用大气环境感应钎涂方法, 在碳钢基体表面制备了不同金刚石粒度及添加量的金刚石镍基钎料复合涂层, 研究了金刚石粒度和金刚石添加量对大气环境感应钎涂金刚石涂层耐磨性的影响, 探讨了感应钎涂金刚石的耐磨机制, 为进一步提高金刚石工具的制备技术和服役寿命提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 金刚石钎涂层的制备

试验用材料为 45 钢、Ni 基钎料、金刚石微粒、金刚石颗粒。其中, Ni 基钎料化学成分见表 1。Ni 基钎料粒度为 70 μm , 粉末形态如图 1 所示。金刚石颗粒粒度为 700~840 μm , 金刚石微粒粒度为 210~280 μm 。涂层所用粘结剂为自主研制的高适配绿色粘结剂。

表 1 Ni 基钎料化学成分(质量分数)

| | | | | | % |
|-------------|------|------|------|------|----|
| C | Si | Cr | B | Fe | Ni |
| ≤ 0.06 | 4.50 | 7.00 | 3.10 | 3.00 | 余量 |

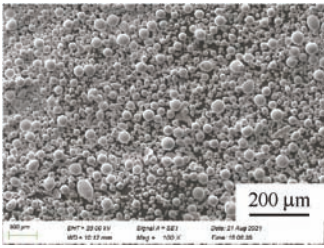


图 1 Ni 基钎料粉末形貌

将 45 钢母材加工为 25 mm×75 mm×10 mm 的试件，钎涂前先对母材进行喷砂处理，去除表面铁锈氧化皮，使表面获得一定粗糙度，可有效增加钎料和基体的接触面积，提高钎着率。随后，将母材放入无水乙醇中超声清洗，并用吹风机吹干。用质量分数配比为 12% 的粘结剂将复合粉末调成糊状，复合成分配比如表 2 所示。

表 2 不同金刚石微粒/颗粒添加量的感应钎涂复合粉末成分配比(质量分数) %

| 金刚石微粒(210~280 μm) | 金刚石颗粒(700~840 μm) | BNi-2 钎料 |
|-------------------|-------------------|----------|
| 5 | 0 | 95 |
| 10 | 0 | 90 |
| 15 | 0 | 85 |
| 20 | 0 | 80 |
| 25 | 0 | 75 |
| 0 | 5 | 95 |
| 0 | 10 | 90 |
| 0 | 15 | 85 |
| 0 | 20 | 80 |
| 0 | 25 | 75 |

然后，将其均匀涂抹在基体表面上，在 25 ℃ 空气环境中静置 12 h，然后放入鼓风烘干箱内加热烘干，加热温度为 95 ℃，保温时间 8 h。采用的感应钎涂设备型号为 SP-25B 高频感应焊机。由铜管绕制成 4 匝环状线圈，截面积约为 32 cm²。钎涂温度 1 030 ℃，加热时间 30 s。钎涂完成后，将钎涂样品空冷至室温，然后进行喷砂处理，完成涂层制备。

1.2 金刚石钎涂层微观组织及耐磨性测试

采用 MML-1G 型干砂半自由磨料磨损试验机对涂层进行无保护气氛干磨粒磨损测试。试验负载 30 N，转速 200 r/min，磨粒选用平均粒径为 280 μm 刚玉砂。图 2 为磨损试验示意图，在经过恒定的摩擦时间(5 min)后，用精度为 1/10 000 g 的电子天平测量并记录试样质量。

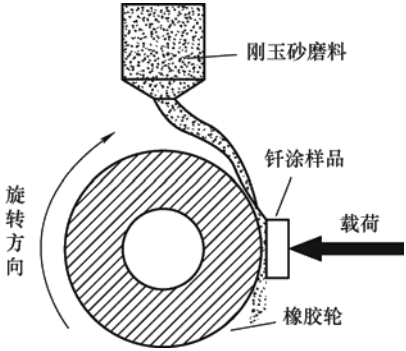


图 2 磨损试验示意图

采用扫描电子显微镜观察钎涂层组织及磨痕形貌并作 EDS 成分分析；采用超景深显微镜观察钎涂层金刚石分布及磨痕形貌；观察钎涂金刚石微观组织所使用的腐蚀液为王水，腐蚀时间为 3 s。

2 感应钎涂金刚石界面组织特征

图 3 为不同金刚石微粒添加量的基体与钎料合金界面组织。可以看到金刚石微粒的质量分数未超过 15% 时，基体与 Ni 基合金附近未观察到金刚石微粒的存在，这是由于金刚石微粒在感应钎涂过程中上浮至钎涂层表面。当金刚石微粒的质量分数超过 15% 时，钢基体与 Ni 基合金的界面附近出现金刚石，表明涂层中的金刚石添加量已达到饱和态。若金刚石添加量继续增加，会使得与钢基体结合的钎料减少，恶化涂层与钢基体的结合，脆性增大。若金刚石添加量超过 25%，在冷却过程中涂层上翘脱落，导致钎涂失败。

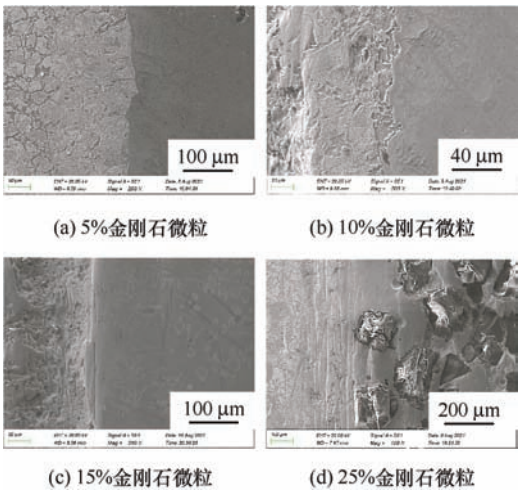


图 3 不同金刚石微粉添加量时钢基体/镍基钎涂层界面

由图 4 可知，当金刚石添加量为 5% 时，在钎料内部发现微裂纹，这主要是因为金刚石与 Ni 基钎料的热膨胀系数相差较大，在冷却过程中，Ni 基钎

料与金刚石的体积收缩不同步,易萌生微裂纹。随着金刚石微粒添加量的增加,钎料内部开始有少量的碳化物析出,C元素主要来源于金刚石表面的C元素扩散。当金刚石添加量达到15%左右时,可在钎料基体中原位生成一定比例的碳化物,碳化物作为硬质相在磨损时能够起到辅助钎料基体抵抗磨损的作用。继续增加金刚石微粒添加量,会使得钎料内部大部分的位置被金刚石所占据,钎料添加量过少,反而难以形成碳化物(图4d)。图4e和图4f分别为金刚石微粒添加量为15%时(图4c)的Cr、Ni元素分析结果,可以看出图4c中的灰色相为镍基基体中析出的碳化物,通过图4f对点K的EDS分析结果可以进一步证实,碳化物中Cr原子和C原子之比约为7:3,即析出的碳化物类型为 Cr_7C_3 。

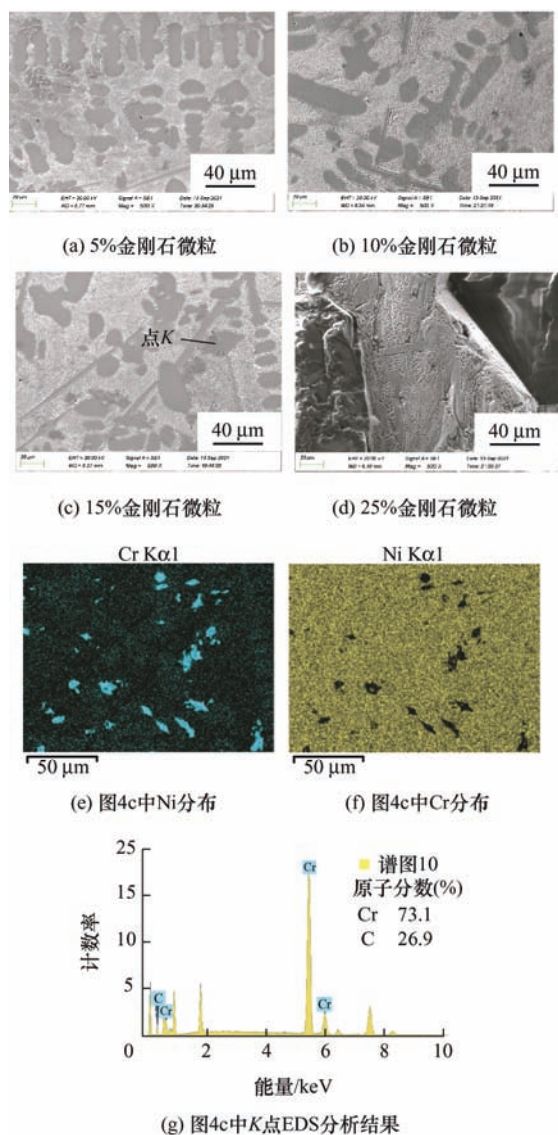


图4 不同金刚石微粒添加量时镍基钎涂层组织

图5为金刚石微粒/Ni基钎料合金界面组织形貌及元素分布。可见Cr元素在界面附近形成了一个宽度约 $2\mu\text{m}$ 的富集带。

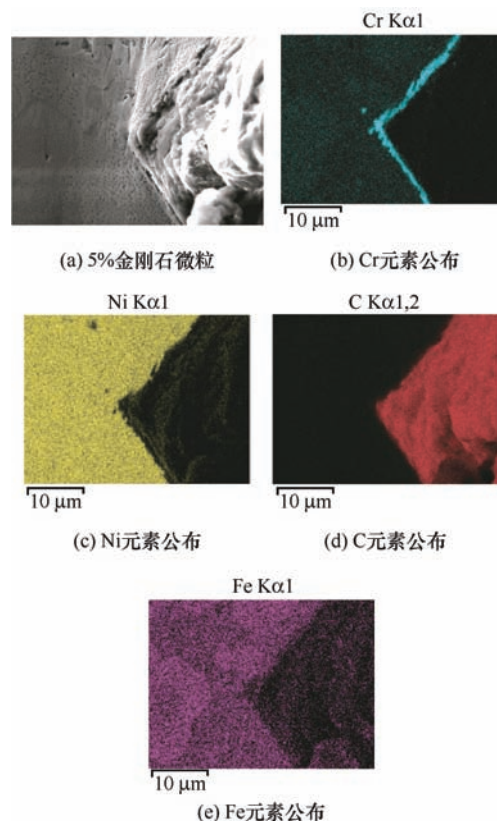


图5 金刚石微粒/Ni基钎料合金界面组织形貌及元素分布

研究^[22]指出,通过分析Ni基钎料中不同原子的嵌入能值,发现Ni基钎料中不同元素向Ni/金刚石界面偏析的能力不同。对于Cr原子,当它掺杂到Ni/金刚石界面上的第一、第二以及第三原子层时的嵌入能值分别为 -3.339 eV 、 -3.692 eV 和 -3.705 eV ,均小于B和Si原子掺杂进Ni/金刚石界面的嵌入能。说明Cr原子嵌入到Ni与金刚石界面区域的能力最强,这也解释了Cr在钎焊过程中向金刚石与钎料界面偏聚的现象,并为界面处碳化物的生成提供了有利条件。

从热力学角度分析了在Ni/金刚石界面处,嵌入界面的Cr原子与金刚石表面的C原子反应Gibbs生成自由能如表3所示^[23]。

表3 碳与铬的反应吉布斯自由能

| 产物 | 反应式 | $\Delta G^0 = A + CT$ (298~1500 K) | $\Delta G^0/(\text{J/mol})$ |
|----------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------|
| Cr_3C_2 | $3\text{Cr} + 2\text{C} = \text{Cr}_3\text{C}_2$ | $-10\,500 - 0.37T$ | $-10\,896.9$ |
| Cr_7C_3 | $7\text{Cr} + 3\text{C} = \text{Cr}_7\text{C}_3$ | $-14\,200 - 1.397T$ | $-16\,038.97$ |
| Cr_{23}C_6 | $23\text{Cr} + 6\text{C} = \text{Cr}_{23}\text{C}_6$ | $-16\,400 - 1.27T$ | $-17\,987.6$ |

钎料与金刚石界面处会优先生成 Cr_{23}C_6 , 其次生成 Cr_7C_3 , 可能还会有少量 Cr_3C_2 生成。本试验中观察到有 Cr_7C_3 生成(图 4c)。

3 金刚石粒度及添加量的影响

图 6 是金刚石粒度及添加量对磨损失重的影响。由图可知磨损 5 min 时, 添加 5% 金刚石颗粒(700~840 μm)的磨损量为 0.086 g, 而添加 5% 微粒(210~280 μm)的磨损量为 0.053 8 g, 添加颗粒的磨损失重大约是添加微粒的 1.6 倍, 添加微粒(210~280 μm)的感应钎涂金刚石涂层耐磨性明显优于添加金刚石颗粒(700~840 μm)。在经过 45 min 磨损后, 添加颗粒的磨损量仍然是添加微粒的磨损量的 2.4 倍左右。

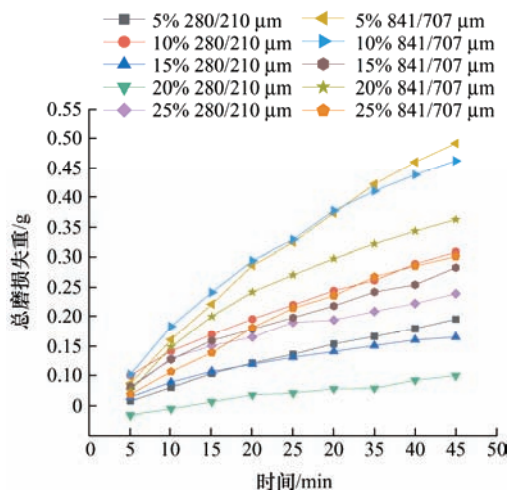


图 6 金刚石粒度及添加量对磨损失重的影响

感应钎涂金刚石钎涂层中添加的金刚石质量分数超过 5% 之后, 金刚石粒度对涂层的总磨损失重的影响减弱, 但是添加微粒的耐磨性要优于添加颗粒。这是由于随着金刚石的比例增加, 涂层表面的金刚石趋于饱和, 单位面积上金刚石所占面积与钎料合金的比值与金刚石的粒度成负相关, 粒度越大金刚石与钎料合金的比值越小。因此在磨损试验中, 微粒更难以发生破损、脱落等情况, 因此添加微粒的涂层耐磨性也更好。这是由于添加了 5% 颗粒和添加 5% 微粒相比, 颗粒的出刃高度要高很多, 通过测量发现 5% 颗粒金刚石的出刃高度约为 175.2 μm , 而微粒的出刃高度仅约为 34.09 μm , 如图 7 所示。在磨损时颗粒会承受很大的弯曲载荷, 弯曲载荷的存在对具有晶粒结构的脆性金刚石有很大危害。金刚石的粒径增大会使得本应该由多个微粒共同分担的

切削力集中在一个粒径更大金刚石上, 因此大粒度金刚石的破碎也更多。

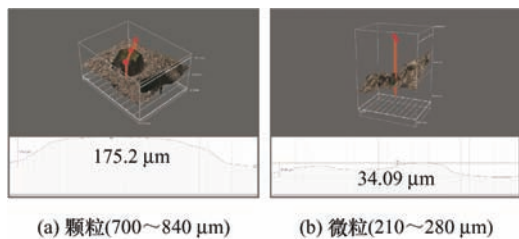


图 7 金刚石添加量为 5% 时不同粒度金刚石出刃高度

由于涂层存在气孔等缺陷, 在磨损过程中可能有刚玉砂嵌入气孔, 起到辅助抵抗磨损的作用, 而颗粒的出刃高度过高刚玉砂就很难起到抵抗磨损有效的作用。

金刚石钎涂层耐磨性受钎涂层中的金刚石间距的影响。硬质颗粒对粘结相的保护作用随金刚石间距的减小而增强, 但金刚石间距越小直接导致金刚石周围的钎料合金越少, 从而影响钎料合金对金刚石的把持力, 只有硬质相和基体的良好匹配能够有效提高涂层的耐磨性能。

金刚石粒度越大, 需要钎料合金对金刚石的把持力度越大^[24]。当前使用的 Ni 基钎料(如 BNi-2 等)对金刚石的把持力度是有限的, 颗粒的比表面积小于微粒, 导致钎料合金对颗粒的把持力低于对微粒的把持力, 颗粒的把持力降低从而导致颗粒更容易脱落。研究表明^[25], 在保持金刚石出刃高度不低于 50% 的情况下, BNi-2Ni 基钎料基本上是不能满足粒度大于 500~600 μm 刚石所需把持力度的要求。本试验所用的含颗粒的钎涂层平均出刃高度约为 262.3 μm , 其出刃高度的值已超过微粒的最大粒径。

当感应钎涂金刚石钎涂层中金刚石添加量超过 5% 后, 金刚石粒度对涂层的耐磨性影响有所减弱, 但是添加微粒的耐磨性仍要优于添加颗粒。这是由于随着金刚石添加量的增加, 涂层表面的金刚石趋于饱和, 单位面积上金刚石所占面积与钎料合金的比值与金刚石的粒度成负相关, 粒度越大金刚石与钎料合金的比值越小。因此在磨损试验中, 微粒更难以发生破损、脱落等情况, 因此添加微粒的涂层耐磨性也更好。

图 8 为金刚石粒度及添加量对每 5 min 磨损失重变化量的影响。以添加质量分数为 5% 金刚石微粒的涂层为例, 在钎涂层失重初始阶段最

大, 经过一段时间的磨合后, 摩擦过程进入相对稳定的阶段, 磨损失重开始减小并最终趋于一个稳定值。这主要是因为在磨损初期涂层表面外露的金刚石较少(图 9a), 与刚玉砂磨料对磨的主要是 Ni 基钎料。Ni 基钎料的硬度比刚玉砂低, 所以磨损较严重(前 5 min 涂层失重 0.253 4 g)。在磨损一段时间后, 外露的金刚石增多, 并达到动态稳定(图 9b), 金刚石逐渐代替了 Ni 基钎料成为与刚玉砂对磨的主体。由于金刚石颗粒具有很高的硬度及耐磨性, 金刚石硬质颗粒弥散分布在涂层中, 充当涂层中的硬质相, 阻碍涂层位错的运动, 起到强化作用, 从而显著提高涂层的高温力学性能等进而改善摩擦磨损性能, 所以在钎涂层中金刚石要比 Ni 基钎料更耐磨^[26]。此外, 部分被磨碎的刚玉砂会转移到涂层表面形成新的表面代替 Ni 基钎料与后续的刚玉砂对磨, 进一步减少钎涂层的磨损^[27]。

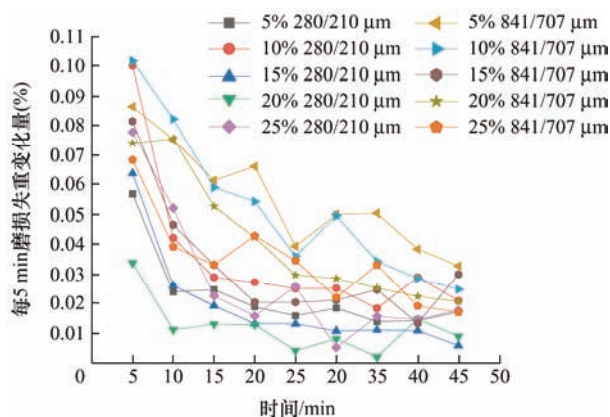


图 8 金刚石粒度及添加量对磨损失重的影响

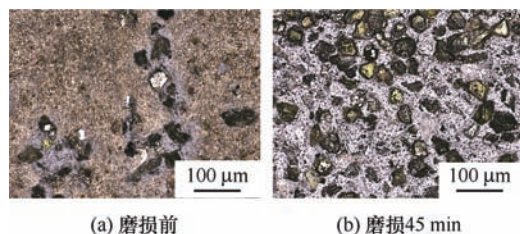


图 9 添加 5% 金刚石微粒(280/210 μm)的镍基钎涂层的磨痕形貌

从图 6 和图 8 还可看出, 对于添加不同含量金刚石微粒的钎涂层而言, 添加金刚石量为 20% 的感应钎涂金刚石涂层耐磨性最优。当金刚石添加量超过 20% 时, 耐磨性不增反降。由于随着金刚石质量分数的增加, 金刚石容易产生聚集, 在

聚集区内的钎料合金添加量较少, 可有效和金刚石发生化学冶金反应的量下降, 导致金刚石由于缺乏足够结合力而脱落; 另外由于金刚石加入过多, 导致试样表面粗糙度增大, 磨损加剧, 造成金刚石硬质相脱落。

4 金刚石钎涂层耐磨机制分析

金刚石涂层表面存在许多尖锐的金刚石, 粗糙度较高。表面粗糙的金刚石涂层摩擦机理主要是磨粒与涂层表面微凸体间的互锁作用^[28]。微凸体对摩擦初期的摩擦行为影响较大。在涂层与磨粒发生相对运动之前, 两表面已相互接触并施加了相应的试验压力, 但由于涂层表面微凸体的存在, 使得两表面的接触面积很小, 表面微凸体将会起到“钉扎作用”, 使得两微观接触表面之间会相互“咬合”, 在相对运动的瞬间即会产生较大的静摩擦阻力, 实际的接触表面不可能是相同的材料和硬度, 较大的静摩擦阻力使涂层表面较软的微凸体破碎。金刚石涂层表面的晶粒也会在磨粒表面的剪切作用下发生断裂以及碎裂, 形成更小的颗粒状碎片, 金刚石碎片中的一部分会在橡胶轮机械运动的作用下被排出摩擦界面, 另一部分则会被夹持在摩擦界面上, 形成磨粒。这些磨粒也能够在涂层接触表面上产生犁沟, 并且进一步加剧了涂层与磨料接触表面(尤其是涂层中较软的 Ni 基钎料合金)的磨损。刚玉砂磨料在经历严重的磨损后会产生大量的磨屑, 磨屑在摩擦过程中会逐渐向金刚石涂层表面转移, 并粘附在金刚石的附近区域, 在进入磨合阶段后, 涂层与磨料之间的相互作用逐渐趋于稳定, 形成一个相对稳定的新生摩擦界面。相应地, 涂层的每 5 min 磨损失重变化量也逐渐过渡到相对稳定的状态。

图 10 显示了金刚石的主要失效形式。钎涂层中的颗粒在磨损过程中, 可能呈现完整、磨损、破碎、脱落等失效形式。完整金刚石的颗粒在机械摩擦作用下被磨平, 出现了磨耗平台; 在外力作用下, 金刚石表面或内部缺陷处应力集中, 达到其抗拉强度时, 出现裂纹, 继而扩展至破碎; 颗粒从钎涂层中脱落, 留下凹坑, 颗粒失效。在磨损过程中金刚石还可能直接跳过磨平或者破碎阶段直接脱落^[29-30]。图 11 为金刚石磨损失效

示意图。磨粒作用在于金刚石的力分为两部分来看: ① 磨粒强度小于钎料合金对金刚石的把持力时, 法向作用力使磨粒磨碎; ② 磨粒强度大于钎料合金对金刚石的把持力时, 法向作用力使金刚石从涂层中脱落。

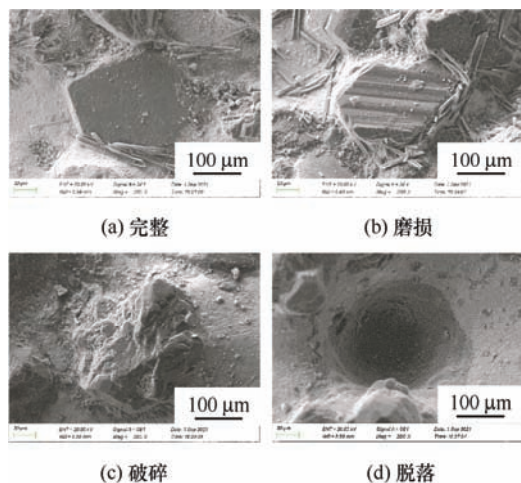
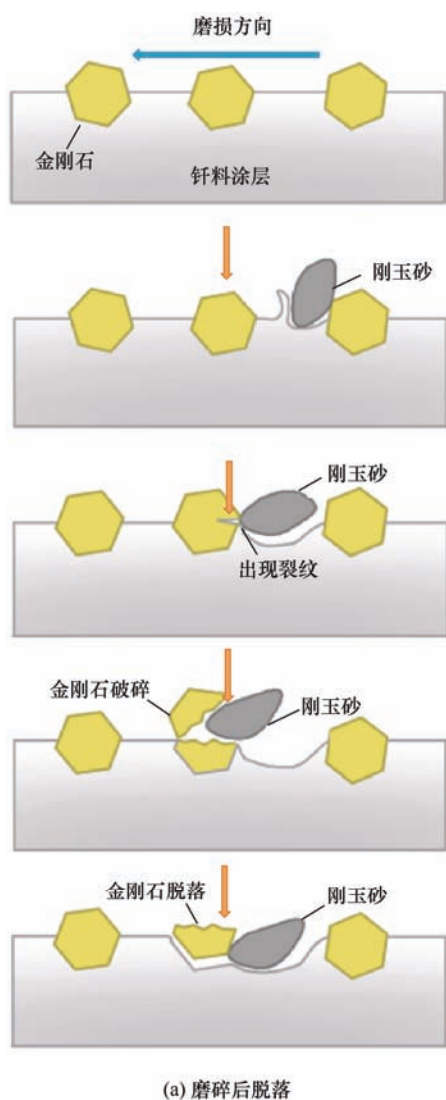
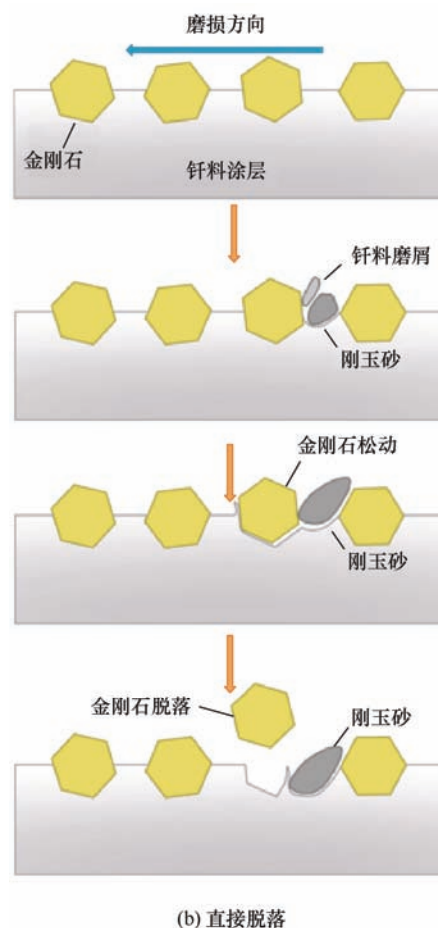


图 10 金刚石的主要失效形式



(a) 磨碎后脱落



(b) 直接脱落

图 11 金刚石磨损失效示意图

刚玉砂转移到涂层表面的形式可以按照转移到涂层的刚玉砂磨料分为两类: 已被磨碎的刚玉砂和未被磨碎的刚玉砂。涂层中存在微气孔等缺陷, 刚玉砂磨料与涂层相互摩擦时因切削而产生的细小刚玉砂在磨损过程中被挤入涂层的气孔中(图 12), 经过反复多次碾压后逐渐填满涂层缺陷, 使得磨损过程中刚玉砂产生的磨屑转移到涂层上。一方面可以减小涂层的磨损失重, 另一方面转移到涂层上的刚玉砂磨屑会形成的新磨损平面, 一定程度上减弱涂层的磨损。此外, 当磨损表面的金刚石间隙刚好与刚玉砂磨粒尺寸相近时, 在载荷的作用下, 磨碎的刚玉砂会被夹持在突出的金刚石间隙中。图 13 显示了这一现象, 根据 SEM 图片及 C、Al、O 元素分布可以看出, 刚玉砂磨料(Al_2O_3)被紧紧夹持在周围突出的金刚石间隙之间。被夹持的刚玉砂与露出的金刚石组成了新的磨损平面, 避免了金刚石周围的钎

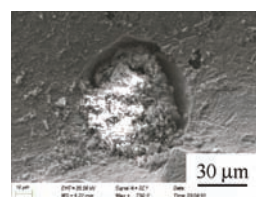


图 12 刚玉砂磨粒嵌入气孔

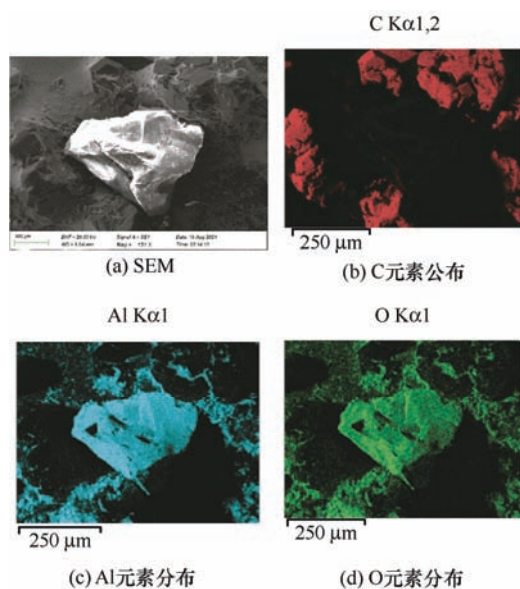
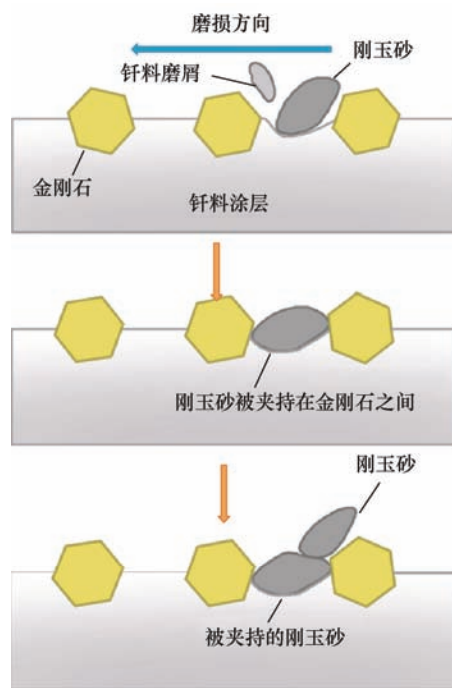


图 13 刚玉砂磨粒嵌入金刚石间隙

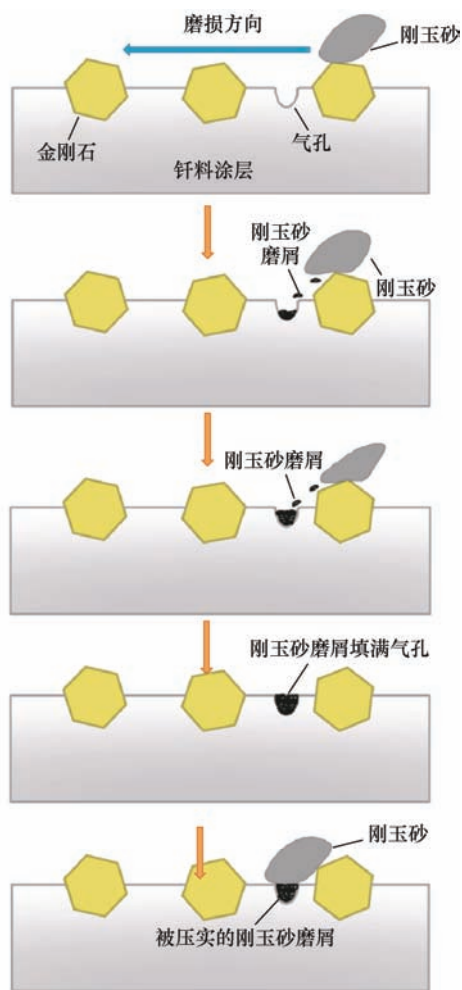
料被磨损,从而降低了金刚石因其周围的钎料被磨损而脱落的几率。

刚玉砂磨料转移到涂层表面的过程可表示为图 14。部分刚玉磨料镶嵌于金刚石间隙或气孔中起



(b) 金刚石间隙新增磨料

图 14 金刚石间隙或冶金气孔作为“陷阱”捕获硬磨料的动态新增硬质相耐磨机制



(a) 气孔中新增磨料

到耐磨相作用,因此,金刚石间隙或冶金气孔作为“陷阱”捕获硬磨料,从而在磨损过程中,可能动态地新增硬质相,提升了感应钎涂金刚石的耐磨性能。

因此,对于大气环境感应钎涂层中的金刚石是最重要的耐磨相,起到耐磨骨架作用,在磨损过程中,金刚石呈现完整、钝化、裂纹、破碎、脱落等形式,其各自发生的频率和数量决定了耐磨性的优劣。镍基基体中原位生成的 Cr_7C_3 提高了基体耐磨性。此外,由于在大气环境感应钎涂金刚石,钎涂层中会存在一定的孔隙率。气孔的存在,减少基体有效承载面积,并使得金刚石附近的钎料合金减少,降低钎料合金对金刚石的把持力,从而降低涂层的耐磨性。某种意义上,在载荷的作用下,磨碎的刚玉砂可能被夹持在露出涂层的金刚石间隙,与露出的金刚石构成增强耐磨骨架,提升耐磨性。

5 结论

(1) 金刚石微粒($210\sim 280\ \mu\text{m}$)的质量分数小于 15%时,钎涂层金刚石主要分布于钎涂层表面;达到 15%时,可原位生成一定比例的碳化物,且碳化物类型为 Cr_7C_3 ;超过 15%时,钢基体与 Ni 基合金的界面附近出现金刚石,表明涂层中的金刚石趋于饱和态;超过 25%,在冷却过程中涂层局部上翘脱落,导致钎涂失败。

(2) 本试验条件下, 微粒金刚石(210~280 μm)的钎涂层耐磨性要优于颗粒金刚石(700~840 μm)钎涂层。在磨损试验中, 微粒更难以发生破损、脱落, 因此添加微粒的涂层耐磨性也更优。

(3) 对于添加不同含量金刚石微粒的钎涂层而言, 金刚石添加量为 20% 时涂层耐磨性最优。当金刚石添加量超过 20% 时, 耐磨性不稳定, 甚至不增反降。

(4) 金刚石起到耐磨质点作用, 在磨损过程中, 金刚石呈现完整、钝化、裂纹、破碎、脱落等形式, 其各自发生的频率和数量决定了耐磨性的优劣。原位生成的 Cr_7C_3 提高了基体耐磨性。气孔主要恶化涂层的耐磨性, 但气孔和金刚石间隙均可作为“陷阱”捕获刚玉砂硬磨料, 有提升耐磨性的倾向。

参 考 文 献

- [1] 张康, 黄亦翔, 赵帅, 等. 基于 t-SNE 数据驱动模型的盾构装备刀盘健康评估[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 35-42.
ZHANG Kang, HUANG Yixiang, ZHAO Shuai, et al. Health assessment of shield equipment cutterhead based on t-SNE data-driven model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 35-42.
- [2] 曹忠溪, 周玉梅, 张凤林, 等. 钎焊金刚石耐磨涂层制备及其磨损性能[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(3): 93-101.
CAO Zhongxi, ZHOU Yumei, ZHANG Fenglin, et al. Preparation and wear properties of brazed diamond wear-resistant coatings[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(3): 93-101.
- [3] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
ZHANG Qiyun, ZHUANG Hongshou. Brazing handbook[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [4] 陆善平, 郭义. 钎焊工艺对 WC-Co/NiCrBSi 复合涂层性能的影响[J]. 材料研究学报, 1999, 13(2): 188-193.
LU Shanping, GUO Yi. The effect of brazing parameters on the properties of WC-Co/NiCrBSi composite coating[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1999, 13(2): 188-193.
- [5] 侯立宁, 石荟琦, 时海芳. Ni 基复合 WC 粉末钎涂层组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(24): 173-175.
HOU Lining, SHI Huiqi, SHI Haifang. Study on microstructure and mechanical properties of WC/nickel-based powder composite coating[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(24): 173-175.
- [6] 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 Ni-based filler alloy[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2016, 62: 58-63.
- [7] 张小红, 申景园, 孙宇, 等. 挤压致密超细 WC/纳米 Al_2O_3 弥散强化铜基复合材料的组织性能研究[J]. 粉末冶金技术, 2019, 37(6): 422-427.
ZHANG Xiaohong, SHEN Jingyuan, SUN Yu, et al. Study on the microstructure and properties of dispersion-reinforced Cu-based composites by ultrafine WC and nano-sized Al_2O_3 particles via extrusion densification [J]. Powder Metallurgy Technology, 2019, 37(6): 422-427.
- [8] 龙伟民, 郝庆乐, 傅玉灿, 等. 金刚石工具钎焊用连接材料研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(23): 142-148.
LONG Weimin, HAO Qingle, FU Yucan, et al. Research progress of filler metals for brazing diamond tools[J]. Materials Reports, 2020, 34(23): 142-148.
- [9] 李明, 贾成厂, 郭宏, 等. Ag-Cu-Ti 活性钎料真空钎焊金刚石/Cu 复合材料和金刚石膜[J]. 粉末冶金技术, 2013, 31(6): 444-450.
LI Ming, JIA Chengchang, GUO Hong, et al. Study on the vacuum brazing of diamond/Cu composite material and diamond film with Ag-Cu-Ti active filler metal[J]. Powder Metallurgy Technology, 2013, 31(6): 444-450.
- [10] 陈世隐, 郭佳杰, 黄国钦. 基于径向神经网络对磨削功率预测的研究[J]. 超硬材料工程, 2016, 28(4): 33-37.
CHEN Shiyin, GUO Jiajie, HUANG Guoqin. Research on prediction of grinding power based on RBF neural network[J]. Superhard Material Engineering, 2016, 28(4): 33-37.
- [11] 卢金斌, 汤峰, 孟普, 等. Ni-Cr 合金真空钎焊金刚石的热损伤分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 25-28.
LU Jinbin, TANG Feng, MENG Pu, et al. Analysis of thermal damage of Ni-Cr alloy vacuum brazing diamond[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 25-28.
- [12] 卢金斌, 徐九华. Ag-Cu-Ti 钎焊金刚石的界面结构及热应力分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 642-646.
LU Jinbin, XU Jiuhua. Analysis of the interface structure and thermal stress of Ag-Cu-Ti brazed diamond[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(4): 642-646.

- [13] SUN B J, XIAO B. Comparative study on interfacial microstructure and cutting performance of tunnel furnace and vacuum furnace brazed diamond core-drill[J]. *Diamond and Related Materials*, 2018, 89: 132-139.
- [14] 钟素娟, 张雷, 宋晓国, 等. 一种在旋耕刀表面制备金刚石耐磨涂层的感应钎涂装置, CN211989525U[P]. 2020-11-24.
- ZHONG Sujuan, ZHANG Lei, SONG Xiaoguo, et al. Induction brazing device for preparing diamond wear-resistant coating on the surface of rotary tiller, CN211989525U[P]. 2020-11-24.
- [15] 詹友基, 黄辉, 徐西鹏. 钎焊金刚石砂轮磨削石材中金刚石粒度对磨削力的影响研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2006, 153(3): 17-19.
- ZHAN Youji, HUANG Hui, XU Xipeng. Influence of diamond grit size on grinding forces when grinding stone with brazed diamond wheel[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2006, 153(3): 17-19.
- [16] 张国青, 黄辉, 徐西鹏. 钎焊单层金刚石薄壁钻头钻削工程陶瓷的研究[J]. *矿冶工程*, 2008(3): 110-113.
- ZHANG Guoqing, HUANG Hui, XU Xipeng. Research on drilling engineering ceramics with brazed single layer diamond thin-walled drill[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2008(3): 110-113.
- [17] 龙伟民, 乔培新, 王海滨, 等. 粉末合成钎料的探讨[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(10): 107-108.
- LONG Weimin, QIAO Peixin, WANG Haibin, et al. Discussion of powder synthetic filler materials[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(10): 107-108.
- [18] LONG W M, LIU D S, DONG X, et al. Laser power effects on properties of laser brazing diamond coating[J]. *Surface Engineering*, 2020, 36: 1-12.
- [19] LONG W M, LIU D S, WU A P, et al. Influence of laser scanning speed on the formation property of laser brazing diamond[J]. *Diamond and Related Materials*, 2020, 110: 108085.
- [20] 龙伟民, 刘大双, 张冠星, 等. 感应钎涂粉末熔融及传热机制[J]. *焊接学报*, 2021, 42(11): 29-34.
- LONG Weimin, LIU Dashuang, ZHANG Guanxing, et al. Melting and heat transfer mechanism of powder by induction brazing coating[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(11): 29-34.
- [21] 龙伟民, 刘大双, 王博, 等. 铝微粉对大气环境感应钎涂金刚石涂层性能影响[J]. *焊接学报*, 2021, 42(12): 67-71.
- LONG Weimin, LIU Dashuang, WANG Bo, et al. Effect of aluminum powder on properties of induction braze coated diamond layers in atmospheric environment[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(12): 67-71.
- [22] 徐琦. Ni 基钎料钎焊金刚石工具界面结合行为及其强化机制研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- XU Qi. Study on Interfacial bonding behaviors and enhancement mechanism of brazed diamond tools with Ni-based filler alloy[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2020.
- [23] JACOB K T. Determination of the Gibbs energy of diamond using a solid state cell[J]. *Solid State Commun.*, 1995, 94: 763-765.
- [24] 曹庆忠. 涂覆金刚石的钎焊工艺研究[J]. *超硬材料工程*, 2019, 31(1): 34-39.
- CAO Qingzhong. Research on brazing process of coated diamond[J]. *Superhard Material Engineering*, 2019, 31(1): 34-39.
- [25] 刘瑶瑶. 热损伤聚晶金刚石真空摩擦学性能及其机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- LIU Yaoyao. Tribological properties and mechanism of thermal damaged polycrystalline diamond under vacuum conditions[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [26] 布克哈德 G, 齐格利希 B, 波勒提乌斯 M, 等. 用有序排列的金刚石或立方氮化硼磨料作切削加工[J]. *超硬材料工程*, 2006(3): 50-55.
- BURKHARD G, ZIEGLICH B, POLETTIUS M, et al. Use ordered diamond or cubic boron nitride abrasives for cutting[J]. *Superhard Material Engineering*, 2006(3): 50-55.
- [27] 李灿, 刘小萍, 郑强, 等. 等离子喷涂含金刚石微粒的 Cr_2O_3 涂层干摩擦磨损性能研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2016, 36(8): 873-879.
- LI Can, LIU Xiaoping, ZHENG Qiang, et al. Improvement of tribological properties of plasma sprayed Cr_2O_3 coatings by adding diamond powder[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2016, 36(8): 873-879.
- [28] 沈彬. 超光滑金刚石复合薄膜的制备、摩擦学性能及应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- SHEN Bin. Study on the deposition, tribological properties and applications of ultra-smooth composite diamond films[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [29] 黄辉, 张国青, 徐西鹏. 钎焊金刚石磨粒磨损性能

- 研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2005(3): 313-317.
- HUANG Hui, ZHANG Guoqing, XU Xipeng. Research on the wear properties of brazed diamond abrasives[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2005(3): 313-317.
- [30] 詹友基, 黄辉, 徐西鹏. 钎焊金刚石磨削石材过程中磨粒磨损状态研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(5): 10-13.
- ZHAN Youji, HUANG Hui, XU Xipeng. Study on the abrasive wear state in the process of brazing diamond grinding stone[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2007(5): 10-13.
-
- 作者简介: 龙伟民(通信作者), 男, 1966 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为钎焊材料、钎焊工艺与设备、钎涂熔敷技术、焊接结构失效分析。
- E-mail: longweimin@camsouth.com.cn