

DOI: 10.3901/JME.2022.04.080

# 钎焊金刚石研究进展及其工具的应用\*

毛雅梅<sup>1</sup> 黑鸿君<sup>1</sup> 高洁<sup>1,2</sup> 郑可<sup>1</sup> 于盛旺<sup>1</sup> 王堉<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学新型碳材料研究院 太原 030024;

2. 电子科技大学真空电子科学技术国家重点实验室 成都 610054)

**摘要:** 现有的钎焊金刚石方法无法避免金刚石石墨化以及高温热损伤, 因此基于金刚石/钎焊合金界面润湿性、金刚石钎焊机理、钎焊金刚石方法, 综合分析影响钎焊金刚石性能的主要因素, 并概括总结国内外单层和多层钎焊金刚石工具的研究成果。详细论述钎料合金成分、钎焊温度、保温时间、钎焊气氛以及表面金属化等因素对钎焊金刚石的影响。各因素不但影响钎料合金/金刚石界面相互作用(包括界面润湿、界面化学反应、界面微观结构、金刚石热损伤等), 而且会引起残余热应力的产生, 进而影响焊接接头的质量。如钎料合金中的活性元素在界面处相互扩散并形成化合物是金刚石与基体以及钎料合金实现高强度连接的关键; 适宜的钎焊温度以及恰当的保温时间不但会使界面结合力增强, 降低界面残余应力, 还能减少反应界面微观孔洞、疏松等缺陷的形成; 采用真空或保护气氛环境, 可以降低金刚石的氧化和石墨化程度。通过现阶段钎焊金刚石工具的发展现状, 结合社会生产现实需要, 对其发展方向和未来要克服的难题进行展望。

**关键词:** 金刚石; 润湿性; 钎焊方法; 钎料合金

**中图分类号:** TG156

## Research Progress of Brazing Diamond and Application of Tools

MAO Yamei<sup>1</sup> HEI Hongjun<sup>1</sup> GAO Jie<sup>1,2</sup> ZHENG Ke<sup>1</sup> YU Shengwang<sup>1</sup> WANG Yao<sup>1</sup>

(1. Institute of New Carbon Materials, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

**Abstract:** The existing methods of brazing diamond cannot avoid diamond graphitization and high temperature thermal damage, so the wettability between diamond and brazing alloy interface, brazing mechanism and brazing method of diamond were discussed. The main factors affecting the performance of brazing diamond were analyzed comprehensively, and achievements in the single-layer and multi-layer brazing diamond tools at home and abroad were summarized. The influences of alloy composition, brazing temperature, holding time, brazing atmosphere and surface metallization on the properties of brazing diamond were discussed in detail. These factors not only effect interface interaction between brazing alloy and diamond (including interface wetting, interface chemical reaction, interface microstructure, thermal damage of diamond, etc.) but also cause residual thermal stress and impact the quality of the brazing joint. For instances, the compounds formed by reaction between active elements and diamond was a key to high bonding strength between diamond and matrix. Appropriate brazing temperature and holding time could not only enhance the interfacial bonding strength, depress interfacial residual thermal stress, but also reduce the formation of microscopic pores, porosity and other interface defects. Using a vacuum environment or protective atmosphere could reduce the oxidation and graphitization of diamond. The development direction and problems that need to be solved in the future were forecasted combining the current development status of brazing diamond tools and the actual needs of social production.

**Key words:** diamond; wettability; brazing method; brazing alloy

## 0 前言

众所周知, 金刚石集高硬度、高耐磨性、低摩

擦因数、高热导率以及良好的耐腐蚀性等众多优异的物化性能于一身, 是理想的加工工具材料<sup>[1]</sup>。在高速、高精切磨, 尤其是在高硬脆性材料加工方面的优势极其突出<sup>[2]</sup>。目前, 工业应用的金刚石工具主要是采用热压、电镀或钎焊等方法将小尺寸金刚石颗粒固定到金属胎体上<sup>[3]</sup>。由于金刚石和金属材料间界面能高, 界面润湿性差, 热压和电镀法制备的工具金属胎体和

\* 国家自然科学基金(51901154)、山西省自然科学基金(201901D211092)、山西省科技重大专项(20181102013)和“1331 项目”山西省工程研究中心(批准号 PT201801)资助项目。20210325 收到初稿, 20210825 收到修改稿

金刚石间仅为机械包镶和物理附着,对金刚石的把持强度较低,工具的加工精度和使用寿命比较有限<sup>[4-5]</sup>。钎焊金刚石工具可实现金刚石、钎料合金与基体间牢固的冶金结合,不仅金刚石的把持强度和出刃高度更高,其自锐性和切削性也更加优良,目前已成为高速、高负荷切磨作业的主流<sup>[6]</sup>。

为了不断提高钎焊金刚石工具的性能,自 20 世纪 90 年代初期以来,国内外的研究学者们开展了大量的研究工作。具体包括钎焊机理<sup>[7]</sup>、钎焊加热方法<sup>[8]</sup>、钎料合金成分设计<sup>[9]</sup>、金刚石焊前金属化预处理<sup>[10]</sup>、钎焊工艺<sup>[11]</sup>、钎焊性能<sup>[12]</sup>等。这些研究促进了钎焊金刚石工具的发展,使得金刚石的把持强度、刀具的锋利度、使用寿命等不断提高。但是,工具制作过程中焊接不牢固、颗粒脱落等问题仍然存在。

本文从金刚石/钎料合金界面润湿性出发,对金刚石钎焊方法和影响钎焊金刚石工具性能的主要因素等进行讨论,以期为研究学者进一步提升金刚石的把持强度、钎焊金刚石工具的使用寿命提供参考。

## 1 金刚石/钎料合金界面润湿性

钎料合金在金刚石表面的润湿性是实现其高强度钎焊,即获得高把持力的前提。然而,金刚石为  $sp^3$  杂化的共价键结构,这种结构在赋予其优异性能的同时,导致其与普通金属及合金材料间存在很高的界面能,普通钎料合金无法在金刚石表面达到很好的润湿,致使焊后结合强度很差<sup>[13]</sup>。表 1 列举了常见金属熔融液滴在金刚石表面的接触角<sup>[14-15]</sup>,可以看出常用于钎焊的低熔点单质金属在金刚石表面的润湿性均很差,接触角均在  $100^\circ$  以上。

表 1 常见金属熔融液滴在金刚石表面的接触角

金属元素	试验温度/ $^\circ\text{C}$	接触角/ $^\circ$
Ag	1 000	120
Cu	1 150	145
Au	1 150	150
Ge	1 150	116
Sn	1 150	125
Sb	900	120
Pb	1 000	110

## 2 提高润湿性的方法及机理

为提高钎料合金在金刚石表面的润湿性,研究人员一般采用活性金属钎料合金(钎料合金中加入 Ti、Cr 等),或采用金刚石颗粒进行金属化预处理再进行焊接的方式。

图 1 为金刚石颗粒直接进行活性金属钎焊的结

构示意图。活性金属钎焊法是高温钎焊过程中,利用可形成碳化物的活性金属元素,在金刚石表面产生强烈的正吸附作用而发生元素富集,参与界面反应,最终在相界面形成稳定的碳化物,其作为金刚石共价键与基体金属键之间的过渡相,能够降低固-液界面的界面能,使得液态钎料合金更好的润湿金刚石<sup>[16]</sup>。表 2 列举了常见低熔点金属加入少量活性元素形成的钎料合金在金刚石表面的接触角<sup>[14-15]</sup>。可以看出,通过添加 Ti、Cr 等活性元素,大幅提高了钎料合金在金刚石表面的润湿性,使接触角降低至  $50^\circ$  以下,其中 Cu+10%Ti, Cu+5%Cr, Cu+10%Sn+3%Ti 等钎料合金的接触角甚至降到了  $0^\circ$ 。

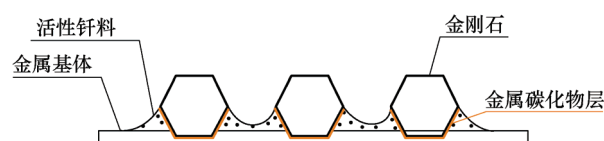


图 1 金刚石颗粒活性金属钎焊结构示意图

表 2 加入少量活性元素后合金对金刚石的接触角

成分	试验温度/ $^\circ\text{C}$	接触角/ $^\circ$
Cu+2%B	1 150	35
Cu+6%Ti	1 150	30
Cu+8%Ti	1 150	15
Cu+10%Ti	1 150	0
Cu+0.5%Cr	1 150	22
Cu+2%Cr	1 150	20
Cu+5%Cr	1 150	0
Cu+10%Cr	1 250	0
Cu+50%Cr	1 150	22
Cu+1%V	1 150	50
Cu+50%Mn	1 200	10
Ag+0.5% Ti	1 000	45
Ag+2% Ti	1 000	5
Sn+5% Ti	1 150	11
Cu+5.6% Sn+4.1% Ti	1 150	0
Cu+10% Sn+3% Ti	1 150	0
Cu+11.5% Sn+0.74% Ti	1 150	7

图 2 为金刚石表面金属化后再钎焊的结构示意图。金刚石表面金属化层一方面赋予金刚石表面金属特性,增加钎料合金在其表面的浸润性;另一方面通过选择碳化物形成元素作为金属化原材料,借助高温退火或高温焊接环境,使金属层与金刚石界面形成碳化物层增加金属层与金刚石的结合强度,进而保证焊接接头对金刚石颗粒的把持强度。

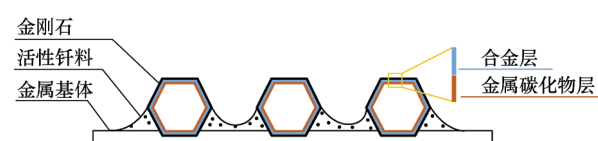


图 2 金刚石表面金属化后再钎焊的结构示意图

基于金刚石和钎料合金界面润湿性的改善方

法, 金刚石颗粒的钎焊实际上是采用合适的钎焊方法, 在不同环境(空气、真空或保护气氛)下, 将有无金属化预处理的金刚石、钎料合金及被连接材料加热到高于钎料合金熔点  $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 通过钎料合金中的活性金属元素或金刚石表面的金属化层, 增加二者间的浸润性, 使钎料合金能够充分在金刚石表面润湿、铺展、毛细流动和相互溶解扩散, 从而将金刚石紧密包裹, 同时利用合金中的活性金属或金属化层与金刚石间形成牢固的化学键合(碳化物层)或冶金结合, 使金刚石被稳固镶嵌在基体中, 提高钎料合金对金刚石的把持力<sup>[17]</sup>。

### 3 金刚石钎焊方法

因为不同的钎料合金熔点不同, 金刚石钎焊的保温过程中所需温度和时间也不同, 所以加热方式

也不同。此外, 金刚石在高温有氧环境中极易发生石墨化, 钎焊气氛也是钎焊过程需要考虑的因素。目前, 金刚石的钎焊方式主要包括炉中钎焊<sup>[18]</sup>、盐浴钎焊<sup>[19]</sup>、激光钎焊<sup>[20]</sup>、高频感应钎焊<sup>[21]</sup>、火焰钎焊<sup>[22]</sup>、电阻钎焊<sup>[23]</sup>以及真空钎焊<sup>[24]</sup>等。表 3 是这几种钎焊方法的优缺点。对比表中, 除了加热方式和钎焊气氛的区别, 不同的钎焊方法还存在钎焊效率和应用范围不同。在这几种钎焊方法中, 高频感应钎焊和真空钎焊在金刚石钎焊领域的应用较为广泛, 因为高频感应钎焊具有加热效率高、速度快、可局部加热等优点, 感应加热钎焊金刚石磨粒具有最小的热损伤, 如金刚石的裂纹和石墨化<sup>[25]</sup>, 主要用于一般金刚石工具的钎焊; 真空钎焊则因为真空环境可保护金刚石, 降低其在高温下的石墨化程度, 同时工件不容易发生变形, 内应力也较小, 主要用于精密金刚石加工工具的钎焊<sup>[26]</sup>。

表 3 钎焊加热方法及其优缺点

钎焊方法	加热方式	优点	缺点
炉中钎焊 <sup>[18]</sup>	电阻炉辐射加热	投资小、生产效率高	由于电阻辐射加热属于整体钎焊加热, 升温速度慢, 焊接时间长, 磨粒和基体在高温环境下长时间暴露
盐浴钎焊 <sup>[19]</sup>	将焊件浸入盐浴炉中加热	钎焊温度较低, 钎焊后金刚石石墨化程度小	工艺烦琐, 焊前需对金刚石表面渗覆 Ti 处理和钢基体表面喷焊 Ni 合金以改善金刚石和金属之间的浸润性, 总钎焊时间长
激光钎焊 <sup>[20]</sup>	激光束作为焊接时的热源	局部受热快(加热仅需 10 s), 金刚石在高温环境下暴露时间短, 可有效的控制了金刚石的石墨化	加热时间太短, 金刚石磨粒和钎料、钎料和基体之间来不及形成连续的过渡层, 降低了钎料对金刚石磨粒的把持力
高频感应钎焊 <sup>[21]</sup>	高频电流作为热源	非接触式加热; 加热温度高, 效率高、速度快; 温度易控; 可局部加热; 易实现自动控制	其本身具有邻近效应和集肤效应, 在加热尺寸较大和结构复杂的基体时, 很难实现均匀受热
火焰钎焊 <sup>[22]</sup>	用可燃气体、氧气或压缩空气混合燃烧的火焰作为热源	设备简单轻便, 燃气来源广, 工艺成本低	加热温度不易控制
电阻钎焊 <sup>[23]</sup>	电阻热	焊缝质量好	刀头整体温度较高, 影响金刚石的使用寿命
真空钎焊 <sup>[24]</sup>	电阻炉辐射加热	一次性可同炉钎焊多个组件, 生产效率高; 真空可有效避免氧化及污染变质等现象的出现	升温速度相对较慢

### 4 影响金刚石钎焊性能的主要因素

影响钎焊金刚石性能的主要因素包括钎料合金成分、钎焊温度、保温时间、钎焊气氛以及表面金属化膜等, 各因素不但会影响钎料合金/金刚石界面相互作用(包括界面润湿、界面化学反应、界面微结构、金刚石热损伤等), 而且还会引起残余应力, 最终影响焊接接头的质量。

#### 4.1 钎料合金成分

钎焊过程中, 基体和金刚石的牢固结合依靠熔化后钎料合金发生的冶金反应, 因此钎料合金自身性能在很大程度上影响钎焊金刚石接头性能。针对金刚石钎焊的难点和应用特点, 钎料合金需要满足以下几个条件: ① 适宜的熔点<sup>[27]</sup>, 既能尽量避免

高温对金刚石的热损伤, 也能满足金刚石钎焊工具的使用温度; ② 对于金刚石的浸润和扩散作用要好<sup>[28]</sup>; ③ 成分稳定性好, 尽可能减少钎焊过程中发生偏析和易挥发元素的损耗<sup>[29-30]</sup>; ④ 要有足够的硬度和强度<sup>[31]</sup>, 能保证刀具整体的使用性能。基于这些要求, 目前用于钎焊金刚石颗粒的钎料合金主要有镍基、铜基和银基等。

##### 4.1.1 镍基钎料合金

镍基钎料合金主要指 Ni-Cr 钎料合金, 其形成的钎焊层一般具有极好的耐蚀性, 且硬度、耐磨性、耐高温性也较好, 是金刚石钎焊中较常采用的一种钎料合金<sup>[32]</sup>。Ni-Cr 钎料合金中碳化物形成元素 Cr 在钎料合金熔化后会在金刚石表面富集并发生扩散反应, 在界面处形成 Cr 的碳化物, 这一过程对金刚石颗粒的润湿性和把持强度的提高起到较大的作用。

CHATTOPADHYAY 等<sup>[33]</sup>的研究表明, Ni-Cr 钎料合金中 Cr 元素的存在会提高金刚石与钎料合金界面的浸润性。

姚正军等<sup>[34]</sup>对比了 Ni-Cr 钎料合金和不含 Cr 的镍基钎料合金制作的砂轮磨削性能, 发现不含 Cr 的 Ni 基钎料合金钎焊的砂轮出现了金刚石大量脱落, 而含 Cr 的金刚石砂轮结合剂层厚度十分均匀, 金刚石与钢基体连接牢固, 对金刚石颗粒的把持力好, 使用后金刚石无脱落现象。

HUANG 等<sup>[35]</sup>对金刚石与 Ni-Cr 钎料合金界面微观结构进行了细致表征, 发现金刚石与 Ni-Cr 钎料合金之间存在两层结构, 一层是不连续碳化物层, 一层是石墨层; 张凤林等<sup>[36]</sup>也发现在金刚石与 Ni-Cr 钎料合金之间确实存在两层结构, 但与 HUANG 结论不同的是: 靠近金刚石一侧的层微观结构不完全是石墨, 而是石墨化金刚石表面的位错通道与 Cr 反应并渗透一定深度形成的, 即含有一定量的 Cr。总之, 界面反应层的存在提高了对金刚石的把持强度。

除了探索更优结合强度的 Ni-Cr 钎料合金外, 研究者们也对 Ni-Cr 钎料合金钎焊金刚石界面的残余应力进行了研究。如孟普<sup>[37]</sup>对 Ni-Cr 合金钎焊金刚石冷却过程形成的残余应力进行了数值模拟和拉曼测试。模拟结果表明: 金刚石/钎料界面处的残余应力较大, 最大残余应力出现在金刚石尖角与钎料界面结合处; 最大残余应力随金刚石包埋深度不同而变化, 当包覆深度为 60% 时, 最大残余应力值最小, 钎焊接头可获得较好的综合性能; 拉曼测试结果表明, 在 1 030 °C 的保护气氛下钎焊时, 金刚石包埋深度为 50%, 顶部受 100 MPa 的残余拉应力, 中部受 500 MPa 的残余压应力, 与模拟结果相近。另外, 蒋志鹏等<sup>[38]</sup>的研究结果还表明残余应力会影响金刚石性能, 降低其断裂强度, 使金刚石产生微裂纹。

Ni-Cr 钎料合金钎焊金刚石还易造成其热损伤。由于 Ni-Cr 钎料合金中的 Ni 为触媒元素, 且其钎焊温度较高(1 020~1 080 °C), 会导致金刚石会出现较大的热损伤, 具体表现为石墨化、残余应力以及表面熔蚀等, 这会削弱金刚石的性能<sup>[39-40]</sup>。在 Ni-Cr 合金中添加合适的金属或非金属元素, 可降低钎焊温度, 减少金刚石的热损伤<sup>[41]</sup>。例如, 卢金斌等<sup>[42-43]</sup>在 Ni-Cr-B-Si 钎料合金中添加质量分数 1% 石墨或 5% Cu 粉, 发现钎料合金不仅能较好润湿金刚石, 也能在一定程度上减少金刚石的热损伤。

#### 4.1.2 铜基钎料合金

铜基钎料合金主要指以 Cu 和 Sn 为主要元素, 添加 Ti、Cr 等元素的合金钎料, 其具有一定的强度和硬度, 由于 Cu 不是金刚石触媒元素且强度、熔

点均较低, 故而可以降低金刚石的热损伤<sup>[35]</sup>。Cu 基钎料合金中的 Ti、Cr 等元素作为活性元素是提高铜基钎料合金润湿性和焊接强度的关键。

在表 2 中, 加入 Ti、Cr 可以有效的提升 Cu 的润湿性, 加入 6% 的 Ti 可使纯 Cu 的接触角由 145° 降至 30°, 加入 0.5% 的 Cr 就能将接触角降至 22°。

卢金斌等<sup>[44]</sup>采用 Cu-Sn-Cr 钎料合金对金刚石磨粒进行钎焊试验。试验结果显示钎焊后, 金刚石界面处形成一层连续片状  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , 该碳化物的形成提高了钎料对金刚石的润湿性。与 Ni-Cr 钎料合金相比, 因为没有 Ni 催化相, 所以对金刚石的热损伤更小。

关砚聪等<sup>[45]</sup>研究了 Cu-Sn-Ti 合金钎焊金刚石的界面组织形貌与物相组成。结果表明, 在合适的焊接参数下, 活性元素 Ti 和金刚石间有充分的相互作用, Cu-Sn-Ti 合金对金刚石颗粒表现出良好的浸润性, 金刚石晶粒的晶形完整, 钎料合金对金刚石的包覆性好, 金刚石与钎料合金的接合界面均匀、连续且致密, 金刚石把持强度高。

LI 等<sup>[46]</sup>的研究表明, Cu-Sn-Ti 合金与金刚石的相互作用会在金刚石的表面异质外延生长一层晶粒尺寸为 40~60 nm 的 TiC, 且 TiC 层中的 C 含量也随着远离金刚石-TiC 界面而减少。

KHALID 等<sup>[31]</sup>对 Cu-Sn-Ti-Zr 合金钎焊金刚石的界面微观形貌进行了观察。结果表明在金刚石和钎焊层界面处生成了两种结构的 TiC, 在靠近金刚石界面处, 由于有丰富的 C 原子, 则形成了连续的立方状 TiC; 靠近钎焊层处由于 C 原子不够充足, 形成的 TiC 为细长型或柱型。同时钎焊层中形成了完整的  $\text{CuSn}_3\text{Ti}_5$  化合物, 这些 Ti 的化合物是提高基体与金刚石之间联结强度的主要原因。

邓朝晖等<sup>[47]</sup>对 Cu-10Sn-5Ti 钎焊金刚石接头处的残余热应力进行了模拟研究。结果表明, 热物性差异是影响钎焊接头应力的主要因素, 金刚石钎焊接头中的残余热应力主要集中在界面 TiC 层附近, TiC 层主要承受拉应力, 而其他部位主要承受压应力; 钎料的塑性变形对热应力具有一定的缓解作用。

#### 4.1.3 银基钎料合金

银基钎料合金主要指以 Ag 和 Cu 为主要元素, 添加 Ti、Zn、Cr 等元素的合金钎料。银基钎料合金熔点适中, 工艺性好, 并具有良好的韧性、导热性和耐腐蚀性。银基钎料合金中的 Cu 可以降低银的熔化温度, 又不会形成脆性相, Ti、Cr 元素则是对润湿性和钎焊强度起作用的主要元素。

李丹等<sup>[48]</sup>研究了不同 Ti 含量 Ag-Cu-Ti 钎料合金在金刚石表面的润湿性, 结果表明当 Ti 含量为 10% 时, 钎料合金对金刚石具有较好的浸润性, 结



合强度较高, 界面 Ti、C 元素的扩散及 TiC 的形成是提高润湿性的主要原因。

张凤林等<sup>[28]</sup>为了改善金刚石钎焊性能, 在 Ag-Cu-Zn 钎料合金中添加 Cr、Ti 金属粉末以改善钎料合金对金刚石的润湿性。试验结果表明, Cr 或 Ti 金属粉末的添加, 提高了钎料合金对金刚石的润湿性。其中添加 Cr 粉在空气中利用高频感应加热便可实现对金刚石的良好钎焊, 磨削试验中金刚石也未脱落。而添加 Ti 粉需要在真空或者覆盖 C 粉前提下才能保证钎焊效果, 主要是因为 Ti 活性更高, 在空气中会优先生成  $\text{TiO}_2$ , 阻止 Ti 和金刚石 C 进一步反应。

刘媛媛等<sup>[49]</sup>在 Ag-Cu-Zn 钎料合金中添加 Ti 对金刚石进行钎焊, 对钎焊金刚石的耐磨性进行试验。试验结果表明, 该钎料合金能够实现对金刚石的强力把持, 在重负荷环境作用下钎焊金刚石仍能保持正常磨损过程, 其耐磨性和原始金刚石接近。

卢金斌等<sup>[50]</sup>采用 Ag-Cu-Ti 钎料合金真空钎焊金刚石颗粒, 对其残余应力进行了拉曼表征。结果表明: 金刚石中的最大拉应力位于磨粒顶部, 为 60 MPa; 最大压应力在底部, 为 120 MPa。李奇林等<sup>[51]</sup>研究了 Ag-Cu-Ti 钎料合金超高频感应连续钎焊金刚石, 得出了相反的结论。高频感应钎焊后金刚石磨粒顶部受到最大残余压应力为 500 MPa, 磨粒底部受到的最大残余拉应力为 150 MPa。即不同的钎焊方法会导致金刚石所受到的残余应力状态及大小明显不同, 真空钎焊后金刚石的残余应力更小。此外, 与 Ni 基(Ni-Cr)合金相比, Ag 基(Ag-Cu-Ti)合金钎焊金刚石时, 金刚石/钎料界面的残余应力相对更低。

综上, 与 Ni 基钎料合金相比, Cu 基和 Ag 基钎料合金的钎焊温度相对低一些, 其中, Cu 基合金的钎焊温度为 880~950 °C, Ag 基钎料合金的钎焊温度范围在 920~1 000 °C, 二者钎焊时对金刚石的热损伤以及金刚石/钎料合金界面的残余应力都相对小一些<sup>[52]</sup>。总体上, 三种钎料合金都是利用碳化物形成元素与金刚石发生互扩散反应并形成碳化物实现对金刚石的良好润湿和高效连接。

## 4.2 钎焊工艺参数

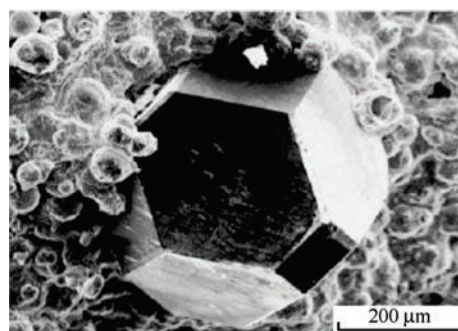
### 4.2.1 钎焊温度和保温时间

钎焊温度和保温时间是钎焊工艺中最主要的工艺参数。随钎焊温度和保温时间的变化, 在毛细管力的作用下, 钎料在范德华力和色散力的推动下在金刚石表面润湿和铺展, 通过对表面缺陷的弥合和对裂纹尖端的钝化作用使金刚石得到强化, 同时通过在金刚石表面外延生长成一层致密连续的碳化物过渡层, 进一步强化金刚石的钎焊质量<sup>[53-54]</sup>。其中, 钎焊温度主要决定钎料合金的融化填充程度、铺展

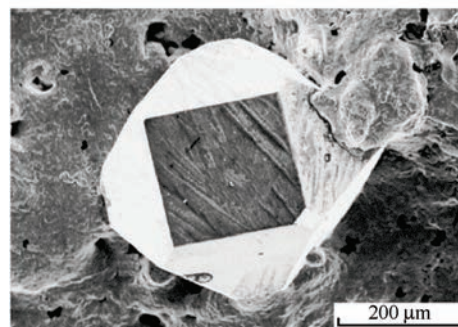
厚度均匀性、钎料合金与金刚石表面冶金结合的程度以及对金刚石的热损伤程度<sup>[55]</sup>。为了保证钎焊质量, 钎焊温度一般要高于钎料合金液相线约 60~120 °C, 以促进钎料合金的铺展和填隙, 进而获得厚度合适且均匀的钎料合金层。当钎焊温度确定时, 保温时间就成为另一个影响钎焊效果的关键因素, 保温时间越长, 金刚石/钎料合金界面反应程度越深, 有利于增加界面润湿性, 但时间过长, 金刚石界面反应层厚度越大, 会增加金刚石发生热损伤的风险, 影响磨粒的力学性能, 因此保温时间一般选取为 5~20 min。

向孙祖<sup>[56]</sup>研究了钎焊温度对 Ag-Cu-Ti 钎料合金在金刚石表面的熔融与铺展, 试验结果表明: 随着钎焊时间的增加以及钎焊温度从 780 °C 升至 825 °C, 原子热运动能量增加, 钎料逐渐处于最佳的流动状态, 在金刚石表面的铺展和流动都更充分均匀, 界面反应程度逐渐加深, 钎料合金对金刚石的浸润性越来越好, 钎料与基体以及金刚石之间的连接强度得到保障。

邓朝晖等<sup>[57]</sup>研究了不同钎焊温度对 Cu-Sn-Ti 钎焊金刚石表面形貌的影响。图 3<sup>[57]</sup>为不同温度钎焊镀钛金刚石的形貌。当钎焊温度为 880 °C(图 3a), 钎料融化不充分, 对金刚石的润湿不充分; 当钎焊温度升至 900 °C 时(图 3b), 金刚石晶形完整、棱角分明, 无明显热蚀痕迹, 钎料铺展充分; 但当温度升至 920 °C 时(图 3c), 金刚石表面出现一定程度的热刻蚀现象。



(a) 880 °C



(b) 900 °C

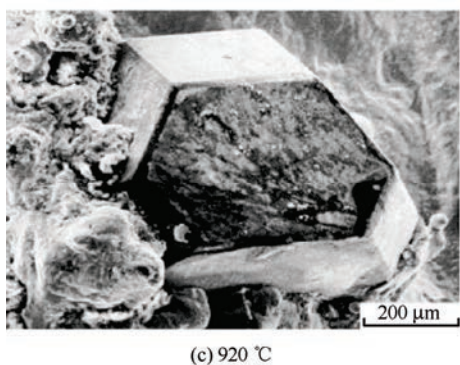


图3 不同钎焊温度下金刚石表面形貌图

徐正亚等<sup>[58]</sup>采用高频焊设备,以 Ni-Cr 合金作为钎料合金,在不同钎焊温度和保温时间下开展了金刚石钎焊试验,并对钎焊金刚石试样磨削性能进行了分析。结果表明:随钎焊温度增加,钎料合金的流动性和润湿性不断增加,但温度过高,钎料合金的黏度会降低,金刚石磨粒发生位移,破坏磨粒的有序排布;当钎焊温度适宜时磨粒不流动且钎焊强度好;保温时间则影响钎焊界面的反应产物量,无保温时间,界面反应产物少,钎料合金对金刚石把持强度弱,磨削性能差,保温时间过长,则金刚石热损伤大,导致冲击性能下降,磨削性能同样会降低。同样的,邵浩明等<sup>[59]</sup>采用 Ni-Cr 钎料合金钎焊金刚石得到结论:钎焊温度过高时,金刚石表面的侵蚀和热损伤会加剧。

言佳颖<sup>[60]</sup>模拟分析了钎焊温度和冷却速度对金刚石钎焊接头残余应力的影响。结果表明:随钎焊温度升高,金刚石中的残余热应力不断增加,这主要是由于温度升高使金刚石和钎焊合金的热膨胀系数增加且差异变大,从而引起整体残余热应力的增加;残余热应力随着冷却速率增大而增加,其原因是冷却速率的增大导致温度场变化较快,增大了钎焊金刚石接头中的温度梯度。因此,降低钎焊温度以及冷却速度可降低钎焊金刚石中的残余热应力。

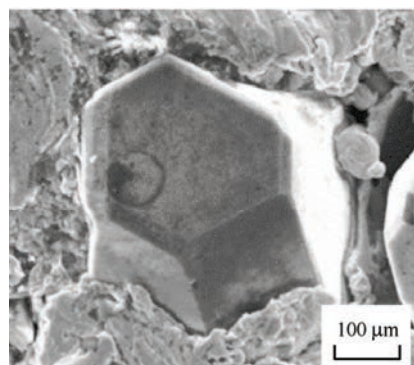
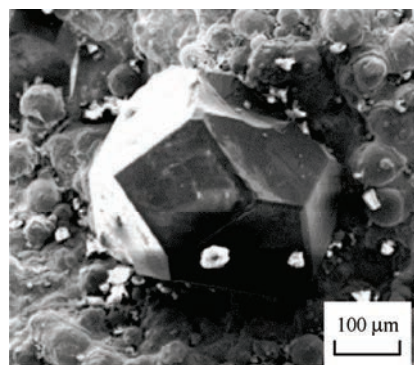
综上所述,钎焊过程中,无论是活性元素向金刚石表面富集还是在界面发生反应,实际上都是原子扩散的过程,当温度较低或保温时间较短时,界面反应不充分,一方面会减少金刚石与钎料合金以及基体三者之间反应层的有效接触面积,使得结合力降低;另一方面,会造成反应界面存在微观孔洞、疏松等缺陷,对钎焊强度产生影响<sup>[61]</sup>。另外,钎焊温度较高还会导致金刚石产生热损伤及较大的热应力。因此,合适的钎焊温度及保温时间可保证钎料向基体和金刚石充分扩散并且降

低金刚石石墨化机率,从宏观上保证钎焊工具的接头质量。

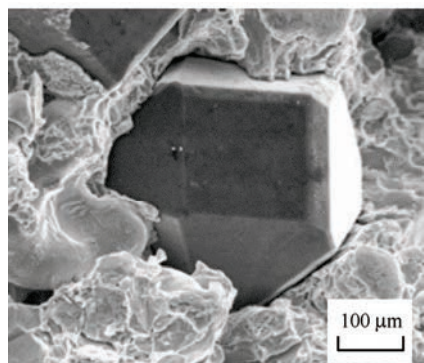
#### 4.2.2 钎焊气氛的影响

金刚石的钎焊通常在真空或者保护气氛下进行,主要是空气中极微量的氧或水汽都会引起金刚石表面生成难还原的氧化膜而阻碍钎焊致密化过程,特别是高温有氧环境下,金刚石极易发生热损伤,包括表面石墨化、表面蚀坑、微裂纹及破碎等。真空或保护气氛有助于钎焊过程中去除高蒸汽压、低沸点的杂质及氧化物,有效降低金刚石的氧化、石墨化程度及界面残余应力,改善钎焊质量<sup>[62]</sup>。

伍俏平等<sup>[63]</sup>利用 Cu-10Sn-5Ti 钎料合金粉末,在空气、Ar 气保护和真空气氛下分别对金刚石进行钎焊试验,对比了不同气氛下钎焊效果的差异。图 4a~4c<sup>[63]</sup>分别是空气、Ar 气保护和真空气氛下钎焊金刚石的形貌图。在空气中钎焊时(图 4a),金刚石石墨化、表面蚀坑和微裂纹等热损伤较为严重;相比之下,在 Ar 气或真空气氛保护下(图 4b,4c),金刚石的石墨化转变温度提高,金刚石表面的石墨化和热损伤程度都很小,晶粒形状完整、棱角分明。另外,由于钎料合金中的 Ti 元素活性高,易氧化,生成的氧化膜妨碍了界面反应,导致空气中钎焊金刚石的把持强度较低;而 Ar 气保护和真空气氛下的钎料合金氧化程度减轻,实现了对金刚石的高强度把持<sup>[64]</sup>。







(c) 真空

图 4 920 °C 下不同钎焊气氛的钎焊金刚石形貌

陈燕<sup>[65]</sup>研究了 Ni-Cr 合金钎焊金刚石的热损伤形式,对比了真空及 Ar 气保护气氛条件下钎焊金刚石性能差异。Ar 气保护气氛下的钎焊金刚石可以有效控制残余应力。相比起真空钎焊,残余应力下降了 30%~50%且未出现裂纹,并且寿命是原始金刚石的 70%。

综上,真空和保护气氛不仅可以降低金刚石石墨化和热损伤的程度,还可以降低金刚石中的残余应力,最终提高钎焊金刚石钎焊效果。

#### 4.3 表面金属化

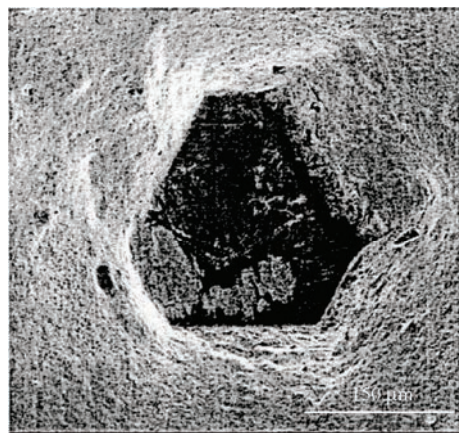
金刚石表面金属化预处理是改善其润湿性及焊接性能的有效手段。钎焊过程中,空气或有害元素都可能对无表面金属化预处理的金刚石造成腐蚀和热损伤<sup>[66]</sup>。此外,钎料合金在钎焊过程中本身可能产生脆性相(如 Sn-Ti),这将导致钎焊界面结合不良,而金属化后的金刚石表面存在大量由原位生长的无位错晶须组成的碳化物,这些界面碳化物可在界面微区中(金刚石与钎料合金间)发挥类似于金属基复合材料中碳化物纤维的增强作用,大幅度提高钎焊金刚石性能以及钎焊接头质量。从北京粉末冶金研究所的碳化物形成反应,到冶金部第一地质勘探局的固相接触法金刚石-金属键,再到燕山大学的真空微蒸发镀的金刚石表面金属化研究,金刚石表面金属化预处理的研究成功解决了金刚石与基体之间结合强度不足的问题。

金刚石表面金属化有很多种方法,按是否发生界面反应分为两大类,其中发生界面反应的有化学气相沉积、真空微蒸发镀、盐浴镀等;不发生界面反应的有物理气相沉积、化学镀、电镀等。界面反应能够使金刚石被基体金属或合金所浸润,大大增强金刚石与基体金属间的黏结力<sup>[67]</sup>。金刚石在合适的条件下容易与 Ti、Mo、W、Zr、V 等亲碳元素发生反应,生成界面碳化物。目前,金刚石表面金属

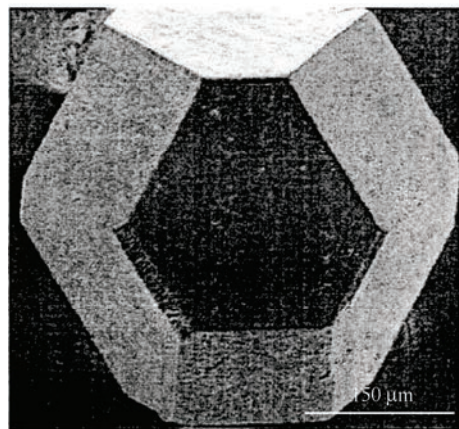
化预处理应用最多的元素为 Ti, Ti 与碳亲和性非常好,极易形成界面碳化物,但是 Ti 也非常容易被氧化,因此,制备 Ti 金属化层后再在其表面制备 Ni 金属化层来阻碍金刚石的氧化,是目前采用较多的手段。

燕山大学的研究者<sup>[68-70]</sup>对有单层 Ti 金属层和复合 Ti+Ni 金属化层的钎焊金刚石可焊性进行探究。试验结果综合表明单层 Ti 金属化层可以有效避免 Ni 与金刚石表面接触以及金刚石石墨化,而 Ni 金属化层避免了 Ti 金属化层和金刚石的氧化,使得复合金属化层的钎焊金刚石钎焊性能更好,在空气中就可以实现金刚石与金属基体的焊接,钎料合金与其完全润湿且焊接接头结合牢固,界面结合强度甚至超过 140 MPa。

郭兆翠<sup>[71]</sup>对比了有无 Ti 金属化层的钎焊金刚石表面结构差异,钎焊后金刚石磨粒外观形貌如图 5 所示<sup>[71]</sup>。很明显有 Ti 金属化层的金刚石表面 TiC 层更致密,金刚石表面润湿性明显优于无 Ti 金属化层的钎焊金刚石。最终试验结果中有 Ti 金属化层的金刚石钎焊后的静压强度明显强于无金属化层的且结合强度明显增强。



(a) 无金属化层



(b) 有 Ti 金属化层

图 5 有无 Ti 金属化层的钎焊金刚石表面微观结构

综上所述，金属化预处理可以实现金属化层与金刚石的冶金结合，达到高结合强度的钎焊目的，同时金属化层优异的抗氧化性能可以直接改善金刚石的热损伤情况，大幅提高钎焊金刚石性能接头质量。

5 钎焊金刚石工具及其应用

目前钎焊法制作的金刚石工具主要为单层钎焊金刚石工具，对于多层实现“孕镶”暂时尚未见有成果发表，但我国有人利用粉末冶金烧结以及模压成型等技术制备了钎焊金刚石钻头、锯片等工具。

5.1 单层钎焊金刚石工具

单层钎焊金刚石工具解决了传统电镀金刚石工具把持力不强、出露高度低、电镀生产易造成水 and 环境污染的弊端。常见单层钎焊金刚石工具主要可分为切削刀具和修整工具两大类。

单层钎焊金刚石切削工具主要有雕刻刀、套料刀、铣刀、钻头、绳锯和串珠等。通常用于雕刻石材；玻璃、石材、大理石、混凝土、金属铸件和复合材料等切割加工。切削刀具锋利，出刃高度大于50%，容屑空间大，不易堵塞，能够更加充分地发挥金刚石工具的优势<sup>[17]</sup>。实际应用中，靳晓丽等<sup>[72]</sup>利用钎焊金刚石套料钻，在普通机床上简单操作就实现了对“三明治”复合板材进行现场批量加工的

要求，也为新型复合材料层板“凯芙拉复合材料-特种陶瓷-铝合金”孔加工开辟了这种方便易行、经济高效的新途径。

单层钎焊金刚石修整工具主要有磨削砂轮、磨头磨盘和磨切片等<sup>[73]</sup>。常用于宝石、半导体、工程陶瓷、光学晶体、磁性材料及生物陶瓷等磨削加工<sup>[74]</sup>。李曙生<sup>[75]</sup>通过试验检测了钎焊金刚石砂轮磨削氧化铝陶瓷的性能，发现其不但锋利度好，磨削效率也较高。同样的，CHEN 等<sup>[76]</sup>进行单层钎焊金刚石砂轮与树脂结合金刚石砂轮磨削氧化铝试验，发现钎焊金刚石砂轮磨削陶瓷的磨削力、比磨削能和磨削温度都比树脂和电镀金刚石砂轮的，并可实现高生产率。

表 4 简要概述了我国钎焊单层金刚石工具的发展情况<sup>[77]</sup>。其中不难发现，钎焊设备大多数应用的都是高真空、高频以及高温钎焊炉。钎焊工艺简单易控，钎焊产品应用广泛。事实也证明：我国的钎焊金刚石工具的把持力是日本产的电镀金刚石把持力的 5/3<sup>[78]</sup>；我国台湾的中国砂轮公司推出的专利产品钎焊绳锯，其金刚石的出刃高度是电镀产品的 2 倍，烧结产品的 4 倍，且金刚石结合牢固，不会脱粒，金刚石排布整齐，每粒发挥最大功效，最高切削速度是电镀产品的 1.5 倍，使用寿命可以达到电镀产品的 2 倍以上<sup>[17]</sup>。

表 4 我国单层钎焊金刚石工具研究概况

金刚石	钎料合金	钎焊设备	钎焊工艺	钎焊产品	试验单位
16/20-300/400	Cu-Sn-Ti; Cu-Ag-Ti Ni-Cr-P/Ag;	高真空,惰性气体或大气中 (钎焊溶剂保护)	钎焊温度高于钎料熔点 50~100℃, 钎焊时间尽可能短	磨轮/磨头/什锦 锉/串珠/绳锯	北京粉末冶金 研究所 <sup>[79]</sup>
SDA100-40/50	Ni-Cr 合金	高温真空钎焊炉	950℃, 保温 10 min, 真空度 10 <sup>-2</sup> Pa	串珠/锯片/磨轮	华侨大学 <sup>[80]</sup>
100~200 μm				CMP 修整器	
40/50	Ag-Cu 合金+Cr 粉	GP30-CWT 高频焊机	780℃, 30 s	开槽砂轮/磨轮/ 磨头/串珠/锯片	南京航空航天 大学 <sup>[81-82]</sup>
SMD40/50,50/60	Ni-Cr 合金	VOQ2-80 真空淬火炉	<1 100℃		
		SP-25 高感应钎焊炉,氩气保护	1 050℃		
镀 Ti 金刚石	Ag-Cu-Ni	真空高频感应钎焊机	790℃, 20 s, 保温 20 min	金刚石磨片	哈尔滨理工 大学 <sup>[83]</sup>
镀 Ni 金刚石	Ag-Cu-Cr		800℃, 18 s, 保温 25 min		
无镀膜金刚石	Ag-Cu-Ti		940℃, 12 s, 保温 25 min, 二次钎焊, 两级加热		
70/80	NiCr13P6+Cr 粉	HVS-40 真空工业炉	950℃, 保温 30 min, 真空 度 2×10 <sup>-1</sup> Pa	牙科单层 金刚石砂轮	第四军医大学 /西安交通 大学 <sup>[84]</sup>
YSD700,40/50	Cu-Sn-Ni-Ti; Ni-Cr-Si-B; Ni-Cr-P Cu62Mn38	真空辐射加热炉	900℃, 保温 10 min, 真空 度 1.3×10 <sup>-1</sup> Pa	φ125 mm 干切 锯片	西安交通大学 /西安理工 大学 <sup>[64]</sup>
YSD700,50/60			900℃, 真空度 10 <sup>-2</sup> Pa		
35/40-50/60	Ni-Cr	高温真空钎焊炉	1 000~1 010℃, 保温 10 min,真空度 10 <sup>-2</sup> Pa	磨轮/锯片/玻璃 /钻头	北京科技 大学 <sup>[85]</sup>
35/40,40/50			1 000~1 010℃, 保温 10 min, 真空度 10 <sup>-3</sup> Pa	切割铸铁锯片/ 装修钻头	



## 5.2 多层钎焊金刚石工具

多层钎焊是以提高金刚石工具的使用效率和寿命为出发点进行设计。由于多层钎焊金刚石工具比单层的工作层厚,在磨削过程中磨粒会有后续的补充,即表层金刚石磨削后内层金刚石可发挥作用等;通过改进结构,增加金刚石工具的容屑空间和排屑能力,提高磨削效率,降低磨削温度,减少磨削温度对金刚石造成的热损伤<sup>[86]</sup>。

基于多层钎焊金刚石在使用效率和寿命等方面的优势,国内研究学者利用粉末冶金烧结、模压成型以及真空钎焊等方法制备了多层钎焊金刚石工具,并对多层钎焊金刚石工具的性能进行了多方面探究。如魏蒙<sup>[87]</sup>对比了多层钎焊的金刚石钻头与普通金刚石钻头的区别后发现:自行设计的多层槽型钎焊金刚石薄壁钻头的基体可将工具的寿命延长 70%。漆书桂<sup>[88]</sup>探究了多层钎焊金刚石钻头的磨损情况。实际上多层金刚石钻头在工作时需要进行保径处理,否则工作唇面边缘的金刚石由于受力复杂,在钻头胎体磨损的同时伴有金刚石脱落。周玉梅等<sup>[89]</sup>对比了钎焊与烧结多层金刚石薄壁钻钻头的出刃高度以及使用寿命。结果表明:钎焊多层金刚石钻头比烧结的出刃高度提高了 12.5%,使用寿命提高了 17.75%。宋立明等<sup>[90]</sup>采用真空钎焊制备多层钎焊金刚石锯片,并对比了无镀覆金刚石锯片、镀钛金刚石锯片以及多层钎焊金刚石锯片的锋利度得出结论:多层钎焊金刚石锯片的锋利度总体上优于镀钛金刚石锯片和无镀覆金刚石锯片,锋利度分别比镀钛以及无镀覆金刚石锯片提高了 10% 和 22.3%。

综上所述,多层钎焊金刚石工具的寿命以及锋利度都优于普通钎焊金刚石。但仍然没有单层钎焊金刚石应用广泛,主要是多层钎焊结构设计复杂繁琐,工艺优化耗时长。所以现阶段,在单层钎焊金刚石工具足以满足工业以及生产需要的情况下,多层钎焊金刚石仍旧需要简便化。

## 6 总结与展望

钎焊金刚石工具能够实现金刚石、钎料合金及基体的高强度结合,通过控制钎料合金成分、钎焊温度、保温时间、保护气氛或者进行金属化预处理等可以调控焊接微结构,减少金刚石热损伤,以及金刚石/钎料合金界面的残余应力,综合提升钎焊金刚石工具的性能。

(1) 研究获得具有合适熔点、能够与金刚石实

现化学冶金结合的钎料合金,仍是未来一段时间钎料成分设计的重点。在保证使用温度的基础上,降低钎料合金熔点有利于降低高温焊接对金刚石的石墨化及热损伤程度。

(2) 金属化后再焊接虽然增加了金属化处理步骤,但是对焊料和焊接工艺要求较低,普通焊料和高频焊接即可实现高强度焊接,因此研发制备方法简单、能够与金刚石高强度结合的金属化层,也是钎焊金刚石工具的主要发展方向之一。

(3) 虽然目前单层钎焊金刚石工具发展应用广泛,但随着工业化要求的更加多元化,工具的复杂性会随之上升,多层钎焊工具会是大势所趋,在航空工业、航海等领域精密且复杂零件会需要多层钎焊工具的支撑发展。

(4) 钎焊金刚石后期的发展可以尝试将单层和多层钎焊有效结合,在电子电路的特殊部位修整方面,既需要单层钎焊的简单易操作,又需要多层钎焊的金刚石晶粒补位替代,以满足特殊情况下不同部位的不同实际要求。

(5) 钎焊设备在后期发展过程中应考虑由于热膨胀系数差异引入的残余应力问题,可通过在控制系统中添加温度以及降温速率的实时匹配调节程序来解决,以保证温度变化的每一时刻都有相对应的降温速率。

(6) 自动化和绿色化是中国制造的基本理念和工程,随着工艺复合化、优质化以及经济化发展,大批量产品的需要使得自动化成了钎焊行业未来发展的方向。

## 参 考 文 献

- [1] ALEXANDER Q, IGOR P, DAVID T. Superior hardness and stiffness of diamond nanoparticles[J]. Carbon, 2020, 162: 497-501.
- [2] CHEN S M, LIN S T. Brazing diamond grits onto a steel substrate using copper alloys as the filler metals[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1996, 5(6): 761-766.
- [3] ARTINI C, MUOLO M L, PASSERONE A. Diamond-metal interfaces in cutting tools: A review[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(7): 3252-3264.
- [4] HWANG T W, EVANS C J, WHITENTON E P, et al. High-speed grinding of silicon nitride with electroplated diamond wheels, I. wear and wheel life[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122(1): 42-50.
- [5] ZHANG G F, ZHANG B, DENG Z H. Recent advances

- and future perspectives in grinding wheel structures[J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2009, 2(2): 113.
- [6] 吴颖. 电镀金刚石工具的应用现状及改进研究[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(18): 18-21.
- WU Ying. Application status and improvement research of electroplated diamond tools[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(18): 18-21.
- [7] ZHANG Z Y, XIAO B, DUAN D Z, et al. Investigation on the brazing mechanism and machining performance of diamond wire saw based on Cu-Sn-Ti alloy[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, 66: 211-219.
- [8] TAKAHISA Y, AKIO S. Brazing-filler material and method for brazing diamond: US, US6889890B2[P]. 2002-10-02.
- [9] KLOTZ U E, LIU C, KHALID F A, et al. Influence of brazing parameters and alloy composition on interface morphology of brazed diamond[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 495(1): 265-270.
- [10] SUNG J C, HU S C, CHANG Y S. The metallization of diamond grits[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 49(15): 1137-1140.
- [11] BUHL S, CHRISTIAN L, RALPH S, et al. Influence of the brazing parameters on microstructure, residual stresses and shear strength of diamond-metal joints[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(16): 4358-4368.
- [12] KIM H S, HEO J I, KANG S K, et al. The brazing properties of diamond and filler metal with brazing in the air and the appliance[C]// *Special lecture and academic lecture of Korean Welding Society*, April 19-21, 2009, Korean: Welding & Connecting Society, 2009: 137.
- [13] CHEN S P, ZHANG W, LIU X P, et al. Dramatically improved mechanical properties of diamond composites via tuning the wettability between diamond abrasive and vitrified bond using  $V_2O_5$  film[J]. *Composite Interfaces*, 2020, 27(9): 859-872.
- [14] 卢照田. 熔融金属与金刚石和石墨表面的相互作用(续)[J]. *人工晶体*, 1979(1): 14-36.
- LU Zhaotian. The interaction between molten metal and diamond and graphite surfaces (continued)[J]. *Artificial Crystal*, 1979(1): 14-36.
- [15] NAIDICH Y V, KOLESNICHENKO G A. Investigation of the wetting of diamond and graphite by molten metals and alloys[J]. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1965, 3(3): 191-195.
- [16] SUNG J C, SUNG M. The brazing of diamond[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, 27(2): 382-393.
- [17] 周玉梅. 钎焊单层金刚石工具研究现状[J]. *焊接技术*, 2010, 39(6): 1-5.
- ZHOU Yumei. Research status of brazed single-layer diamond tools[J]. *Welding Technology*, 2010, 39(6): 1-5.
- [18] LU J B, MENG P, ZHAO B, et al. Nucleation and growth of  $Cr_7C_3$  of brazing diamond with Ni-Cr alloy in protective atmosphere furnace[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 463-464: 505-509.
- [19] WEI C L, CHENG J G, LI J F, et al. Tungsten-coated diamond powders prepared by microwave-heating salt-bath plating[J]. *Powder Technology*, 2018, 338: 274-279.
- [20] HUANG Y G, LIANG G X, LV M, et al. Nd: YAG pulsed laser brazing of CBN to steel matrix with Zr modified Ag-Cu-Ti active brazing alloy[J]. *Diamond and Related Materials*, 2020, 104: 107732.
- [21] HUANG G Q, ZHANG M Q, GUO H, et al. The effects of temperature curves on the diamond/Ni-Cr interfacial properties in high-frequency induction brazing[J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2017, 8(2): 133-146.
- [22] 姜政刚, 周建新. 金刚石复合片(PDC)的火焰钎焊[J]. *焊接技术*, 2002(6): 57.
- JIANG Zhenggang, ZHOU Jianxin. Flame brazing of diamond composite (PDC)[J]. *Welding Technology*, 2002(6): 57.
- [23] 陈建民, 杨宝德, 缪青维, 等. 聚晶金刚石切削齿散热电阻钎焊工艺的研究[J]. *石油大学学报*, 1994(2): 64-67.
- CHEN Jianmin, YANG Baode, MIU Qingwei, et al. Research on the heat dissipation resistance brazing process of polycrystalline diamond cutting teeth[J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1994(2): 64-67.
- [24] SUN B J, XIAO B. Mechanical properties of diamond grinding discs brazed in a continuous-belt tunnel furnace or vacuum furnace[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(5-8): 1379-1386.
- [25] MA B J, YU Q X. Hot-filament chemical vapor deposition of amorphous carbon film on diamond grits and induction brazing of the diamond grits[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(10): 4750-4755.
- [26] MA B J, PANG Q, LOU J P. Rod-like brazed diamond tool fabricated by supersonic-frequency induction brazing with Cu-based brazing alloy[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, 43: 25-29.
- [27] CHEN Y, FU Y, SU H H, et al. The effects of solder alloys on the morphologies and mechanical properties of brazed diamond grits[J]. *International Journal of*

- Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 42: 23-29.
- [28] 张凤林, 周玉梅, 付凯旋, 等. Cr、Ti 金属粉改善 Ag-Cu-Zn 合金对金刚石的钎焊性能研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(3): 22-25.
- ZHANG Fenglin, ZHOU Yumei, FU Kaixuan, et al. Adding Cr/Ti metal powder to improve brazing performance of Ag-Cu-Zn alloy to diamond[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2007(3): 22-25.
- [29] 孙凤莲. CVD 金刚石厚膜与硬质合金的钎焊连接机理及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- SUN Fenglian. Research on the mechanism and process of brazing connection between CVD diamond thick film and cemented carbide[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002.
- [30] 王毅, 卢广林, 殷世强, 等. Cu-Ni-Sn-Ti 活性钎料成分设计与优化[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(3): 615-618.
- WANG Yi, LU Guanglin, YIN Shiqiang, et al. Cu-Ni-Sn-Ti active solder composition design and optimization[J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(3): 615-618.
- [31] KHALID F A, KLOTZ U E, ELSENER H R, et al. On the interfacial nanostructure of brazed diamond grits[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(8): 1139-1143.
- [32] TAN A H, CHENG Y C. Wear-corrosion properties of diamond conditioners in CMP slurry[J]. Wear, 2007, 262(5-6): 693-698.
- [33] CHATTOPADHYAY A. K, CHOLLET L, HINTERMANN H E. Experimental investigation on induction brazing of diamond with Ni-Cr hardfacing alloy under argon atmosphere[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(18): 5093-5100.
- [34] 姚正军, 徐鸿钧. Ni-Cr 合金与金刚石和钢基体界面微区的分析研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(4): 311-314.
- YAO Zhengjun, XU Hongjun. Analysis and research on the microzones of the interface between Ni-Cr alloy and diamond and steel matrix[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 33(4): 311-314.
- [35] HUANG S F, TSAI H L, LIN S T. Effects of brazing route and brazing alloy on the interfacial structure between diamond and bonding matrix[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 84(2-3): 251-258.
- [36] 张凤林, 周玉梅, 王成勇. 钎焊法制造单层金刚石取孔钻及其界面微观结构[J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 21-24.
- ZHANG Fenglin, ZHOU Yumei, WANG Chengyong. Single-layer diamond hole drill made by brazing method and its interface microstructure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(3): 21-24.
- [37] 孟普. Ni-Cr 合金钎焊金刚石接头残余应力分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2013, 33(5): 57-60.
- MENG Pu. Analysis of residual stress in Ni-Cr alloy brazed diamond joint[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2013, 33(5): 57-60.
- [38] 蒋志鹏, 孟普, 王家锐. Ni-Cr 合金对钎焊金刚石颗粒形貌与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(9): 221-223.
- JIANG Zhipeng, MENG Pu, WANG Jiarui. Effect of Ni-Cr alloy on the morphology and mechanical properties of brazed diamond particles[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(9): 221-223.
- [39] 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): 21-25.
- CHEN Yan, XU Hongjun, FU Yucan, et al. Ni-Cr alloy vacuum brazing diamond surface graphitization[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 21-25.
- [40] CHEN Y, XU H J, FU Y C, et al. Thermal damage of diamond grits during the brazing process with Ni-Cr alloy[J]. Solid State Phenomena, 2011, 175: 22-26.
- [41] 尹芳, 黄辉, 徐西鹏. 细粒度金刚石钎焊热损伤的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2013, 33(3): 21-25.
- YIN Fang, HUANG Hui, XU Xipeng. Experimental study on the thermal damage of fine-grained diamond in brazing process[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2013, 33(3): 21-25.
- [42] 卢金斌, 张旺玺, 张雷, 等. 添加石墨对 Ni-Cr 合金保护气氛钎焊金刚石磨粒界面组织的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 80-84.
- LU Jinbin, ZHANG Wangxi, ZHANG Lei, et al. The effect of adding graphite on the interface structure of diamond grit brazing Ni-Cr alloy in protective atmosphere[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 80-84.
- [43] 赵彬, 贺亚勋, 卢金斌, 等. 添加 Cu 粉对 Ni-Cr 合金真空钎焊金刚石磨粒界面组织的影响[J]. 中原工学院学报, 2014, 25(3): 8-10.
- ZHAO Bin, HE Yaxun, LU Jinbin, et al. The effect of adding Cu powder on the interface structure of diamond abrasive grains in vacuum brazing of Ni-Cr alloy[J]. Journal of Zhongyuan Institute of Technology, 2014, 25(3): 8-10.
- [44] 卢金斌, 贺亚勋, 穆云超, 等. Cu-Sn-Cr 真空钎焊金刚石界面微结构分析[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(10): 2881-2884.
- LU Jinbin, HE Yaxun, MU Yunchao, et al. Analysis of the interface microstructure of Cu-Sn-Cr vacuum brazing diamond[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2015, 44(10): 2881-2884.



- 2881-2884.
- [45] 关砚聪, 郑敏利, 姚德明. 铜基钎料焊接金刚石的界面结构与强度[J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 65-68.  
GUAN Yancong, ZHENG Minli, YAO Deming. Interfacial structure and strength of diamond welded with copper-based solder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 65-68.
- [46] LI W C, LIN S T, LIANG C. Interfacial segregation of Ti in the brazing of diamond grits onto a steel substrate using a Cu-Sn-Ti brazing alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(7): 2163-2172.
- [47] 邓朝晖, 言佳颖, 伍俏平, 等. 钎焊金刚石接头热应力场有限元仿真及试验研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(15): 165-168.  
DENG Zhaohui, YAN Jiaying, WU Qiaoping, et al. Finite element simulation and experimental research on thermal stress field of brazed diamond joints[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(15): 165-168.
- [48] 李丹, 孙文山. Ag-Cu-Ti 钎料在金刚石表面的润湿状况[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2000, 5(3): 101-104.  
LI Dan, SUN Wenshan. Wetting status of Ag-Cu-Ti solder on diamond surface[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2000, 5(3): 101-104.
- [49] 刘媛媛, 陈燕, 徐鸿钧. 银基钎料钎焊金刚石耐磨性试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008(4): 35-39.  
LIU Yuanyuan, CHEN Yan, XU Hongjun. Experimental study on the wear resistance of silver-based brazing diamonds[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2008(4): 35-39.
- [50] 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.
- [51] 李奇林, 苏宏华, 徐九华, 等. 基于 Ag-Cu-Ti 钎料的超高频感应连续钎焊金刚石界面结构及残余应力[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(12): 3250-3254.  
LI Qilin, SU Honghua, XU Jiuhua, et al. Ultra-high frequency induction continuous brazing diamond interface structure and residual stress based on Ag-Cu-Ti solder[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(12): 3250-3254.
- [52] 何源. 单层钎焊金刚石工具的残余应力分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.  
HE Yuan. Residual stress analysis of single-layer brazed diamond tools[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [53] WANG Y H, ZANG J B, WANG M Z, et al. Relationship of interface microstructure and adhesion strength between Ti coating and diamond[J]. Key Engineering Materials, 2003, 250(1): 41-45.
- [54] WANG Y H, ZANG J B, WANG H X, et al. Effect of Ti coating on wear stages of diamond in tools[J]. Key Engineering Materials, 2001, 202-203: 199-202.
- [55] SUN B, MENG P, LU J B, et al. Influence of brazing time on microstructure of high temperature brazing diamond with Ni-Cr alloy[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1619: 628-632.
- [56] 向孙祖. 细粒度金刚石磨料钎焊工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
XIANG Sunzu. Research on brazing process of fine-grained diamond abrasive[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [57] 邓朝晖, 伍俏平, 张荣辉, 等. 铜基钎料真空钎焊镀钛金刚石[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(2): 343-348.  
DENG Zhaohui, WU Qiaoping, ZHANG Rongping, et al. Vacuum brazing of titanium-coated diamond with copper-based brazing filler metal[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2011, 39(2): 343-348.
- [58] 徐正亚, 徐鸿钧, 傅玉灿. 镍基合金钎料高频感应钎焊金刚石试验研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(16): 1977-1980.  
XU Zhengya, XU Hongjun, FU Yucan. Experimental study on high frequency induction brazing of diamond with nickel-based alloy brazing filler metal[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(16): 1977-1980.
- [59] 邵浩明, 王进保, 孙浩. 温度对 Cr 基钎料钎焊金刚石界面微观形貌影响的研究[J]. 超硬材料工程, 2008(2): 12-15.  
SHAO Haoming, WANG Jinbao, SUN Hao. Study on the influence of temperature on the micro-morphology of diamond interface brazed with Cr-based solder[J]. Superhard Materials Engineering, 2008(2): 12-15.
- [60] 言佳颖. 钎焊金刚石磨粒接头热应力有限元仿真分析及试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015.  
YAN Jiaying. Finite element simulation analysis and experimental research on thermal stress of brazed diamond abrasive joint[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2015.
- [61] LI Y S, HIROSE A. Controlled synthesis of diamond and carbon nanotubes on Ni-base alloy[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 2251-2255.
- [62] CHATTOPADHYAY A K, CHOLLET L, HINTERMANN H E. Induction brazing of diamond with Ni-Cr hard facing alloy under argon atmosphere[J]. Surface and Coatings Technology, 1991, 45(1): 293-298.
- [63] 伍俏平, 邓朝晖, 潘占, 等. 钎焊气氛对金刚石钎焊性

- 能的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 51-57.
- WU Qiaoping, DENG Zhaohui, PAN Zhan, et al. Influence of brazing atmosphere on diamond brazing performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 51-57.
- [64] YANG Z B, LIU A J, YANG R Y, et al. Interface microstructure and formation mechanism of diamond abrasives laser brazed with Ni-Cr solder[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(5): 1152-1156.
- [65] 陈燕. 高温钎焊金刚石磨料热损伤分析及其控制对策的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- CHEN Yan. Thermal damage analysis of high-temperature brazing diamond abrasive and basic research on its control countermeasures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [66] 孙刚, 陈超, 彭放, 等. 金刚石表面电镀镍铁合金工艺研究[J]. 表面技术, 2007(4): 49-51.
- SUN Gang, CHEN Chao, PENG Fang, et al. Study on the process of electroplating nickel-iron alloy on diamond surface[J]. Surface Technology, 2007(4): 49-51.
- [67] 宋月清, 康志君, 高云. 金刚石与金属(或合金)的结合界面分析[J]. 人工晶体学报, 1999(4): 3-5.
- SONG Yueqing, KANG Zhijun, GAO Yun. Study on interface of diamond and metal matrix[J]. Journal of Synthetic Crystals, 1999(4): 3-5.
- [68] 王艳辉, 王焕新, 王明智, 等. 复合镀钛-镍金刚石的钎焊[C]//第十一届全国磨削技术学术会议, 2001, 6月1-6, 华侨大学. 泉州: 中国机械工程学会, 2001: 11-13.
- WANG Yanhui, WANG Huanxin, WANG Mingzhi, et al. Brazing of composite titanium-nickel diamond[C]//Proceedings of the 11th National Conference on Grinding Technology, June 1-6, 2001, Huaqiao University, Quanzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2001: 11-13.
- [69] 钟建平, 王明智, 王艳辉. 复合镀钛-镍金刚石的钎焊工艺[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2001(5): 31-32, 35.
- ZHONG Jianping, WANG Mingzhi, WANG Yanhui. The brazing process of composite titanium-nickel diamond coating[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2001(5): 31-32, 35.
- [70] 王明智, 张世良. 金刚石表面复合镀层结构及可钎焊性研究[J]. 工业金刚石, 2002(3): 19-22.
- WANG Mingzhi, ZHANG Shiliang. Research on the structure and brazability of composite coating on diamond surface[J]. Industrial Diamond, 2002(3): 19-22.
- [71] 郭兆翠. 新型铜基钎料的研制及其在金刚石工具中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- GUO Zhaocui. Development of a new type of copper-based solder and its application in diamond tools[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [72] 靳晓丽, 袁军堂, 张永刚. 钎焊金刚石刀具钻削新型复合板试验[J]. 机械工程师, 2004(4): 18-19.
- JIN Xiaoli, YUAN Juntang, ZHANG Yonggang. Drilling of new composite plates with brazed diamond tools[J]. Mechanical Engineer, 2004(4): 18-19.
- [73] TSAI M Y, LI P H, SUNG J C. Organic diamond disk versus brazed diamond disk for dressing a chemical-mechanical polishing pad[J]. Diamond and Related Materials, 2012, 23: 144-149.
- [74] 曹庆忠, 王建松, 张红涛, 等. 钎焊金刚石工具的技术现状[C]//中国超硬材料技术发展论坛, 2015, 11月12-15, 郑州市国际会展中心. 郑州: 中国机床工具工业协会超硬材料分会, 2015: 226-231.
- CAO Qingzhong, WANG Jiansong, ZHANG Hongtao, et al. The technology status of brazing diamond tools[C]//China Superhard Materials Technology Development Forum, November 12-15, 2015, Zhengzhou International Exhibition Center, Zhengzhou: Superhard Materials Branch of China Machine Tool Industry Association, 2015: 226-231.
- [75] 李曙生. 新型单层钎焊金刚石砂轮磨削工程陶瓷的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- LI Shusheng. Basic research on the grinding of engineering ceramics with a new type of single-layer brazed diamond grinding wheel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [76] 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(1-2): 16-23.
- [77] XU H J, FU Y C, XIAO B, et al. Fabrication of monolayer brazed diamond tools with optimum grain distribution[J]. Key Engineering Materials, 2004, 259(8): 6-9.
- [78] ZHANG F L, ZHOU Y M, GUO C W, et al. Performance of brazed diamond tool for machining dental ceramic[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1027: 84-87.
- [79] 林增栋. 钎焊法制造金刚石单层工具的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004(3): 1-5.
- LIN Zengdong. Research on brazing method for manufacturing diamond single layer tools[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2004(3): 1-5.
- [80] HUANG G Q, XU X P. Sawing performance comparison of brazed and sintered diamond wires[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013(2): 393-399.
- [81] 肖冰, 武志斌, 徐鸿钧. 银基钎料钎焊单层金刚石砂轮的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2001(1): 4-5.
- XIAO Bing, WU Zhibin, XU Hongjun. Research on

- brazing single layer diamond grinding wheel with silver-based solder[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2001(1): 4-5.
- [82] 关砚聪. 金刚石磨片的钎焊方法研究[J]. *石材*, 2005(6): 28-32.
- GUAN Yancong. Research on brazing methods of diamond grinding discs[J]. *Stone*, 2005(6): 28-32.
- [83] 马楚凡, 王忠义, 南俊马, 等. 一种牙科单层高温钎焊金刚石砂轮的研制[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2002(2): 34-35.
- MA Chufan, WANG Zhongyi, NAN Junma, et al. Development of a single-layer high-temperature brazed diamond grinding wheel for dental use[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2002(2): 34-35.
- [84] 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. Research on precision grinding of ultra-fine grained cemented carbide based on multi-layer brazed diamond grinding wheel online electrolytic dressing technology[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(21): 212-220.
- [85] WANG C C, WANG X C, SUN F H. Tribological behavior and cutting performance of monolayer, bilayer and multilayer diamond coated milling tools in machining of zirconia ceramics[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 353: 49-57.
- [86] XIAO B, XU H J, SU H H, et al. A preliminary investigation on multi-layer brazed diamond tools[C]// *Current Development in Abrasive Technology- Proceedings of the 9th International Symposium on Advances in Abrasive Technology*, October 12-14, 2006, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Dalian: *Diamond and Abrasives Engineering*, 2006: 6.
- [87] 魏蒙. 高效排屑换热的多层钎焊金刚石薄壁小孔钻的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- WEI Meng. Research on multi-layer brazed diamond thin-wall small hole drill with efficient chip removal and heat transfer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [88] 漆书桂. 多层钎焊金刚石钻头的实验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- QI Shugui. Experimental research on multi-layer brazed diamond drill bit[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [89] 周玉梅, 刘燕, 吕智. 钎焊多层金刚石薄壁钻的性能研究[J]. *超硬材料工程*, 2010(2): 14-17.
- ZHOU Yumei, LIU Yan, LÜ Zhi. Research on the performance of brazed multi-layer diamond thin-wall drills[J]. *Superhard Materials Engineering*, 2010(2): 14-17.
- [90] 宋立明, 肖冰, 丁晓阳, 等. 多层钎焊金刚石锯片的研制及基础分析[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2013, 33(3): 1-4.
- SONG Liming, XIAO Bing, DING Xiaoyang, et al. Development and basic analysis of multi-layer brazed diamond saw blades[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2013, 33(3): 1-4.
- 
- 作者简介: 毛雅梅, 女, 1995 年出生。主要研究方向为等离子体表面改性, 金刚石表面金属化及焊接。  
E-mail: 13474031636@163.com
- 高洁(通信作者), 女, 1989 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为等离子体表面改性, 金刚石表面金属化及焊接。  
E-mail: gaojie01@tyut.edu.cn