

钎焊单层金刚石工具研究现状

周玉梅¹, 张凤林²

(1.仲恺农业工程学院 机电工程学院, 广东 广州 510225; 2.广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:与单层电镀金刚石工具相比, 钎焊单层金刚石工具由于金刚石出刃高, 容屑空间大, 金刚石与基体之间的结合强度高而成为近年来超硬材料工具的热门研究领域。本文分别从钎料及钎焊方式、金刚石有序排布、界面微观结构及界面热力学与动力学以及钎焊工具性能概述了国内外钎焊单层金刚石工具在钎焊工艺、钎焊机理及工具性能三方面的研究成果, 并在此基础上提出了钎焊金刚石工具需要继续深入研究的问题。

关键词:钎焊; 单层; 金刚石工具; 研究现状

中图分类号: TG454 **文献标志码:** A

0 引言

硬脆材料, 如石材、玻璃、陶瓷等普通建筑材料, 以及宝石、半导体、工程陶瓷、光学晶体、磁性材料、生物陶瓷等高档先进工程和功能材料的加工, 需要采用具有更高硬度的磨料制备的工具, 金刚石与其他磨料相比, 具有极高的硬度、高相对耐磨性、热导率和抗压强度^[1]。因此, 金刚石工具是硬脆材料切割、磨削等加工的最常用工具。在金属结合剂金刚石工具的制造工艺中, 烧结和电镀是 2 种最主要的制造方法。由于金刚石与结合剂之间的结合强度较低, 金刚石的出刃低, 这 2 种工具的工作效率和使用寿命较低。

钎焊作为一种新型的金l石工具制造方法在国内外受到广泛关注。钎焊过程中钎料合金熔化以及毛细作用, 使合金紧密包裹金刚石, 同时在金刚石与钎料合金之间形成强的化学键, 大大提高了金刚石的结合强度和金刚石的出刃高度, 进而提高了工具的切削性能和自锐性, 特别适合高速高效磨削加工^[2]。本文分别从钎焊单层金刚石工具的钎焊工艺、钎焊机理以及工具性能等方面概述国内外钎焊金刚石工具的研究成果。

1 钎焊工艺

1.1 钎料及钎焊方式

钎焊金刚石工具的原理是采用碳化物形成元素(如 Ti, Cr, W 等)的钎料, 在钎焊的过程中于金刚石表面发生化学反应, 在界面形成一层碳化物, 借助于这层碳化物的作用, 金刚石、钎料、基体三者能通过钎焊实现牢固的化学冶金结合。理论上钎焊金刚石裸露高度可达到磨粒高度的 70%以上, 磨粒间的容屑空间大, 在高速高效磨削中能够承受较大的负荷, 因此对钎焊金刚石工具来讲, 钎料和钎焊方式是最主要的影响因素。在满足工具使用性能的前提下, 钎料首先要对金刚石具有足够的活性, 要包含强碳化物形成元素。

从目前钎焊所使用的钎料来看, Cr, Ti 等具有较低的界面反应能而成为钎焊金刚石的首选活性元素^[3]。活性元素的加入方式有 2 种, 一是预合金活性钎料, 二是直接添加活性粉末。目前钎料主要有 Ni 基、Cu 基和 Ag 基, 其中 Ni 基钎料工艺最成熟, 应用也最广泛。钎焊方式主要有真空炉中(气氛保护)钎焊、感应钎焊(空气或气氛保护)、激光钎焊、盐浴焊等, 但目前工业化的钎焊金刚石工具绝大多数是在真空炉中钎焊完成。

根据钎料种类、钎料中活性元素加入方式、钎焊方式的不同, 国内外对钎焊金刚石工具的研究成果见表 1。

收稿日期: 2010-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50605009); 仲恺农业工程学院引进优秀人才培养项目(G2360290)

表 1 国内外钎焊单层金刚石工具研究成果

钎料	活性元素加入方式	钎焊设备及气氛	研究者及机构
Ni 基	预合金 Cr (Ni-Cr-P, Ni-Cr-B-Si)	真空炉中氩气保护钎焊	J T Lower ^[4]
		氩气保护感应钎焊	A K Chattopadhyay ^[5]
		氩气保护感应钎焊、 真空炉中钎焊、激光焊	南京航空航天大学 ^[6-8]
		高温真空炉	国立台湾科技大学 ^[9]
		空气中高频感应钎焊	华侨大学 ^[10]
		高真空炉中钎焊	德国 Trenker 公司 ^[11]
		氩气保护高频感应设备和加热炉	北京科技大学 ^[12]
		真空炉中钎焊	S F Huang ^[13]
		高频感应钎焊、真空炉中钎焊、 盐浴焊	广东工业大学 ^[14-15]
	Ni-Cr-P 添加 Cr 粉	真空工业炉	第四军医大学/ 西安交通大学 ^[16]
Cu 基	预合金 Ti, Zr (Cu-Sn-Ni-Ti, Cu-Sn-Ti, Cu-Sn-Ti, Zr)	真空炉中钎焊	西安交通大学 ^[18]
			F A Khalid ^[19]
			U Z Klotz ^[20]
			W G Li ^[21]
	预合金 Cr (Cu-Sn-Cr)	真空炉中钎焊、氩气保护激光焊	S F Huang ^[13]
			国立台湾科学院 ^[22]
Ag 基	预合金 Ti, V (Ag-Cu-Ti, Ag-Cu-Ti+In Ag-Cu-V)	真空炉中钎焊	哈尔滨理工大学 ^[23]
			卢金斌 ^[24]
			J T Lower ^[25]
			T Yamazaki ^[26]
其他	添加 Cr, Ti 粉 (Ag-Cu-Zn+Cr, Ag-Cu-Zn+Ti)	空气中或氩气保护高频感应钎焊	南京航空航天大学 ^[27]
		真空炉中钎焊、高频感应钎焊、 覆盖 C 粉保护盐浴钎焊	广东工业大学 ^[28]
其他	Ti-Zr-Ni-Cu	真空淬火炉中钎焊	卢金斌 ^[29]

1.2 金刚石有序排布

金刚石磨料的均匀分布/有序排布被认为是改善工具性能和延长使用寿命的有效途径,在钎焊单层金刚石工具中较易实现,从而引起了国内外研究者的关注。金刚石的均匀分布/有序排布能够使金刚石在工具中得到充分有效的利用,既提高了工具的加工效率,又延长了工具的使用寿命,同时减小了金刚石浓度,降低了成本。此外,由于有序排布金刚石能够在工具表面形成理想的磨削形貌,可以保证合理的磨粒裸露高度和合理的间距,从而具有降低加工对象的粗糙度的效果^[30-31]。迄今为止,能够实现金刚石有序排布的技术主要包括复制技术、一次性使用壳模布料法、有序阵列法、孔模板、激光快速成形技术、点胶法等,但这些方法仅限于实验室应用,没有一种技术能够实现产业化。钎焊单层有序排布工具性能研究也较多,如我国台湾的中国砂轮公司推出的单层均布金刚石高温钎焊串珠,在不缩短工具使用寿命的前提下,可使

金刚石用量减少 1/2,切割速度提高 2 倍^[32]。美国和日本 Noritake 公司研制的单层均布钎焊金刚石磨轮用于精密磨削加工时,其工作表面粗糙度明显改善,表面粗糙度 $<0.2\ \mu\text{m}$ ^[33]。苏黎世 ETH 开发研究的新型钎焊单层均布磨磨刀具的寿命为电镀刀具的 10~20 倍,即使在进刀量增加 1 倍的情况下,刀具使用寿命也明显地高于电镀刀具^[34]。因此,加大对金刚石有序排布技术的研究力度,尽早开发出一套能够大规模进行工业化生产的金刚石有序排布技术尤为重要。

2 钎焊机理

目前,对钎焊金刚石机理研究主要集中在对金刚石、钎料和基体三者之间的界面微观结构以及界面反应的热力学和动力学。

2.1 界面微观结构

2.1.1 Ag 基钎料与金刚石界面

孙凤莲等对 Ag-Cu-Ti 合金及金刚石的界面进行了研究发现,Ag-Cu-Ti 钎焊金刚石的过程中 Cu 和 Ti 都会向金刚石表面偏聚,Ti 在金刚石表面形成一定厚度的 TiC 层,受不同晶面的影响,TiC 在金刚石表面的生长具有一定的方向性,在某一晶面生长完成后向其他晶面延伸。卢金斌在金刚石与 Ag-Cu-Ti 钎料的界面处发现了约 $1\ \mu\text{m}$ 的块状 TiC,且钎料在界面处呈不连续分布。但对于 Ag-Cu-Ti 合金与金刚石反应形成的 TiC 的更微观的形态和结构还缺乏相应的研究。武志斌在 Ag-Cu 合金中添加活性金属粉末 Cr,发现了 Cr 在钎焊过程中向金刚石界面富集,但具体的界面形成机理分析还不够深入。笔者在 Ag-Cu-Zn 合金和金刚石之间加入少量 Cr 粉,发现在钎料合金靠近钢基体部分、钎料合金靠近金刚石部分以及在金刚石上都存在反应过渡层,且在钎料和金刚石之间主要反应产物是 Cr_7C_3 ^[35]。

2.1.2 Cu 基钎料与金刚石界面

相比 Ag 基合金,Cu 基合金钎焊界面的微观结构研究报道较多。W C Li 在研究 Cu-Sn-Ti 合金钎焊金刚石时发现,在金刚石的表面可以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 界面的缩小而减少;界面上 TiC 的晶格常数也随着金刚石的晶向而不同。S F

Huang 等也发现激光钎焊和真空钎焊分别在金刚石表面形成非连续和连续的 TiC 层。非连续 TiC 层是由孤立的 100 nm 左右的 TiC 晶粒组成, 连续的 TiC 层厚约 300 nm。且在真空钎焊过程中, Ti, Sn 都会向金刚石-TiC 界面偏聚, 形成 Ti 或 Sn 的化合物。F A Khalid 等采用 STEM, TEM 等手段对 Cu-Sn-Ti 合金界面研究后认为: Ti 与金刚石反应形成的 200 nm 左右的 TiC 层应该包括 2 层结构, 一层是靠近金刚石的呈立方形的不连续的 TiC 晶粒, 另一层是以立方晶粒为基底生长的柱状晶 TiC, 其中第 2 层结构的 C 含量要小于第 1 层结构。

2.1.3 Ni 基钎料与金刚石界面

Ni-Cr 合金钎焊金刚石较为广泛。除了大多发现金刚石与 Ni-Cr 合金形成 Cr 的碳化物之外, S F Huang 等发现 Ni-Cr 与金刚石之间钎焊后不仅仅是形成一层碳化物, 还在金刚石与碳化物之间存在一层约 4 μm 的石墨化层, 而且还认为, Ni-Cr 合金并不像 Cu-Sn-Ti 合金那样与金刚石表面形成一层连续的 TiC 膜, 而是形成了不连续的碳化物膜, 而这层不连续的碳化物膜不能起到阻止钎焊合金对金刚石的继续反应及石墨化的作用。张凤林等也发现在金刚石与 Ni-Cr 合金之间确实存在 2 层结构, 但与 S F Huang 得出的结论有一定差别, 即靠近金刚石的一层微观结构并不完全是石墨, 而是含有一定量的 Cr。

不论是直接添加活性元素还是预合金活性元素的钎料, 其中的活性元素在钎焊过程中与金刚石之间形成碳化物是金刚石和钎料之间形成高强度结合的根本原因。目前采用市售的 Ni-Cr 合金钎料较多, 钎焊工艺相对比较成熟。而几乎所有的 Ag 基、Cu 基钎料都是在实验室条件下自制的预合金活性元素 Cr, Ti 等钎料, 市售的专用钎焊金刚石的 Ag-Cu 或 Cu-Sn 基活性合金钎料很少。其中对于活性元素的添加主要是以预合金 Cr 为主, 预合金 Ti 合金由于 Ti 比 Cr 易氧化且难以制备, 以及价格昂贵等特点在应用中受到限制。

2.2 界面反应热力学和动力学

固体与液体接触, 当体系的吉布斯自由能降低时, 可达到润湿。对于金刚石与金属体系而言, 物理润湿的润湿性一般比较差, 其润湿过程的推动力主要是范

德华力和色散力。反应润湿是在润湿过程中发生化学反应, 有新相在界面生成。考虑到在钎焊过程中近似于等压情况, 根据冶金热力学选用最小自由能为基本判据。即在恒温恒压条件下, 封闭体系中钎焊过程进行的方向是使其自由能降低的方向。根据热力学公式 $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$, 计算各反应式的自由能, 对其进行分析^[36]。比如采用 Ni-Cr-P ($w(\text{Ni})76\%$, $w(\text{Cr})14\%$, $w(\text{P})10\%$) 合金钎料钎焊金刚石, 在钎焊温度 950 $^{\circ}\text{C}$ 下, 各反应式的 ΔG^0 值见表 2。

表 2 钎焊中可能发生的反应及其 ΔG^0 计算值

反应式	$\Delta G^0/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	反应式	$\Delta G^0/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
$\text{C}(\text{金刚石}) \rightarrow \text{C}(\text{石墨})$	-6.028	$23\text{Cr}+6\text{C}(\text{金刚石}) \rightarrow \text{Cr}_{23}\text{C}_6$	-471.423
$3\text{Cr}+2\text{C}(\text{金刚石}) \rightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2$	-109.929	$23\text{Cr}+6\text{C}(\text{石墨}) \rightarrow \text{Cr}_{23}\text{C}_6$	-435.257
$3\text{Cr}+2\text{C}(\text{石墨}) \rightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2$	-97.874	$3\text{Ni}+\text{C}(\text{金刚石}) \rightarrow \text{Ni}_3\text{C}$	18.273
$7\text{Cr}+3\text{C}(\text{金刚石}) \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3$	-221.455	$3\text{Ni}+\text{C}(\text{石墨}) \rightarrow \text{Ni}_3\text{C}$	24.301
$7\text{Cr}+3\text{C}(\text{石墨}) \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3$	-203.372		

由表 2 可知, 在钎焊温度为 950 $^{\circ}\text{C}$ 时, Ni_3C 的 $\Delta G^0 > 0$, 所以在钎焊过程中不可能生成。 Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 都可能生成, 金刚石也有可能向石墨转化。但明显可以看出, 金刚石转化成石墨的 ΔG^0 远小于碳化物的 ΔG^0 , 这说明 Cr 与金刚石或者石墨的反应具有很强的趋势。但 $\Delta G^0 < 0$ 是反应能够进行的必要条件, 并不是充分条件。 ΔG^0 是一个状态函数, 只与反应的始末状态有关, 与反应过程无关。但在实际反应过程中会遇到各种阻力, 所以不能单纯从 ΔG^0 来判断反应的生成物, 还需要对其进行动力学分析。

从前面对界面微观结构分析可知, 液相钎料中 Cr 向金刚石界面扩散生成碳的化合物, 在钎焊温度下, 当熔融的液态钎料与金刚石开始接触时, 金刚石表面存在许多晶体缺陷, 如位错露头处、生长台阶等, 其 C 首先向钎料中溶解, 并与钎料中的 Cr 生成碳化物。由于靠近金刚石处 C 含量较高, 优先形核 Cr_3C_2 , 而后 Cr_3C_2 以金刚石为晶界开始生长。液态钎料中的 Cr 开始向界面迁移, 随着反应的进行, Cr 和 C 化学势的降低, Cr 和 C 继续扩散。Cr 和 C 的溶解过程可以看成是扩散控制条件下相界面的移动问题。由 Cr-C 相图可知, 反应组成由浓度低的相向高的相依次形成, 且沿着热力学稳定最大的方向。因此, 金刚石和钎料界面依次形成 Cr_3C_2 , Cr_7C_3 和 Cr_{23}C_6 。

在 Ni-Cr 合金钎焊金刚石的试验中, 在钎料层

检测到 $w(\text{Cr})85.5\%$ ，首先生成 Cr_3C_2 ，随着液相 Cr 的增多， Cr_3C_2 继续长大在远离金刚石与钎料界面方向形核 Cr_7C_3 。随着反应的进行，Cr 和 C 的化学势降低，可能也会生成 Cr_{23}C_6 。在 C 向 Cr 溶解的同时，Cr 也向界面扩散。由于表面原子的扩散激活能比内部原子扩散激活能低，同时，表面缺陷分布也不均匀，在金刚石晶格畸变处，原子的化学能最高，又由于晶面内原子排列不规则，原子在该处的扩散激活能更低，原子的扩散速度更快。因此， Cr_3C_2 首先会在金刚石表面位错露头处、生长台阶等缺陷处析出，随着时间的延长， Cr_3C_2 会继续与 C 反应生成 Cr_7C_3 新相，其整个过程由扩散和相变组成。由此，金刚石与钎料的界面形成了金刚石 \(\text{Cr}_3\text{C}_2\)/ Cr_7C_3 钎料的梯度材料，实现了 Ni-Cr 合金与金刚石的冶金结合。

3 钎焊工具性能

由于钎焊金刚石工具中的金刚石与钎料合金之间既有机械结合又有化学冶金结合，而较之电镀金刚石工具中的金刚石与镀层金属之间单纯的机械结合，具有更加优异的使用性能。为此，国内外研究者就钎焊金刚石工具与电镀金刚石工具的使用性能做了较多对比研究。如 A Trenker 制备的钎焊磨轮磨削石材发现：钎焊单层金刚石工具的材料去除率是电镀单层金刚石工具的 3.5 倍，而前者的使用寿命至少是后者的 3 倍。靳晓丽等人研制的钎焊金刚石套料钻在钻削新型“三明治”复合板层“凯福拉-特种陶瓷-铝合金”通孔时发现：电镀金刚石套料钻仅钻削 1/2 个孔，金刚石磨粒就完全脱落。而钎焊金刚石套料钻可以连续钻削 10 个孔，切削部位无明显变化，加工效率高且孔表面光滑平整^[37]；此外，在钻削工程陶瓷时也发现：高温钎焊金刚石套料钻在加工了 200 个孔以后工具表面金刚石尚无脱落，而国产电镀金刚石套料钻加工了 5 个孔、日本产电镀金刚石套料钻加工了 3 个孔后金刚石磨粒都出现了严重的脱落^[38]。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。张凤

林等人制备的钎焊单层金刚石套料钻钻削玻璃时，发现钎焊金刚石取孔钻加工单个孔的时间远短于电镀取孔钻，说明钎焊取孔钻的锋利度大于电镀取孔钻的。电镀取孔钻加工 50 个孔后就失效了，而钎焊取孔钻可以加工 150 个孔，钎焊工具的使用寿命是电镀工具的 3 倍。

4 结语

与单层电镀工具相比，钎焊单层金刚石工具由于金刚石出刃高，容屑空间大，金刚石与基体之间的结合强度高而具有明显优势，但上述研究大多是在实验室条件下进行的，若要实现大批量工业化生产乃至在加工中推广应用，不论从钎焊工艺还是从钎焊机理方面仍存在问题需要进一步研究。比如，在钎焊工艺方面尽快研究出适合钎焊金刚石用的低熔点合金钎料，开发一套实用的金刚石有序排布技术等。而在钎焊机理方面，则需要采用各种先进的研究手段（如透射电镜、电子探针、拉曼光谱、俄歇能谱等）综合研究金刚石与钎料之间界面的微观结构、微区成分、相结构等，从而为改进钎料成分、钎焊工艺，提高金刚石工具的使用性能提供有力的科学依据。

参考文献：

- [1] 袁公显. 人造金刚石合成与工具制造[M]. 湖南 长沙：中南工业大学出版社，1992.
- [2] 周玉梅，吕 智，章兼植. 钎焊技术在金刚石工具中的应用[J]. 工具技术，2004，38(3)：9-11.
- [3] 章兼植. 粘结剂（或钎料）中活性元素的选择[J]. 超硬材料工程，2005，17(2)：10-13.
- [4] Lower J T, Tausch E M. Diamond abrasive tool[P]. U S, 4018576, 1977-04-19.
- [5] Chattopadhyay A K, Chollet L and Hintermann H E. Induction brazing of diamond with Ni-Cr hardfacing alloy under argon atmosphere[J]. Surface and Coating Technology, 1990, 45: 293-298.
- [6] Xiao B, Xu H J and Fu Y C. Form and distribution characterization of reaction products at the brazing interface between Ni-Cr alloy and diamond[J]. Key Engineering Materials, 2003, 259-260: 151-153.
- [7] 张义平. 金刚石磨粒激光钎焊的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2006，37(5)：36-39.
- [8] 肖 冰，徐鸿钧，武志斌. Ni-Cr 合金真空单层钎焊金刚石砂轮[J]. 焊接学报，2001，22(2)：23-26.
- [9] Sung C M. Brazed diamond grid: a revolutionary design for diamond

- saws[J]. *Diamond and Related Materials*, 1999, 8: 1 540-1 543.
- [10] 黄 辉, 朱火明, 徐西鹏. Ni-Cr 合金钎焊单层金刚石磨料的试验研究[J]. *超硬材料与宝石*, 2002, 14(2): 6-8.
- [11] Trenker A, Seidemann H. High-vacuum brazing of diamond tools[J]. *Industrial Diamond Review*, 2002, 62: 49-51.
- [12] 刘 琦, 郭志猛, 叶宏煜. Ni-Cr 合金钎焊金刚石磨粒的试验研究[J]. *超硬材料工程*, 2005, 17(6): 1-6.
- [13] Huang S F, Tsai H L and 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: 251-258.
- [14] 徐振超. 高温钎焊法制造单层金刚石工具[D]. 广东 广州: 广东工业大学, 2005.
- [15] 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.
- [16] 马楚凡, 王忠义. 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, 33(2): 34-35.
- [17] 吴文军, 罗伯诚, 陈静科. Ni-Fe 二元系合金钎焊金刚石的研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2006, 43(3): 25-29.
- [18] 孟卫如, 徐可为, 杨吉军. 金刚石工具真空钎焊钎料的适应性[J]. *焊接学报*, 2004, 25(1): 80-82.
- [19] Khalid F A, Klotz U E. On the interfacial nanostructure of brazed diamond grits[J]. *Scripta Materials*, 2004, 50: 1 139-1 143.
- [20] Klotz U Z, Khalid F A and Elsener H R. Nanocrystalline phases and epitaxial interface reactions during brazing of diamond grits with silver based incusil-ABA alloy[J]. *Diamond and Related Materials*, 2006, 15: 1 520-1 524.
- [21] Li W G, Liang C and Lin S T. 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: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2002, 33: 2 163-2 172.
- [22] Chen S M, Lin S T. Brazing diamond grits onto a steel substrate using copper alloys as the filler metals[J]. *Journal of Material Engineering Performance*, 1996, 5: 761-766.
- [23] 关砚聪, 陈玉全, 姚德明. Ag-Cu-Ti 钎料钎焊单晶金刚石磨粒的研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2005, 36(2): 23-25.
- [24] 卢金斌, 徐九华. Ag-Cu-Ti 钎料钎焊金刚石的界面微观组织分析[J]. *焊接学报*, 2007, 28(8): 29-32.
- [25] Lower J T. Method of making monolayer abrasive tools[P]. US, 5 492 771, 1996-02-20.
- [26] Yamazaki T, Suzumura A. Relationship between X-ray diffraction and unidirectional solidification at interface between diamond and brazing filler metal[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35: 6 155-6 160.
- [27] 武志斌, 徐鸿钧, 肖 冰. 钎焊单层金刚石砂轮的实验研究[J]. *中国机械工程*, 2001, 12(12): 1 423-1 424.
- [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, 38(3): 22-25.
- [29] 卢金斌, 徐九华. 真空钎焊金刚石界面碳化物的形貌[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(7): 1 142-1 148.
- [30] 姜荣超. 金刚石均匀分布并有序排列是改善金刚石工具性能的有效途径[J]. *石材*, 2006, 24(10): 28-37.
- [31] 陈宝杰, 卜长根. 有序排布和烧焊一体化制造金刚石工具新技术研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2004, 35(2): 52-54.
- [32] China Grinding Wheel Corporation. Brazed beads with a diamond grit for wire sawing[J]. *Industrial Diamond Review*, 1998(4): 134-136.
- [33] Tohge N. Precise grinding with single-layered metal bonded diamond wheel[C]. *Intertech 2003, proceeding CD paper*.
- [34] 布克哈德 G. 用有序排列的金刚石或立方氮化硼磨料作切削加工[J]. 芮钟英, 译. *超硬材料工程*, 2006, 18(3): 50-55.
- [35] 周玉梅, 张凤林, 王成勇. Cr 粉改善 Ag-Cu-Zn 合金钎焊金刚石性能及其界面微观结构[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(3): 354-357.
- [36] 卢金斌, 徐九华, 徐鸿钧. Ni-Cr 合金真空钎焊金刚石界面反应的热力学与动力学分析[J]. *焊接学报*, 2004, 25(1): 21-25.
- [37] 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, 36(4): 18-19.
- [38] 靳晓丽, 袁军堂, 肖 冰. 工程陶瓷材料孔加工技术的试验[J]. *工具技术*, 2004, 38(5): 22-24.

作者简介: 周玉梅 (1977—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为超硬材料工具制造及农业机械设备研究。