

AgCuTi 合金钎焊单层立方氮化硼砂轮

肖 冰，徐鸿钧，武志斌，傅玉灿

(南京航空航天大学 机电学院，南京 210016)

摘要：为研制我国新一代单层钎焊 CBN(立方氮化硼)磨料砂轮，尝试 Ni—Cr 和 Ag—Cu—Ti 两种活性钎料，在真空炉中钎焊。试验结果表明，Ni—Cr 合金钎料对 CBN 磨料不浸润，钎焊后 CBN 磨料全部脱落；而 Ag—Cu—Ti 合金钎料对 CBN 则表现出良好的浸润性并将 CBN 牢牢钎焊住。借助扫描电镜、X 射线能谱和 X 射线衍射对界面微区组织的分析研究表明，钎焊过程中 Ag—Cu—Ti 合金钎料中的 Ti 向 CBN 磨料界面富集，并与 CBN 磨料表面的 N 和 B 元素反应生成 TiN 和 TiB，这是实现 Ag—Cu—Ti 合金钎料与 CBN 磨料高结合强度的关键因素。断口形貌的分析研究表明，CBN 与 Ag—Cu—Ti 合金钎料间的断口发生在 Ag—Cu—Ti 合金钎料层，说明 CBN 磨料与 Ag—Cu—Ti 合金钎料的结合强度已超过了 Ag—Cu—Ti 合金钎料本身强度。最后将研制出的单层钎焊 CBN 磨料砂轮与传统电镀 CBN 砂轮进行了重负荷磨削对比试验，钎焊砂轮表现出明显的优势。

关键词：砂轮；单层；钎焊；立方氮化硼；化学结合

中图分类号：TG74 文献标识码：A 文章编号：0253—360X(2002)02—29—04



肖 冰

0 序 言

单层钎焊超硬磨料砂轮因其钎焊时在超硬磨料、钎料与母材界面上发生的诸如溶解、扩散、化合之类的相互作用从根本上改善了磨料、结合剂(钎料合金)、基体三者间的结合强度，与传统的单层电镀超硬磨料砂轮相比具有明显的优势。(1)结合强度高，钎料结合层厚度只需维持在磨料高度的 20%~30% 的水平上就足以在重负荷的高效磨削中牢固地把持住磨粒，这是其它砂轮难于与之相比的；(2)磨料出露高，通常可达磨料高度的 70%~80%，砂轮因此变得更加锋利，磨削力、比能、磨削热、温度均有明显下降；(3)砂轮表面容屑空间亦因磨料出露高而变得更加充裕，更不容易发生因切屑堵塞而导致的砂轮失效；(4)磨料本身有效利用率高，砂轮寿命长；(5)钎焊单层超硬磨料砂轮其结构强度之高是其它任何砂轮都无法企及的，它将是有条件可以成为今后在 300~500 m/s 以上直至 1 000 m/s 的超高速磨削中唯一可以安全使用的高效砂轮；(6)用钎焊替代电镀制作单层超硬磨料砂轮还具有重要的环保意义，因为它可以彻底甩掉电镀这一重度污染包袱，符合当今关于绿色清洁制造的要求；等等。正因此，钎焊超硬磨料砂轮被广泛看好，是电镀砂轮当然的最佳换代产品，且被业内专家权威高度评价为

是砂轮行业特别是超硬磨料砂轮制造业的一项具有一定意义的创造发明，今后在生产中大面积推广应用后将会产生不可估量的技术经济效果。

作者采用 Ni—Cr 合金钎料，成功地研制出单层钎焊金刚石砂轮^[1]，但由于 CBN(立方氮化硼)的钎焊性比金刚石更差，目前国内单层钎焊 CBN 磨料砂轮的设计、制造与使用仍然是一个空白。国外有关钎焊 CBN 的试验研究始于 20 世纪 90 年代初，现有的 CBN 钎焊工艺通常是^[2]：首先用化学气相沉积法在 CBN 磨料表面上沉积一层 TiC 膜，沉积温度 1 000 °C，沉积时间 90 min，然后采用 Ni—P 合金在 1 040 °C 下进行真空感应钎焊，取得成功。但因该工艺成本较高，至今仍未能工业化生产。本文尝试 Ni—Cr 和 Ag—Cu—Ti 两种活性钎料，分别在真空炉中直接钎焊 CBN 磨料，期望探索出钎焊 CBN 磨料的新工艺，加快单层钎焊 CBN 磨料砂轮的实用化研究进程。

1 Ni—Cr 合金钎焊 CBN 磨料

1.1 试验条件与方法

金属基体为 45 号钢；钎料为 Ni—Cr 合金粉末，其主要成分(质量分数，%)为 72 Ni, 10 Cr, 3.5 Si, 2 B, 2 Fe，熔化温度 1 000 °C；CBN 磨粒 70~80 目；真空炉中钎焊；真空气度 < 0.01 Pa；钎焊温度 1 050 °C，保温时间 4 min，自然冷却。

1.2 试验结果与分析

图 1 是钎焊后 CBN 磨料与 Ni—Cr 合金的结合形貌, 很明显界面无浸润。将钎焊温度升高到 1 100 ℃ 并将保温时间延长到 10 min, 界面的浸润性亦无任何改变。改变 Ni—Cr 合金钎料的成分含量, 将 Cr 的含量提高到 25%, 并在 1 100 ℃ 钎焊温度下保温 10 min, 界面的浸润性亦无得到改善。用钎焊后的试样在硬质合金上做刻划试验, 刚一开始 CBN 磨料便全部脱落, 图 2 是脱落坑的表面形貌, 看不出有化学冶金结合的特征。

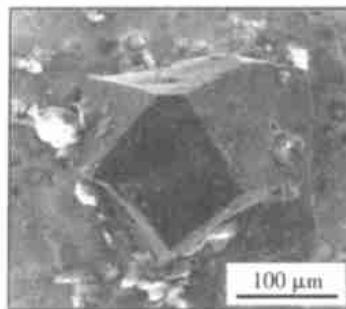


图 1 Ni—Cr 合金与 CBN 结合形貌(SEM)

Fig. 1 Appearance of CBN grit after brazing with Ni—Cr alloy

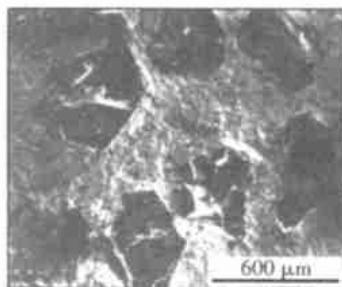


图 2 脱落坑的表面形貌(SEM)

Fig. 2 Micrograph showing the hole formed upon dislodgement of CBN grits from the matrix

这些皆说明, Ni—Cr 合金钎料虽能很好地浸润金刚石并能与金刚石磨粒在界面上形成化学冶金结合^[1], 但对 CBN 则表现出相反的情形, 既无浸润亦无界面反应, 不能用来钎焊 CBN 磨料。表 1 中的热力学数据表明^[3], Cr 的碳化物的生成热比金刚石高, 比金刚石有更高稳定性, 所以 Cr 能够与金刚石反应。但 Cr 的氮化物 CrN、Cr₂N 的生成热都比 BN 低, 即 BN 比 Cr 的氮化物有更高的稳定性。这就是 Ni—Cr 合金钎料不能浸润 CBN 并形成界面化学冶金结合的原因所在。但 Ti 的氮化物 TiN、硼化物 TiB 的生成热都高于 BN, 都比 BN 有更高的稳定性。可见含 Ti 合金钎料很可能用来直接钎焊无镀膜 CBN 磨料。因此尝试含 Ti 合金钎料钎焊 CBN 的试验研究十分必要。

表 1 热力学数据表

Table 1 Free energy of formation and heat of formation of different materials

	Free energy of formation kJ/mol	Heat of formation kJ/mol
Diamond	2 868	1. 897
BN	— 225. 179	— 251. 082
Cr ₃ C ₂	— 81. 643	— 80. 805
Cr ₇ C ₃	— 167. 053	— 162. 029
Cr ₂₃ C ₆	— 373. 88	— 365. 089
TiC	— 180. 870	— 184. 638
CrN	—	— 124. 767
Cr ₂ N	—	— 127. 697
TiN	— 307. 646	— 337. 875
TiB ₂	— 159. 814	— 160. 354
TiB	— 319. 872	— 324. 058

2 Ag—Cu—Ti 合金钎焊 CBN 磨料

2.1 试验条件与方法

钎料成分(质量分数, %)为 67 Ag, 20 Cu, 12 Ti; 布置在 45 号钢基体表面; CBN 磨粒分布在 Ag—Cu—Ti 合金钎料表面, 钎料熔点 900 ℃, CBN 开始热损伤的温度为 1 370 ℃, 钎焊温度选择 1 000 ℃, 真空炉中钎焊。

2.2 试验结果与分析

图 3 是钎焊后 CBN 磨粒与 Ag—Cu—Ti 合金结合状况的表面形貌, 与 Ni—Cr 合金不浸润 CBN 形成鲜明对比, Ag—Cu—Ti 合金对 CBN 磨粒表现出很好的浸润性并将 CBN 磨料牢牢钎焊住。

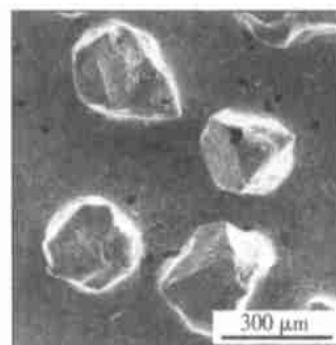


图 3 Ag—Cu—Ti 钎焊 CBN 后的表面形貌

Fig. 3 Wetting of CBN grits with Ag—Cu—Ti alloy

2.2.1 CBN 与 Ag—Cu—Ti 结合区元素的扩散与分布

借助能谱仪(EDS)对 CBN 与 Ag—Cu—Ti 合金结合区进行了定点成分能谱分析, 表 2(其中的 A、B、C、D 各点见图 4)为分析的结果。可以看出 Ti, Ag, Cu 元素都具有明显的浓度梯度, 其中靠近 CBN 处 Ti 元素有较高的浓度分布, 达到了 80. 69%, 远高于 Ag—Cu—Ti 合金钎料中 12% 的 Ti 含量。图 5

为界面处 B 点的成分能谱图。Ti 元素从合金中分离出并在 CBN 结合界面偏析形成富 Ti 层, 唯一的解释就是合金中的 Ti 与 CBN 表面的 N 或 B 反应生成了氮化物 TiN 或硼化物 TiB, 界面反应发生的结果使界面及邻近界面处的单质 Ti 浓度降低, 导致单质 Ti 由较远离界面的地方向界面运输。

表 2 能谱分析界面区定点成分(EDS)(质量分数, %)

Table 2 Composition of intermediate layer near interface

	Ag	Cu	Ti
A	1.84	0.56	0.15
B	11.55	7.75	80.69
C	43.90	10.87	45.24
D	70.25	21.15	8.24

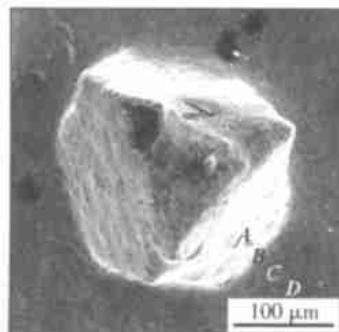


图 4 界面区定点成分能谱分析

Fig. 4 Analysis of elements at different points near interface(EDS)

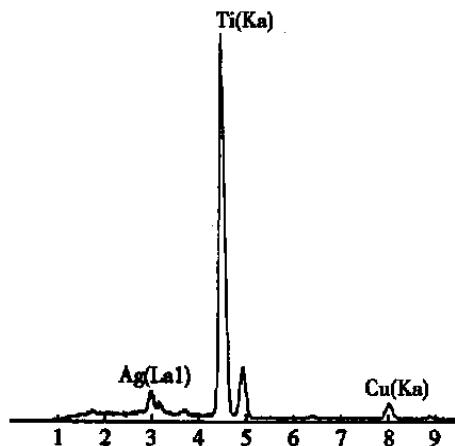


图 5 界面处 B 点成分能谱图

Fig. 5 Analysis of elements at point B of Fig. 4

2.2.2 界面生成物的结构分析

表 1 中的热力学数据表明, Ti 的氮化物 TiN 硼化物 TiB 的生成热都高于 BN, 都比 BN 有更高的稳定性。在钎焊过程中, 钎料中的 Ti 元素很可能与 CBN 中的 N、B 元素在界面相互扩散并反应生成 TiN 或 TiB。为查明是否有新的化合物生成, 钎焊

时将 CBN 磨料密排, 然后对钎焊后的表面层进行 X 射线衍射结构分析。图 6 是 X 射线衍射谱, 有 TiB 生成, 但没有测试出有 TiN 生成, 其原因很可能是生成的 TiN 所占比例非常小, 未测出明显的 TiN 峰。据此可以说明 Ag—Cu—Ti 合金与 CBN 磨料在界面上已形成了化学冶金结合。

Intensity(cps)

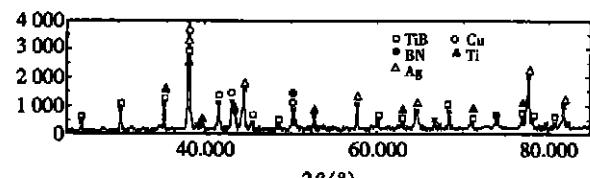


图 6 X 射线衍射图

Fig. 6 X-ray diffraction pattern

2.2.3 CBN 与 Ag—Cu—Ti 断口形貌分析

为确证 Ag—Cu—Ti 合金与 CBN 界面上的化学冶金结合是否有足够的强度, 断口的形貌分析十分有效。用 Ag—Cu—Ti 合金钎焊大颗粒 CBN, 钎焊后先用砂轮磨去 CBN 四周 Ag—Cu—Ti 合金, 再沿界面加剪切应力, 使试样分裂成两部分。观察 CBN 与 Ag—Cu—Ti 合金层之间断口处的扫描电镜照片。发现 CBN 一侧断口处表面上大部分区域已被 Ag—Cu—Ti 合金层金属覆盖, Ag—Cu—Ti 合金层一侧断口处则可以明显地看到存在塑性层状撕裂现象, 破坏主要发生在钎料层, 呈塑性断裂, 这可以说明 CBN 与 Ag—Cu—Ti 合金材料界面上已形成了化学冶金结合。

3 单层钎焊 CBN 砂轮研制及磨削试验研究

3.1 单层钎焊 CBN 砂轮的研制

作者认为, 在解决 CBN 磨料焊牢的问题后, 国内关于高温钎焊砂轮的研制开发应该有一个高的起点层面, 不宜就事论事只是考虑去设法解决目前国外在研制过程中发现的问题, 而是应该有自己的新构想——钎焊时磨料的择优排布及结合剂层厚度的一致性, 从而也就可以一步到位地研制开发出具有优化地貌的且可与静电植砂的高锋利度砂带相媲美的更为理想的单层钎焊超硬磨料砂轮。

研制开发的高温钎焊单层超硬磨料砂轮应达到如下技术性能指标: (1) 磨料出露高度达磨料本身高度的 70%~80% 以上; (2) 钎料结合层厚度均匀一致, 可稳定控制在 20%~30% 以下; (3) 确保磨料、钎料、基体三者的界面上有稳定且高强度的冶金化学结合, 可确保磨料与钎料结合剂层在磨削过程中

均具有不脱落的效果; (4) 确保超硬磨料在高温钎焊时不损伤; (5) 确保钎焊成的单层超硬磨料砂轮具有所要求的最佳地貌。

图 7 是按照上述技术性能指标以 Ag—Cu—Ti 为钎料研制出的单层钎焊 CBN 端面砂轮。

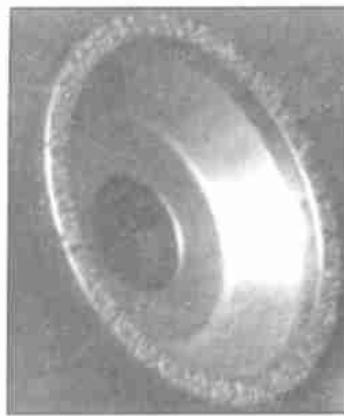


图 7 单层钎焊 CBN 端面砂轮

Fig. 7 Brazed single layer CBN wheel

3.2 钎焊与电镀 CBN 砂轮磨削性能对比试验

试验条件为: 工具磨床; 单层钎焊/电镀 CBN 端面砂轮 ($70 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$), CBN 粒度 35 号, 浓度 120%; 试件材料为硬质合金 YT15; 干磨削; 切入式顺磨; 分块试件夹丝半人工热电偶测量温度; 3033 X-Y 记录仪; 砂轮转速 3 800 r/min; 切深分别为 0.05 mm, 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm, 0.25 mm, 0.3 mm。

采用上述磨削试验条件, 在相同的砂轮圆周速度以及相同的工作台进给速度下, 改变切深大小, 夹丝热电偶测得磨削弧区的热电势信号, 通过温度标定曲线, 可由热电势值换算成温度值, 表 3 是单层电镀 CBN 砂轮与单层钎焊 CBN 砂轮磨削弧区的温度对比。由表 3 可见, 在相同磨削条件下, 单层钎焊 CBN 砂轮比电镀 CBN 砂轮磨削温度明显低, 特别是在大切深条件下, 其降温效果更加显著。

表 3 钎焊与电镀单层 CBN 砂轮磨削温度对比

Table 3 Grinding temperature contrast of single layer electroplated and brazed CBN grinding wheel

Grinding depth d/mm	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
Electroplated wheel $T_E/^\circ\text{C}$	80	120	170	250	320	510
Brazed wheel $T_B/^\circ\text{C}$	70	80	130	180	220	260

在切深 0.3 mm 磨削硬质合金 YT15 后, 观察单层钎焊和电镀 CBN 砂轮的表面形貌, 钎焊砂轮磨粒表面没有任何粘附和堵塞物, 无一颗 CBN 磨粒脱落, 属正常磨损; 而电镀砂轮磨粒表面有局部粘附和

堵塞物, 大部分 CBN 磨粒脱落, 特别是边缘上的 CBN 脱落更为严重。可见, 通过地貌的优化和磨料的相对有序合理排布, 高温钎焊时在超硬磨料、钎料与基体界面上形成的高强度化学冶金结合使得磨料的出露高度达其本身高度的 70%~80%, 来提高砂轮的锋利度以大幅度降低磨削比能和产生的磨削热, 同时也提高砂轮寿命和磨削效率, 确实行之有效。

4 结 论

(1) Ni—Cr 合金对金刚石表现出良好的湿润性, 并能将金刚石牢固地钎焊住, 但对 CBN 则表现出不湿润, 钎焊后 CBN 磨料全部脱落。其机理是, 在钎焊条件下 Ni—Cr 合金中的 Cr 能与金刚石表面的 C 反应, 却不能与 CBN 中的 N 或 B 反应。

(2) Ag—Cu—Ti 合金对 CBN 表现出良好的湿润性, 并能将 CBN 牢固地钎焊住。钎焊过程中 Ag—Cu—Ti 合金中的 Ti 向 CBN 磨料界面富集, 并与 CBN 磨料表面的 N 和 B 元素反应生成 TiN 和 TiB, 这是实现 Ag—Cu—Ti 合金钎料与 CBN 磨料高结合强度的关键因素。

(3) CBN 与 Ag—Cu—Ti 合金断口形貌分析表明, 断裂主要发生在钎料层, 呈塑性断裂, 这表明 CBN 与 Ag—Cu—Ti 合金材料界面上的结合强度已超过了 Ag—Cu—Ti 合金材料本身强度。

(4) 钎焊与电镀单层 CBN 砂轮磨削性能对比试验表明, 钎焊砂轮在降低磨削温度, 提高磨料结合强度, 延长砂轮使用寿命等方面比电镀砂轮具有明显的优势。

参考文献:

- [1] 肖冰, 徐鸿钧, 武志斌等. 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.
- [2] Hintermann H E, Chattopadhyay A K. On improved bonding of TiC-coated CBN grits in nickel-based matrix[J]. Annals of the CIRP, 1993, 42(1): 413~416.
- [3] Hintermann H E, Chattopadhyay A K. On surface modification of superabrasive grits by C of chromium[J]. Annals of the CIRP, 1992, 41(1): 381~385.

作者简介: 肖冰, 男, 1968 年出生, 工学博士。研究方向为高效精密磨削加工和超硬磨料工具的开发与研制。承担过 2 项国家自然科学基金的研究工作, 发表论文 20 余篇。

Email: Xbxiao@263.net