

聚晶金刚石复合片非脆性去除磨削机理研究

贾乾忠, 李 嫒, 张弘弢*, 董 海, 屈福政

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 聚晶金刚石 (polycrystalline diamond, PCD) 的磨削是 PCD 刀具制造中的关键环节, 磨削参数的变化影响 PCD 的去除方式, 进而决定刀具的切削性能. 通过扫描电镜观察分析腐蚀后的 PCD 磨削表面微观形貌, 研究了金刚石砂轮磨削 PCD 中的刻划作用、滑擦作用和热化学反应等非脆性去除机理, 及其与磨削参数的关系. 结果表明: 刻划作用仅在砂轮磨粒较锋利时产生作用, 多存在于湿磨初期; 砂轮磨钝后, 滑擦作用和热化学反应是 PCD 的主要去除方式, 且滑擦作用与热化学反应同时发生. 通过设计一组特殊磨削试验, 间接证明了磨削后的 PCD 表面存在由热化学反应产生的软化层.

关键词: 聚晶金刚石; 磨削; 金刚石砂轮; 刻划; 滑擦; 热化学反应

中图分类号: TG580.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201503008

0 引言

聚晶金刚石 (polycrystalline diamond, 简称 PCD), 是由少量金属粉末催化剂混合在金刚石微粉中, 在高温高压下烧结而成的一种超硬材料. 在烧结过程中金刚石颗粒之间会形成牢固的 C—C 键, 因此 PCD 具有接近单晶金刚石的硬度、耐磨性和较高的强度, 是一种理想的刀具材料^[1]. PCD 复合片包括 PCD 层和硬质合金层, 是直接 在韧性较好的硬质合金基体上烧结而成^[2]. PCD 复合片集金刚石的高硬度与硬质合金的良好韧性于一身. 然而, 因为 PCD 的高硬度和高耐磨性, PCD 刀具的加工变得非常困难. 目前, 主要有 4 种加工 PCD 刀具的方法, 包括电火花磨削加工、热铸铁盘加工、超声振动研磨和金刚石砂轮磨削^[3-5]. 其中, 金刚石砂轮磨削技术相对比较成熟, 工艺易于掌握, 已经广泛应用于 PCD 刀具的实际生产中. 但是金刚石砂轮磨削 PCD 的加工效率低, 导致 PCD 刀具的加工成本较高, 已经严重妨碍了 PCD 刀具的推广应用. 为了解决这一技术瓶颈问题, 研究 PCD 材料的去除机理成为迫在眉睫之事.

通过深入研究 PCD 不同磨削参数下的去除率 Q_w 和磨耗比 R_g , 德国学者 Kenter 提出了 4 种 PCD 磨削中磨粒去除的方式, 包括滚压、振动、滑

擦和刻划, 其中起主要作用的是滑擦和刻划. 认为可能存在修锐后金刚石砂轮磨粒压入 PCD 微小深度并形成切屑的状态; 也曾在 PCD 的刃口处发现了与磨削方向相同的少量划痕^[6-8]. 但其研究以提高 PCD 的磨削效率为导向, 侧重于比较磨削参数对 Q_w 和 R_g 的影响. 研究中 Kenter 没有给出化学去除存在的证据, 对 PCD 去除机理的研究并不充分. 张建华等对砂轮磨削 PCD 时的磨削区域温度进行了估算和测量, 认为 PCD 的去除机理分为 3 种: 磨粒机械磨耗磨削, 热化学磨削, 破碎磨削^[9]. 然而, 其没有对热化学磨削进行充分验证, 仅从 PCD 磨削表面的 SEM 照片一个方面来判断热化学反应的发生有失片面. 研究中的 PCD 复合片中存在直径达 50 μm 的金刚石晶粒, 与当今市场主流 PCD 复合片的晶粒直径相差较大.

在之前的研究中, 曾发现金刚石砂轮加工 PCD 干磨和湿磨的去除机理存在较大差异^[5]. 干磨时主要是热化学去除和机械热去除, 基本不发生疲劳脆性去除; 湿磨时则主要是疲劳脆性去除, 同时也存在局部热化学去除. 通过进一步探讨金刚石砂轮磨削 PCD 时的脆性去除机理, 提出 PCD 的脆性去除方式包括微细破碎、沿晶破碎和疲劳解理破碎^[10]. 然而, 对于 PCD 磨削中的刻划

作用、滑擦作用和热化学反应等非脆性去除方式缺少深入的研究. 本文试验中, 对不同磨削条件下的 PCD 样本进行腐蚀, 并对其磨削表面微观形貌进行观察分析, 探讨金刚石砂轮磨削 PCD 中的刻划作用、滑擦作用, 及其与热化学反应之间的关系.

1 试验条件

试验选用 Element Six 公司生产的 3 种 PCD 复合片, SYNDITE CTB002、CTB010、CTB025 (粒度分别是 2、10、25 μm), 其 PCD 层厚度均为 0.75 mm. 磨削试验在 PCD&PCBN 刀具专用磨床 FC-200D 上进行, 磨床工作台调定压力为 129 N. 选用 3 种杯型砂轮, 分别为用于粗磨的陶瓷结合剂砂轮 W40 和 W14, 型号为 6A2 150 \times 40 \times 15 \times 5 V100; 用于精磨的金属结合剂砂轮 W7, 型号为 6A2 150 \times 40 \times 15 \times 5 M100. 试验中, 固定参数如下: 砂轮修锐时间 20 s, 摆频 40 次/min, 摆幅 20 mm. 磨削试验参数如表 1 所示. 其中, 湿磨中的磨削液为含 1% TSM-1 水剂的水溶液. 磨削后的 PCD 用王水进行腐蚀, 然后用 JSM-6360LV 型扫描电镜观察分析试样的表面微观形貌.

表 1 磨削试验参数

Tab. 1 Parameters in the grinding experiments

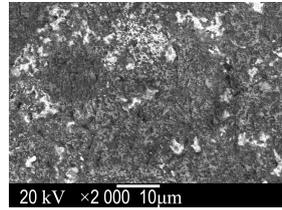
PCD 复合片型号	砂轮型号	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	磨削环境
CTB002,	W7,	700,	干磨,
CTB010,	W14,	1 200,	湿磨
CTB025,	W40,	1 947,	

2 试验结果及分析

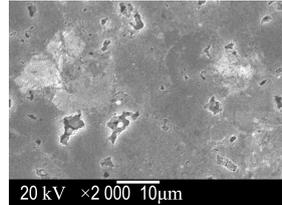
图 1 为磨削后的 PCD 表面微观形貌 SEM 照片. 其中图 1(a) 未腐蚀, 图中白色区域由原子序数较高的 Co 元素富集而成, 灰色区域为金刚石颗粒, 灰黑色剥落坑则是磨削过程中形成的. 图 1(b) 为用王水腐蚀 2 min 后得到的磨削表面形貌. 从图中可以看到, 腐蚀后的磨削表面更清晰, 黏结物和黏结剂 Co 被去除, 金刚石固架依然保持完整. 这是因为王水在常温下对金刚石几乎没有腐蚀作用, 而对黏结剂 Co 却有较强的腐蚀能力.

金刚石砂轮磨削加工 PCD 与传统磨削加工方式相差很大, 其实质是砂轮中的金刚石磨粒与 PCD 中的金刚石颗粒相互作用的过程. 磨削中, 砂轮既绕其轴线做旋转运动 v_c , 也做径向摆动

v_r ; PCD 复合片受切向力 F_t 、径向力 F_r 和法向力 F_n 的共同作用, 如图 2 所示. 相对于较平滑的 PCD 表面, 金刚石砂轮上既有比较尖锐的磨粒 (磨粒 1), 也有较为平滑的磨粒 (磨粒 2). 一般而言, 磨削前期, 砂轮经过修锐, 磨粒多处于磨粒 1 的尖锐状态; 随着磨削的进行, 磨粒逐渐磨损, 磨削后期很多磨粒会变得如同磨粒 2 般平滑, 这也导致 PCD 的磨削机理发生变化.



(a) CTB025, W40, 700 r/min, 湿磨



(b) CTB025, W7, 700 r/min, 干磨

图 1 PCD 磨削表面显微照片

Fig. 1 Micrographs of ground PCD surface

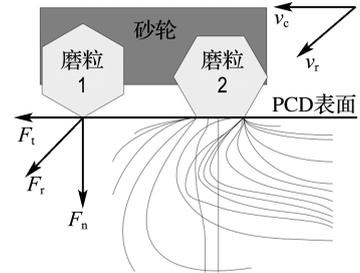


图 2 金刚石砂轮磨粒运动示意图

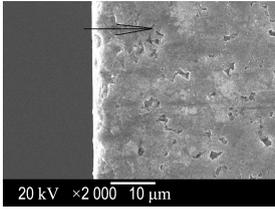
Fig. 2 Schematic of wear particles movement in diamond wheel

2.1 刻划作用

刻划作用是指金刚石砂轮中的磨粒压入 PCD 并形成划痕的过程.

图 3 与 4 是在试验中发现的 PCD 磨削表面上因刻划作用而形成的划痕 (箭头所指的方向为磨削方向). 其中, 图 3 较清晰, 且划痕位于 PCD 刃口附近. 图 3 中划痕是在湿磨状态下发现的, 且长度都很短, 这与 Kenter 的研究结果吻合^[8]. 图 4 为 PCD 刃口 50 μm 以下, 磨削表面上刻划作用留下的划痕. 其中, 图 4(b) 是图 4(a) 中椭圆区域的

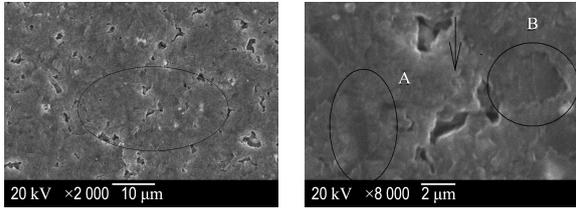
放大图, 可以发现, A 处划痕很短, 在局域放大的 SEM 照片上才较为明显. 除了轻微划痕, 图 4(b) 中 PCD 表面 B 处为微细破碎而生成的剥落坑, 说明磨削中多种去除方式共同发生. 与 Kenter 的发现不同的是, 图 3 与 4 上的划痕都是在 CTB010 型复合片上发现的, 未在 CTB025 试样上观察到刻划作用留下的划痕, 这与 CTB025 较高的硬度和耐磨性有关. 陈石林研究了 2~25 μm 粒度范围的 PCD, 发现 PCD 的硬度和耐磨性随其粒度的增大而提高^[11].



CTB010, W14, 1 947 r/min, 湿磨

图 3 PCD 刃口附近的划痕

Fig. 3 Scratch marks near the cutting edge of PCD



(a) 刃口 50 μm 以下划痕

(b) 局域放大图

CTB010, W40, 700 r/min, 湿磨

图 4 PCD 表面刻划作用留下的划痕

Fig. 4 Scratch marks on the PCD surface formed by scoring effect

理论上, 因为砂轮中金刚石磨粒和 PCD 中金刚石颗粒的任意取向性, 磨削过程中必然会存在砂轮中的金刚石磨粒硬度大于 PCD 中的金刚石颗粒硬度的状态, 刻划作用随之发生. 然而, 实际观察中, 在 PCD 的磨削表面很难看到因刻划作用留下的划痕. Kenter 只在 CTB002 型 PCD 的刃口处发现了少量较明显的划痕, 在刃口 50 μm 以下则没有发现任何划痕^[8]. 这种现象的出现有以下两个原因: 一是由于硬度接近, 金刚石磨粒不可能压入 PCD 过深, 形成不了较深的划痕; 二是因为 PCD 较硬, 砂轮上的磨粒磨损非常快, 很可能在与 PCD 接触后很短时间内就因磨损而变得平滑 (如图 2 中的磨粒 2), 结果就很难在 PCD 上留下划痕. 所以, 刻划作用仅能在磨削初期磨粒锋利时发

生, 当砂轮磨损以后将变得不太明显. 湿磨比干磨更有利于保持磨粒的锋利度, 这也是 Kenter 和本文试验中的划痕都是在湿磨条件下发现的原因.

2.2 滑擦作用与热化学反应

图 5 为滑擦作用示意图. 金刚石砂轮中的磨粒在磨钝后不足以产生刻划作用, 其在 PCD 表面产生的局部应力也不能使 PCD 产生微细破碎时, 磨粒在 PCD 上只能起到摩擦作用, 导致 PCD 磨耗式去除, 称为滑擦作用^[12].

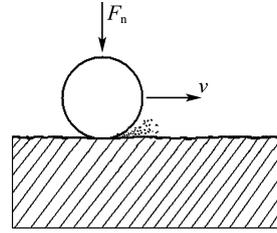
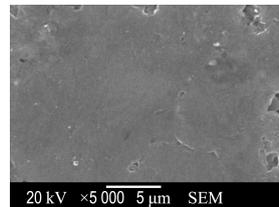


图 5 滑擦作用示意图

Fig. 5 Schematic of sliding effect

图 6 为滑擦作用形成的典型 PCD 磨削表面. 因为滑擦作用导致的 PCD 磨耗去除非常缓慢, 最终会形成非常光滑的 PCD 磨削表面. 图 1(b) 中的光滑表面, 也主要是由滑擦作用形成的. 因为金刚石砂轮中的磨粒磨损很快, 在磨削 PCD 的过程中, 滑擦作用是广泛存在的. 采用金刚石砂轮磨削 PCD 时, 在以下 3 种情况下滑擦作用都会发生: 金刚石磨粒已经磨钝; PCD 中的金刚石颗粒硬度超过金刚石砂轮中的磨粒硬度; 砂轮磨粒与 PCD 表面的接触应力不足以造成 PCD 的微细破碎.



CTB025, W40, 700 r/min, 干磨

图 6 滑擦作用形成的典型 PCD 磨削表面

Fig. 6 Typical ground surface of PCD formed by sliding effect

在 PCD 的磨削过程中, 肯定不是一种磨削去除机理发生作用, 往往是多种去除方式同时作用. 当砂轮被磨钝以后, 伴随滑擦作用必将产生大量的摩擦热, 使磨削区域的温度升高. 而 PCD 中的 Co 在磨削压力与高温作用下具有较高的化学活

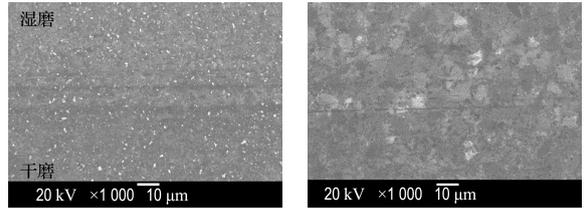
性,很可能会促使PCD在磨削过程中产生金刚石的氧化、石墨化、无定形碳化等热化学反应.王适等对3种PCD复合片热稳定性进行了研究,发现CTB002、CTB010、CTB025在空气中的热稳定性表征温度分别是650、690、720℃^[13].张建华等发现当金刚石磨削速度为15 m/s时,磨削区温度的变化范围是200~500℃,当磨削速度提高至30 m/s时,磨削区域的温度可高达900℃^[9].本文试验中的磨削速度介于5.5 m/s与15.3 m/s之间,然而,PCD的热化学反应不仅与温度有关,黏结剂Co的含量、PCD的质量、磨削应力以及磨床振动等都可能对热化学反应过程产生影响.这就使PCD砂轮磨削时的热化学反应过程变得非常复杂.

目前还没有公认的研究结果来解释金刚石砂轮磨削PCD时热化学反应的具体过程,文献中也缺少令人信服的证据.因此,本文对PCD复合片的磨削顺序进行设计,以期能发现热化学反应在PCD磨削表面产生的软化层.

2.3 PCD表面软化层

首先,用W7砂轮将试样CTB002和CTB010在1 200 r/min转速下干磨成镜面;其次,在1 947 r/min转速下,用修锐后的W14砂轮在各试样一半宽度处进行少于5 s的短时间湿磨;然后,用SEM观察PCD干湿磨分界线上线下的表面微观形貌.

图7显示了试样干磨与湿磨界面处微观形貌,其中下部为干磨后的镜面,上部为W14砂轮再次湿磨后的表面.从图中可以看到,不仅在CTB002和CTB010的干湿磨分界线处存在清晰的划痕,还可以在上部湿磨后的PCD表面上发现较长的划痕.在图7(b)中的上部可以清晰地看到,数条较粗的划痕穿过多个金刚石颗粒,该划痕显然是由同一颗磨粒因犁沟效应而生成.反观图3和4,因刻划作用形成的划痕长度很短、深度也很浅,与图7中发现的长划痕明显不同.在讨论刻划作用时,知道砂轮上的磨粒磨损非常快,正常情况下不会出现图7中的长划痕.由此可以断定,W7砂轮在1 200 r/min的转速下将CTB002和CTB010干磨成镜面时,PCD表面发生了热化学反应,并形成了软化层.因为软化层的硬度比金刚石砂轮中的磨粒硬度低,用修锐后的W14砂轮对PCD进行磨削时,磨粒压入软化层,在犁沟作用下形成了图7中的长划痕.



(a) CTB002

(b) CTB010

图7 干磨与湿磨界面处显微照片

Fig.7 Micrograph of the boundary between dry grinding and wet grinding

3 结 论

(1)研究了金刚石磨削PCD过程中的非脆性去除方式机理,包括刻划作用、滑擦作用和热化学反应.

(2)刻划作用仅在磨削初期砂轮磨粒较锋利的时候发挥作用,且多存在于湿磨PCD的刃口附近.

(3)当砂轮磨钝以后,刻划作用很难发生,而滑擦作用与热化学反应成为PCD的主要去除方式.

(4)通过设计特殊的磨削试验,间接证明了PCD磨削表面由热化学反应产生的软化层的存在.

参考文献:

- [1] 邓福铭,陈启武,卢学军,等. 金刚石-硬质合金系统超高压烧结过程的X射线衍射研究[J]. 粉末冶金技术, 2004, 22(4):205-209.
DENG Fu-ming, CHEN Qi-wu, LU Xue-jun, *et al.* X-ray diffraction study on HP/HT sintering process of diamond on the substrate of cobalt-tungsten carbide [J]. **Powder Metallurgy Technology**, 2004, 22(4):205-209. (in Chinese)
- [2] 于启勋,朱正芳. 刀具材料的历史、进展与展望[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12):62-66.
YU Qi-xun, ZHU Zheng-fang. History progress and prospect of cutting tool materials [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2003, 39(12): 62-66. (in Chinese)
- [3] DENG Jian-xin, ZHANG Hui, WU Ze, *et al.* Friction and wear behavior of polycrystalline diamond at temperatures up to 700℃ [J]. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, 2011, 29(5):631-638.
- [4] Sheu Dong-yea. Machining of PCD by micro EDM [J]. **Industrial Diamond Review**, 2006, 66(4):29-31.
- [5] 李 嫒,张弘毅,刘培德. 聚晶金刚石研磨机理研究[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(4):463-467.
LI Man, ZHANG Hong-tao, LIU Pei-de. Research

- on lapping mechanism of polycrystalline diamond [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2001, **41**(4):463-467. (in Chinese)
- [6] Kenter I M. Effect of process parameters when grinding PCD-1 [J]. **Industrial Diamond Review**, 1992, **52**(545):29-33.
- [7] Kenter I M. Effect of process parameters when grinding PCD-2 [J]. **Industrial Diamond Review**, 1992, **52**(549):75-80.
- [8] Kenter I M. Effect of process parameters when grinding PCD-3 [J]. **Industrial Diamond Review**, 1992, **52**(553):313-318.
- [9] 张建华,艾兴. 金刚石砂轮磨削加工聚晶金刚石的机理[J]. 山东工业大学学报, 1993, **23**(3):6-15.
ZHANG Jian-hua, AI Xing. Grinding mechanism of polycrystalline diamond with diamond wheel [J]. **Journal of Shandong Polytechnic University**, 1993, **23**(3):6-15. (in Chinese)
- [10] 李嫚,贾乾忠,张弘毅,等. 基于表面微观形貌的聚晶金刚石脆性去除机理研究[J]. 机械工程学报, 2014, **50**(13):202-206.
LI Man, JIA Qian-zhong, ZHANG Hong-tao, *et al.* Study on brittle removal mechanism of polycrystalline diamond based on surface micro-morphology [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2014, **50**(13):202-206. (in Chinese)
- [11] 陈石林. 聚晶金刚石复合体界面及复合机理的研究[D]. 长沙:中南大学, 2004.
CHEN Shi-lin. A study on interface and compounding mechanism of interfaces of polycrystalline diamond compacts [D]. Changsha: Central South University, 2004. (in Chinese)
- [12] 徐龙. PCD刀具磨削机理及刃磨工艺研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
XU Long. Study on the removal mechanism and grinding technique of the PCD cutting tools [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [13] 王适,张弘毅. 聚晶金刚石热稳定性的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(3):408-411.
WANG Shi, ZHANG Hong-tao. Study on thermal stability of polycrystalline diamond compacts [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2005, **37**(3):408-411. (in Chinese)

Study of non-brittle removal mechanism in grinding of polycrystalline diamond compact

JIA Qian-zhong, LI Man, ZHANG Hong-tao*, DONG Hai, QU Fu-zheng

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Grinding of polycrystalline diamond (PCD) is an important process in PCD cutter manufacturing. The grinding parameters can strongly influence the removal form of PCD, and determine the performance of the cutting tool. Non-brittle removal mechanism of PCD including scoring effect, sliding effect and thermochemical reaction, as well as their relations with grinding parameters, are investigated by examining the surface micro-morphology of pre-etched PCD specimens using scanning electron microscopy. The experimental results indicate that scoring effect, which is functional in the initial stage of wet grinding, happens only when the wear particles of diamond wheel are sharp. On the contrary, sliding effect and thermochemical reaction, which happen simultaneously, are the main removal mechanisms when wear particles of diamond wheel are blunt. At last, a special group of grinding experiments are carried out and the existence of a softened layer caused by thermochemical reaction on the ground surface of PCD is confirmed indirectly.

Key words: polycrystalline diamond (PCD); grinding; diamond wheel; scoring; sliding; thermochemical reaction