

多孔金属结合剂CBN砂轮的研制及其高效磨削加工 钛合金研究

杨 薇¹, 温学兵², 肖 红², 赵 彪³, 丁文锋³

(1. 海军装备部, 西安 710021;

2. 中国航发西安航空发动机有限公司, 西安 710021;

3. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 通过添加造孔剂碳酸氢钠颗粒至超硬磨料砂轮工作层, 制备兼具高锋利度、大容屑空间、长寿命的新型CBN砂轮, 旨在解决钛合金材料高效磨削过程中, 加工效率低、工件表面易烧伤、砂轮磨损严重等问题。通过开展钛合金干式磨削试验, 对比分析绿色碳化硅砂轮和新型多孔CBN砂轮在不同磨削用量条件下的材料去除率、磨削温度、砂轮及工件表面形貌。研究表明: 结合金属结合剂对CBN磨粒浸润效果和节块弯曲强度方面分析, 砂轮中石墨质量分数优化为10%。相同磨削用量条件下, 多孔CBN砂轮最高磨削温度为250℃, 是碳化硅砂轮的41.6%。此外, 多孔CBN砂轮的材料去除率和磨削比分别为碳化硅砂轮的4倍和2倍, 且表面粗糙度更低。因此, 采用新型多孔CBN砂轮磨削钛合金, 能够达到提升磨削加工效率, 改善磨削加工表面质量, 增大砂轮使用寿命的目的。

关键词: 钛合金; 多孔CBN砂轮; 磨削温度; 材料去除率; 表面粗糙度

Study on Design and Performance of Porous Metal-Bonded CBN Abrasive Wheels During Grinding of Ti-6Al-4V Titanium Alloy

YANG Wei¹, WEN Xuebing², XIAO Hong², ZHAO Biao³, DING Wenfeng³

(1. Naval Equipment Department, Xi'an 710021, China;

2. AECC Xi'an Aero Engine Co., Ltd., Xi'an 710021, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Porous metal-bonded cubic boron nitride (CBN) grinding wheels are fabricated by employing ammonium hydrogen carbonate (NH_4HCO_3) as pore-forming agents to avoid workpiece burn, improve ground surface quality and service life during grinding Ti-6Al-4V titanium alloys. The graphite particle concentrations are optimised with the flexural strength and interface morphology between the metallic matrix and grains. The grinding performance, including grinding temperature, material removal rate, grinding ratio, grains wear and ground surface quality of the porous CBN wheels and silicon-carbide abrasive wheels is evaluated during grinding Ti-6Al-4V titanium alloys without cooling lubricants. Results indicate that porous CBN wheels with 10% (mass fraction) graphite particles are optimized in terms of the wettability between the metallic matrix and abrasive grains as well as the flexural strength. In addition, porous CBN wheels exhibit high porosity and promising comprehensive grinding performance. In comparison with the silicon-carbide abrasive wheels, a lower grinding temperature (approximate 250°C) and better ground surface quality can be achieved by porous CBN wheels. Moreover, the material removal rate and grinding ratio of porous CBN wheels reach about 4 and 2 times than that of the silicon-carbide abrasive wheels under the same conditions.

Keywords: Ti-6Al-4V titanium alloy; Porous CBN wheel; Grinding temperature; Material removal rate; Surface roughness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.20.064

钛合金(Ti-6Al-4V)凭借自身比强度高、耐热性和耐腐蚀性好等优良性能,在航空航天领域得到越来越广泛的应用。然而因热导率和弹性模量低等特点,钛合金磨削过程中存在磨削效率低、工件表面易烧伤、砂轮磨损严重等问题,严重限制了钛合金材料去除效率和加工表面质量^[1-3]。

纵观国内外有关磨削钛合金的研究成果,普遍认为,增大磨粒锋利度、耐磨性和容屑空间,是减少磨削热,最终提升磨削加工效率和工件表面质量的有效途径。此外,由于从本质上降低了砂轮粘附磨损,砂轮使用寿命得到大幅提升^[4-6]。有鉴于此,一方面,通过选择合适的砂轮参数(如磨粒种类、结合剂类型、孔隙率),提升砂轮锋利度、耐磨性和容屑空间,能够有效提升磨削效率。另一方面,通过磨削用量(如磨削深度、进给速度和砂轮线速度)的优化,降低磨削热的产生,达到提升加工表面质量和砂轮寿命的目的^[7-13]。

本文将碳酸氢铵颗粒通过液相烧结工艺加入活性钎料中,研制以大容屑空间、高锋利度和长寿命为主要特征的多孔金属结合剂 CBN 砂轮,并开展钛合金高效磨削试验,对比分析绿色碳化硅砂轮和新型多孔 CBN 砂轮在不同磨削用量条件下的材料去除率、磨削温度、砂轮表面及工件表面形貌。研制成功新型多孔 CBN 砂轮以及获取优化的砂轮成分配比和磨削工艺参数。

1 多孔金属结合剂 CBN 砂轮的设计与制作

本文选用的钎料为含 10% Ti 的 Cu-Sn20 共晶钎料, CBN 磨粒选用 CBN-982 型,粒度为 80/100 目单晶 CBN 磨粒,选用石墨颗粒作为固体润滑剂,以防止烧结过程中节块坍塌,选择 40 目的碳酸氢铵颗粒作为造孔剂,如图 1 所示。凭借高温时液态合金中 Ti 活性元素分别与石墨和磨粒二者在结合界面处发生原子扩散并产生化学键合,提高结合剂对磨粒的把持强度,避免磨削过程中非正常脱落。与此同时,碳酸氢铵颗粒分解后形成的开孔结构有利于增大砂轮工作层的容屑空间。

图 2 显示的是砂轮磨料层的制作工艺流程,包括混料、冷压成型、成孔、烧结等工序。首先,将合金钎料、石墨颗粒、CBN 磨粒和碳酸氢铵颗粒按一定比例称量后均匀混合,连同芯棒装填模具中冷压成型,待节块脱膜后,置于恒温箱 150°C 环境中,保温 90min 去除碳酸氢铵颗粒,获取砂轮节块毛坯的多孔结构。随后,采用真空炉烧结工艺 880°C,保温 30min,最终制成新型多孔 CBN 砂轮。通过控制碳酸氢铵颗粒的含量,获得孔隙率为 20% 的多孔 CBN 砂轮。复合钎料研磨后过筛的目的是为了排除因团聚颗粒造成砂轮磨料层组织不均匀的可能性。

2 钛合金磨削加工试验

试验在 WAZA415X-NC 超精密成形平面磨床上进行,将电磨装置固定在磨床侧面,通过调整固定装置,实现电磨装置主轴平行于工作台如图 3 所示。电磨装置主轴跳动和砂轮的回转精度在磨削试验开始前需要不

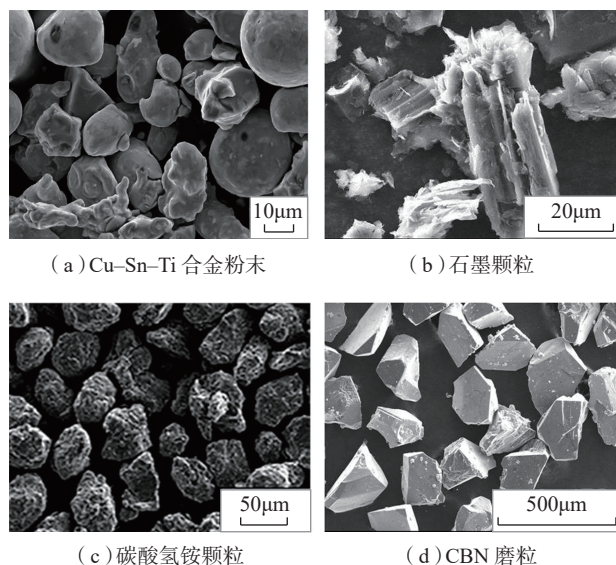


图1 制备新型多孔CBN砂轮的原材料

Fig.1 Starting materials for fabricating porous metal-bonded CBN wheels

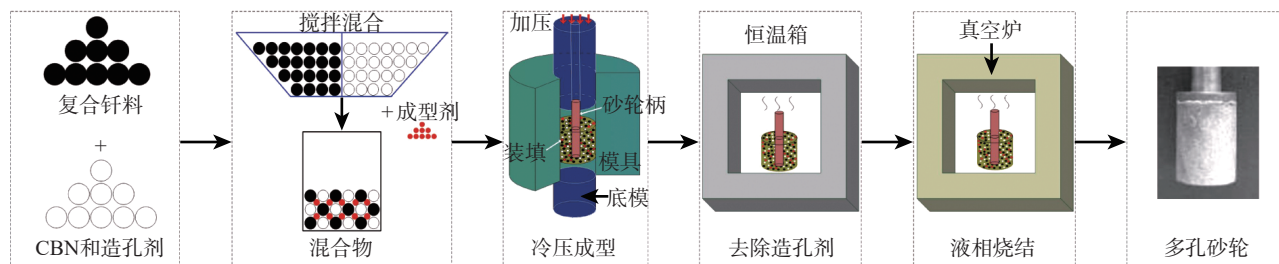


图2 新型多孔CBN砂轮制作工艺流程

Fig.2 Flowchart of the fabrication process for porous metal-bonded CBN wheels

断调整,以降低由于试验条件的不一致带来的误差。除此之外,磨削试验开始前,各砂轮均需进行整形和修锐,以满足高效磨削对加工条件一致性的要求。本文采用绿色碳化硅砂轮和新型多孔 CBN 砂轮对钛合金材料进行干式磨削试验,砂轮参数和磨削用量参数见表 1 和 2,图 4 为磨削温度测量装置。

3 试验结果与讨论

3.1 不同石墨含量下的节块微观结构和弯曲强度

为防止砂轮磨料层因混料不均匀导致的塌陷或收缩,不能很好地保持形状完整性,因此需添加一定量的高温固相粉末阻碍液相合金的过度流失偏析。石墨颗粒除了能起到骨架相作用,还能降低青铜基金属胎体的韧性和硬度以改善砂轮易修整性;石墨添加过多,强度、硬度损失严重,且阻碍钎料与 CBN 磨粒之间的化学反应,影响磨粒结合强度;石墨添加过少,则达不到改善韧性硬度的效果。因此,有必要从节块弯曲强度和微观结构出发,优化石墨颗粒含量。利用多孔 CBN 砂轮制作

工艺制备出 3 组石墨颗粒质量分数分别为 5%、10% 和 15% 的砂轮试样节块,对比分析各节块的弯曲强度(图 5)。由图 5 看出:节块弯曲强度与石墨颗粒含量成反比,且下降幅度较大。当石墨质量分数从 5% 增大到 15%,抗弯强度从 58MPa 急剧下降到 20MPa 左右。这是因为石墨颗粒具有层状结构,使得其滑移能力较好,并且石墨颗粒的加入也在一定程度上阻碍了合金钎料的流动,使得焊后节块断面存在微孔隙,而且随着石墨含量的增多,微孔隙数量增多,合金钎料与磨粒的结合界面间隙越来越大。因此,磨粒把持强度和节块弯曲强度大幅下降。图 6 为上述不同节块断面微观形貌。

由图 6 砂轮节块断面可以看出,金属结合剂的浸润效果较好,但磨粒逐渐从微破碎/大块破碎向未发生破碎转变,即破损形式由穿晶断裂变为沿晶断裂。这是因为过多的石墨颗粒导致基体内产生大量微孔隙,因此 CBN 磨粒与结合剂的界面结合强度变弱,磨粒把持强度大幅下降。综上所述,选择石墨质量分数为 10%,既能达到对金属结合剂的改性,又能获得较高的磨粒把

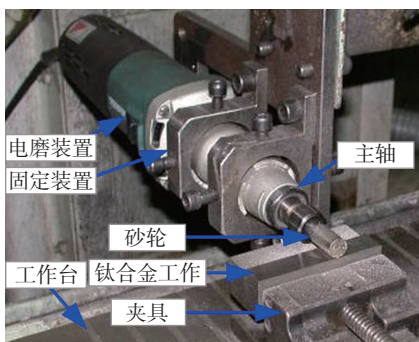


图3 多孔CBN砂轮磨削加工试验装置

Fig.3 Equipment of grinding test with porous CBN wheels

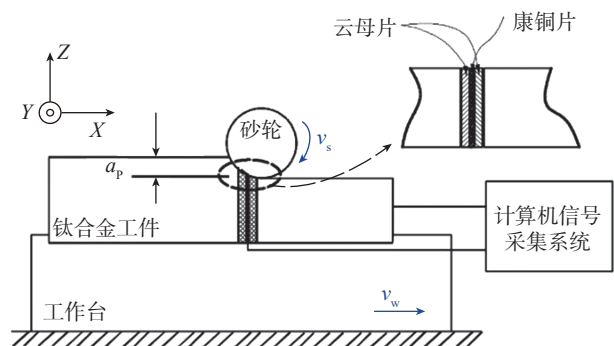


图4 测温装置示意图

Fig.4 Schematic diagram for measuring grinding temperature

表1 砂轮结构参数

Table 1 Structure parameters of grinding wheels

砂轮类别	磨料	磨料粒径	砂轮外径
多孔 CBN 砂轮	CBN	#80/100	20mm
绿色碳化硅砂轮	碳化硅	#80/100	20mm

表2 磨削用量参数

Table 2 Grinding parameters

项目	参数值
砂轮线速度 / (m·s ⁻¹)	4~18
进给速度 / (m·min ⁻¹)	2~10
磨削深度 /mm	0.005~0.025
单次磨削行程 /mm	50

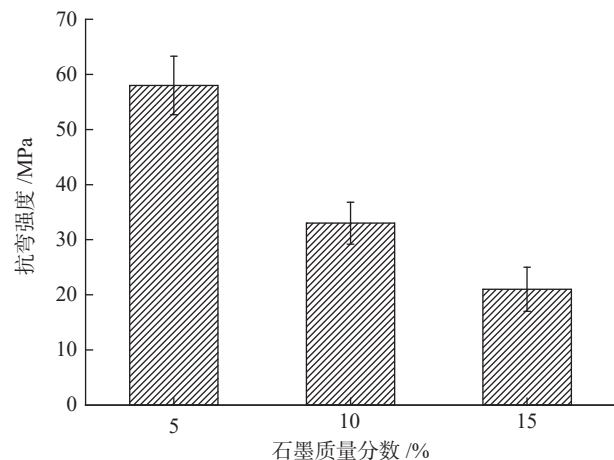


图5 抗弯强度与石墨含量的关系

Fig.5 Flexural strength as a function of graphite concentrations

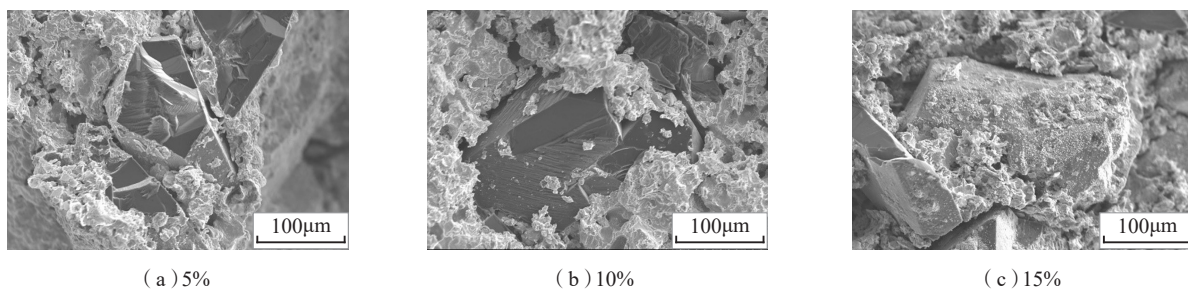


图6 不同石墨含量的多孔CBN砂轮节块断面微观形貌

Fig.6 SEM micrographs of the cross-sectional surface of as-sintered samples with different graphite concentrations

持强度。

3.2 磨削温度

图7为多孔CBN砂轮典型磨削温度信号,读取信号曲线的内包络线作为工件表面磨削温度。

图8为不同磨削深度下的磨削温度变化规律,砂轮线速度为16m/s,工作台进给速度为2m/min。发现两种砂轮的磨削温度均随磨削深度的增大而上升,而且当磨削深度超过0.02mm时,碳化硅砂轮磨削温度超过550°C,工件表面已出现烧伤。对于新型多孔CBN砂轮来说,最高的磨削温度仅为250°C左右,工件表面未出现烧伤。由此可见,通过优化磨削工艺参数,可以避免工件表面烧伤,保持较好的加工表面质量。使用新型多孔CBN砂轮时,能够有效降低磨削温度,减少磨削烧伤现象的发生。

3.3 材料去除率和磨削比

材料去除率 Q_w 作为评价砂轮磨削效率的重要因素,能够有效衡量砂轮磨削性能。本文,在相同的 $v_s=16\text{m/s}$, $v_w=2\text{m/min}$, $a_p=0.01\text{mm}$ 用量组合情况下,通过对比分析材料去除率,评价砂轮磨削性能。

图9为采用碳化硅砂轮和新型多孔CBN砂轮磨削钛合金材料时的材料去除率。多孔CBN砂轮的材料去

除率(约 $2.8\text{mm}^3/(\text{min}\cdot\text{mm})$)是碳化硅砂轮材料去除率的(约 $0.7\text{mm}^3/(\text{min}\cdot\text{mm})$)4倍,因此,采用新型多孔CBN砂轮能够有效提升材料去除率。

磨削比经常用于评价砂轮使用寿命。计算碳化硅砂轮和新型多孔CBN砂轮的磨削比。由图10可以看出,多孔CBN砂轮的磨削比数值约是碳化硅砂轮的两倍,

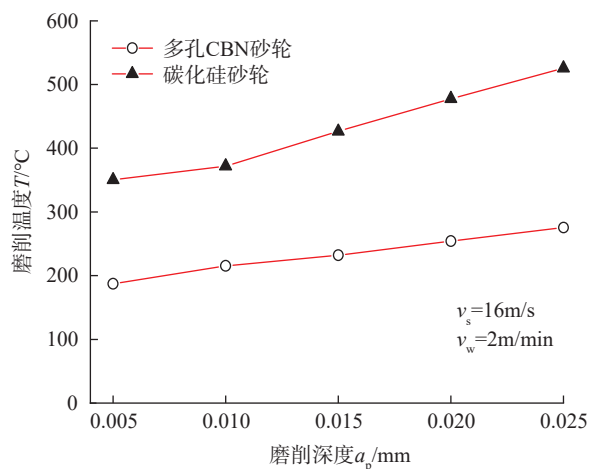


图8 磨削温度与磨削深度的关系

Fig.8 Grinding temperature as a function of cut depth

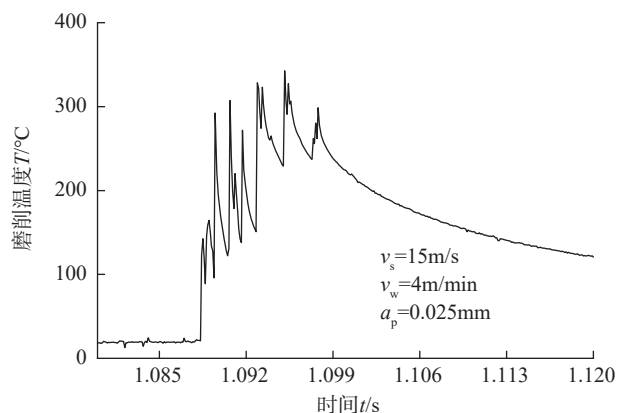


图7 多孔CBN砂轮典型磨削温度信号

Fig.7 Typical signal of grinding temperature with porous CBN wheels

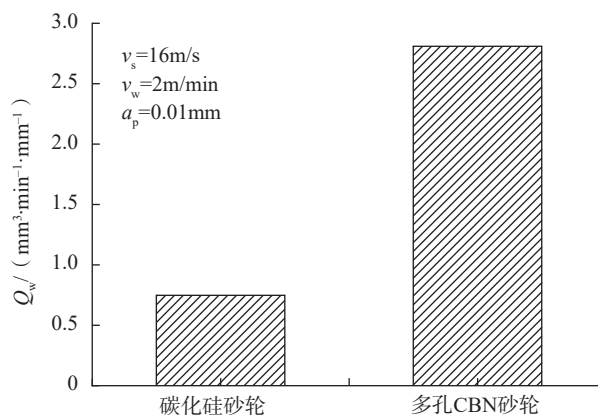


图9 不同砂轮的材料去除率

Fig.9 Material removal rate for different grinding wheels

磨削钛合金时具有更高的砂轮使用寿命。

3.4 砂轮磨损形貌

在相同磨削用量的 $v_s=16\text{m/s}$, $v_w=2\text{m/min}$, $a_p=0.01\text{mm}$ 条件下,磨削 800 个行程时,碳化硅砂轮和新型多孔 CBN 砂轮表面形貌如图 11 所示。可以清晰地发现(图 11 (a)),大量的黏附物涂覆在碳化硅砂轮表面,而且涂覆层表面磨削痕迹明显。这是因为碳化硅砂轮

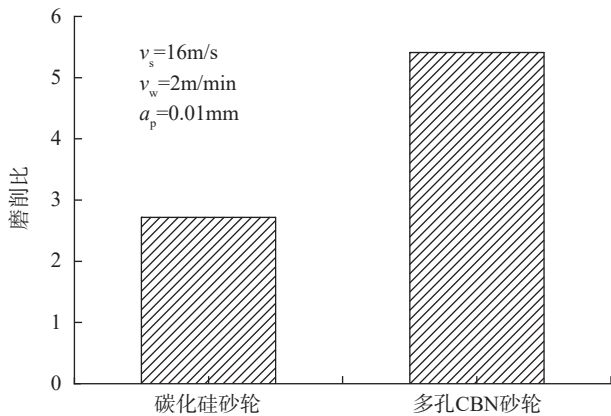
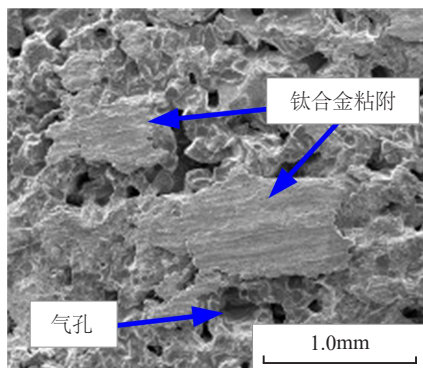
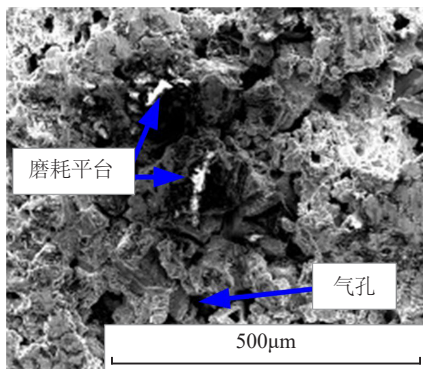


图10 不同砂轮磨削比

Fig.10 Grinding ratio for different grinding wheels



(a) 碳化硅砂轮



(b) 多孔 CBN 砂轮

图11 砂轮表面形貌

Fig.11 Morphologies of different grinding wheels

表面容屑空间小,钛合金磨屑较容易堵塞砂轮。由于钛合金涂覆不断加剧,使得磨削温度和磨削力进一步提升,从而加剧了钛合金材料软化,造成工件加工表面质量较差以及砂轮磨损严重等问题。由图 11 (b)可以看出,新型多孔 CBN 砂轮表面并未出现钛合金材料涂覆现象,磨屑容屑空间依然较大,CBN 磨粒不断发生磨损。该砂轮表面形貌充分展示了新型多孔 CBN 砂轮的优势,容屑空间大和高锋利度的特点,有利于提升材料去除效率、改善工件加工表面质量、延长砂轮使用寿命。

3.5 工件表面质量

为进一步研究磨削用量参数对工件表面粗糙度的影响,检测了不同磨削用量参数下的表面粗糙度数值(图 12)。发现,提升砂轮线速度有利于一定程度上改善工件加工表面质量,且采用新型多孔 CBN 砂轮显然能获得更低的表面粗糙度数值(图 12 (a))。相比于砂轮线速度,工作台进给速度和磨削深度严重影响工件表面粗糙度,随着进给速度和磨削深度的不断增大,工件表面粗糙度数值大幅上升,但采用新型多孔 CBN 砂轮能获得更好的表面加工质量,如图 12 (b)和 12 (c)所示。因此,选择较高的砂轮线速度、较低的工作台进给速度及磨削深度能够获取较低的加工表面粗糙度,而且采用新型多孔 CBN 砂轮有利于改善工件加工表面质量。

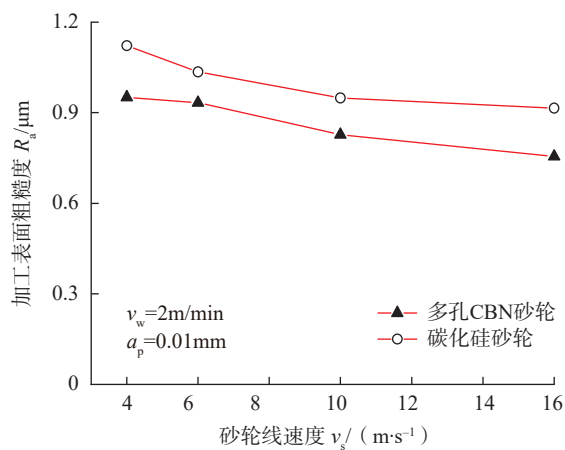
在相同磨削用量的 $v_s=16\text{m/s}$, $v_w=2\text{m/min}$, $a_p=0.01\text{mm}$ 条件下,磨削 800 个行程时,采用两种砂轮的工件表面形貌如图 13 所示。发现,采用碳化硅砂轮磨削的加工表面出现大量涂覆以及鱼鳞状叠摺,工件表面缺陷较多(图 13 (a))。这是由于碳化硅砂轮磨削钛合金的磨削温度较高,钛合金材料在高温下发生软化、熔融、涂覆,而且部分失去切削能力的磨粒在较大切向力作用下,发生断裂及脱落,嵌入工件表面。不同地,通过观察图 13 (b),发现多孔 CBN 砂轮磨削钛合金后加工表面较好,并未发现钛合金涂覆现象。

4 结论

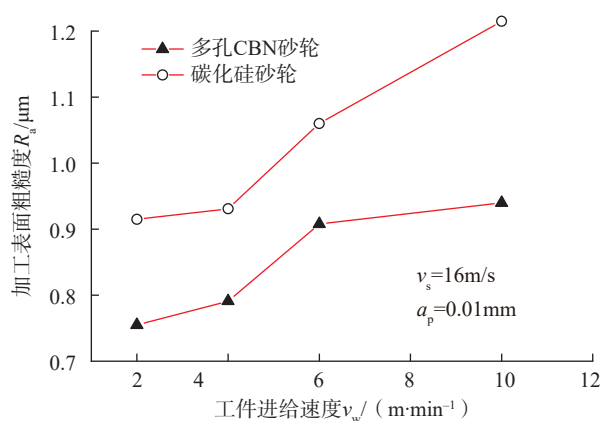
(1) 采用石墨颗粒作为骨架相和润滑相,结合液相烧结技术制备了新型多孔 CBN 砂轮,综合金属结合剂对 CBN 磨粒浸润效果和砂轮节块弯曲强度方面分析,砂轮中石墨质量分数优化为 10%。

(2) 相同磨削用量条件下,新型多孔 CBN 砂轮的磨削温度最大值不高于 250°C ,而碳化硅砂轮的磨削温度最高可达 600°C 。

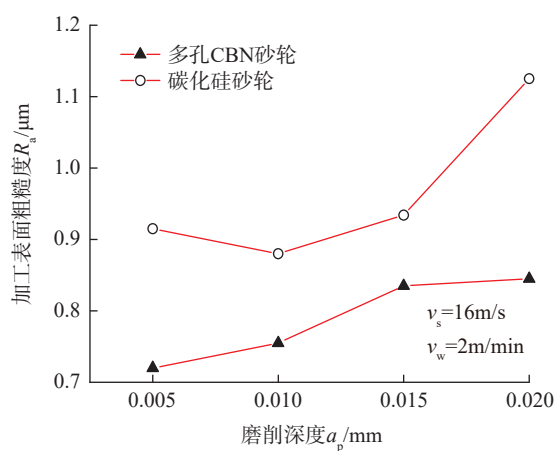
(3) 综合分析钛合金材料去除率和磨削比,发现新型多孔 CBN 砂轮的材料去除率和磨削比分别为碳化硅



(a) 砂轮线速度



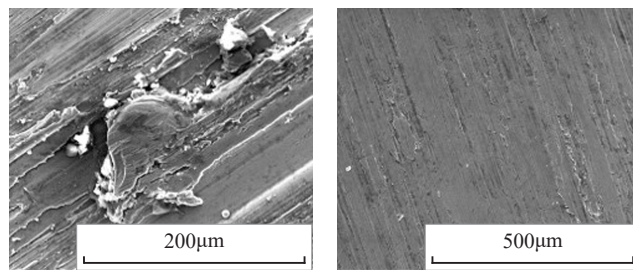
(b) 工件进给速度



(c) 磨削深度

图12 磨削用量与表面粗糙度的关系

Fig.12 Ground surface roughness under different grinding parameters



(a) 碳化硅砂轮

(b) 多孔 CBN 砂轮

图13 不同砂轮磨削后工件表面形貌

Fig.13 Ground surface morphologies with different grinding wheels

砂轮的4倍和2倍。因此,新型多孔CBN砂轮具有更好的磨削性能。

(4)较高的砂轮线速度、较低的工作台进给速度及磨削深度能够获取较低的加工表面粗糙度,而且采用新型多孔CBN砂轮有助于获取更低的加工表面粗糙度。

(5)相比于碳化硅砂轮,由于新型多孔CBN砂轮的容屑空间大、锋利度高、使用寿命长等特点,使得磨削过程中该砂轮不易发生堵塞现象,能够有效改善工件加工表面质量。

参考文献

- [1] 庄司克雄. 磨削加工技术[M]. 郭隐彪, 王振忠, 译. 北京机械工业出版社, 2007: 96-97.
- [2] SYOJI K. Grinding technology[M]. GUO Yinbiao, WANG Zhenzhong, trans.. Beijing: China Machine Press, 2007: 96-97.
- [3] JAIN R K, JAIN V K. Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2001, 41(12): 1689-1704.
- [4] HASUDA Y, HANDA A, KOBORI Y S, et al. Grinding of superalloys using metal-bonded CBN wheel[J]. Key Engineering Material, 2012, 523-524: 143-148.
- [5] LI Z, DING WF, MA C. Y, et al. Grinding temperature and wheel wear of porous metal-bonded cubic boron nitride super abrasive wheels in high-efficiency deep grinding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(11): 1961-1971.
- [6] EZUGWU O, WANG Z M. Titanium alloys and their machinability-a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262-274.
- [7] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B. Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48: 1585-1591.
- [8] WANG B, ZHANG Z Y, CHANG K K, et al. New deformation-induced nanostructure in silicon[J]. Nano Letters, 2018, 18(7): 4611-4617.
- [9] BRINKSMIEIER E, PREUSS W, RIEMER O, et al. Cutting forces, tool wear and surface finish in high speed diamond machining[J]. Precision Engineering, 2017, 49: 293-304.

(下转至第82页)

et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2775–2787.

[2] 曲家庆. 关于我国冷轧硅钢生产现状和需求预测[J]. 中国钢铁业, 2007(1): 20–22.

QU Jiaqing. China's current CR silicon steel production and demand forecast[J]. China Steel, 2007(1): 20–22.

[3] 荣光. 冷轧硅钢的生产工艺概述[J]. 本钢技术, 2008(3): 25–27, 31.

RONG Guang. Production introduction of cold rolled silicon steel[J]. Bengang Technology, 2008(3): 25–27, 31.

[4] 王安东, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机用高强度铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 航空制造技术, 2017, 60(20): 95–103.

WANG Andong, CHEN Yueliang, BIAN Guixue, et al. Research progress on corrosion fatigue of high strength aluminum alloy of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(20): 95–103.

[5] 秦振兴. 冷轧钢板表面质量在线监测系统研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2012.

QIN Zhenxing. Research of cold-rolled steel sheet surface quality on-line monitoring system[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2012.

[6] 李乐刚, 刘松平, 刘菲菲, 等. 大型复合材料构件超声快速检测[J]. 航空制造技术, 2009, 52(Z1): 101–103, 107.

LI Legang, LIU Songping, LIU Feifei, et al. Fast ultrasonic inspection of large composites component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(Z1): 101–103, 107.

[7] 丁智, 王立功. 带钢表面质量检测系统的研究现状及展望[C]// 第九届中国钢铁年会. 北京: 冶金工业出版社, 2013.

DING Zhi, WANG Ligong. Development and perspective of strip surface quality inspection system[C]// Proceedings of the Ninth China Iron and Steel Annual conference. Beijing: Metallurgical Industry Press Co., Ltd., 2013.

[8] 吴平川, 路同浚, 王炎. 钢板表面缺陷的无损检测技术与应用[J]. 无损检测, 2000, 22(7): 312–315.

WU Pingchuan, LU Tongjun, WANG Yan. Nondestructive testing technique for strip surface defects and its applications[J]. Nondestructive Testing, 2000, 22(7): 312–315.

[9] 张建川. 红钢棒材表面缺陷图像采集与检测系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.

ZHANG Jianchuan. Study on image acquisition and inspection system for red steel rod surface defects[D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[10] SONG K C, HU S P, YAN Y H, et al. Surface defect detection method using saliency linear scanning morphology for silicon steel strip under oil pollution interference[J]. ISIJ International, 2014, 54(11): 2598–2607.

[11] 展慧, 李小昱, 王为, 等. 虫眼板栗的图像识别方法研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(8): 121–124.

ZHAN Hui, LI Xiaoyu, WANG Wei, et al. Research on image recognition technology of worm hole chest nut[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(8): 121–124.

[12] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communications of the ACM, 1984, 27(3): 236–239.

[13] 张立亚, 孟庆勇, 杨坤. 基于维纳滤波的矿井监控图像的复原技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(1): 129–132.

ZHANG Liya, MENG Qingyong, YANG Kun. Recovery technology of mine monitoring image based on Wiener filtering[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(1): 129–132.

[14] 袁文成, 杨德兴, 陈超. 图像混合噪声的一种组合滤波消除方法[J]. 微处理机, 2007, 28(4): 78–80, 83.

YUAN Wencheng, YANG Dexing, CHEN Chao. A synthetic filtering method for restoration of images contaminated by mixed noise[J]. Microprocessors, 2007, 28(4): 78–80, 83.

通讯作者: 龚时华, 博士, 教授, 主要从事激光相关特种加工装备控制研究, E-mail: gongshihual@hust.edu.cn.

(责编 知舟)

(上接第69页)

[9] DAICW, DING W F, ZHU Y J, et al. Grinding temperature and power consumption in high speed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy with a vitrified CBN wheel[J]. Precision Engineering, 2018, 52: 192–200.

[10] MA C S, CHENG D, ZHU X H, et al. Investigation of a self-lubricating coating for diesel engine pistons, as produced by combined microarc oxidation and electrophoresis[J]. Wear, 2018, 394–395: 109–112.

[11] ZHANG Z Y, HUO F W, WU Y Q, et al. Grinding of silicon wafers using an ultrafine diamond wheel of a hybrid bond material[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51: 18–24.

[12] MATTHEW A, KYRIAKI K, SHREYES M. An investigation of graphite nano platelets as lubricant in grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(12–13): 966–970.

[13] SHAJI S, RADHAKRISHNAN V. Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(1): 51–59.

通讯作者: 丁文锋, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为超硬磨料工具技术、高速超高速磨削加工技术、难加工材料高效精密加工技术, E-mail: dingwf2000@vip.163.com.

(责编 大漠)