

引文格式: 李征, 刘斌, 丁文锋, 等. 颗粒增强钛基复合材料磨削试验与仿真研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(5): 63-67.

LI Zheng, LIU Bin, DING Wenfeng, et al. Experimental and simulation study of grinding particle-reinforced titanium matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(5): 63-67.

颗粒增强钛基复合材料磨削试验与仿真研究*

李 征^{1,2}, 刘 斌¹, 丁文锋², 田 帅¹, 王正鹤¹

(1. 郑州航空工业管理学院, 郑州 450046;

2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 采用单层钎焊 CBN 砂轮开展了颗粒增强钛基复合材料 (PTMCs) 磨削试验, 对比研究了在磨削 TC4 钛合金和 PTMCs 时, 磨削用量对磨削力与磨削温度的影响规律, 利用有限元仿真研究了 PTMCs 材料去除演变过程。结果表明, 磨削过程中 PTMCs 的磨削力较 TC4 增加了 15%~30%, 磨削温度提高了 7%~11%, PTMCs 比 TC4 钛合金更难加工; PTMCs 材料去除过程为 TC4 基体材料的延性去除和 TiC 增强颗粒的脆性去除, 脆性去除形成了磨削表面孔洞缺陷; 当磨削速度从 120 m/s 降到 20 m/s 时, 磨削表面孔洞缺陷深度由 0.8 μm 增至 3.5 μm, 增加了约 3.4 倍; 提高磨削速度可以降低增强颗粒脆性去除对 PTMCs 磨削表面孔洞缺陷的影响程度。

关键词: 颗粒增强钛基复合材料 (PTMCs); 磨削力; 磨削温度; 有限元仿真; 材料去除

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.05.063



李 征

讲师, 博士, 研究方向为难加工材料的高效精密磨削加工。

钛合金具有较高的比强度、比刚度和优异的高温特性, 在航空航天领

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775275); 河南省科技攻关项目(212102210057, 212102310093); 河南省高等学校重点科研项目(21A460025, 22A460029)。

域有着广泛的应用^[1-3]。为了提高其耐磨性和服役温度等性能, 研究人员将各种硬脆增强材料 (TiC 和 TiB) 加入钛合金来制备性能更加优异的颗粒增强钛基复合材料 (PTMCs)^[4-6]。PTMCs 的屈服强度可达到 1100 MPa, 而 TC4 钛合金的屈服强度仅为 700 MPa。尽管有些零部件可以使用近净成形技术加工, 但是后续相关精密加工工艺仍然不能被代替。由于 PTMCs 低导热率以及对含碳、氧和氮化合物的亲和力, 当车削和铣削 PTMCs 时, 经常会遇到不利于加工的情况, 例如严重的刀具磨损、较差的加工表面质量和较低的加工效率^[7]。

目前, 用砂轮磨削加工是提高难加工材料加工精度的一个重要方法^[8]。然而, 在钛合金磨削过程中, 由于其导热性差和功耗大, 砂轮与工件的接触区域极易产生高温, 这是加工质量与效率提升的主要制约因素。随着磨削温度的升高, 工件材料往往表现出更

大的延展性, 从而冷焊到砂轮磨粒上。因此, 工件材料更容易黏附在磨削表面从而降低表面质量, 同时砂轮磨损加剧, 工件更易发生烧伤^[9]。近年来, 单层超硬磨料砂轮 (即电镀和钎焊砂轮) 在难加工材料磨削中得到了广泛应用, 较高的磨粒出露有效提升了砂轮锋利度和容屑空间, 特别是钎焊砂轮的磨粒出露高度可以是电镀砂轮的两倍。钎焊砂轮较高的磨粒出露高度不但没有影响磨粒的连接强度, 反而使超硬磨料的优势更为突出, 增加了砂轮锋利度和降低了磨削温度^[10]。

另一方面, 与铝基复合材料相似, 在磨削 PTMCs 时, 会在加工表面出现硬脆材料去除形成的加工缺陷。已有研究人员针对 PTMCs 采用各种砂轮开展了一系列磨削试验, 对磨削表面质量和加工过程参量进行了研究^[11]。吴帮福等^[12]采用微晶刚玉砂轮进行了 PTMCs 磨削试验, 研究了超声磨削和普通磨削两种加

工方式对PTMCs磨削加工特性的影响,发现超声振动磨削可以有效增强砂轮自锐能力,从而提升砂轮磨削效果。在超声磨削加工方式下,PTMCs的磨削力和加工表面粗糙度都要优于普通磨削;同时,超声磨削还有抑制磨削烧伤的作用。但直到目前,还没有针对PTMCs材料去除机制的研究。鉴于此,有必要开展单层钎焊CBN砂轮磨削PTMCs的试验与仿真研究,为进一步提高PTMCs加工质量和效率提供理论和技术支持。

本文采用单层钎焊CBN砂轮开展了PTMCs磨削试验,对比研究了在磨削TC4钛合金和PTMCs时,磨削用量对磨削力和磨削温度的影响规律,对PTMCs的磨削难易程度进行了评价分析。利用有限元法研究了PTMCs材料去除演变过程,分析了磨削速度对PTMCs材料去除的影响。

1 试验条件及方法

试验所用PTMCs(微观结构见图1)是通过原位反应法生产的,增强颗粒为硬脆TiC材料,尺寸为1.2~10 μm,体积分数约为10%,基体为TC4钛合金,其力学性能如表1所示。将材料切割成尺寸为25 mm×20 mm×5 mm的试样,并在25 mm×5 mm表面上进行磨削试验。砂轮采用的是粒度80/100单层钎焊CBN砂轮,砂轮宽度为10 mm。

磨削试验在最大主轴功率为45 kW的平面磨床上进行,所有试验均选择逆磨,磨削参数见表2,磨削试验设备见图2。使用Kistler 9272压电测力计测量磨削力,磨削温度信号

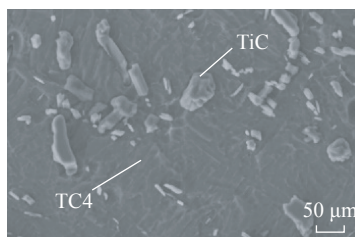


图1 PTMCs微观结构
Fig.1 Microstructure of PTMCs

通过半人工自然热电偶检测,磨削力和温度数据取5次重复试验平均值。

2 试验结果与分析

2.1 PTMCs磨削难易程度分析

TC4钛合金是一种典型难加工材料,与其他金属材料相比,磨削加工中其具有更高的磨削力与磨削温度,从而影响了加工质量。因此,为了评价PTMCs加工难易程度,对TC4钛合金和PTMCs磨削力和磨削温度差异进行了对比分析。图3为TC4钛合金和PTMCs磨削力的差异(其中 F_n 为法向力, F_t 为切向力)。从图3(a)可以看出,当磨削速度 v_s 从120 m/s下降到20 m/s时对于法向磨削力,TC4从15.0 N增加到55.3 N,PTMCs则从18.7 N增加到65.0 N,PTMCs的法向磨削力较TC4增加

表1 PTMCs力学性能

Table 1 Mechanical properties of PTMCs

参数	数值
拉伸强度/MPa	1102
屈服强度/MPa	972
弹性模量/GPa	133
泊松比	0.34

表2 磨削参数

Table 2 Grinding parameters

参数	数值
磨削速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	20, 40, 60, 80, 100, 120
工件进给速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$	1, 3, 5, 7, 9, 12
切深 $a_p/\mu m$	10, 20, 40, 60, 80, 100

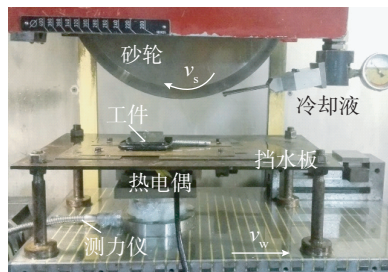
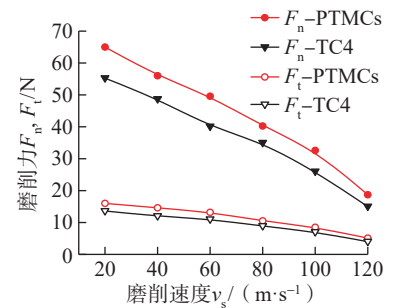


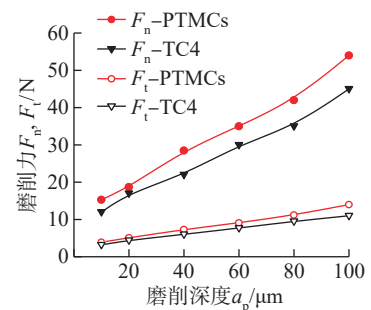
图2 磨削试验设备
Fig.2 Experimental setup of the grinding

了15%~25%;对于切向磨削力,TC4从4.0 N增加到13.6 N,PTMCs则从5.1 N增加到16.1 N,PTMCs的切向磨削力较TC4增加了18%~28%。从图3(b)、(c)中可以看出,PTMCs的法向磨削力分别比TC4增加了17%~30%和15%~28%,PTMCs的切向磨削力分别比TC4增加了18%~28%和15%~29%。从试验结果可以发现,无论磨削参数如何变化,PTMCs的磨削力总是高于TC4钛合金。

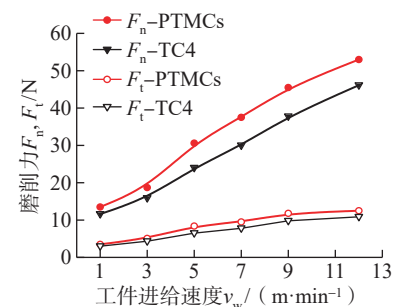
磨削温度直接影响零件的表面烧伤、裂纹与残余应力等。TC4钛合金和PTMCs磨削温度的差异如图4



(a) 磨削速度的影响
($a_p=20 \mu m, v_w=3 m/min$)



(b) 磨削深度的影响
($v_s=120 m/s, v_w=3 m/min$)



(c) 工件进给速度的影响
($v_s=120 m/s, a_p=20 \mu m$)

图3 磨削参数对磨削力的影响规律
Fig.3 Effects of grinding parameters on grinding force

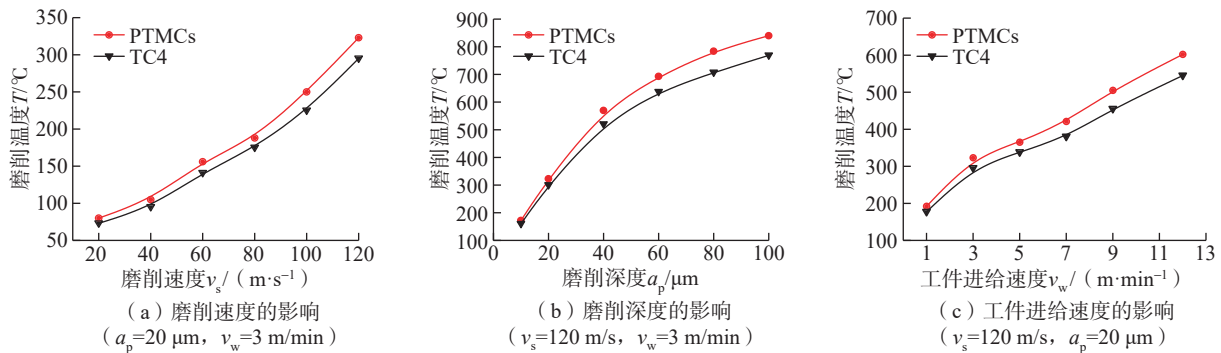


图4 磨削参数对磨削温度的影响规律

Fig.4 Effects of grinding parameters on grinding temperature

所示。从图4(a)中可以看出,当磨削速度 v_s 从 120 m/s 下降到 20 m/s, TC4 磨削温度从 295 $^\circ\text{C}$ 下降到 73 $^\circ\text{C}$, PTMCs 则从 323 $^\circ\text{C}$ 下降到 80 $^\circ\text{C}$, PTMCs 的磨削温度较 TC4 增加了 7%~11%。从图4(b)中可以看出,当磨削深度 a_p 从 100 μm 下降到 10 μm 时, PTMCs 的磨削温度较 TC4 增加了 8%~10%。从图4(c)中可以看出,当工件进给速度 v_w 从 12 m/min 下降到 1 m/min 时, PTMCs 的磨削温度较 TC4 增加了 8%~11%。同样,无论磨削参数如何变化, PTMCs 的磨削温度总是高于 TC4,但磨削温度的影响程度略小于磨削力。综上所述,通过分析 TC4 和 PTMCs 磨削力和温度的差异可知,由于具有较大的磨削力和较高磨削温度, PTMCs 比 TC4 钛合金更难加工。

2.2 PTMCs 材料去除演变过程

为了更好地理解 PTMCs 材料去除行为,本文采用 ABAQUS 商业软件建立了三维平面应变有限元模型以模拟 PTMCs 的材料去除过程,模型如图5所示。为了便于分析将增强颗粒简化为椭球体,椭球体的长轴半径为 4 μm ,短轴半径为 3 μm 。工件在 x 方向尺寸为 12 μm , y 方向尺寸为 7.5 μm , z 方向尺寸为 8 μm 。假定 CBN 磨粒为前角 -35° 的三棱锥。模型中的磨削深度为单颗磨粒切厚。有限元仿真中,将 TC4 基体材料和 TiC 增强颗粒结合界面简化为单元捆绑,基体材料单元与颗粒单元共用

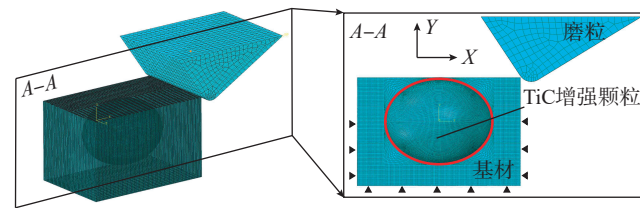


图5 三维平面应变有限元模型

Fig.5 3D plane strain finite element model

网格节点。TiC 增强颗粒和 TC4 基体材料分别采用理想弹性体和 JC 模型赋予材料属性,同时,分别采用脆性断裂和剪切失效模型作为材料失效准则。采用满足库仑定律的摩擦接触模型描述刀-屑接触区的摩擦,并将摩擦系数 μ 设置为 0.3。在加工过程中,磨粒的变形很小,可假设为刚体。

图6为磨削速度 20 m/s、单颗磨粒切厚 0.7 μm 时 PTMCs 的材料去除演变过程。值得注意的是,磨削 PTMCs 的去演变过程经历了 2 个典型阶段: TC4 钛合金基体材料去除阶段和增强颗粒材料去除阶段,将上述两个阶段表示为 S1 和 S2。其中, S1 阶段包括两个部分,第 1 部分从时刻 A (图6(a)) 到时刻 B (图6(b)) 为去除增强颗粒前基体材料阶段;第 2 部分从时刻 E (图6(e)) 到时刻 F (图6(f)) 为去除增强颗粒后基体材料阶段。

在 S1 阶段第 1 部分, PTMCs 的材料去除过程是典型的金属切屑形成的过程,即由于 TC4 基体金属材

料的绝热剪切而形成锯齿形切屑。但是,由于 TiC 增强颗粒所受的应力仅为 0.547 GPa,不足以对其产生显著影响,因此增强颗粒保持完整。在 S1 阶段第 2 部分, PTMCs 的材料去除过程仍是以 TC4 基体绝热剪切形成锯齿状切屑为主。由于磨粒 CBN 逐渐远离 TiC 增强颗粒,因此增强颗粒去除状态未有改变。可以看出,在 S1 阶段, PTMCs 的材料去除以金属基体材料的延性去除为主。

从 S2 阶段可以看出,从时刻 B (图6(b)) 到时刻 E (图6(e)) 主要为增强颗粒被去除。在时刻 B,磨粒 CBN 即将与增强颗粒接触,此时由于最大应力存在于增强颗粒中,因此会使磨粒下方的增强颗粒产生微小断裂,这通常是脆性断裂的前兆。在时刻 C,一半的增强颗粒已被去除,发现磨粒 CBN 和增强颗粒之间存在一定的非接触区域,如图6(c)所示,这种现象是增强颗粒脆性断裂形成的碎屑从表面剥落导致的,这也表明应力已超过增强颗粒脆性破坏的临界值。在前半部分增强颗粒去除过程中,

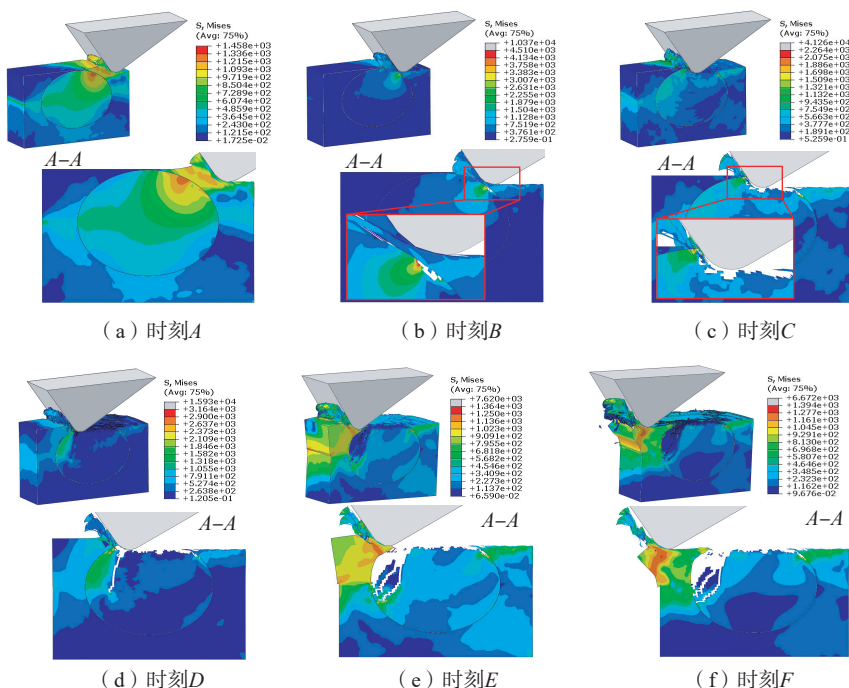


图6 磨削PTMCs的材料去除演变过程

Fig.6 Material removal behavior of grinding PTMCs

PTMCs的材料去除主要以脆性断裂为主。在时刻D,当去除到增强颗粒后半部分时微裂纹开始在增强颗粒中形成,如图6(d)所示。随着磨削的进行,增强颗粒中的裂纹加剧并扩展,如图6(e)所示。最后,当增强颗粒中的碎屑被冷却液冲出时,在磨削表面上产生了孔洞缺陷。可以看出,在S2阶段,PTMCs的材料去除以TiC增强颗粒的脆性去除为主。

PTMCs的材料去除演变过程为金属基体材料的延性去除和TiC增强颗粒的脆性去除。在S1阶段,PTMCs的材料去除行为属于延性去除,材料去除主要由锯齿状切屑形成。然而,在S2阶段,PTMCs的材料去除行为是脆性去除,材料去除主要是脆性断裂、裂纹萌生和裂纹扩展。图7为采用SEM观察得到的PTMCs典型磨削加表面形貌特征,磨削表面出现较多由TiC硬脆增强颗粒破碎形成的孔洞缺陷(图7箭头所示),这与仿真结果相一致。由此可以看出,孔洞缺陷是PTMCs磨削中的典型磨削表面损伤。

2.3 磨削速度对PTMCs材料去除的影响

图8为磨削速度对PTMCs材料去除的影响。可以看出,对于TiC增强颗粒脆性去除产生孔洞缺陷深度,高速磨削和低速磨削有很大差异。当磨削速度从120 m/s降到20 m/s时,磨削表面孔洞缺陷深度由0.8 μm增加到了3.5 μm,增加了约3.4倍。形成这个现象的原因之一是高速磨削和低速磨削的单颗磨粒切厚有显著差异,当磨削速度从120 m/s降到20 m/s时,单颗磨粒切厚从0.3 μm增加到0.7 μm,增加了近1.3倍。研究表明,单颗磨粒切厚对硬脆材料横向裂纹的形成有重要影响,横向裂纹深度随着单颗磨粒切厚的增加而增加^[13]。随着横向裂纹扩展的深度和数量逐渐增加,横向裂纹相互交织,最终延伸至增强颗粒表面,形成了较大面积和深度的孔洞缺陷。同时,低速磨削相对高速磨削会产生较大的磨削力,磨削力的增加促使横向裂纹扩展加快。因此,提高磨削速度可以降低增强颗粒脆性去

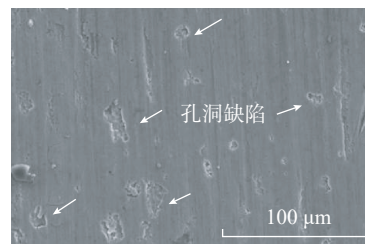


图7 PTMCs典型磨削加表面

Fig.7 Topography of PTMCs ground surface

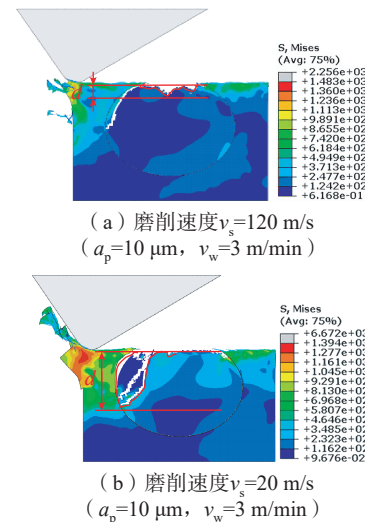


图8 磨削速度对PTMCs材料去除的影响

Fig.8 Effects of grinding speed on material removal of PTMCs

除对PTMCs磨削表面孔洞缺陷的影响程度。

3 结论

(1)磨削过程中,PTMCs的磨削力较TC4增加了15%~30%,磨削温度增加了7%~11%,PTMCs较TC4钛合金更难加工。

(2)PTMCs的材料去除包括延性去除和脆性去除,延性去除是TC4基体材料锯齿成屑,脆性去除主要是TiC增强颗粒脆性断裂、裂纹萌生和裂纹扩展。由脆性去除形成的磨削表面孔洞缺陷是PTMCs磨削中的典型加工损伤。

(3)当磨削速度从120 m/s降到20 m/s时,磨削表面孔洞缺陷深度由0.8 μm增加到3.5 μm,增加了约3.4倍。提高磨削速度可以降低PTMCs磨削表面孔洞缺陷。

参考文献

- [1] DING S T, ZHOU H M, PAN B C, et al. An experimental method to obtain the hard alpha anomaly distribution for titanium alloy aeroengine disks[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 67–82.
- [2] XU M R, LI C P, KURNIAWAN R, et al. Study on surface integrity of titanium alloy machined by electrical discharge-assisted milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117334.
- [3] XIE W B, WANG X K, LIU E B, et al. Research on cutting force and surface integrity of TC18 titanium alloy by longitudinal ultrasonic vibration assisted milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(7): 4745–4755.
- [4] ZHU Y S, LIU Y F, WEI X N, et al. Tribological characteristics of the dual titanium boride layers (TiB₂+TiB) on titanium alloy[J]. Ceramics International, 2021, 47(10): 13957–13969.
- [5] LI S P, HAN Y F, ZHOU H T, et al. Optimizing the local microstructure and mechanical properties of variable section particulate reinforced titanium matrix composites component based on numerical simulation and isothermal forming[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 829: 142161.
- [6] 韩远飞, 孙相龙, 邱培坤, 等. 颗粒增强钛基复合材料先进加工技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2017, 34(8): 1625–1635.
- HAN Yuanfei, SUN Xianglong, QIU Peikun, et al. Research and development of processing technology on particulate reinforced titanium matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(8): 1625–1635.
- [7] ARAMESH M, ATTIA H M, KISHAWY H A, et al. Observation of a unique wear morphology of cBN inserts during machining of titanium metal matrix composites (Ti-MMCs); leading to new insights into their machinability[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1): 519–530.
- [8] 张桂冠, 孙玉利, 范武林, 等. 钛合金加工表面完整性的研究现状与展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(4): 36–55, 79.
- ZHANG Guiguan, SUN Yuli, FAN Wulin, et al. Research progress and future development of surface integrity on machined surface of titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(4): 36–55, 79.
- [9] XI X X, ZHU Y J, CHEN T, et al. Surface burn behavior in creep-feed deep grinding of gamma titanium aluminide intermetallics: Characterization, mechanism, and effects[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(3–4): 985–996.
- [10] LI Z, DING W F, SHEN L, et al. Comparative investigation on high-speed grinding of TiC_p/Ti-6Al-4V particulate reinforced titanium matrix composites with single-layer electroplated and brazed CBN wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(5): 1414–1424.
- [11] ZHAO B, DING W F, XU J H, et al. Comparative study on cutting behavior of vitrified cubic boron nitride wheel and electroplated cubic boron nitride wheel in high-speed grinding of (TiC_p+TiB_w)/Ti-6Al-4V composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(3): 428–438.
- [12] 吴帮福, 丁文锋, 曹洋. 颗粒增强钛基复材轴向超声振动辅助磨削试验研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(11): 96–102.
- WU Bangfu, DING Wenfeng, CAO Yang. Experimental study on axial ultrasonic vibration-assisted grinding of particle-reinforced titanium matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 96–102.
- [13] WU C J, LI B Z, LIU Y, et al. Strain rate-sensitive analysis for grinding damage of brittle materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5): 2221–2229.

通讯作者: 丁文锋, 教授, 博士生导师, 研究方向为航空航天难加工材料高效高性能磨削技术。

Experimental and Simulation Study of Grinding Particle-Reinforced Titanium Matrix Composites

LI Zheng^{1,2}, LIU Bin¹, DING Wenfeng², TIAN Shuai¹, WANG Zhenghe¹

(1. Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In this paper, the experiments on grinding of particle-reinforced titanium matrix composite (PTMCs) were conducted using single-layer brazed CBN wheels. The comparative grinding performance was studied in terms of grinding force and grinding temperature by grinding of PTMCs and TC4 titanium alloy. The evolution process of PTMCs material removal was discussed by the finite element method. The results show that the grinding forces for PTMCs are always 15%–30% higher than that for TC4. The grinding temperature for PTMCs is always 7%–11% higher than that for TC4. PTMCs is more difficult to machine than TC4 titanium alloy. The material removal process of PTMCs includes the ductile removal of TC4 matrix material and the brittle removal of TiC reinforced particles. The hole defect on the grinding surface is created by the brittle removal. When the grinding speed decreases from 120 m/s to 20 m/s, the depth of the hole defect on the ground surface increases from 0.8 μm to 3.5 μm, an increase of about 3.4 times. The influence of reinforced particle brittle removal on PTMCs ground surface hole defects can be reduced by increasing the grinding speed.

Keywords: Particle-reinforced titanium matrix composites (PTMCs); Grinding force; Grinding temperature; Finite element simulation; Material removal

(责编 逸飞)