

高体积比铝基SiC复合材料的 铣磨试验研究*

李 勋¹, 柏 帆¹, 付 余¹, 崔 伟²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

[摘要] 为了改善高体积比铝基 SiC 复合材料的可加工性, 提高加工效率, 本文对高体积比铝基 SiC 复合材料进行了平面铣磨加工试验研究。试验结果表明, 高体积比铝基 SiC 复合材料在铣磨加工中主要表现为脆性材料的特性, 电镀金刚石砂轮在磨削过程中不会出现磨屑粘附现象。SiC 颗粒的破损程度是影响表面粗糙度的主要因素, 并且在相同磨削参数和条件的情况下随着颗粒的破损程度、砂轮粒度的增大和进给速度 v_f 的降低, 磨削表面的粗糙度值会逐渐减小。在给定其他试验参数的情况下, 120# 的 $\phi 8\text{mm}$ 电镀砂轮适合进行粗磨, 并且磨削的材料去除率能够达到 $2400\text{mm}^3/\text{min}$, 同时进给力 F_z 小于 25N , 磨宽抗力 F_x 和磨深抗力 F_y 小于 15N 。使用 230# 的 $\phi 8\text{mm}$ 电镀砂轮进行精磨能够保证表面形成率达到 $6400\text{mm}^2/\text{min}$, 并使表面粗糙度优于 $R_a 0.4\mu\text{m}$ 。

关键词: 铝基 SiC 复合材料; 磨削; 脆性材料; 加工效率; 表面粗糙度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.024



李 勋

博士, 副教授。主要研究方向为高性能材料切削磨削技术及表面完整性。

颗粒增强型铝基 SiC 复合材料是一种性能优异的新型材料, 其以优异的比强度、抗热变形性倍受人们的关注, 在航空航天、汽车制造等领域得到应用^[1]。但是, 颗粒增强型铝基 SiC 复合材料的应用范围与其优异的性能所具有的应用潜力并不相称, 铝基 SiC 复合材料的切削加工性能差是限制其推广应用的重要因素, 主要表现为刀具磨损极快、加工表面质量和一致性差^[2-4], 并且随着 SiC 体积比的增加其加工性能进一步变差, 因此, 对于高体积比的铝基 SiC 复合材料来说, 其加工难度更大。

为了提高铝基 SiC 复合材料的可加工性, 降低零件的加工成本, 研究者进行了多种加工工艺方法的研究, 并将其用于铝基 SiC 复合材料的去除加工领域, 例如 PCD 刀具的高速切削、电解加工、放电加工等。但

是, 这些加工方式也同样存在加工成本高或加工效率低等问题, 尤其是针对高体积比铝基 SiC 复合材料来说, 其导电特性随着 SiC 含量的增加而降低, 使这些问题更为突出^[2,5-8]。

因此, 研究针对高体积比铝基 SiC 复合材料的高效、高质量加工工艺方法对于推动铝基 SiC 复合材料在各行业内的广泛应用具有重要作用。结合铝基 SiC 复合材料的性质, 磨削加工技术受到研究者的关注, 且已经在铝基 SiC 复合材料的加工中得到了成功应用^[9-12]。但是, 随着铝基 SiC 复合材料中 SiC 的含量逐渐提高, 其切削性能越来越差, 超硬磨料砂轮的铣磨加工技术对于高体积比铝基 SiC 复合材料零件的结构成型加工显得尤为重要^[11]。

本文针对高体积比铝基 SiC 复合材料的铣磨加工方式进行试验研

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“涡轮增压内冷却磨削液施加新原理研究”(51105024)。

究,得到了粗、精加工时的磨削参数、表面质量,在试验条件下,粗磨时的材料去除率达到 $2400\text{mm}^3/\text{min}$,精磨时的表面形成率达到 $6400\text{mm}^2/\text{min}$,表面粗糙度小于 $R_a 0.4\mu\text{m}$ 。

平面铣磨机机理研究

铝基 SiC 颗粒增强复合材料的材料特性受 SiC 颗粒含量的影响较大,不同体积比的铝基 SiC 颗粒增强复合材料表现出的加工特性也相差甚远^[2]。为研究高体积比铝基 SiC 颗粒增强复合材料的磨削特性和机理,更好地发挥超硬磨料砂轮磨削加工高体积比铝基 SiC 复合材料的技术优势,利用三坐标高速磨削机床和电镀金刚石砂轮进行相应的平面磨削试验(图 1),磨削方式如图 2 所示,磨削参数见表 1,采用 Blaser Blasgrind 高速磨削油进行冷却和润滑。

试验中铝基 SiC 颗粒增强复合

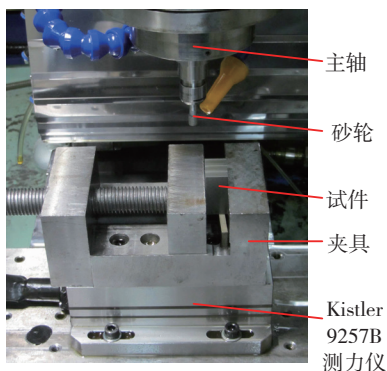


图1 三轴数控机床

Fig.1 Three-axis NC machine tool

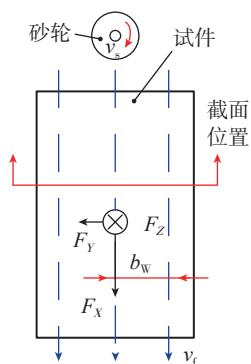


图2 铣磨过程和剖面位置

Fig.2 Mill-grinding process and location of section

表1 磨削机理试验参数

砂轮粒度	线速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	磨削宽度 b_w / mm	进给速度 $v_t / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	磨削深度 a_p / mm
120#	12.6	8	100	0.01
230#			200	0.02
			800	0.06

材料的 SiC 颗粒体积比为 65%,其中 SiC 颗粒的直径为 $20\mu\text{m}$ 左右,材料组织 SEM 照片如图 3 所示。试验中采用电镀 CBN 砂轮,砂轮实物及表面 SEM 照片如图 4 所示,砂轮安装柄直径 $\phi 6\text{mm}$,砂轮磨削部分直径 $\phi 8\text{mm}$ 。

通过 JSM-6010LA 扫描电镜对剖面 and 磨削加工后的砂轮表面进行观测,使用 Taylor Hoboson 轮廓仪测量表面粗糙度 R_a 。采用 230# 砂轮在参数 $v_s=12.6\text{m/s}$, $b_w=8\text{mm}$,

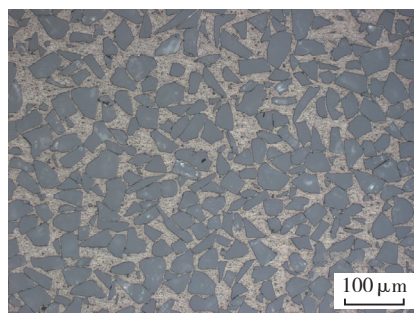
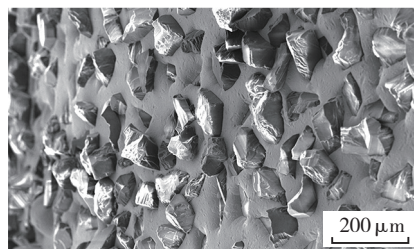


图3 铝基SiC颗粒增强复合材料的内部组织
Fig.3 Morphology of SiC_p/Al MMCs



(a) 砂轮宏观结构



(b) 砂轮表面显微形貌

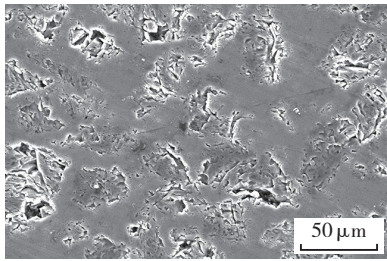
图4 120#电镀CBN砂轮

Fig.4 120# electroplated diamond wheel

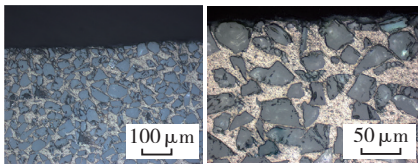
$a_p=0.01\text{mm}$, $v_t=200\text{mm}/\text{min}$ (参数条件 1) 条件下的磨削试验结果如图 5 所示,其表面粗糙度为 $R_a 0.26\mu\text{m}$;采用 120# 砂轮在参数 $v_s=12.6\text{m/s}$, $b_w=8\text{mm}$, $a_p=0.06\text{mm}$, $v_t=100\text{mm}/\text{min}$ (参数条件 2) 和 $v_s=12.6\text{m/s}$, $b_w=8\text{mm}$, $a_p=0.02\text{mm}$, $v_t=800\text{mm}/\text{min}$ (参数条件 3) 条件下的磨削试验结果分别如图 6 和图 7 所示,其表面粗糙度分别为 $R_a 0.52\mu\text{m}$ 和 $R_a 0.83\mu\text{m}$ 。砂轮磨削加工后的表面如图 8 所示。

从磨削表面和剖面组织照片可以清楚地看出,利用电镀砂轮对铝基 SiC 复合材料进行磨削加工时,磨削表面层中的 SiC 颗粒受到砂轮磨粒冲击、挤压的作用而破碎,并随着砂轮持续的磨削加工而脱离加工表面。由图 5 (a)、图 6 (a) 和图 7 (a) 可以看出, SiC 颗粒破碎后,一部分从加工表面脱落,另一部分仍然镶嵌在铝基体内,但是暴露在加工表面的部分能够清晰地看到 SiC 颗粒已经破碎成更为细小的颗粒。同时,破碎的 SiC 颗粒脱落一部分后,在加工表面形成小于 SiC 原始尺寸(约 $20\mu\text{m}$) 的凹坑,如图 5 (b)、图 6 (b) 和图 7 (b)。这些凹坑的深度随着 SiC 颗粒的破碎程度不同而变化,从而形成不同的表面粗糙度,如图 5 (c)、图 6 (c) 和图 7 (c) 所示。破碎的程度越严重,形成的表面凹坑深度越浅,磨削表面的粗糙度值就越小。反之,表面粗糙度值就越大。因此,影响表面粗糙度的最大因素是磨削表面 SiC 颗粒的破碎程度,要得到较好的表面质量,就需要改变磨削条件和参数,使 SiC 颗粒的破碎程度严重,形成更为细小的颗粒从磨削表面脱落。

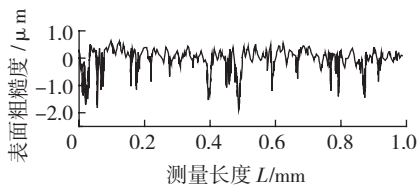
另一方面,铝基体填充在 SiC 颗



(a) 表面微观形貌

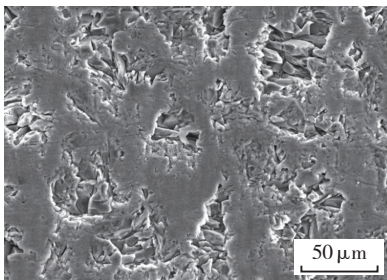


(b) 剖面组织结构

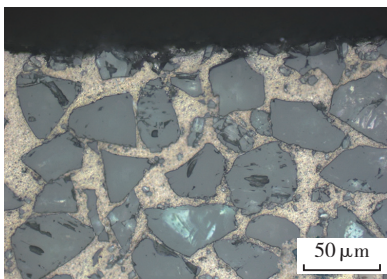


(c) $R_a 0.26 \mu\text{m}$ 及表面粗糙度曲线

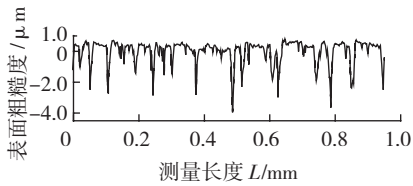
图5 参数条件1下磨削加工后的表面质量
Fig.5 Surface after grinding with No. 1 parameters



(a) 表面微观形貌

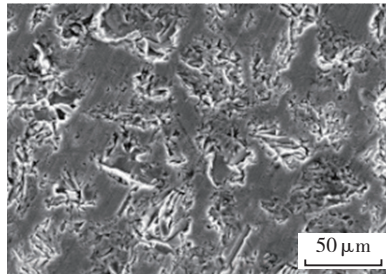


(b) 剖面组织结构

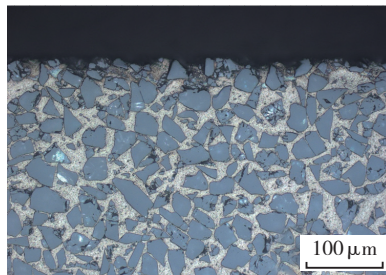


(c) $R_a 0.52 \mu\text{m}$ 及表面粗糙度曲线

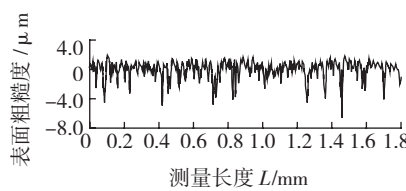
图6 参数条件2下磨削加工后的表面质量
Fig.6 Surface after grinding with No. 2 parameters



(a) 表面微观形貌



(b) 剖面组织结构



(c) $R_a 0.83 \mu\text{m}$ 及表面粗糙度曲线

图7 参数条件3下磨削加工后的表面质量
Fig.7 Surface after grinding with No. 3 parameters

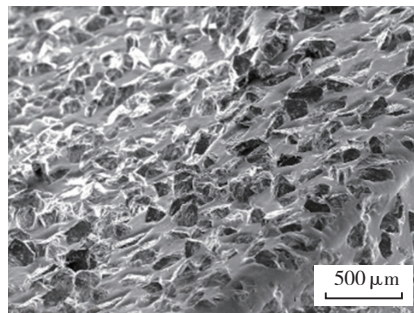


图8 120#砂轮磨削加工后的表面
Fig.8 Surface microstructure of 120# wheel

粒形成框架的空隙中间,在受到砂轮上磨粒的磨削作用时,其晶粒基本上没有产生拉长和扭曲的塑性变形。同时,砂轮表面没有粘附铝基体材料,这就充分说明,高体积比铝基SiC复合材料在磨削加工中表现出脆性材料的特性,完全能够采用高速磨削加工方法进行加工,砂轮也不会因为铝基体材料的粘附而失去磨削能力,从而能够保证磨削加工过程顺利进

行,如图8所示。

砂轮粒度和参数对表面粗糙度的影响

为了进一步研究砂轮粒度和参数对磨削表面质量的影响关系,保证磨削表面粗糙度能够稳定地达到优于 $R_a 0.4 \mu\text{m}$,同时,更好地优选精磨加工时的工艺条件和参数,进行磨削试验。

从以上试验可知,SiC 颗粒的破碎程度对磨削表面的粗糙度影响较大,因此,在磨削参数给定的情况下,分别利用 120#、200# 和 230# 电镀砂轮对铝基 SiC 复合材料进行平面铣磨加工试验,改变进给速度,观测磨削表面质量与砂轮粒度和参数的相互关系。试验结果如图9所示。

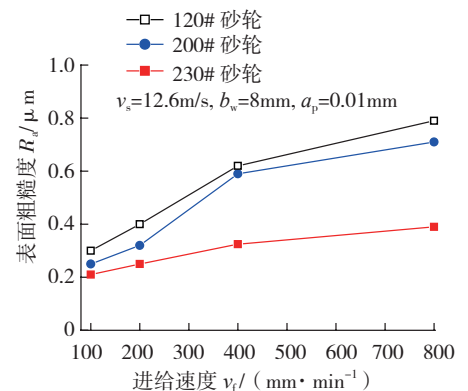


图9 不同粒度号砂轮的磨削表面粗糙度
Fig.9 Surface roughness R_a effected by mill-grinding conditions

试验结果表明,随着砂轮粒度号的提高,在相同磨削参数的条件下,能够使磨削表面 SiC 颗粒的破碎程度逐渐细化,磨削表面粗糙度值逐渐降低。当采用 120# 和 200# 的电镀砂轮时,能够在 $v_f=250\text{mm}/\text{min}$ 的条件下,使磨削表面粗糙度稳定地达到优于 $R_a 0.4 \mu\text{m}$ 的要求;而采用 230# 的电镀砂轮进行磨削时,其进给速度能够达到 $v_f=800\text{mm}/\text{min}$,在保证表面粗糙度优于 $R_a 0.4 \mu\text{m}$ 的前提下,大幅提高了精磨时的效率,与 120# 和 200# 电镀砂轮相比,精磨效率提高了3倍左右。在图9所示试验基础上,

采用 230# 电镀砂轮,在 $v_s=12.6\text{m/s}$, $b_w=8\text{mm}$, $a_p=0.01\text{mm}$, $v_f=800\text{mm/min}$ 的参数条件下对高体积比铝基 SiC 复合材料进行精磨,试件表面粗糙度约为 $R_a 0.39\mu\text{m}$,表面形成率能够达到 $6400\text{mm}^2/\text{min}$ 。加工后试件表面的显微结构如图 10 所示。

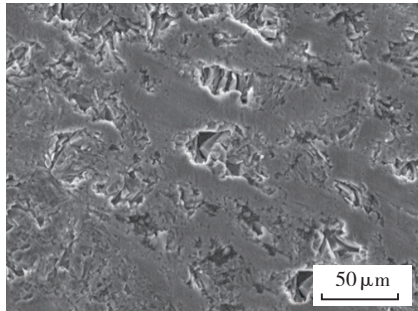


图10 230#砂轮精磨加工后的试件表面
Fig.10 Surface microstructure after finish grinding with 230# wheel

铣磨参数对磨削力和效率的影响

为了提高粗磨时的材料去除率,采用 120# 电镀砂轮进行高体积比铝基 SiC 复合材料粗磨试验。在粗磨加工过程,利用 kistler9257B 测力仪测量其三向磨削力(图 11)。为了最大限度地发挥磨削加工对铝基 SiC 复合材料的去除作用,更好地将磨削加工应用于零件的实际生产,试验中取磨削宽度 $b_w=8\text{mm}$,其他试验参数及磨削力测量结果图 12 所示。

从以上的磨削力试验结果可以看出,3 个方向上的磨削力 F_x , F_y , F_z 均随着磨削参数增加而不断增大。但是,在试验参数范围内, F_z 没有超过 25N, F_x 、 F_y 最大在 15N 左右。从磨削工艺系统刚性及高速主轴承载

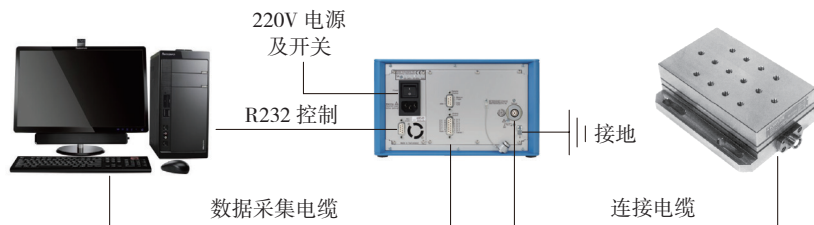
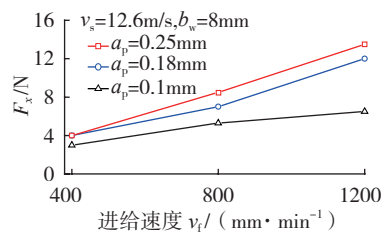


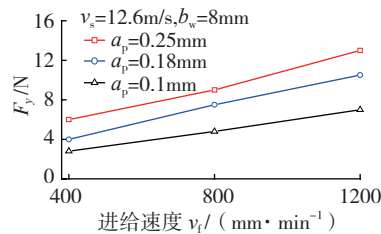
图11 Kistler9257B测力系统
Fig.11 Kistler9257B force measuring system

能力方面都可以稳定、可靠地满足铝基 SiC 复合材料的高速铣磨粗加工的要求,保证材料铣磨粗加工的顺利、可靠进行。以上磨削力的试验结果也充分证明,利用 $\phi 8\text{mm}$ 的 CBN 电镀砂轮能够实现铝基 SiC 复合材料的高效铣磨粗加工,当参数选取 $v_f=1200\text{mm/min}$, $a_p=0.25\text{mm}$, $b_w=8\text{mm}$ 时磨削效率能够达到 $2400\text{mm}^3/\text{min}$ 。

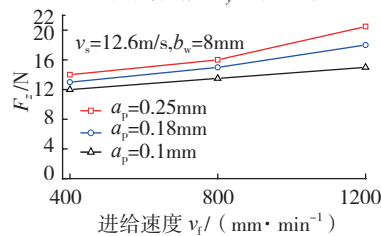
在利用上述参数进行铝基 SiC 复合材料的铣磨粗加工试验后,其有效磨削时间大约为 8min,材料去除



(a) 磨削力 F_x 变化规律



(b) 磨削力 F_y 变化规律



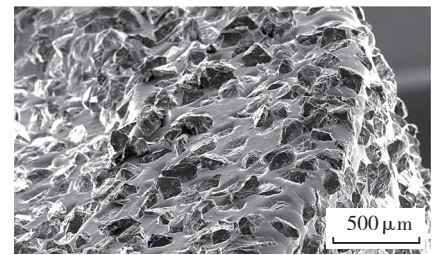
(c) 磨削力 F_z 变化规律

图12 开槽磨削加工的三向磨削力随进给速度及磨削深度的变化规律

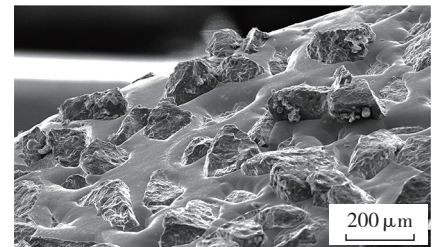
Fig.12 Experimental results of rough grinding forces

总量约为 5000mm^3 ,对砂轮表面进行扫描电镜观察,结果如图 13 所示。

从图 13 可以看出,砂轮表面存在磨损现象,局部有少量的砂粒脱落、破碎,但整体磨损程度不大,砂轮的形状保持良好,砂轮表面还存在大量的砂粒,且分布比较均匀,能够使砂轮保持良好的磨削能力,可以继续利用此砂轮进行铝基 SiC 复合材料的铣磨粗加工。



(a) $\times 50$



(b) $\times 100$

图13 磨削加工后120#砂轮的表面形貌
Fig.13 Surface microstructure of used 120# wheel

结论

(1) 铝基 SiC 复合材料在磨削加工中表面层主要以颗粒破碎为主。影响表面粗糙度的最大因素是磨削表面 SiC 颗粒的破碎程度,要得到较好的表面质量,就需要改变磨削条件和参数,使 SiC 颗粒破碎成更为细小的颗粒。而铝基体的金属组织在磨削过程中几乎不存在扭曲、拉伸等塑性变形,从而保证砂轮在磨削过程中能够保持良好的磨削性能。

(2) 随着砂轮粒度号的不断增大,在相同磨削参数和条件的情况下,磨削表面的粗糙度值会逐渐减小,因此,在能够满足磨削效率和砂轮使用寿命的情况下,应采用小粒度号的砂轮进行粗磨,采用大粒度号的

砂轮进行精磨的方式较为合适,既能保证磨削效率,又能稳定地保证磨削表面的粗糙度优于 $R_a 0.4 \mu\text{m}$ 的设计要求。

(3) 在本文的试验条件下,利用 $\phi 8\text{mm}$ 的 230# 电镀砂轮能够在保证表面粗糙度优于 $R_a 0.4 \mu\text{m}$ 的前提下,使精磨时表面形成率达到 $6400\text{mm}^2/\text{min}$; 利用 $\phi 8\text{mm}$ 的 120# 电镀砂轮,能够使粗磨时的磨削效率达到 $2400\text{mm}^3/\text{min}$ 。

参考文献

[1] 王文明,潘复生, Lu Yun, 等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料开发与应用的研究现状[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(3): 61-67.

WANG Wenming, PAN Fusheng, Lu Yun, et al. Development and application of silicon carbide particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(3):61-67.

[2] 全燕鸣,周泽华. 不同颗粒度 SiC 增强铝基复合材料的切削加工性能与适用刀具[J]. 材料科学与工程, 1996, 14(4):59-64.

QUAN Yanming, ZHOU Zehua. Machinability of aluminum matrix composites reinforced by different size SiC particles and

their applicable tools[J]. Materials Science and Engineering, 1996, 14(4):59-64

[3] 郑建新,刘传绍,赵波,等. 颗粒增强金属基复合材料的加工现状[J]. 焦作工学院学报(自然科学版),2003, 22(2):121-124.

ZHENG Jianxin, LIU Chuanshao, ZHAO Bo, et al. Processing status of particulate reinforced metal matrix composites [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2003, 22(2):121-124.

[4] MANNA A, BHATTACHARAYYA B. A study on machinability of Al/SiC-MMC[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1-3):711-716.

[5] LIN J T, BHATTACHARYYA D, LANE C. Machinability of a silicon carbide reinforced aluminium metal matrix composite[J]. Wear, 1995, 181-183(95):883-888.

[6] YADAV R N, YADAVA V. Influence of input parameters on machining performances of slotted-electrical discharge abrasive grinding of Al/SiC/Gr metal matrix composite[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2013, 28(12):1361-1369.

[7] YADAV R N, YADAVA V. Slotted-electrical discharge diamond cut-off grinding of Al/SiC/B4C hybrid metal matrix composite[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(1):309-316

[8] MÜLLER F, MONAGHAN J. Non-conventional machining of particle reinforced

metal matrix composites[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1988, 65(12):399-400.

[9] ZHONG Z W, HUNG N P. Grinding of alumina/aluminum composites[J]. Materials Processing Technology, 2002, 123(1):13-17

[10] THIAGARAJAN C, SIVARAMAKRISHNAN R, SOMASUNDARAM S. Experimental evaluation of grinding forces and surface finish in cylindrical grinding of Al/SiC metal matrix composites[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(9):1606-1614.

[11] 匡仁军. 铝基复合材料 SiC_p/Al 窄槽磨削技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

KUANG Renjun. Research on the narrow slot grinding technology of SiC_p/Al composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[12] 周明,李英杰,李丹. 电镀金刚石砂轮磨削加工 SiC_p 颗粒增强铝基复合材料的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008(5):39-43.

ZHOU Ming, LI Yingjie, LI Dan. Research on grinding of SiC_p particle reinforced aluminum matrix composites with electroplated diamond wheel based on orthogonal arrays[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2008(5):39-43.

通讯作者: 李勋, E-mail:lixunbuaa@163.com。

Experimental Study on Mill-Grinding of High Volume Fraction SiC_p/Al Metal Matrix Composites

LI Xun¹, BAI Fan¹, FU Yu¹, CUI Wei²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

[ABSTRACT] Based on analyzing the material properties and grinding mechanism, the mill-grinding process is presented to machine high volume fraction SiC_p/Al MMCs. The experimental results show that 65% volume fraction SiC_p/Al MMCs presents the machinability of brittle material. Meanwhile, the electroplated diamond wheel will not be smeared with soft aluminum to lose machinability. The broken degree of SiC particles is the main influencing factor of surface roughness. R_a value decreases gradually with increasing of disintegrated degree, wheel's grit number and reducing of feed speed. Under the given experimental conditions, 120# $\phi 8\text{mm}$ electroplated diamond wheel is very suitable for rough machining and MRR can be improved to $2400\text{mm}^3/\text{min}$ with parameters optimized. At the same time, F_z is not more than 25N and F_x , F_y are not more than 15N. The finishing SFR can be reached $6400\text{mm}^2/\text{min}$ utilizing 230# $\phi 8\text{mm}$ electroplated diamond wheel under the premise of surface roughness less than $R_a 0.4\mu\text{m}$.

Keywords: SiC_p/Al MMCs; Grinding; Brittle material; Machining efficiency; Surface roughness

(责编 大漠)