

SiC_p/Al 基复合材料的切削加工研究现状

冷金凤 武高辉

(哈尔滨工业大学金属基复合材料工程技术研究所, 哈尔滨 150001)

文 摘 综述了 SiC 颗粒增强铝基复合材料的切削加工研究进展情况, 重点阐述了刀具材料的主要失效形式及影响刀具磨损的因素, 并展望了该领域的发展前景。

关键词 SiC_p/Al 基复合材料, 切削加工

Status of Research on Machinability of SiC_p/Al Composites

Leng Jinfeng Wu Gaohui

(Center for Metal Matrix Composites Engineering Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The status of research on the machinability of SiC_p/Al composites is introduced and the failure of the cutting tool and factors influencing tool wear are mostly detailed. In addition, the development prospect of this field is showed in this paper.

Key words SiC_p/Al composites, Machinability

1 前言

SiC_p/Al 基复合材料具有高的比强度、比模量^[1]和好的耐磨性及尺寸稳定性, 且 SiC 颗粒价格低廉, 来源广泛, 在航空航天、汽车等行业中显示出巨大的应用潜力。SiC_p/Al 作为结构材料已被广泛应用于直升机的旋翼系统上, 美国海军飞行动力实验室研制成 SiC_p/Al 复合材料薄板, 应用于新型舰载战斗机上^[2], 美国用 SiC_p/Al 复合材料制备汽车刹车盘^[3], 美国将 SiC_p/Al 复合材料替代铍材成功地应用于某型号导弹的惯性制导测量仪表上^[4]。我国复合材料的研究和发展起步较晚, 大约在 20 世纪 80 年代中期才开始对金属基复合材料开展研究, 近几年来在颗粒增强金属基复合材料的研究方面取得了很大的进展, 一些材料在航天航空领域已经进入实用化阶段。

SiC_p/Al 基复合材料一般是铸造法或粉末冶金法等制备的, 需要进一步的机械加工达到零件所需的精度和表面粗糙度的要求。增强体颗粒比常用的刀具(如高速钢刀具和硬质合金钢刀具)的硬度高^[5], 在机械加工的过程中能引起剧烈的刀具磨损^[6], 因此, 复合材料的难加工性和昂贵的加工成本限制了 SiC_p/Al 基复合材料的广泛应用。目前, 在进一步扩大 SiC_p/Al 基复合材料的应用方面, 材料的切削加工是

最重要的研究课题之一。本文综述了 SiC_p/Al 基复合材料切削加工过程中刀具材料的主要失效形式, 分析了影响刀具磨损的因素并对复合材料的切削加工性的改善和前景作了预测。

2 SiC_p/Al 基复合材料的切削加工研究现状

2.1 刀具的经济性评价

Hung 等人^[7]用搅拌铸造法和粉末冶金法制备了 SiC_p/Al 基复合材料, 其中 SiC 颗粒的粒度为 13 μm, 体积分数为 20%, 搅拌铸造法采用的基体材料为 A359 铝合金, 粉末冶金法采用的基体材料为纯铝 L2。研究不同刀具切削 SiC_p/Al 复合材料的刀具寿命计算及不同刀具的经济指数(E), 可以用来衡量不同刀具加工复合材料所用的成本, 为刀具的选择提供依据。

$$E = \frac{M}{Q} = \frac{2M}{Vdf}$$

式中, M 为每个切削刃的价格, Q 为单位时间切除金属材料的体积, V 为刀具的线速度, d 为切削深度, f 为进给量。

经济性评价忽略了刀具转换的时间; 假设刀具为一次性使用, WC 刀具有六个切削刃, 而 PCD、CBN 和 HSS 刀具只有一个切削刃。表 1 列出了 Hung 等计算

收稿日期: 2006-06-07; 修回日期: 2006-09-04

作者简介: 冷金凤, 1973 年出生, 博士研究生, 主要从事颗粒增强铝基复合材料的加工、尺寸稳定性及阻尼性能研究

得到的不同刀具的经济性指标,这个指标值越小,表征复合材料的加工成本越低。在研究所采用的切削条件下,进行粉末冶金法和搅拌铸造法制备的复合材料端面切削加工,得到结论如下:WC 刀具的经济性指数值最小,分别为 6.9 和 4,低于其他刀具的经济

性指数,见表 1。依据刀具的经济性指数进行刀具的选择,粗加工选用 WC 刀具能降低成本,但精加工时须综合考虑表面质量和加工成本,因此采用 PCD 刀具进行复合材料的切削加工。经济性指标的计算还适用于车削加工外圆、钻削和磨削加工等。

表 1 不同刀具的经济性指数和切削速度
Tab.1 Circumferent speed and economy index of facing process

复合材料 制备方法	切削速度/cm·min ⁻¹					相对速度					经济性指数/\$·(cm ³ ·min ⁻¹) ⁻¹ ·刃 ⁻¹				
	HSS	WC	TiN/WC	CBN	PCD	HSS	WC	TiN/WC	CBN	PCD	HSS	WC	TiN/WC	CBN	PCD
	TiN/HSS					TiN/HSS					TiN/HSS				
粉末冶金	42	3.5		21	55	1	8.3		50	131	510	6.9		204	104
铸造		5.5	13	131	572		13	31	312	1362		4	5	33	10

注:1)切削条件:进给量为 0.7 mm/rev; 切削深度为 0.5 mm; 干切削; 切削时间为 10 min; 后刀面耐用度标准为 0.3 mm。

2.2 刀具材料的主要失效形式

2.2.1 磨粒磨损

在切削 SiC_p/Al 增强复合材料过程中,刀具材料的主要磨损形式为磨粒磨损^[8-9]。由于工件材料中的 SiC 颗粒以及硬质点、积屑瘤碎片等造成机械磨损,它们在刀具表面划出一条条平行于切削方向的条纹,作用机制^[10]主要有三种:刀具上黏附的 SiC 颗粒对刀具有微切削作用;刀具材料在铝基体的作用下颗粒拔出,硬度下降;材料中的 SiC 颗粒对刀具有刮擦作用。在这几种机制的综合作用下,导致刀具材料的磨粒磨损。

2.2.2 黏着磨损

在刀具与工件的接触面上,当温度和压力足够大时,产生塑性变形而发生的所谓冷焊现象,是摩擦面塑性变形所形成的新鲜表面原子吸附力所造成的结果,是前刀面的主要磨损机制。EI - Gallab 等人^[10-11]的研究用 PCD 刀具加工 SiC_p/Al 复合材料,在切削刃上由于黏着磨损出现附加边界,这种边界的出现能保护前刀面免受磨粒磨损,但是不稳定附加边界能引起刀具的崩刃而使加工材料的表面质量下降。

2.2.3 扩散磨损

刀具和工件之间的温度和压力足够高,工件材料的原子能通过扩散的方式进入刀具材料,使刀具材料软化导致刀具失效。扩散发生的条件一是材料间有金属键存在,二是具有能引起快速扩散的温度,三是工件材料在刀具材料中有一定的固溶度。扩散磨损是前刀面的主要失效形式,有人对前刀面的扩散磨损用中子谱定量分析了扩散元素^[12],认为刀具材料的固溶度和扩散系数是决定扩散磨损的主要因素。

2.2.4 刀具的脆断和塑性破损

对裂纹敏感刀具材料能在刀尖处萌生裂纹导致

刀具材料的断裂。对于硬质合金刀具,黏合剂的含量决定刀具材料的强韧性。另外,在切削的过程中,切削刃在高的温度和压力下能使刀尖发生塑性变形而使其形状改变,这种变形能引起刀具前后刀面磨损的加剧而导致刀具突然崩刃。

2.3 影响刀具磨损的因素

2.3.1 刀具材料

Brun 等人^[13]研究认为,刀具材料的硬度与刀具的磨损率间不完全是线性关系。分为两种情况:一种当刀具基体材料的硬度大于增强体材料,如 PCD、CBN 刀具,刀具的磨损率与硬度成线性关系,随着刀具基体材料的硬度升高,其磨损率下降;另一种当刀具基体材料的硬度低于增强体材料,刀具的磨损与其硬度没有呈现单调的趋势。

金刚石具有极高的硬度和耐磨性,其显微硬度可达到 HV 10⁴(SiC 的硬度为:HV 2 700),它可以加工高硬度和高耐磨的复合材料,刀具耐用度比硬质合金可提高几倍到几百倍。金刚石不与铝基体发生化学反应、摩擦系数小且导热性好,精加工获得较好的表面质量。文献[14~16]报道的 SiC_p/Al 复合材料加工中普遍采用此种刀具,但金刚石刀具价格昂贵,通常在精加工和半精加工中应用。在复合材料的粗加工中,通常使用价格比较低廉且耐磨性较小的硬质合金刀具。陶瓷刀具虽然比硬质合金刀具硬度大,但弯曲强度低、脆性大,在加工粗颗粒增强复合材料时未能表现出优异的耐磨性,其后刀面磨损比硬质合金大,刀刃上容易出现缺口,前刀面上容易出现冷焊现象。涂层刀是在硬质合金刀具表面涂覆一层硬度和耐磨性高的难熔金属化合物,但有研究表明,加工颗粒增强复合材料,涂层刀具比硬质合金刀具磨损严重^[13]。

另外,刀具材料的晶粒尺寸也是影响刀具磨损的因素之一。对于硬质合金刀具而言,WC的晶粒尺寸增加虽然使刀具材料硬度降低,但减少了扩散磨损的几率而导致刀具材料的寿命延长^[17]。金刚石刀具在晶粒尺寸较大的情况下,能减轻SiC颗粒对刀具材料的微切削作用,但由于晶粒尺寸增加也导致晶体缺陷增加,所以刀具材料应选择合适的晶粒尺寸。

2.3.2 切削工艺对刀具磨损的影响

(1) 切削速度

在切削加工参数中,切削速度是影响刀具磨损的主要因素。众多研究表明,切削速度增大加剧刀具磨损。采用较高切削速度加工复合材料,刀具和工件材料之间由于摩擦作用产生的切削热增加,使刀具材料结合强度下降,导致刀具磨损增加。Ei-Gallab^[10]等研究认为,切削速度的增大,增加了SiC颗粒的动能,使SiC粒子对刀具的磨粒磨损效应增加,加剧刀具的磨损。但有研究指出,PCD刀具耐磨性好,在一定的切削速度范围内刀具磨损不受影响。

(2) 进给量

Tomas和Tnnessen^[18]研究了PCD刀具和WC刀具加工SiC_p/Al复合材料过程中,进给量对刀具磨损的影响。他们发现较大的进给量的选用能减少刀具的磨损,并认为较大的进给量能使切屑形成区的热量传导到工件材料的过程得到改善。工件材料的热量能使其金属基体软化,加工过程中SiC颗粒容易与基体协调塑性变形而减少对刀具的磨损程度。但Ei-Gallab的研究认为在切除一定金属体积的条件下,增大进给量能使刀具与材料间磨粒磨损的机会减少,从而减轻对刀具的磨损程度。同时,进给量对切屑的形态产生影响,大进给量的选用易形成断续切屑,容易处理并减少对刀具的磨损。Jin^[19]也采用PCD刀具进行SiC_p/Al复合材料的切削加工,却得到了相反的结论,他们认为采用大的进给量进行切削,产生的切削热增加,使刀具材料软化并且扩散磨损增加,同时SiC粒子的动能增加,这些都加剧刀具的磨损。

(3) 切削深度

选用较大的切削深度能加剧刀具的磨损,这是由于随着切削深度的增加,刀具后刀面与材料的接触面积增大,SiC对刀具的微切削作用增强。

(4) 切削介质

通常,切削液在材料的加工过程中起到冷却和润滑作用,降低刀具磨损。但在复合材料加工中,研究者^[20-23]普遍认为,切削液引入加剧刀具的磨损。原因是由于切削液的引入,一方面导致基体材料切屑形成区的温度下降,导致切削力增加;另一方面复合材料硬度升高,SiC与基体结合增强,降低了SiC颗粒与

基体的协调塑性变形的能力。另外,切削液可能与切碎的增强体颗粒混和,黏附在材料的表面加剧刀具的磨损。McGinty和Preuss^[24]等研究者的研究显示,在切削加工的过程中吹入压缩空气或者将切屑吸走,能减少刀具的磨损,认为是由于黏附在刀具表面的切碎的增强体颗粒减少,SiC粒子对刀具材料的微切削作用减弱,降低了刀具的磨损。

2.3.3 增强体对刀具磨损的影响

(1) 增强体的形状

有研究表明,切削块状的增强体颗粒比狭长的颗粒对刀具的磨损影响更大,这是由于在切削过程中,刀具的磨损主要来源于与增强体的直接接触而产生的磨粒磨损效应,块状增强体颗粒比狭长的颗粒与刀具的接触面积大。Lane认为,为了提高刀具寿命,铸造方法制备的铝基复合材料的SiC长宽比为1.5:1比较适合,而粉末冶金方法应采用长宽比为1:1的增强体颗粒。

(2) 增强体的尺寸和体积分数

颗粒的尺寸和体积分数两者相比,前者对刀具的磨损较大。当SiC颗粒粗大时,在切削变形区受刀刀挤压而转动,脱落、破碎的几率比较大,而颗粒对刀具材料的刮擦犁作用也严重,因而刀具磨损加剧。当颗粒细小时,在基体中弥散分布,一方面与刀具接触的几率较低,另一方面,在切削区颗粒随基体的变形较容易,可以压入已加工表面或切屑中,使其不致于对刀具直接摩擦,可以减少刀具磨损。随着增强体体积分数的增大,SiC颗粒与切削刀具接触的几率增加,刀具的磨损加剧。Lane^[25]研究了切削含不同体积分数和粒度SiC颗粒增强体的铝基复合材料对刀具磨损的影响。他的研究显示,增强体颗粒的体积分数下降50%,刀具寿命能提高5倍,相当于颗粒粒度降低21%~27%提高的刀具寿命,这说明增强体颗粒的粒度比体积分数对刀具的磨损影响显著。

(3) 增强体颗粒的分布

不同材料制备方法导致颗粒在基体中的分布均匀性的差异。与粉末冶金方法和挤压铸造法相比,搅拌铸造法和喷射沉积法制备的材料中增强体颗粒分布不均匀,切削复合材料的过程中,增强体颗粒的不均匀分布使周围基体产生不均匀的塑性变形,切削力和刀具磨损增加。

(4) 缩孔和疏松

在复合材料的铸造过程中,伴随着液相到固相的转变过程或铝液中的氢气杂质,不可避免地会产生一些组织缺陷,如缩孔、疏松等。这些空洞分布在机加表面或下表面都会减轻刀具的磨损程度。

3 结语

切削加工 SiC_p/Al 基复合材料应选用硬质合金刀具进行粗加工,选用 PCD 刀具进行精加工或半精加工;选用较低的切削速度和较小的切削深度能得到可接受的刀具耐用度;采用干切削、吹压缩空气或吸走切屑几种切削方式进行。为改善复合材料的切削加工性,增强体颗粒应选用形状狭长并且细小颗粒来制备复合材料,尽量控制增强体的体积分并保证 SiC 颗粒在基体中均匀分布。

在 SiC_p/Al 基复合材料切削加工的未来发展中,可以从两方面进行:一是可以采用一些新的加工方法,如高能束非接触加工、磨料流切削、电火花成型加工等,来补充传统切削加工方法中存在的不足;另一方面可以通过在复合材料中加入一些增强体如石墨来改善材料切削加工性。SiC_p/Al 基复合材料切削加工性的改善,成本的降低,将会对复合材料的工业应用奠定坚实的基础。

参考文献

- 1 Clyne T W, Withers P J. An introduction to metal matrix composites. London: Cambridge University Press, 1993
- 2 Lee K. Interfacial reaction in SiC_p/Al composite fabricated by pressureless infiltration. Scripta Materialia, 1997; 36(8): 847
- 3 Cole G S, Sherman A M. Lightweight materials for automotive applications. Mater. Charact., 1995; 35: 3 ~ 9
- 4 Mohn W R, Vukobratovich D. Recent applications of metal matrix composites in precision instruments and optical systems. Journal of Materials Engineer, 1988; 10: 225 ~ 231
- 5 Ramrattan S, Sitkins F, Nallakatala M. Optimization of the casting and machining processes for a metal-matrix composite. In: Processings of the Canadian society mechanical english symposium. McMaster University, 1996: 624 ~ 629
- 6 Boardman B. Metal matrix composites—An opportunity for the off-highway industry. OH, USA: SAE International, 1990
- 7 Hung N P, Boey K A, Khor C A. Machinability of cast and power-formed aluminum alloys reinforced with SiC particles. Journal of Materials Processing Technology, 1995; 48: 292 ~ 297
- 8 Deuis R L, Subramanian C, Yellup J M. Abrasive wear of aluminum composites—a review. Wear, 1996; 201: 132 ~ 144
- 9 Bergman F, Jacobson S. Tool wear mechanisms in intermittent cutting of metal matrix. Wear, 1994; 179: 89 ~ 93
- 10 Ei-Gallab M, Sklad M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites, part I: Tool performance. Journal of Materials Processing Technology, 1998; 83: 151 ~ 158
- 11 Manna A, Bhattacharaya B. A study on machinability of Al/SiC - MMC. Journal of Materials Processing Technology, 2003; 140: 711 ~ 716
- 12 Sharadchandra S. The micromechanisms of contracted carbide cutting Tool wear. Ph. D Thesis. McMaster University, 1993
- 13 Brun M K, Lee M. Wear characteristics of various hard materials for machining SiC reinforced aluminum alloy. Wear, 1985; 104: 21 ~ 29
- 14 Paulo D J. Diamond tool performance in machining metal matrix composites. Journal of Materials Processing Technology, 2002; 128: 100 ~ 105
- 15 Davim J P, Baptista A M. Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminum. Journal of Materials Processing Technology, 2000; 102: 25 ~ 29
- 16 全燕明. 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. 材料科学与工程, 1996; 14(4): 59 ~ 64
- 17 Masuda M, Kuroshima Y, Chujo Y. Failure of tungsten carbide-cobalt alloy tools in machining of carbon materials. Wear, 1996; 169: 135 ~ 140
- 18 Tomac N, Tonnessen K. Machinability of particulate aluminum matrix composites. Ann. CIRP41(1). 1992: 55 ~ 58
- 19 Lin J T, Bhattacharyya D, Line C. Machinability of silicon carbide reinforced aluminum metal matrix composites. Wear, 1995; 181 ~ 183: 883 ~ 888
- 20 Ding X, Liew W Y H, Liu X D. Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools. Wear, 2005; 259: 1 225 ~ 1 234
- 21 Hung N P, Yeo S H, Oon B E. Effect of cutting fluid on the machinability of metal matrix composites. Journal of Materials Processing Technology, 1997; 67: 157 ~ 161
- 22 颜炳萼. SiC 粒子強化アルミニウム合金基複合材料の被切削性. 轻金属, 1993; 43(4): 8 ~ 12
- 23 韩荣第, 姚洪权, 严春华. SiC_p/2024 复合材料切削力与刀具磨损的试验研究. 复合材料学报, 1997; 2(14): 71 ~ 75
- 24 Meginty M J, Preuss C W. Machining ceramic fiber metal matrix composites. In: Proc. high productivity machining materials and processes, USA, 1985: 231 ~ 242
- 25 Lane C. The effect of different reinforcements on PCD tool life for aluminum composites. In: Proceedings of the machining of composite materials symposium. ASM material week, Chicago, IL. 1 - 5 November 1992: 12 ~ 27

(编辑 李洪泉)