复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 36 卷 第 5 期 5 月 2019 年
Vol. 36 No. 5 May 2019

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20180724.001

不同冷却润滑方式对切削 SiC_P/Al 复合材料刀具磨损的影响

段春争*，车明帆，孙伟，魏斌，刘玉敏

（大连理工大学 机械工程学院，大连 116024）

摘　要： 为探究不同冷却润滑方式对切削 SiC_P/Al 复合材料刀具磨损的影响，进行了干切削（Dry）、微量润滑（MQL）、液氮（LN_2）、切削油（Oil）和乳化液（Emulsion）共五种冷却润滑条件下的车削实验，分析了冷却润滑方式对刀具边界磨损、刀具破损和后刀面磨损的影响。结果表明：MQL 和 LN_2 有更佳的流体冲刷效果，可以将脱落的 SiC 颗粒及时带离切削区，减少边界磨损；Oil 和 Emulsion 冲刷效果较差，会加剧边界磨损。LN_2 的使用会增加刀具受到的热应力和机械冲击，积屑瘤发生完全脱落，造成切削过程不平稳，当切削距离达到 1 100 m 时，刀具发生破损；Oil 切削时，严重的边界磨损导致刀尖部位尺寸减小，强度降低，当切削距离达到 825 m 时发生了刀具破损。MQL 良好的润滑渗透性和 LN_2 有效的冷却效果可以减少后刀面磨损。因此，MQL 兼具冷却、润滑和流体冲刷效果，更加适合作为切削 SiC_P/Al 复合材料的冷却润滑方式。

关键词： SiC_P/Al 复合材料；切削液；冷却润滑；刀具磨损；边界磨损；刀具破损

中图分类号： TG501.5　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2019)05-1244-10

Influence of different cooling and lubrication methods on tool wear in machining SiC_P/Al composites

DUAN Chunzheng*, CHE Mingfan, SUN Wei, WEI Bin, LIU Yumin

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

Abstract: In order to study the influence of different cooling and lubrication methods on tool wear in machining SiC_P/Al composites, the turning experiments with cooling and lubrication methods including dry, liquid nitrogen (LN_2), minimum quantity lubrication (MQL), cutting oil (Oil) and emulsion were carried out, the influences of cooling and lubrication methods on tool boundary wear, tool breakage and flank wear were analyzed. The results show that MQL and LN_2 can bring the detached SiC particles away from the cutting zone due to their more effective flushing characteristic, which contributes to the decrease of boundary wear; the application of Oil and Emulsion deteriorates boundary wear intensely because of less flushing ability. The increase in the thermal stress and mechanical shocking applied to the tool and build-up edge shedding will cause the cutting process to be unstable with the application of LN_2, resulting in tool breakage at the cutting distance of 1 100 m; when turning with Oil, serious boundary wear can decrease the tool nose size and lead to reducing of intensity of the tool nose, so tool breakage occurs at the cutting distance of 825 m. Flank wear decreases due to MQL's great lubrication permeability and LN_2' effective cooling effect. Therefore, MQL possesses good cooling, lubrication and fluid flushing effects and is a better cooling and lubrication method for machining SiC_P/Al composites.

Keywords: SiC_P/Al composites; cutting fluid; cooling and lubrication; tool wear; boundary wear; tool breakage

收稿日期： 2018-04-19；**录用日期：** 2018-05-28；**网络出版时间：** 2018-07-25　13:53
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180724.001
基金项目： 国家自然科学基金（51775083）
通讯作者： 段春争，博士，教授，博士生导师，研究方向为高速高效切削加工技术　E-mail：duancz@dlut.edu.cn
引用格式： 段春争，车明帆，孙伟，等. 不同冷却润滑方式对切削 SiC_P/Al 复合材料刀具磨损的影响[J]. 复合材料学报，2019，36(5)：1244-1253.
DUAN Chunzheng, CHE Mingfan, SUN Wei, et al. Influence of different cooling and lubrication methods on tool wear in machining SiC_P/Al composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(5): 1244-1253 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

近年来，先进武器系统、航空航天、汽车、体育和电子封装等领域对材料的要求越来越高，碳化硅颗粒增强铝基(SiC_P/Al)复合材料以其高比强度、高比刚度、高耐磨耐腐蚀及重量轻等优异的综合性能，获得非常广阔的应用前景[1-2]。由于 SiC 增强颗粒的硬度(HV 3 000)比大多数刀具材料高[3]，在切削 SiC_P/Al 复合材料过程中会对刀具造成强烈的高频冲击，破坏刀具[4]，缩短刀具使用寿命，严重制约该材料的广泛应用。切削液等冷却润滑方式在工业中的应用已经十分广泛，良好的冷却润滑能有效减少刀具磨损，提高刀具寿命[5]。针对 SiC_P/Al 复合材料切削加工刀具磨损严重的问题，国内外学者进行了不同冷却润滑方式对刀具磨损影响的研究。王涛[6]对 65vol% SiC_P/Al 复合材料进行了干/湿铣削实验，认为切削液的使用导致工件材料热软化倾向减少，强度增加，增强颗粒更容易被切削，刀具磨损增加。Ding 等[7]在 20vol% SiC_P/Al 复合材料的车削实验中指出，无论 50 m/min 的低速切削还是 400 m/min 的高速切削，切削液的使用都会加剧后刀面磨损。Kannan 等[8]在 20vol% SiC_P/Al 复合材料的车削实验中发现，当切削速度为 120 m/min 时，干/湿切削条件下后刀面磨损差异不明显，刀具磨损受切削热影响较小。Sadik 等[9]对 20wt% SiC_P/Al 复合材料的钻削实验表明，从刀具内部供应低温 CO_2 可以有效保护切削刃并减少积屑瘤(Buil-up Edge，BUE)，和乳化液相比，能够显著提高刀具寿命，并指出后刀面磨损为主要磨损形式。Sankar 等[10]对比了最小量润滑(Minimum Quantity Cutting Fluid，MQCF)和油液浇注两种切削液使用方式对车削 10vol% SiC_P/Al 复合材料后刀面磨损的影响，结果显示，MQCF 可以减少 5%～12.5%的后刀面磨损量，由于 MQCF 更加有效的冷却效果，保持了刀具硬度，从而减少后刀面磨损。

在探讨冷却润滑方式对切削 SiC_P/Al 复合材料刀具磨损的影响时，现有研究主要以后刀面磨损为研究对象。与均质材料不同，SiC 颗粒的存在使切削 SiC_P/Al 复合材料时刀具磨损状况更复杂，不仅会造成严重的副后刀面边界磨损[7]，SiC 颗粒对刀具的高频刻划和冲击还会加速刀具破损[4,11]。由于副后刀面直接与已加工表面接触，该区域磨损状态会严重影响已加工表面质量[7,12]，且刀具破损有时会成为刀具的主要失效形式[13]，因此考虑冷却润滑方式对副后刀面边界磨损和刀具破损的影响具有现实意义。此外，现阶段对切削 SiC_P/Al 复合材料时副后刀面边界磨损和刀具破损的研究比较缺乏，因此，应该从后刀面磨损、边界磨损和刀具破损等多方面探究冷却润滑方式对刀具磨损的影响。

根据学者们的研究结果，不同冷却润滑方式对切削 SiC_P/Al 复合材料时刀具磨损的影响是不同的，并且研究重点主要集中在冷却效果上。SiC_P/Al 复合材料作为典型的非均质材料，影响切削该材料刀具磨损的因素较复杂，在分析冷却润滑方式对刀具磨损的影响时，不能仅考虑冷却效果对刀具磨损的影响。有研究表明[8,14]，在切削 SiC_P/Al 复合材料时，冷却润滑方式的润滑性能和冲刷效果对刀具磨损也具有一定影响，但对润滑和冲刷效果的作用机制探讨不够全面和深入。因此，为了更清楚地揭示不同冷却润滑方式对刀具磨损的影响，应该从冷却、润滑和冲刷效果三个方面综合考虑冷却润滑方式在刀具磨损中的作用，为切削 SiC_P/Al 复合材料时合理选用冷却润滑方式提供指导。

综上所述，本文针对 SiC_P/Al 复合材料进行了干切削(Dry)、微量润滑(Minimum Quantity Lubrication，MQL)、液氮(Liquid nitrogen，LN_2)、切削油(Cutting oil，Oil)和乳化液(Emulsion)共五种冷却润滑条件下的切削实验，从冷却、润滑和冲刷效果等角度探究不同冷却润滑方式对切削 SiC_P/Al 复合材料刀具边界磨损、破损及后刀面磨损的影响。

1 实验材料及方法

1.1 车削实验

实验采用沈阳第一机床厂 CA6140 普通车床进行外圆车削。工件为圆筒状 SiC_P/2024Al 复合材料，外径为 120 mm，内径为 100 mm，高为 150 mm。SiC 增强颗粒平均尺寸为 15 μm，体积分数为 50vol%。

聚晶金刚石(Polycrystalline diamond，PCD)硬度可达 HV 8 000，并且有极高的耐磨性。以往研究表明[15-17]，PCD 是切削颗粒增强金属基复合材料较为合适的刀具材料，因此，本文采用粒度大小为 20 μm 的 PCD 刀具，其几何参数如表 1 所示。所用材料采用搅拌铸造法生产，材料原件外表面凹凸不平，并且有较厚氧化层，实验前首先车削外圆，保证工件外圆尺寸。对于较高体积分数的 SiC_P/Al

http://fhcxb.buaa.edu.cn

复合材料，切削速度不宜过大，实验主轴转速 $n=320$ r/min($v=115$ m/min)，进给量 $f=0.1$ mm/r，切削深度 $a_p=0.2$ mm。

每种冷却润滑条件下切削距离 $L=1\ 375$ m，每切削 137.5 m 进行一次刀具磨损测量，测量采用苏州欧卡 VTM-3020F 工具显微镜，并使用 FEI (Q45)型 SEM 观察刀具磨损微观形貌。为便于观察，将刀具浸泡在质量分数为 10wt%的 NaOH 溶液中腐蚀，去除黏附材料。

切屑根部试样通过正交切削获取，实验使用自行设计制造的弹簧式快速落刀装置，其最大加速度可达 6 480 m/s^2，当切削速度小于 300 m/min 时切屑根部获取成功率可达 90%以上。

表 1　聚晶金刚石(PCD)刀具主要几何参数

Table 1　Main geometric parameters of polycrystalline diamond (PCD) tool

Rake angle/(°)	Clearance angle/(°)	Minor clearance angle/(°)	Cutting edge angle/(°)	Corner radius/mm
5	7	7	90	0.4

1.2　冷却润滑方式

(1)干切削(Dry)：即切削过程中不使用任何冷却润滑物质；(2)切削油(Oil)：型号为 HOUGHTON MACRON 400 M-22，适合钢、铝及其他有色金属加工，使用时无需加水稀释，运动黏度为 22 mm^2/s(40℃)，切削供液量为 36 L/h；(3)乳化液(Emulsion)：型号为 HOUGHTON HOCUT 5759 AL-S，铝及铝合金加工专用，油水混合比例为 1∶10，切削供液量为 36 L/h；(4)微量润滑(MQL)：装置型号为 KINS KS-2100(双泵)，微量润滑油型号为 KINS KS-1108，铝加工专用，实验油气混合压力为 0.4 MPa，采用双混合喷嘴，分别对准刀具前后刀面，喷嘴出口距离刀具 10 cm，每个喷嘴油液消耗量为 83 mL/h；(5)液氮(LN_2)：由杜瓦罐供液，型号为 BTIC DLP-175MP，有效容积为 165 L，实验供液压力为 0.4 MPa，喷口直径为 2 mm，喷口距离刀尖 10 cm，对应靶距标定温度为 −165℃(室温 25℃)。

2　结果与讨论

2.1　PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料的边界磨损

图 1 为车削示意图，刀尖是主要参与切削部位。外圆车削 SiC_P/Al 复合材料过程中，后刀面磨

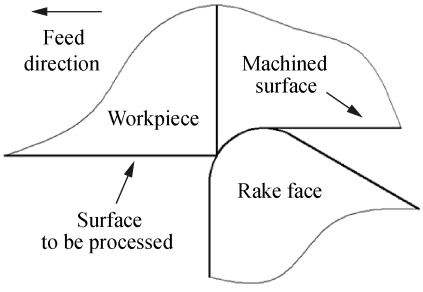


图 1　车削示意图

Fig. 1　Schematic diagram of turning

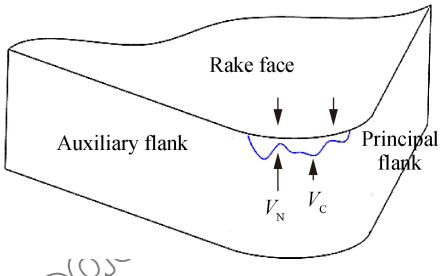


图 2　外圆车削 SiC_P/Al 复合材料后刀面磨损模型

Fig. 2　Model of flank wear during excircle turning SiC_P/Al composite

损带中间部位并没有明显的均匀磨损区域，如图 2 所示(V_N 为副后刀面边界磨损量；V_C 为靠近刀尖后刀面最大磨损量)，因此本文不考虑后刀面平均磨损量。

切削完成后($L=1\ 375$ m)，各冷却润滑条件下 PCD 刀具后刀面磨损情况如图 3 所示，Dry、Oil 和 Emulsion 切削均造成了大面积副后刀面边界磨损。此外，Oil 切削后刀面与待加工表面接触部位形成了“V”型深沟槽(如图 4 所示)。LN_2 和 MQL 切削边界磨损区域不明显。

图 5 为各切削条件下 PCD 刀具副后刀面与已加工表面接触部位边界磨损量 V_N 随切削距离变化趋势。可知，Oil 切削 V_N 最大，在切削初期 V_N 已大于 0.1 mm，且在切削距离达到 825 m 之前边界磨损曲线急剧上升，比 Emulsion 切削增加了 23.2%～50%。Emulsion 切削 V_N 仅次于 Oil，边界磨损增加过程相对平缓，但当切削距离为 275 m 时，V_N 已达到 0.1 mm。MQL 和 LN_2 切削造成的 V_N 远小于 Dry 和 Oil，且磨损过程均匀，随切削距离的增加变化不大，其中 MQL 切削 V_N 最小。

2.1.1　PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料边界磨损形成机制

为探究 SiC 颗粒对刀具磨损的影响，揭示其对

http://fhclxb.buaa.edu.cn

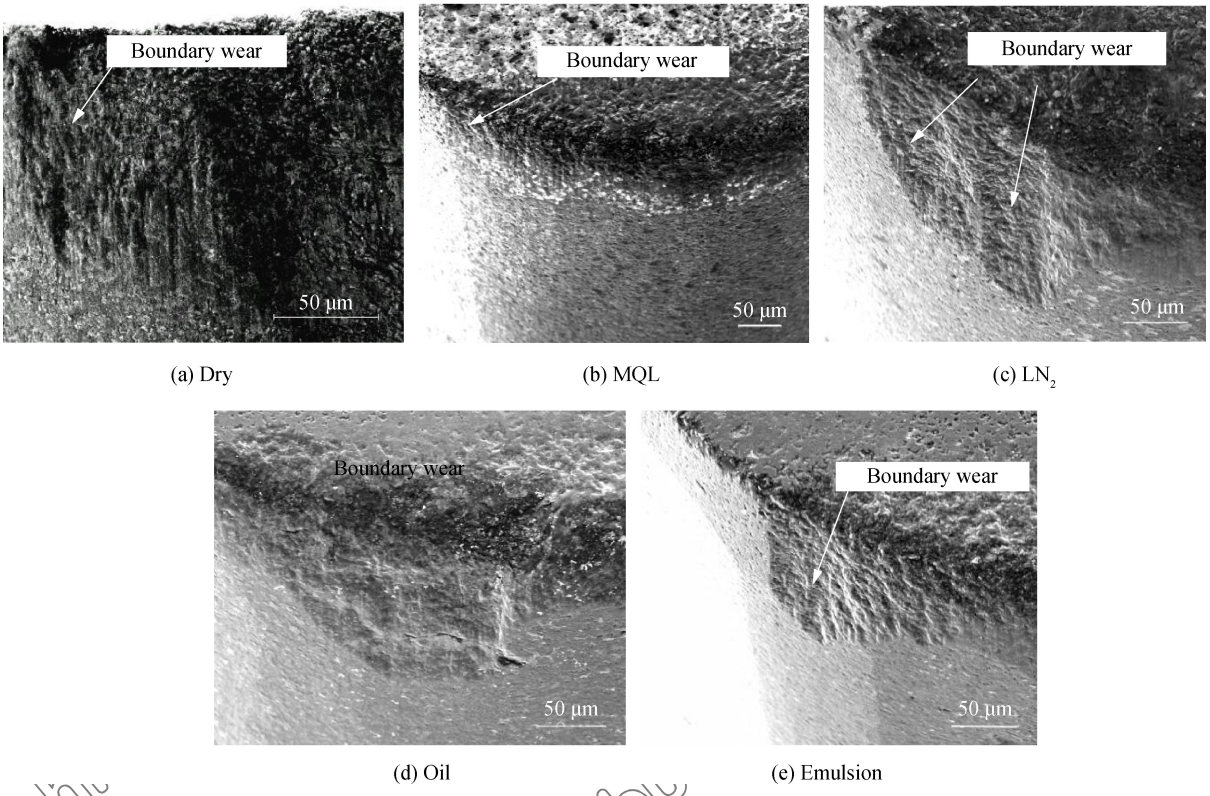


图 3　不同冷却润滑条件下 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料后刀面微观形貌 SEM 图像(腐蚀后)

Fig. 3　SEM images of flank face of PCD after cutting SiC_P/Al composite under different cooling and lubrication conditions (After etching)

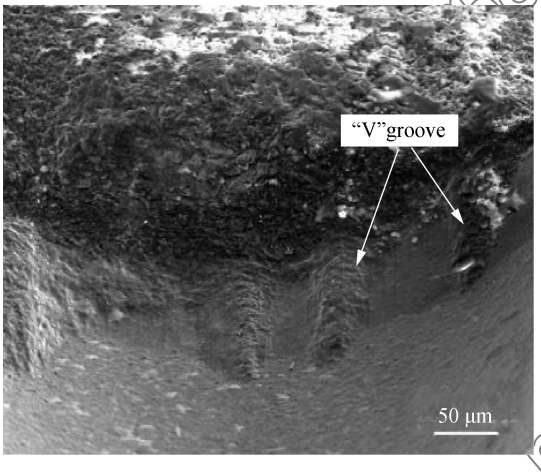


图 4　后刀面磨损微观形貌 SEM 图像(Oil)

Fig. 4　Micromorphology SEM image of flank wear (Oil)

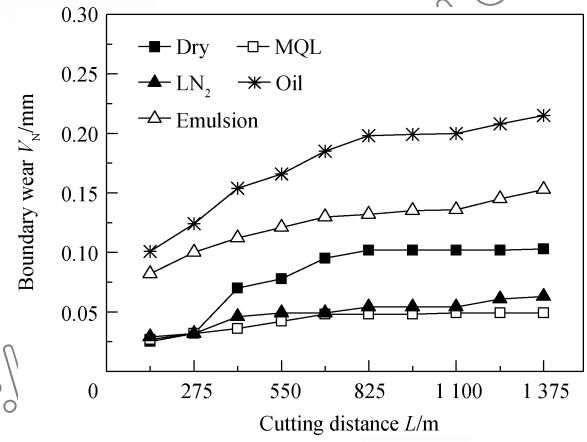


图 5　不同冷却润滑条件下 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料副后刀面边界磨损量

Fig. 5　Width of boundary wear of auxiliary flank of PCD tool after cutting SiC_P/Al composite under different cooling and lubrication conditions

刀具表面的作用机制，制取并观察了切屑根部试样。图 6 是 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料切屑根部试样金相组织照片，可见，已加工表面和切屑底部有明显的 SiC 颗粒凸起和脱落现象。切削 SiC_P/Al 复合材料过程中，凸起和脱落的 SiC 颗粒会对刀具表面产生微切削作用，造成平行于切削方向或切屑流动方向的沟槽，形成磨料磨损[18]，如图 7 所示。

图 8 是 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料边界磨损过程模型。可知，切削刚开始，切削刃比较锋利，副后刀面与已加工表面接触面积较小，在 SiC 颗粒的高频冲击下，PCD 晶粒发生脱落，形成微崩刃(见图 7)，随着崩刃范围增加，切削刃变钝，两

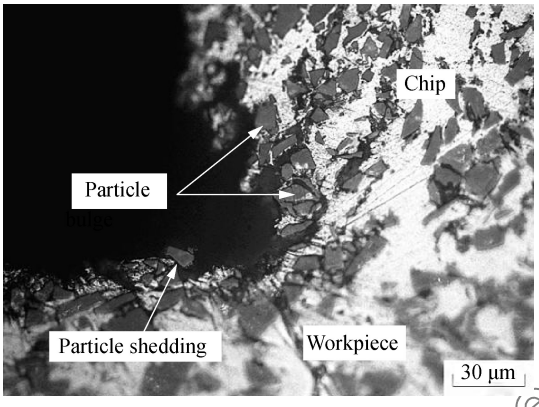
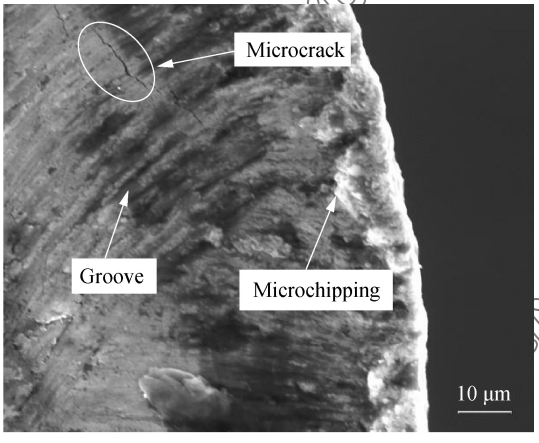
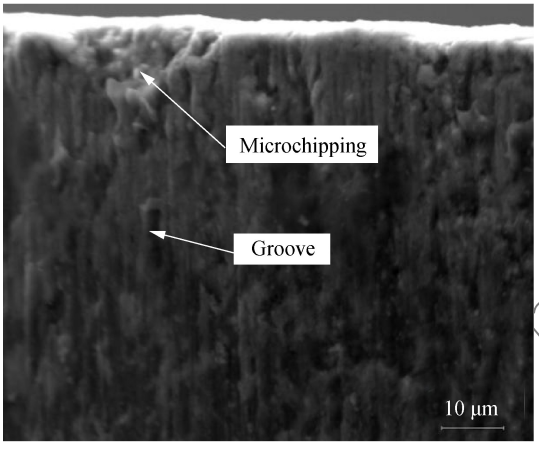


图 6　PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料切屑根部金相照片（切削速度 v=115 m/min，进给量 f=0.1 mm/r）

Fig. 6　Metallographic photo of chip root of SiC_P/Al composite after cutting using PCD tool (v=115 m/min, f=0.1 mm/r)



(a) Rake face



(b) Flank face

图 7　PCD 切削 SiC_P/Al 复合材料刀具表面 SEM 图像（Dry，切削距离 L=412.5 m）

Fig. 7　SEM images of PCD tool face in cutting SiC_P/Al composite (Dry, L=412.5 m)

表面接触面积增加。含有 SiC 颗粒的已加工表面对副后刀面产生剧烈摩擦（两相磨损），且未能及时排

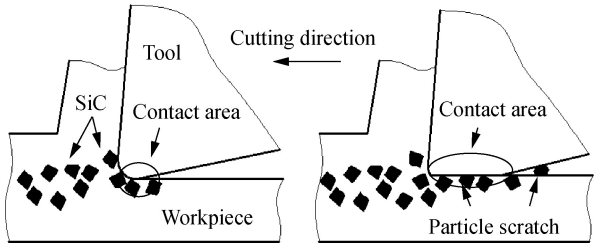


图 8　PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料边界磨损过程模型

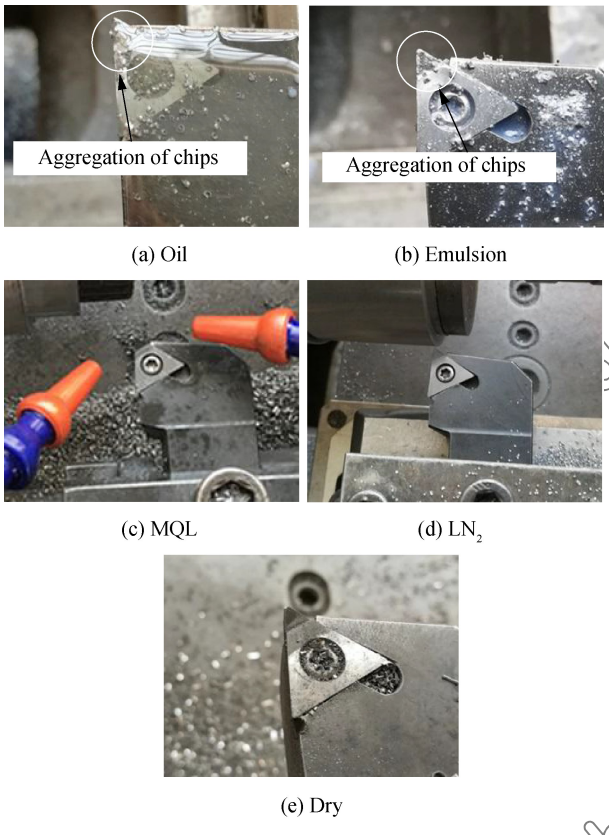
Fig. 8　Boundary wear process model of PCD tool in cutting SiC_P/Al composite

出切削区脱落的 SiC 颗粒会滞留在两表面之间，刀具表面受到严重刻划作用（三相磨损）[19-20]，两相磨损和三相磨损共同造成了副后刀面边界磨损。因此，可以从两方面降低副后刀面边界磨损：(1) 使润滑介质顺利进入切削区，在后刀面和已加工表面之间形成有效的润滑膜，减少两表面之间的实际接触面积，降低两相磨损发生几率；(2) 减少副后刀面与已加工表面之间 SiC 颗粒的滞留量，弱化三相磨损作用，从而减少边界磨损。

2.1.2　冷却润滑方式对 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料边界磨损的影响

图 9 为 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料不同冷却润滑方式的冲刷效果对比。Oil 和 Emulsion 切削采用浇注供液，靠切削液自身重力提供的冲刷效果有限，并且黏度大，工件材料 SiC 颗粒含量较高，不利于切屑和 SiC 颗粒及时排出切削区，导致切屑和脱落的 SiC 颗粒与切削液混合，积聚在切削区周围（见图 9(a)、9(b)），形成含有 SiC 颗粒的“磨粉浆”[31]。在“磨粉浆”和已加工表面共同作用下，副后刀面边界磨损非常明显。尽管 Oil 和 Emulsion 具有很好的润滑效果，但是滞留在切削区的 SiC 颗粒对边界磨损的影响使润滑效果难以体现。切削时 Oil 无需稀释直接使用，比稀释后的 Emulsion 运动黏度大，导致刀具表面积聚着更多切削液，对切屑和脱落的 SiC 颗粒冲刷效果更差，促进了“磨粉浆”的形成，滞留在切削区的 SiC 颗粒更多，三相磨损加剧，使切削初期 V_N 急剧增加。同时“磨粉浆”的形成也加剧了后刀面和待加工表面接触部位的磨损，造成“V”型深沟槽。根据王涛[6]和 Ding 等[7]的结论，有效的冷却效果会增加工件材料的强度和硬度，从而加剧刀具磨损。事实上，稀释后 Emulsion 的油水比例达到1∶10，比 Oil 拥有更佳的冷却效果，然而从图 3 和图 5 可知，Oil 切削

http://hcxb.buaa.edu.cn



(a) Oil (b) Emulsion

(c) MQL (d) LN_2

(e) Dry

图 9 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料不同冷却润滑方式的冲刷效果对比

Fig. 9 Flushing effects of different cooling and lubrication methods in cutting SiC_P/Al composite using PCD tool

比 Emulsion 造成了更严重的边界磨损，因此在 Oil 和 Emulsion 切削条件下，刀具边界磨损的对比中，冷却效果对切削 SiC_P/Al 复合材料刀具边界磨损的影响并未得到体现。因此可以认为是冷却润滑方式对 SiC 颗粒的冲刷能力决定了边界磨损程度，即相对于 Oil，Emulsion 对 SiC 颗粒的冲刷更有效，减少了边界磨损。

与 Oil 及 Emulsion 的使用方式不同，MQL 和 LN_2 采用压力喷吹供给，相比 Oil 和 Emulsion 的浇注供液具有更明显的冲刷效果，切屑和脱落的 SiC 颗粒能够被加压流体及时冲刷并带离切削区，减少滞留时间和滞留量(见图 9(c)和图 9(d))，不具备形成“磨粉浆”的客观条件，三相磨损减少，也避免了切削刃重复切削切屑和 SiC 颗粒[22]。由于脱落的颗粒是导致刀具破坏的主要因素[23-24]，因此，MQL 和 LN_2 切削条件下边界磨损并不明显。对于 MQL 切削，加压的雾化微量润滑液更容易进入刀-工件接触区，形成润滑膜，减少刀-工件实际接触面积，且用量极少，在保证润滑性的同时进一步减少了形成“磨粉浆”的可能，因此，MQL 切削可以有效减少边界磨损，V_N 值非常小。虽然 LN_2 作用使切削区的温度低至－165℃，拥有极佳的冷却性能，可以显著降低工件表面热软化倾向，增加工件材料的强度和硬度，但并没有对刀具造成明显的边界磨损；而且，LN_2 和 MQL 切削时的供给压力都是 0.4 MPa，具有相同的冲刷效果，由于 MQL 具备有效的润滑性能，考虑到 LN_2 本身并不具备润滑能力，且由图 5 可知，两种切削条件下 V_N 差别很小。因此，在 LN_2 和 MQL 切削条件下刀具边界磨损的对比中，能够证明切削 SiC_P/Al 复合材料时，LN_2 的冷却能力有效保持了刀具硬度，减少磨损，从而使 V_N 值与 MQL 切削的 V_N 值接近。

Dry 切削条件下，既没有造成明显的切屑和 SiC 颗粒在切削区周围的聚集现象(见图 9(e))，也不具备对切屑和 SiC 颗粒的冲刷能力，且缺乏润滑和冷却性能，因此其 V_N 值小于 Oil 和 Emulsion 切削且大于 MQL 和 LN_2 切削。

通过对比分析不同切削条件下的副后刀面边界磨损情况，认为能否实现对切削区崩碎切屑和脱落的 SiC 颗粒的有效冲刷是影响切削 SiC_P/Al 复合材料刀具边界磨损的主要原因。Oil 和 Emulsion 由于不能对切削区进行有效冲刷，造成了严重的副后刀面边界磨损。MQL 和 LN_2 具有良好的的冲刷效果，三相磨损减少，大大降低了刀具的边界磨损。MQL 的润滑性能和 LN_2 的冷却效果也能减少刀具边界磨损。

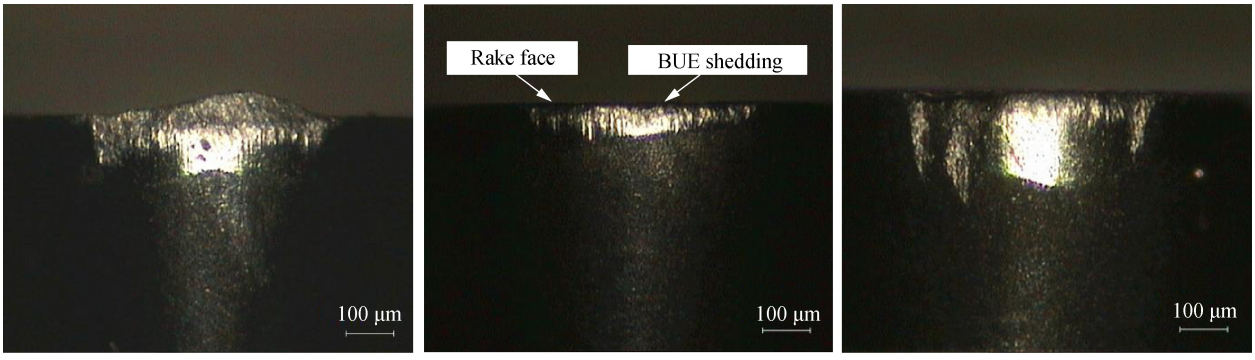
2.2 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料的刀具破损

当达到一定切削距离后，Dry、LN_2 和 Oil 三种切削条件下刀具均出现不同程度的局部碎裂状破损，且破损部位均发生在靠近刀尖主切削区，发生破损时的切削距离分别为 1 375 m、1 100 m 和 825 m。图 10 为 PCD 切削 SiC_P/Al 复合材料刀具破损前后形貌，可以看到，刀具破损前并没有明显的破损现象，即刀具的破损是在某个切削过程节点突然发生的。

2.2.1 刀具破损形成机制

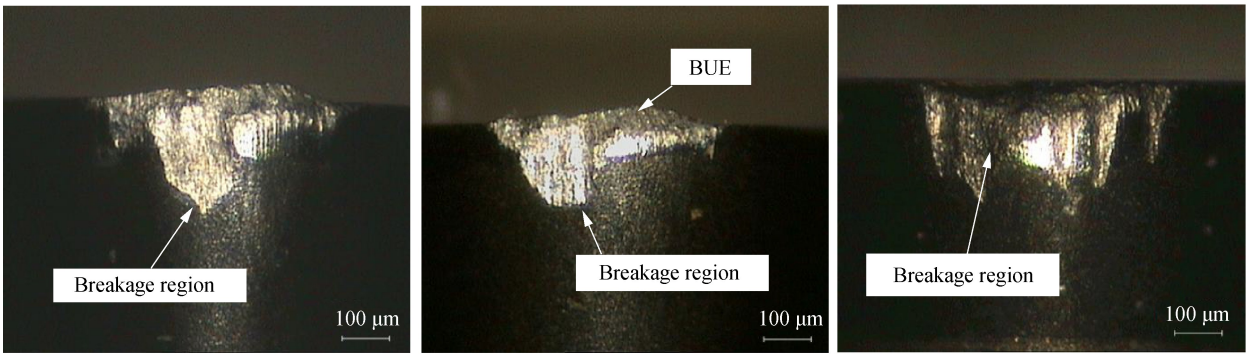
虽然刀具的破损具有一定随机性，但对于颗粒增强金属基复合材料，增强颗粒体积分数越高，刀具磨损越严重，更易发生崩刃和破损[25]。刀具发生破损前，首先会在前刀面距离切削刃一定距离处形成微裂纹(见图 7(a))，裂纹失稳扩展，导致应力

http://fhclxb.buaa.edu.cn



(a1) Dry, L=1 237.5 m　(a2) LN_2, L=962.5 m　(a3) Oil, L=687.5 m

(a) Before breakage



(b1) Dry, L=1 375 m　(b2) LN_2, L=1 100 m　(b3) Oil, L=825 m

(b) After breakage

图 10　PCD 切削 SiC_P/Al 复合材料刀具破损微观形貌 SEM 图像

Fig. 10　Morphology SEM images of tool breakage in cutting SiC_P/Al composite using PCD tool

集中，最终发生刀具破损。在切削 SiC 颗粒体积分数为 50vol%的 SiC_P/Al 复合材料过程中，由于 SiC 颗粒含量较高，刀具前刀面受到的刻划和冲击频率增大，再加上 SiC 颗粒的不均匀分布，使切削过程带有典型的断续切削特征，并产生崩碎切屑(如图 11 所示)，造成切削过程剧烈振动，容易在黏结剂-刀具晶粒界面处形成微裂纹[4]，破坏刀具。由于断续切削时，刀具受交变载荷作用，随着切削距离增加，容易引起机械疲劳裂纹；且切削与空切的交替变化，引起前刀面温度发生周期性变化，受到压、拉热应力交替作用，产生热裂现象[26]。在强烈的机械和热冲击综合作用下，很容易发生刀具局部破损。

图 11　PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料的切屑形态

Fig. 11　Morphology of chips in cutting SiC_P/Al composite using PCD tool

2.2.2　冷却润滑方式对刀具破损的影响

LN_2 切削时冷却温度较低，刀具表面冷、热温差增加，导致作用在刀具表面的热冲击加强；同时低温也减少了材料的热软化倾向，加强了 Al 基体对 SiC 颗粒的支撑作用，增加了切屑底部凸起的 SiC 颗粒对前刀面的刻划和冲击强度，导致黏附在前刀面的积屑瘤完全脱落(见图 10(a2))，既减少了对刀具的保护作用，又造成切削过程波动，加强了机械冲击。因此，LN_2 比 Dry 切削更早发生刀具破损。Oil 切削时，由于初期就产生了严重的边界磨损，造成刀尖部位尺寸减小，削弱了主要参与切削部位的强度，刀具耐机械和热冲击能力降低，当切

削距离达到 825 m 时发生了破损。与 Dry、LN_2 和 Oil 切削相比，MQL 和 Emulsion 切削拥有更加合适的冷却效果，能够适当降低切削温度，有利于减弱机械和热冲击作用，切削过程更加平稳，不易产生微裂纹，刀具磨损比较均匀，避免过早发生破损。

虽然 LN_2 有效的冲刷效果在一定程度上可以减少刀具表面受到磨料磨损，保护刀具，但通过分析认为，有效的冲刷效果并不能阻止刀具破损的发生，LN_2 的冷却效果是导致刀具提前破损的重要因素。Oil 由于不具备有效的冲刷能力，造成严重的边界磨损，间接导致了刀具提前破损。因此，在本文采用的冷却润滑方式中，具有最佳冷却效果的 LN_2 和最差冲刷效果的 Oil 都会加剧刀具破损。

2.3 后刀面磨损

图 12 为各切削条件下 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料后刀面最大磨损量 V_C 随切削距离变化趋势。由于 Dry、LN_2 和 Oil 三种切削条件下都在刀尖主切削区发生了严重的刀具破损，因此 V_C 曲线只给出了刀具破损前的部分。与各切削条件下边界磨损 V_N 不同，各 V_C 值之间差距没有 V_N 值那么明显，但仍可以看出 MQL 和 LN_2 切削 V_C 最小。

由图 1 和图 2 可知，靠近刀尖后刀面部位属于刀尖主切削区，该部位的高压环境使滞留在切削区周围的 SiC 颗粒难以进入刀-工件接触区，减少了三相磨损对后刀面磨损的影响，因此冲刷效果对后刀面磨损的影响没有得到明确体现，各切削条件下的刀具磨损以两相磨损为主，V_C 相差不大。

靠近刀尖后刀面部位散热条件较差，形成高温

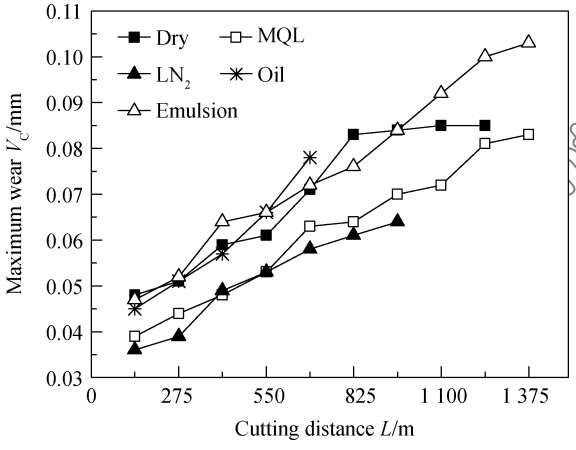


图 12 不同冷却润滑切削条件下 PCD 刀具切削 SiC_P/Al 复合材料后刀面最大磨损量

Fig. 12 Maximum width of flank wear of PCD tool after cutting SiC_P/Al under different cooling and lubrication conditions

环境，由于毛细作用进入切削区的液体会在切削区形成蒸汽膜，阻碍液体进入刀-工件接触区，且蒸汽膜会削弱对流传热强度[27]，降低冷却效果，因此 Oil 和 Emulsion 并不能有效发挥冷却润滑作用，导致 Oil、Emulsion 和 Dry 切削时后刀面磨损都以两相磨损为主，V_C 差别较小。MQL 切削时，经过加压的微量润滑液呈雾状喷出，高速雾状颗粒更容易突破蒸汽膜，在刀-屑和刀-工件接触面形成润滑膜[10]，减小了已加工表面和后刀面的接触面积，从而降低了凸起的 SiC 颗粒与后刀面的接触几率，减少磨损。LN_2 低温射流可以有效降低切削区温度，不利于蒸汽膜的产生，由于低温凝结在工件表面的水蒸气在毛细作用下更容易进入切削区，起到一定润滑作用，同时低温也使刀具保持了硬度，因此 LN_2 的使用可以减少后刀面磨损。

综上所述，切削区滞留的 SiC 颗粒不会加剧后刀面磨损，冷却润滑方式的冲刷效果对后刀面磨损的影响难以体现。MQL 和 LN_2 凭借更有效的润滑和冷却能力能够减少后刀面磨损。

3 结 论

（1）切削 SiC_P/Al 复合材料时，脱落的 SiC 颗粒在切削区的滞留会加剧三相磨损，是导致刀具边界磨损的主要原因，冷却润滑方式对脱落的 SiC 颗粒冲刷效果对刀具边界磨损有显著影响。切削油（Oil）和乳化液（Emulsion）的冲刷效果较差，有利于脱落的 SiC 颗粒滞留在切削区，促进了三相磨损的形成，加剧边界磨损。其中，Oil 由于较大的运动黏度，冲刷效果最差，导致边界磨损量比 Emulsion 增加了 23.2%～50%。微量润滑（MQL）和液氮（LN_2）具有优异的流体冲刷效果，可以及时将 SiC 颗粒带离切削区，有效减少边界磨损。

（2）SiC 颗粒体积分数为 50vol% 的 SiC_P/Al 复合材料切削过程具有典型的断续切削特征，会加剧刀具受到的机械冲击和热冲击，引起刀具破损。与干切削（Dry）比较，LN_2 的冷却效果会加强刀具受到的热冲击和切屑表面凸起的 SiC 颗粒刻划冲击作用，加速刀具破损。Oil 较差的冲刷能力增加了边界磨损，削弱了刀尖强度，从而间接导致刀具最早发生破损。MQL 和 Emulsion 具有更合适的冷却效果，不会增加热冲击和 SiC 颗粒的机械冲击作用，刀具磨损均匀，在实验切削距离内没有发生刀具破损。

http://tlclxb.buaa.edu.cn

(3) 脱落的 SiC 颗粒不会加剧后刀面磨损，因此冷却润滑方式的冲刷效果对后刀面磨损没有明显的影响，后刀面磨损以两相磨损为主。后刀面的高温高压环境使 Oil 和 Emulsion 无法充分发挥冷却润滑作用，和 Dry 切削条件下的后刀面磨损量非常接近。MQL 特殊的供液方式使其能够有效发挥润滑作用，降低工件表面凸起的 SiC 颗粒对刀具表面的划擦作用，减少后刀面磨损。LN_2 的冷却作用可以保持刀具硬度，减少后刀面磨损和边界磨损。

(4) 综合分析认为，MQL 具有优异的冲刷效果，可以有效发挥冷却润滑作用，能够显著降低 SiC 颗粒对刀具磨损的影响，在减少边界磨损、后刀面磨损及防止刀具破损方面都有积极作用，适合作为切削 SiC_P/Al 复合材料的首选冷却润滑方式。

参考文献：

[1] DAS D K, MISHRA P C, SINGH S, et al. Fabri cation and heat treatment of ceramic-reinforced aluminium matrix composites: A review[J]. International Journal of Mechanical & Materials Engineering, 2014, 9(1): 1-15.

[2] GOPALAKANNAN S, SENTHILVELAN T. Application of response surface method on machining of Al-SiC nano-composites[J]. Measurement, 2013, 46(8): 2705-2715.

[3] QUAN Y, ZHOU Z. Tool wear and its mechanism for cutting SiC particle-reinforced aluminium matrix composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100(1): 194-199.

[4] 葛英飞，徐九华，傅玉灿. 高速铣削 SiC_P/Al 复合材料时聚晶金刚石刀具的磨损机理[J]. 光学精密工程，2011，19(12)：2907-2918.
GE Y F, XU J H, FU Y C. Wear mechanisms of PCD tool in high-speed milling of SiC_P/Al composites[J]. Opitics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2907-2918 (in Chinese).

[5] 舒尔茨，阿贝勒. 高速加工理论与应用[M]. 北京：科学出版社，2010.
SCHULZ H, ABELE E. The high speed machining: Fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese).

[6] 王涛. 高体积分数 SiC_P/Al 复合材料高速铣削基础研究[D]. 北京：北京理工大学，2015.
WANG T. Fundamental study on high speed milling of high volume fraction SiC_P/Al composite[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015 (in Chinese).

[7] DING X, LIEW W Y H, LIU X D. Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools[J]. Wear, 2005, 259(7-12): 1225-1234.

[8] KANNAN S, KISHAWY H A. Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(1): 399-406.

[9] SADIK M I, GRENMYR G. Application of different cooling strategies in drilling of metal matrix composite (MMC)[J]. Materials Science Forum, 2016, 836-837: 3-12.

[10] SANKAR M R, RAMKUMAR J, ARAVINDAN S. Machining of metal matrix composites with minimum quantity cutting fluid and flood cooling[J]. Advanced Materials Research, 2011, 299-300: 1052-1055.

[11] 王阳俊. SiC_p/Al 复合材料高速铣削表面质量及刀具磨损研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.
WANG Y J. Research on surface quality and tool wear in high-speed milling of SiC_P/Al composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).

[12] KLOCKE F, KRIEG T. Coated tools for metal cutting-features and applications[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1999, 48(2): 515-525.

[13] 王大镇，冯培锋，李波，等. 切削 SiC 增强铝基复合材料时刀具的磨损形态及机理[J]. 高技术通讯，2010，20(11)：1184-1189.
WANG D Z, FENG P F, LI B, et al. Tool wear appearance and mechanism when cutting SiC reinforced aluminum matrix composites[J]. High Technology Letters, 2010, 20(11): 1184-1189 (in Chinese).

[14] HAKAMI F, PRAMANIK A, BASAK A K. Tool wear and surface quality of metal matrix composites due to machining: A review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 231(5): 739-752.

[15] 吉国强. SiC_P/Al 复合材料的切削加工性能研究[J]. 广东化工，2015，42(9)：1-3.
JI G Q. Research on machinability of SiC_P/Al composites[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(9): 1-3 (in Chinese).

[16] 韩荣第，姚洪权，严春华，等. SiC_p/2024Al 复合材料切削力与刀具磨损的试验研究[J]. 复合材料学报，1997，14(2)：71-75.
HAN R D, YAO H Q, YAN C H, et al. Experimental study on the cutting force and wear of lathe tool for SiC_P/2024Al composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1997, 14(2): 71-75 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

[17] NJUGUNA M J，GAO D. Experimental study on performance of CBN-coated，CBN-uncoated and PCD tools in turning Al 2124 SiC (45wt%) PMMC[J]. Key Engineering Materials，2013，567：27-31.

[18] EL-GALLAB M，SKLAD M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites part I：Tool performance[J]. Journal of Materials Processing Technology，1998，83(1-3)：151-158.

[19] RABINOWICZ E，TANNER R I. Friction and wear of materials[J]. Journal of Applied Mechanics，1966，33(2)：606-611.

[20] LI X，SEAH W K H. Tool wear acceleration in relation to workpiece reinforcement percentage in cutting of metal matrix composites[J]. Wear，2001，247(2)：161-171.

[21] BARNES S，PASHBY I R. Through-tool coolant drilling of aluminum/SiC metal matrix composite[J]. Journal of Engineering Materials & Technology，2000，122(4)：384-388.

[22] KANNAN S，KISHAWY H A. Tribological aspects of machining aluminum metal matrix composites[J]. Journal of Materials Processing Technology，2008，198(1)：399-406.

[23] LIN C B，HUNG Y W，LIU W C，et al. Machining and fluidity of 356Al/SiC_p composites[J]. Journal of Materials Processing Technology，2001，110(2)：152-159.

[24] DAVIM J P. Diamond tool performance in machining metal-matrix composites[J]. Journal of Materials Processing Technology，2002，128(1-3)：100-105.

[25] MUTHUKRISHNAN N，DAVIM J P. An investigation of the effect of work piece reinforcing percentage on the machinability of Al-SiC metal matrix composites[J]. Journal of Mechanical Engineering Research，2011，3(1)：15-24.

[26] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京：机械工业出版社，2002.
CHEN R Y. The principle of metal cutting[M]. Beijing：China Machine Press，2001 (in Chinese).

[27] 徐济鋆，鲁钟琪. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京：原子能出版社，1993.
XU J Y，LU Z Q. Boiling heat transfer and gas-liquid two-phase flow[M]. Beijing：Atomic Energy Press，2001 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn