

# Al-50wt% Si合金钻削孔壁形貌与棱边缺陷实验研究

牛秋林<sup>1</sup> 王星华<sup>1</sup> 张深圳<sup>2</sup> 荆露<sup>1</sup>

(1 湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201)

(2 中国航发湖南南方宇航工业有限公司, 株洲 412000)

**文 摘** 在Al-50wt% Si合金切削加工过程中,铝基体发生塑性变形而增强相硅颗粒发生脆性破坏,极易产生裂纹、崩边、毛刺等缺陷,属于一种典型的难加工材料。本文针对Al-50wt% Si合金钻孔质量差的问题,采用单因素实验方法,对Al-50wt% Si合金进行干式钻削,开展孔壁形貌和棱边缺陷研究。结果表明,当钻头进给量为0.08 mm/r时,切削速度从30 m/min增加到70 m/min,轴向力增加了15.8%,孔壁表面粗糙度增加了19.8%。低切削速度下孔出口棱边形貌以颗粒脱落、毛刺为主,随着切削速度增加,孔出口棱边形貌以基体韧性断裂为主,孔出口棱边缺陷的径向宽度增大;当钻头切削速度为50 m/min时,进给量从0.04 mm/r增加到0.12 mm/r,轴向力整体上增大了74.3%,孔壁表面粗糙度增大了50.2%,低进给量下孔出口侧出现凸起变形和基体韧性断裂现象,随着进给量增加凸起变形减少,孔出口棱边缺陷的径向宽度先减少后增大,在进给量为0.08 mm/r时获得最小径向宽度。

**关键词** Al-50wt% Si合金, 钻削, 孔壁质量, 棱边形貌

中图分类号: TG506

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.004

## Experimental Study on Drilling Hole Wall Morphology and Edge Defects of Al-50wt% Si Alloy

NIU Qiulin<sup>1</sup> WANG Xinghua<sup>1</sup> ZHANG Shenzheng<sup>2</sup> JING Lu<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 AECC Hunan South Astronautics Industry Co., Ltd, Zhuzhou 412000)

**Abstract** During the cutting process of Al-50wt% Si alloy, plastic deformation of aluminum matrix and brittle failure of reinforced silicon particles easily lead to crack, edge collapse, burr and other defects, which is a typical difficult to machine material. In order to solve the problem of poor drilling quality of Al-50wt% Si alloy, this paper adopts single factor experimental method to dry drill Al-50wt% Si alloy, and research on the morphology of hole wall and edge defects. The results show that when the drill feed rate is 0.08 mm/r, the cutting speed increases from 30 m/min to 70 m/min, the axial force increases by 15.8%, and the hole wall surface roughness increases by 19.8%. At lower cutting speeds, the edge appearance at the hole outlet is dominated by particle shedding and burrs. With the increase of cutting speed, the edge appearance at the hole outlet is dominated by matrix ductile fracture, the radial width of edge defect at hole outlet increases; When the drill cutting speed is 50 m/min, the feed rate increases from 0.04 mm/r to 0.12 mm/r, the axial force increases by 74.3% on the whole, and the hole wall surface roughness increases by 50.2%. At lower feed rates increases, the convex deformation and matrix ductile fracture occur at the outlet side of the hole. As the feed rate, the convex deformation decreases, the radial width of the edge defect at the hole outlet decreases first and then increases, and the minimum radial width is obtained when the feed rate is 0.08 mm/r.

**Key words** Al-50wt% Si alloy, Drill, Hole wall quality, Edge topography

收稿日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(52075168); 湖南省研究生科研创新项目(CX20221051)

第一作者简介: 牛秋林, 教授, 博士生导师, 主要从事难加工材料高速切削与超声振动辅助加工方面的研究。E-mail: qlniu2009@163.com

## 0 引言

50wt%的高硅铝合金(Al-50wt% Si合金)由于具有比强度和比刚度高、密度小、线胀系数低、热稳定性好等优异的物理力学性能,被广泛应用于航空航天等高端制造领域<sup>[1-2]</sup>。Al-50wt% Si合金含有大量的块状初晶硅,其自身的脆硬性在加工过程中将导致划痕、凹坑、硅颗粒析出等缺陷,从而降低材料的切削加工性,属于典型的难加工材料。鉴于Al-50wt% Si合金良好的机械性能和广泛的应用价值,探究该材料的切削机理、提升其切削加工性对解决该材料的高质高效加工难题具有重要现实意义<sup>[3-4]</sup>。

目前针对高硅铝合金的研究大多集中在铣削方面。赵国龙<sup>[5]</sup>使用金刚石刀具铣削Al-50wt% Si合金材料,发现金刚石涂层刀具的失效形式主要是涂层剥落和磨粒磨损,在保证刃口强度的前提下可以适当减小切削刃圆弧半径以提高加工表面质量。JING<sup>[6]</sup>将响应面法、人工神经网络和遗传算法相结合,确定了Al-50wt% Si合金在精密铣削中表面粗糙度 $R_a$ 和进给力 $F_f$ 最小的最佳切削条件。李召群<sup>[7]</sup>在切削共晶硅铝合金时,发现当刀具发生磨粒磨损且随着切削时间的增加磨损程度加剧时,会发生刀具材料剥落、切削刃崩刃等现象。

在钻削这种半封闭式加工工艺中,钻削材料时会产生大量切削热,刀尖上易产生积屑瘤。积屑瘤频繁地生长与脱落,以及硅结晶的破碎与脱落会使材料的加工表面粗糙度增大。因此,钻削后得到的孔壁粗糙度和加工精度不高。对于硅铝合金钻削研究,HANYU<sup>[8]</sup>发现涂覆多层涂层的钻头切削性能优于单层涂层,同时,随着刀具前角的增大,施加在刀刃涂层上的机械载荷减小。HAMED<sup>[9]</sup>等认为刀具在钻削硅铝合金时,硅颗粒对刀具的高频冲击和切削过程中热冲击作用将导致刀具剧烈磨损,并且显著恶化硅铝合金加工表面质量。贾轶<sup>[10]</sup>利用多种固体

润滑涂层钻头对硅铝合金进行干式钻削,发现钻削过程中粘结现象明显减少,排屑顺利,钻孔质量较好且尺寸分散范围较小。BRAGA<sup>[11]</sup>使用少量润滑剂和金刚石涂层刀具钻削硅铝合金,获得了较好的孔壁质量并发现适当增大刀尖半径可有效提高硅铝合金切削加工性。AKHAVAN<sup>[12]</sup>使用无涂层、TiAlN涂层和AlTiN涂层硬质合金刀具对高硅铝合金进行钻削,探究了3种刀具的切削性能和磨损机理,发现扩散、塑性变形、磨损和断裂是刀具的主要磨损机制。MARTINS<sup>[13-14]</sup>探究了涂层类金刚石高速钢钻头钻削铝硅合金过程中与刀具磨损相关的粗糙度和形状误差,发现切削速度可以直接影响刀具侧面磨损和钻削后的表面粗糙度、直径变化。

综上所述,目前,对于高硅铝合金钻削方面,学者们注重刀具磨损机理,而对硅铝合金的钻削机理仍缺乏深入研究,特别是对于高硅铝合金钻孔质量的调控研究不足,对钻削过程中出现的有关现象缺乏系统分析。现如今切削液对环境产生有害的影响,因此,“无润滑加工”是当前的绿色制造目标,铝合金的干钻是可作为一种环保的替代加工方案,但加工过程中存在耐热性损失、材料黏附力和化学元素扩散损失等问题,很大程度地影响了钻孔质量<sup>[15-16]</sup>。有鉴于此,本文采用硬质合金刀具对Al-50wt% Si合金进行干式钻削,对钻削后的孔壁形貌与棱边缺陷实验研究,以期通过分析该材料在钻削过程中的关键影响因素,揭示硅铝合金钻削机理,为改善高硅铝合金钻削质量提供实验支撑。

## 1 实验

### 1.1 工件材料与刀具

工件材料为硅质量分数为50%的颗粒增强型铝基复合材料:Al-50wt% Si合金,其力学性能如表1所示。钻头为硬质合金麻花钻,型号为1101SC05-0600,直径为6 mm。

表1 Al-50wt% Si合金性能参数

Tab. 1 Performance parameters of Al-50wt% Si alloy

线胀系数(25℃) / $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	热导率(25℃) / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	泊松比	延伸率 /%	弹性模量 /GPa
11.5	140	25	220	210	0.28	<1	108

### 1.2 实验方案设计

本文采用干式钻削,钻削实验在KVC800立式加工中心上进行,钻削过程中采用KISTER 9253B测力仪对钻削轴向力进行测量。实验装置见图1。钻削实验参数为:主轴转速 $n=1\ 600、2\ 130、2\ 660、3\ 190、3\ 720\ \text{r/min}$ ,进给量 $f=0.04、0.06、0.08、0.1、0.12\ \text{mm/r}$ 。钻削实验分为两个阶段,第一阶段:固定进给

量 $f=0.08\ \text{mm/r}$ ,进行主轴转速单因素实验;第二阶段:固定主轴转速 $n=2\ 660\ \text{r/min}$ ,进行进给量单因素实验。实验结束后,利用JITAI820表面粗糙度测量仪测量孔内壁表面粗糙度,每组参数下重复测量5次,结果取平均值。采用SU3500扫描电镜观察孔壁形貌,并利用VHX-500FE超景深光学显微镜观察孔出口形貌。



图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

## 2 结果与讨论

### 2.1 钻削轴向力

在钻削 Al-50wt% Si 合金过程中,参与切削的主要部分为两条主切削刃和一条横刃。由于钻削加工是在半封闭状态下进行,因此刀具横刃在进给过程中会受到很大的挤压作用,并且有小部分切屑不易排出。钻削轴向力受诸多因素的影响,主要由工件材料的变形、钻头与工件之间的摩擦而产生。在初始钻削 Al-50wt% Si 合金时钻削轴向力逐渐上升;在高进给量下,轴向力达到稳定后会突然出现高振幅的变化;最后钻削轴向力会逐渐减少至最低点。图2为当进给量分别为0.06、0.12 mm/r时钻削过程的各阶段轴向力信号。在钻削过程中,随着钻头逐步钻入工件,刀具和工件的接触面积逐渐变大,钻削轴向力逐渐增大;在高进给量下,切屑厚度的增加会显著影响切屑的连续流动,钻削过程中产生的部分切屑不能及时排出,从而出现切屑堵塞现象,轴向力突然

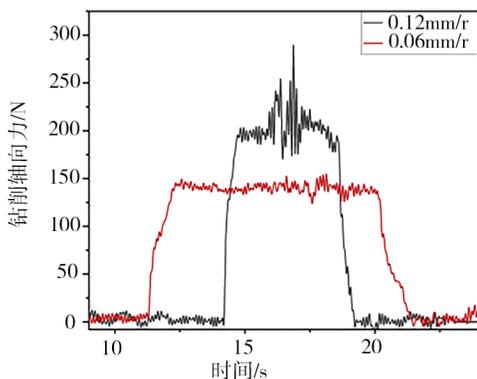


图2 各阶段轴向力变化图

Fig. 2 Variation of axial force at each stage

增加<sup>[17]</sup>;当钻头逐步钻出工件时,刀具和工件的接触面积逐渐变小,钻削轴向力逐渐减少到最低。轴向力随切削速度和进给量的变化趋势见图3和图4。

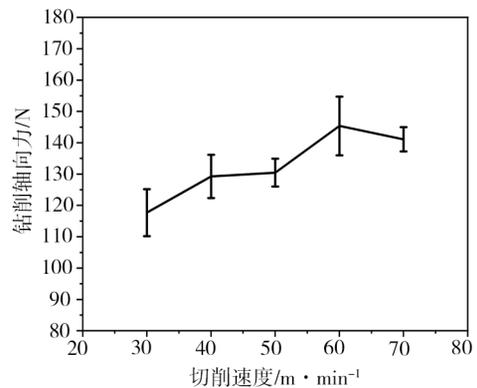


图3 切削速度对轴向力的影响曲线

Fig. 3 Influence curve of cutting speeds on axial force

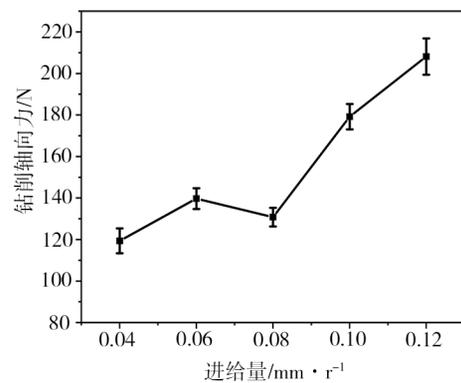


图4 进给量对轴向力的影响曲线

Fig. 4 Influence curve of feed rates on axial force

当进给量一定时,钻削轴向力随着切削速度的增大有缓慢增大的趋势,说明切削速度对钻削轴向

力的影响不大。当切削速度一定时,钻削轴向力随着进给量的增加整体上呈现增大趋势。

## 2.2 孔表面质量

### 2.2.1 孔壁形貌

钻削 Al-50wt% Si 合金时,硬质硅颗粒的存在会导致钻削后的孔壁表面出现颗粒拔出、划痕、凹坑、切屑粘结、切屑涂抹、基体撕裂等缺陷。图 5 为切削速度对 Al-50wt% Si 合金孔壁表面粗糙度的影响,可知,当进给量一定时,表面粗糙度随着切削速度的增加而增加。不同切削速度下 Al-50wt% Si 合金孔壁的表面形貌如图 6 所示。

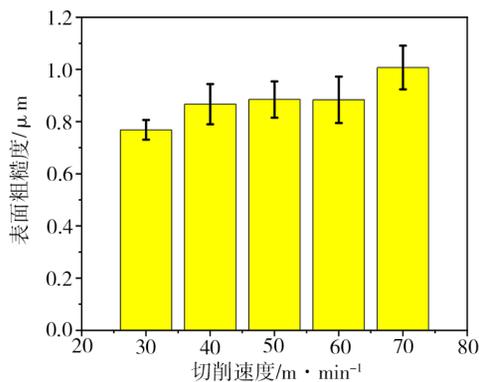


图 5 切削速度对表面粗糙度的影响

Fig. 5 Effect of cutting speeds on surface roughness

当切削速度为 30 m/min 时,已加工孔壁表面出现划痕和凹坑等缺陷;切削速度为 40~50 m/min 时,已加工孔壁表面出现硅颗粒粘附、划痕和切屑粘结现象;当切削速度大于 60 m/min 时,孔壁表面存在明显的基体撕裂现象和切屑涂抹现象,表面粗糙度明显增加。刀具和硅颗粒之间的接触频率增加会导致刀具磨损速率增加<sup>[13-14]</sup>。因此,可以发现,在切削速度为 30 m/min 时,切削温度低,刀具磨损速率小,切削刃较锋利,硅颗粒易被切削刃拔出或切断,使加工表面形成凹坑,表面粗糙度增大。随着切削速度的增加,铝基体随着温度的升高而变软,主切削刃的最外侧在旋转过程中与孔壁摩擦挤压会引起划痕缺陷。在高切削速度下,Al-50wt% Si 合金中大量硅颗粒的高频刻划及断续冲击会导致刀具磨损速率变大,切削刃钝化,部分硅颗粒无法被切削刃切断,而是受到了刀具的推挤作用,使硅颗粒被拔出基体。因此,切削速度增大到 70 m/min 时,部分脱落的硅颗粒在刀具的接触压力下对孔壁表面造成损伤,形成基体撕裂现象,导致表面粗糙度增加。

当切削速度为 50 m/min 时,进给量对孔壁表面粗糙度的影响趋势如图 7 所示,可知,当切削速度一定时,表面粗糙度随着进给量的增加而增加。同时,Al-50wt% Si 合金的孔壁表面形貌随着进给量的增大,孔壁表面逐渐恶化,如图 8 所示。

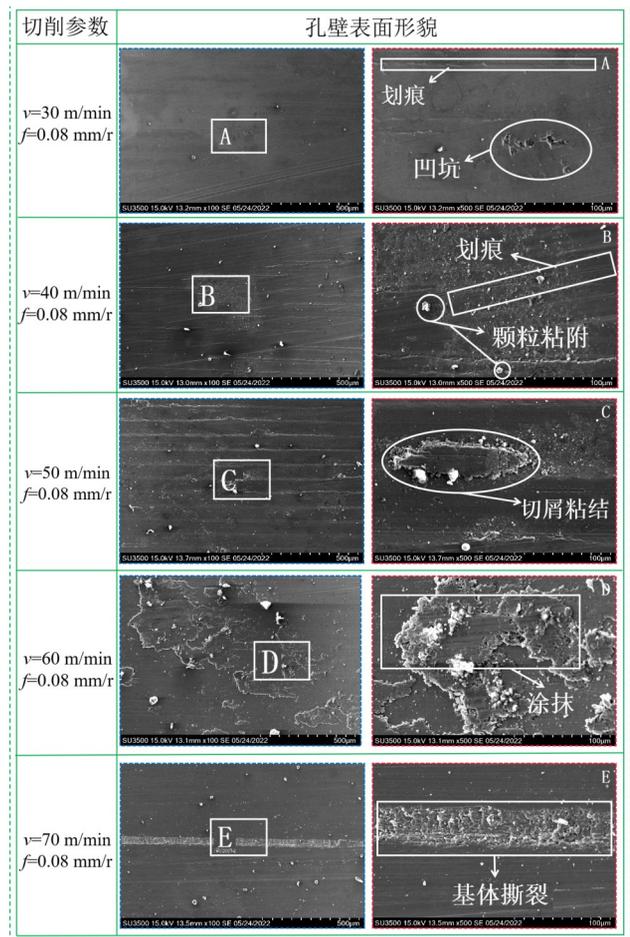


图 6 不同切削速度下孔壁表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of the wall of the hole different at cutting speeds

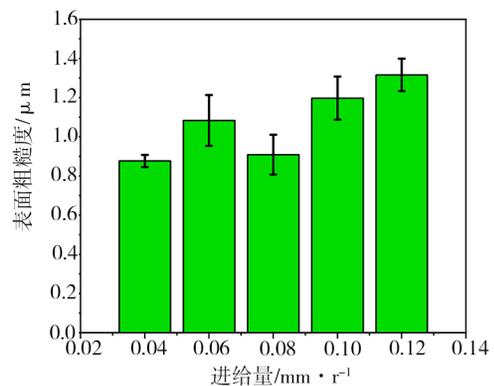


图 7 进给量对表面粗糙度的影响

Fig. 7 Effect of feed rates on surface roughness

当进给量为 0.04 mm/r 时,孔壁出现表面花斑的现象;当进给量超过 0.06 mm/r 时,孔壁出现基体撕裂现象,且进给量的增加使得孔壁基体撕裂的宽度变大。原因在于进给量对切削温度影响较大,当切削温度过高时,硅颗粒与铝基体的结合强度会降低,使硅颗粒容易被拔出或压入。另一方面,单位长度内低进给量的刀具与硅颗粒的接触频率高,刀具磨损速率会增加。当进给量为 0.04 mm/r 时,大量硅颗粒被拔出或压入基体,形成表面花斑;而随着进给量

的增加,切削温度升高,硅颗粒与铝基体的结合强度降低,切削力超过了颗粒与基体的结合强度从而脱落,脱落下来的硅颗粒在孔壁表面相互摩擦并在较高的刀具接触压力下会对孔壁表面造成损伤,形成大面积的基体撕裂。进而,当进给量达到0.12 mm/r时,基体撕裂宽度到达最大,显著影响孔壁表面粗糙度。

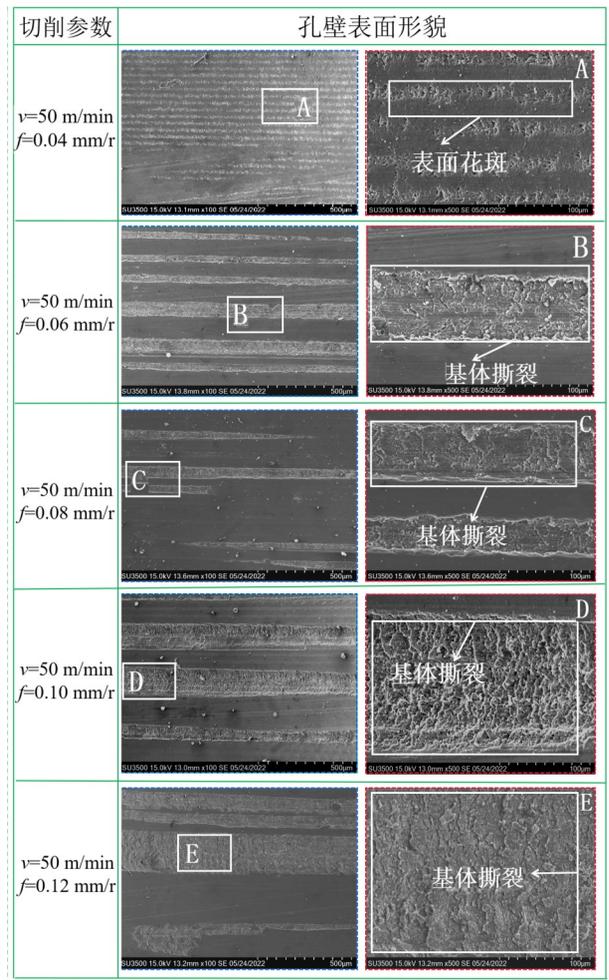


图8 不同进给量时孔壁表面形貌  
Fig. 8 Surface morphology of the wall of the hole at different feed rates

### 2.2.2 孔出口棱边缺陷

图9展示了进给量为0.08 mm/r时不同切削速度下获得的硅铝合金出口棱边缺陷。可知在切削速度为30 m/min时,硅铝合金的孔出口出现颗粒脱落、毛刺现象。当切削速度大于40 m/min时,硅铝合金孔出口毛刺现象消失,开始出现基体韧性断裂现象,且基体韧性断裂宽度随切削速度的增加而增大。原因在于切削速度为30 m/min时,切削刃和硅颗粒的接触频率低,刀具磨损速率小。孔出口边缘处的硅颗粒和铝基体的结合处承受的载荷超过了基体与颗粒结合面的结合强度,使硅颗粒被剪切或推挤,因此出现颗粒脱落和出口毛刺的现象。当切削速度为40~

70 m/min时,刀具磨损速率会增大,硬质合金刀具切削性能下降,磨钝的切削刃在出口处的棱边剪切作用下下降,轴向力使得趋于脆性的高硅铝合金材料出口棱边产生材料脱落,形成基体韧性断裂现象<sup>[18]</sup>。因此,在切削速度为30 m/min时,钻削出口棱边缺陷主要以颗粒脱落为主,孔出口棱边质量较好,随着切削速度的持续增大,出口棱边开始出现基体韧性断裂现象,孔出口棱边缺陷的径向宽度增加,孔出口棱边质量变差,如图10所示。

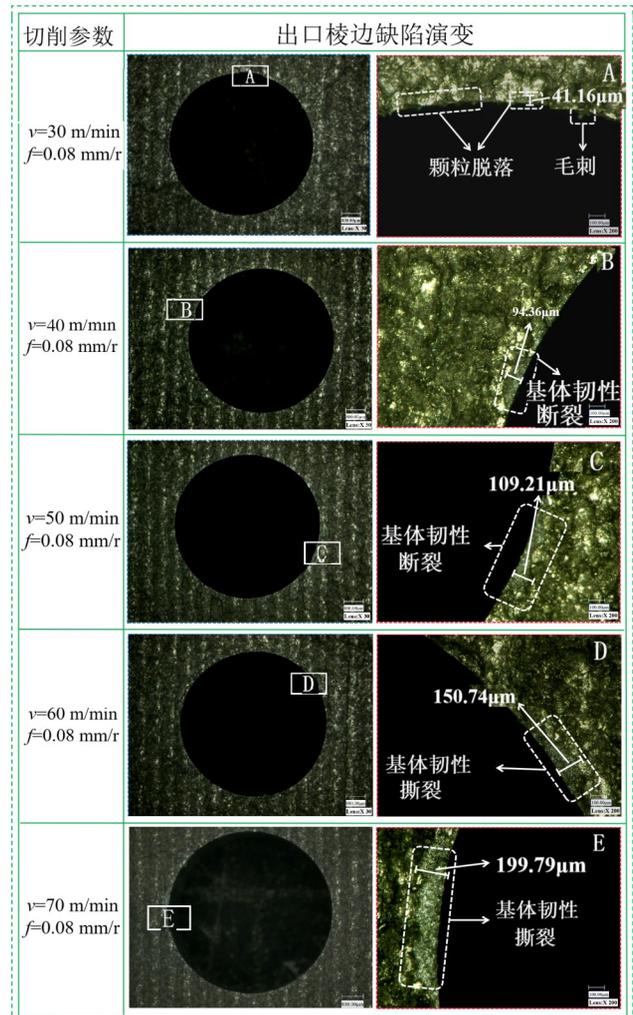


图9 受切削速度影响的出口棱边缺陷演变过程  
Fig. 9 Evolution process of outlet edge defects affected by cutting speeds

图11展示了切削速度为50 m/min时,不同进给量下的棱边缺陷形貌。在进给量为0.04~0.06 mm/r时,孔出口棱边出现了凸起变形和基体韧性断裂现象。当进给量大于0.08 mm/r时,凸起变形现象消失,且基体韧性断裂范围随进给量的增加而增大。原因是进给量为0.04~0.06 mm/r时,刀具磨损速率会变大,刀具对颗粒的剪切作用下降,且轴向力使得趋于脆性的高硅铝合金材料出口棱边产生小面积的材料脱落,孔出口棱边出现凸起变形和基体韧性断

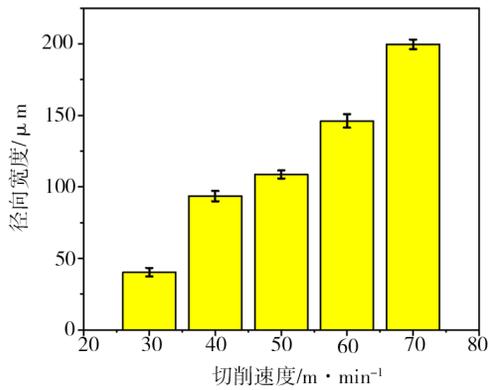


图 10 切削速度对出口棱边缺陷径向宽度的影响

Fig. 10 Effect of cutting speeds on radial width of edge defects at exit

料发生基体韧性断裂<sup>[19]</sup>,孔出口棱边缺陷的径向宽度随进给量增大而增大。因此,在0.04~0.06 mm/r的低进给量下,棱边缺陷有凸起变形现象和基体韧性断裂现象,进给量为0.08~0.12 mm/r时,基体韧性断裂宽度增加,孔出口棱边缺陷的径向宽度呈现出先减少后增大的趋势,如图12所示。

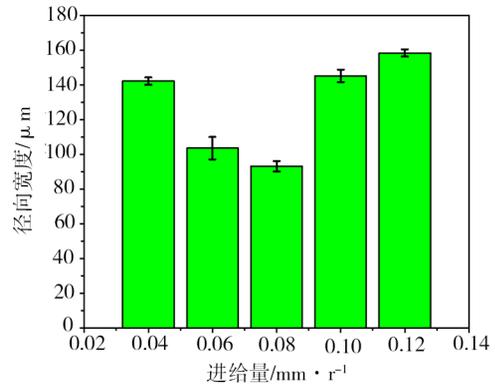


图 12 进给量对出口棱边缺陷径向宽度的影响

Fig. 12 Effect of feed rates on radial width of edge defects at exit

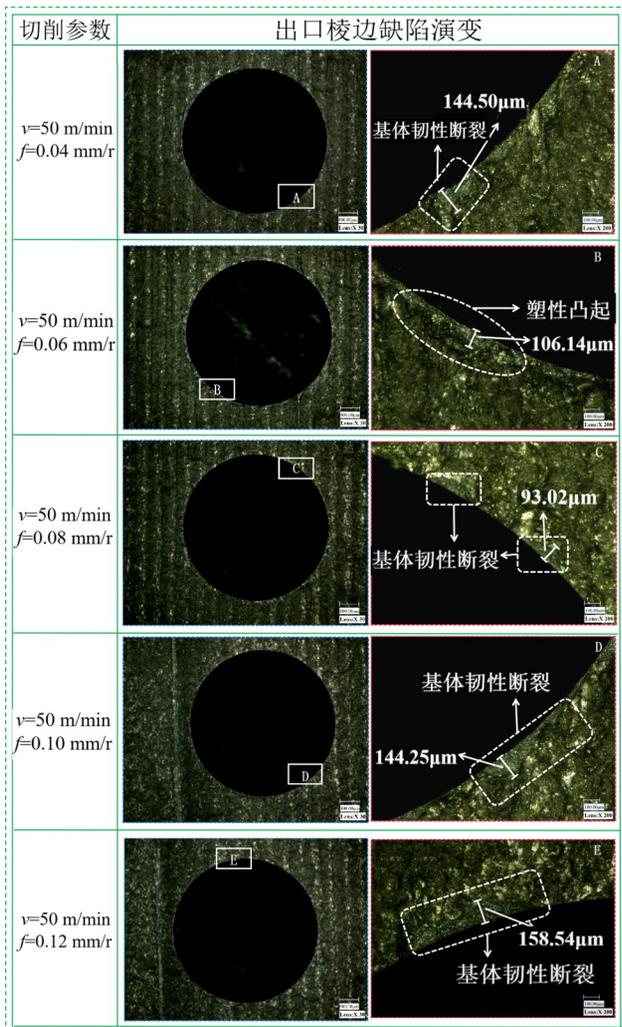


图 11 受进给量影响的出口棱边缺陷演变过程

Fig. 11 Evolution process of outlet edge defects affected by feed rates

### 3 结论

本文针对Al-50wt% Si合金开展了干式钻削实验研究,分析了切削参数对轴向力、孔壁形貌和孔出口棱边缺陷的影响,获得的主要结论如下。

(1) Al-50wt% Si合金钻削过程中,轴向力随进给量的增加整体呈增加趋势,且轴向力随切削速度的增加缓慢增加。

(2) 钻削过程中颗粒-刀具间的相互作用会直接影响表面粗糙度,且基体撕裂缺陷对孔内壁表面粗糙度影响最大。进给量越大,基体撕裂宽度越明显。当采用切削速度为50 m/min、进给量为0.04 mm/r的切削参数时,可有效减少基体撕裂宽度,降低孔壁表面粗糙度。

(3) 当切削速度为50 m/min、进给量为0.04~0.06 mm/r时,孔出口侧出现凸起变形和基体韧性断裂现象。进给量为0.08~0.12 mm/r时,基体韧性断裂现象增加,孔出口棱边缺陷的径向宽度呈现先增加后减小的趋势。因此,当切削速度为50 m/min、进给量为0.08 mm/r时,可以减少孔棱边损伤;当进给量为0.08 mm/r时,随着切削速度增加,棱边缺陷由颗粒脱落和毛刺为主转变为基体韧性断裂,基体韧性断裂的宽度随着切削速度增加而增大。因此,当进给量为0.08 mm/r时,切削速度为30 m/min时,孔出口棱边缺陷的径向宽度最小。

### 参考文献

[1] KUN Y U, SHAO J L, Chen L S, et al. Microstructure characterization and thermal properties of hypereutectic Si - Al alloy for electronic packaging applications [J]. Transactions of 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第6期

裂的现象,此时孔出口棱边缺陷的径向宽度较大。当进给量为0.08~0.12 mm/r时,钻削轴向力随进给量明显增加,而Al-50wt% Si合金材料本身拥有高含量的硅颗粒,材料脆性大。此时,孔出口边缘处的材料会受切削温度的影响,硅颗粒和铝基体结合强度降低,高轴向力使材料更容易被刀具推挤带出,使材

Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6):1412-1417.

[2] LI Y X, LIU J Y, Wang W S, et al. Microstructures and properties of Al-45%Si alloy prepared by liquid-solid separation process and spray deposition [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4):970-976.

[3] CHEN Z, ZHOU H, YAN Z, et al. Machining characteristics of 65vol% SiC<sub>p</sub>/Al composite in micro-WEDM [J]. Ceramics International, 2021, 47(10): 13533-13543.

[4] NIU Q L, JING L, Li C P, et al. Study on effects of tool nose radius on the formation mechanism of edge defects during milling SiC<sub>p</sub>/Al composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114 (7) : 2261-2269.

[5] 赵国龙, 信连甲, 李亮. 高硅铝合金的金刚石涂层刀具铣削损伤机理研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(2): 153-159.

ZHAO G L, XIN L J, LI L. Study on damage mechanism of high-volume fraction silicon aluminum alloy milled with diamond coated cutting tools [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(2): 153-159.

[6] JING L, NIU Q L, ZHAN D L, et al. Predictive modeling of surface roughness and feed force in Al-50wt% si alloy milling based on response surface method and various optimal algorithms [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022: 1-17. (on line)

[7] 李召群, 朱振国, 周前进, 等. 金刚石涂层刀具切削硅铝合金时磨损机理探讨[J]. 工具技术, 2011, 45(08): 40-42.

LI Z Q, ZHU Z G, ZHOU Q J, et al. Discussion of wear mechanism in cutting silicon alloy with diamond coated tools [J]. Tool Engineering, 2011, 45(08):40-42.

[8] HANYU H, KAMIYA S, ODAGI H, et al. Development of high performance diamond-coated drills for cutting high silicon aluminum alloy [J]. Thin Solid Films, 2002, 413(1-2): 139-146.

[9] HAMED M, ZEDAN Y, Samuel A M, et al. Effect of tool quality on the machinability characteristics of Al-Cu and Al-Si cast alloys [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5):1-10.

[10] 贾轶. 涂层刀具干式钻削铝硅合金的切削性能研究 [D]. 西安理工大学, 2006.

JIA Y. Research on cutting performance of coated tools

under dry drilling Al-Si Alloy [D]. Xi'an University of Technology, 2006.

[11] BRAGA D U, DINIZ A E, Miranda G, et al. Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(1):127-138.

[12] AKHAVAN F A, Sharif S, IDRIS M H. Performance and wear mechanisms of uncoated, TiAlN, and AlTiN-coated carbide tools in high-speed drilling of Al-Si alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(9): 2671-2684.

[13] MARTINS P S, JUNIOR P A A M, CARNEIRO J R G, et al. Study of diamond-like carbon coating application on carbide substrate for cutting tools used in the drilling process of an Al-Si alloy at high cutting speeds [J]. Wear, 2022, 498: 204326.

[14] MARTINS P S, CARNEIRO J R G, BA E C T, et al. Study on roughness and form errors linked with tool wear in the drilling process of an Al-Si alloy under high cutting speed using coated diamond-like carbon high-speed steel drill bits [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 711-719.

[15] GHOSH S, RAO P V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 100: 17-34.

[16] BURANSKA E, BURANSKY I. Cutting environment impact on the aluminium alloy machining (dfa) [C]//29<sup>th</sup> DAAAM International Symposium. 2018: 1158-1163.

[17] KARNAN B, UTHAYAKUMAR M, KUMARAN T, et al. Drilling study on lightweight structural Mg/SiC composite for defence applications [J]. Defence Technology, 2019, 15(4): 557-564.

[18] NAN X, XIE L, ZHAO W. On the application of 3D finite element modeling for small-diameter hole drilling of AISI 1045 steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9):1927-1939.

[19] 赵鹏, 黄树涛, 周丽. 电镀金刚石钻头钻削高体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料入口棱边缺陷的研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2012, 32(04):37-41, 45.

ZHAO P, HUANG S T, ZHOU L. Research on entrance edge defect when drilling high volume fraction SiC<sub>p</sub>/Al composites with diamond electroplated drill bit [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2012, 32(04):37-41, 45.