

# 铝锂合金高速铣削表面粗糙度试验研究\*

## Experimental Study on Surface Roughness During High Speed Milling Aluminum-Lithium Alloy

中航工业北京航空制造工程研究所 丁悦 王焱 吴茂庆 刘畅

**[摘要]** 在对 2198 铝锂合金进行高速铣削试验的基础上,研究了切削参数对表面粗糙度的影响规律,观察了其铣削表面形貌。结果表明:平直处表面粗糙度与拐角处表面粗糙度不一致是由机床主轴振动和实际进给量变化造成的;较小的每齿进给量和铣削宽度能够获得较好的表面质量;表面缺陷常发生在铣削刀痕交叉处。

**关键词:** 铝锂合金 高速切削 表面粗糙度 表面形貌

**[ABSTRACT]** A series of tests are conducted based on high speed milling 2198 aluminum-lithium alloy. It is investigated that the cutting parameters could influence surface roughness and the surface topography. The experimental results show that the straight surface quality is better than the corner surface roughness. The difference is due to the chatter of milling and the variation of the actual feed per tooth. In addition, a low level of feed per tooth and milling width could get better surface quality. Moreover, surface defects are usually observed at the cross of tool paths.

**Keywords:** Aluminum-lithium alloy High speed cutting Surface roughness Surface topography

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.06.092

铝锂合金是一种先进航空轻量化材料,具有减重效果明显、强度-韧性综合性能好、疲劳性能好和耐腐蚀等多项优点,在飞机设计中广泛应用于地板梁、机身蒙皮、长桁、框、梁、腹板等部位<sup>[1-3]</sup>。因此研究切削加工对铝锂合金后续性能的影响有着十分重要的意义。本研究以 2198 铝锂合金为研究对象,采用正交试验的理论与方法进行高速铣削试验,研究切削参数与表面粗糙度之间的关系,并分析特定切削参数下的铣削表面形貌,为合理选择 2198 铝锂合金切削参数提供依据。

### 1 试验方案

工件材料为 2198 铝锂合金,热处理状态 T8,其化

学元素含量如表 1 所示。铣削刀具为 SECO 双刃圆弧角型硬质合金立铣刀,型号为 421200R310-MEGA-T,直径为  $\phi 20\text{mm}$ ,圆角半径为 3.1mm,螺旋角为  $30^\circ$ ,径向前角为  $18^\circ$ 。试验机床为桥式高速龙门铣床,最高转速为 24000r/min。试验采用水基冷却液雾冷顺铣方式。

表1 材料元素含量 %

Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Cr	Zn	Zr	Ag	Li	Al
$\leq 0.08$	$\leq 0.10$	$\leq 0.5$	3.5	0.8	0.05	0.35	0.18	0.50	1.10	其余

试验安排采用 4 因素 3 水平正交试验<sup>[4]</sup>,各因素及其水平如表 2 所示。在完成铣削试验后,测量刀具轨迹中平直处表面粗糙度  $R_{as}$  和拐角处的表面粗糙度  $R_{ac}$ ,在不同的 3 个位置重复测量 5 次,同时观察铣削表面形貌。表面粗糙度采用时代公司的 TR220 粗糙度仪,通过 keyence VHX 超景深显微镜观察。

表2 试验因素及水平

水平	切削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	切削深度 $a_p / \text{mm}$	切削宽度 $a_e / \text{mm}$
I	628.32	0.08	1	3.5
II	942.48	0.12	2	7.0
III	1256.64	0.20	4	10.5

### 2 结果分析

试验结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,平直处表面粗糙度明显低于拐角处表面粗糙度。这是因为相比平直刀路,机床转角时主轴所受载荷不稳定,容易发生振动,造成铣刀切削刃对工件表面的复刻不均匀,因此拐角处表面粗糙度较大。此外,机床转角时实际进给量会变小,切削刃对工件的挤压效果会强于切削效果,此时待去除材料未完全形成切屑而堆积在已加工表面上,这种切削侧漏现象会在一定程度上恶化拐角处的表面粗糙度。

对表 3 进行极差分析可以发现,影响平直处表面粗糙度因素的主次关系分别是每齿进给量、切削速度、切削深度和切削宽度,而影响拐角处表面粗糙度因素的主

\* 民机科研项目(MJZ-G-2011-20)资助。

表3 试验结果

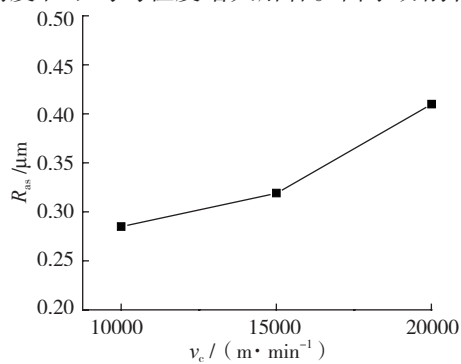
编号	$v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	$a_p / \text{mm}$	$a_c / \text{mm}$	$R_{as} / \mu\text{m}$	$R_{ac} / \mu\text{m}$
1	1256.64	0.08	4	7.0	0.326	0.739
2	1256.64	0.12	1	3.5	0.337	0.593
3	1256.64	0.20	2	10.5	0.566	1.434
4	942.48	0.08	2	3.5	0.223	0.625
5	942.48	0.12	4	10.5	0.337	1.273
6	942.48	0.20	1	7.0	0.397	0.901
7	628.32	0.08	1	10.5	0.171	0.566
8	628.32	0.12	2	7.0	0.270	0.714
9	628.32	0.20	4	3.5	0.416	0.497
$I_s$	0.285	0.240	0.302	0.324		
$I_c$	0.592	0.643	0.687	0.572		
$II_s$	0.319	0.315	0.353	0.331		
$II_c$	0.933	0.860	0.924	0.785		
$III_s$	0.410	0.459	0.359	0.358		
$III_c$	0.922	0.944	0.837	1.091		
$R_s$	0.125	0.219	0.057	0.034		
$R_c$	0.341	0.301	0.237	0.520		

次关系分别是切削宽度、切削速度、每齿进给量和切削深度。这种主次关系的不一致造成了平直处和拐角处表面粗糙度的差异。每齿进给量对平直处表面粗糙度有重要影响,对拐角处表面粗糙度影响不大,而影响拐角处表面粗糙度最主要的因素是切削宽度。从极差分析上也能够解释平直处表面粗糙度低于拐角处表面粗糙度的原因。

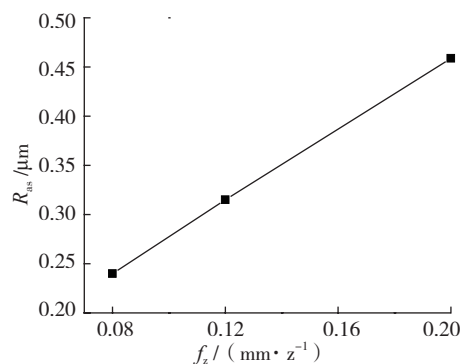
图1所示为平直处表面粗糙度随切削参数的变化规律。从图1(a)中可以看到,随着切削速度的提高,平直处表面粗糙度呈现增加的趋势。这是因为受机床转动平稳性的影响,高切削速度下刀具振动加剧,材料残余高度增大,刀纹不均匀程度严重,造成表面粗糙度恶化。图1(b)所示为每齿进给量对平直处表面粗糙度的影响,每齿进给量的提高导致平直处表面粗糙度几乎呈线性增大。当每齿进给量提高时,同样会造成材料残余高度和均匀程度增大,最终使得表面粗糙度增大。从图1(c)和图1(d)可以看到,切削深度和切削宽度对平直处表面粗糙度影响不大。需要注意的是,在选定的切削参数范围内,平直处表面粗糙度基本保持在 $0.4\mu\text{m}$ 以下。

图2所示为拐角处表面粗糙度随切削参数的变化规律,各切削参数的影响规律比较复杂。随着切削速度的提高,拐角处表面粗糙度的变化趋势为先迅速增大后

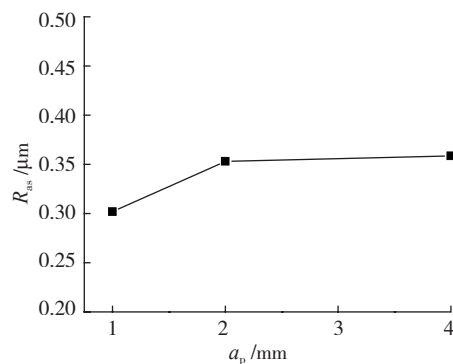
缓慢减小,如图2(a)所示。表面粗糙增大可根据材料残余高度和均匀程度增大解释。由于切削转角时实



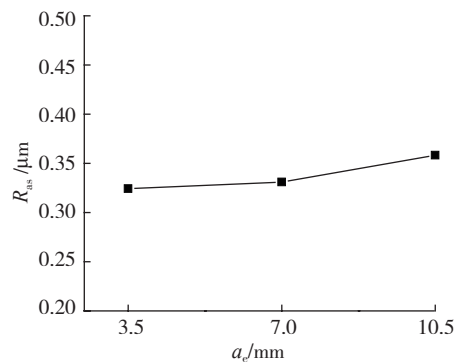
(a) 切削速度



(b) 每齿进给量



(c) 切削深度



(d) 切削宽度

图1 切削参数对平直处表面粗糙度的影响

Fig.1 Influence of cutting parameters on surface roughness of the straight part

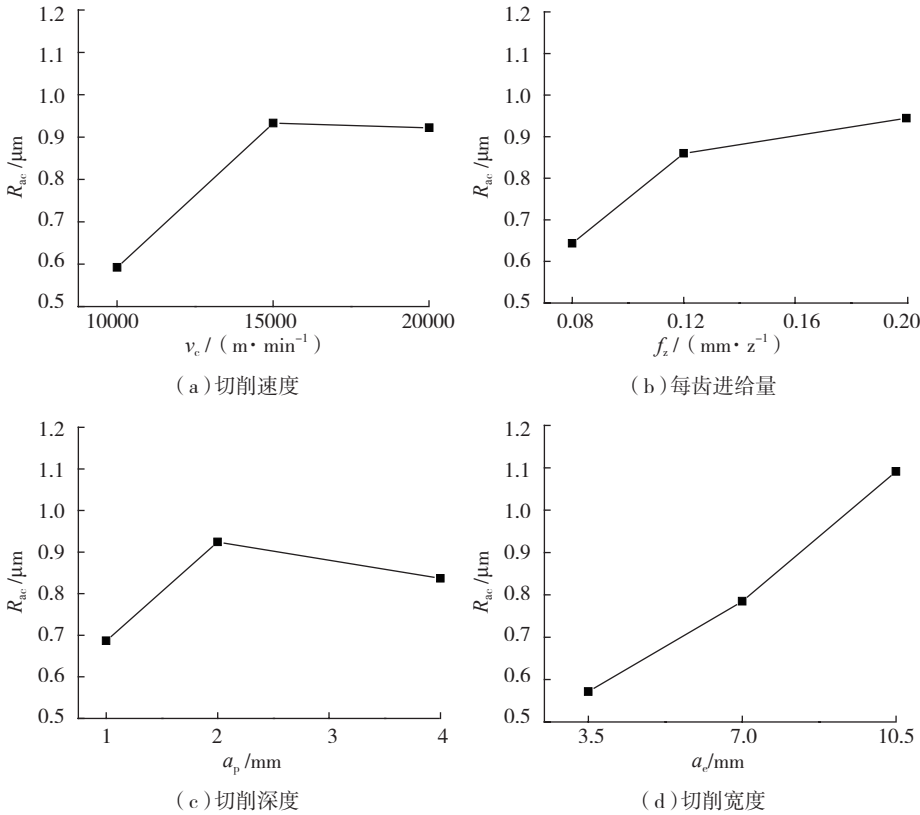
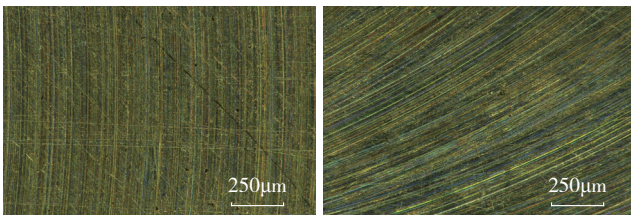


图2 切削参数对拐角处表面粗糙度的影响

Fig.2 Influence of cutting parameters on surface roughness of the corner

际每齿进给量减小,切削厚度也相应减小,因此刀具承受的切削力变小。当切削速度达到一定值时,虽然高转速会引起切削振动,但高速切削时相对较小的切削力引起的切削振动也较小,最终会使表面粗糙度缓慢降低。从图 2 (b) 可以看出,随着每齿进给量的提高,拐角处表面粗糙度呈现增大的趋势,这与平直处表面粗糙度随每齿进给量的变化规律一致。图 2 (c) 中,随着铣削深度的增加,拐角处表面粗糙度呈现先增大后减小的趋势。图 2 (d) 中拐角处表面粗糙度随着铣削宽度的增加而增大。

根据试验数据,试验 7 获得的表面质量最好,其铣削表面形貌如图 3 所示。从图 3 中可以看到,平直处铣削表面呈紧密有序的平行结构,其方向与切削刀线速度方向一致,与进给方向垂直。拐角处微结构形貌



(a) 平直处铣削表面 (b) 拐角处铣削表面

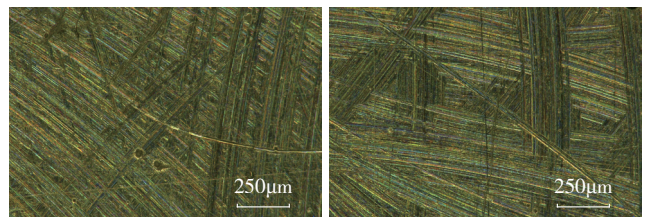
图 3 试验 7 铣削表面形貌

Fig.3 Surface topography of test 7

与平行处一致。需要注意的是,无论平直刀路还是拐角刀路,都会出现表面缺陷,即表面材料在刀具的作用下被带走而形成的凹坑。仔细观察表面缺陷出现的部位可以发现,表面缺陷极易在交叉刀纹处出现,这是因为当形成某方向的“峰-谷”铣削刀纹结构后,由于加工塑性变形等原因,高峰处的材料硬度提高,同时结构强度下降,此时如果出现刀具跳动或者表面划痕,切削刃就会对高峰处材料产生划擦作用,使结构强度低的材料发生断裂,从而被切削刃带走,进而形成表面缺陷。

试验 2 对应的平直处表面粗糙度  $R_{as}=0.337\mu m$ ,拐角刀路处表面粗糙度  $R_{ac}=0.593\mu m$ ,分别处于  $0.2\mu m \sim 0.4\mu m$  和  $0.4\mu m \sim 0.8\mu m$  的范围,其表面形貌如图 4 所示。平直刀路和拐角刀路由于铣削刀具跳动原因,铣削刀纹互相交织

在一起,导致铣削表面质量较差。当加工拐角时,实际的进给量减小,而过小的进给量造成了切削侧漏现象,即待去除材料由于切削刃的挤压效果强于切削效果,材料未完全形成切屑而堆积在已加工表面,这也会在一定程度上对表面质量造成负面影响。此外,在交叉刀纹处同样发现了大量的表面缺陷。



(a) 平直处铣削表面 (b) 拐角处铣削表面

图 4 试验 2 铣削表面形貌

Fig.4 Surface topography of test 2

试样 3 的表面粗糙度在选定的铣削参数范围内最差,其表面形貌如图 5 所示。从图 5 中可以看到,相比较试样 2 和试验 7,由于每齿进给量的增大,刀纹间隔明显增大,因此对应的表面质量也最差。同时由于较大的每齿进给量,表面微结构中的高峰处结构强度降低严重,因而在大的切削力作用下更容易出现表面缺陷。

(下转第 99 页)

表7 舵面质心舵轴前1mm颤振分析

频率组合 / Hz	颤振速度 (Ma0.8) / (m·s <sup>-1</sup> )	颤振速度 (Ma1.2) / (m·s <sup>-1</sup> )	颤振速度 (Ma1.5) / (m·s <sup>-1</sup> )	颤振速度 (Ma3.0) / (m·s <sup>-1</sup> )
145~180	410	480	565	>1760
145~200	490	560	665	>1760
155~180	385	470	550	>1760
155~200	485	575	700	>1760
155~230	600	700	825	>1760
170~200	575	675	825	>1760
170~230	725	850	1050	>1760

注: 弹身一阶频率 49Hz, 二阶频率 135Hz。

表8 舵面质心舵轴前1mm颤振分析

频率组合 / Hz	颤振速度 (Ma0.8) / (m·s <sup>-1</sup> )	颤振速度 (Ma1.2) / (m·s <sup>-1</sup> )	颤振速度 (Ma1.5) / (m·s <sup>-1</sup> )	颤振速度 (Ma3.0) / (m·s <sup>-1</sup> )
145~180	585	1210	>1760	585
145~200	780	1077	>1760	780
155~180	586	883	>1760	586
155~200	810	1150	>1760	810
155~230	771	1024	>1760	771
170~200	826	1226	>1760	826
170 ~ 230	585	1210	>1760	585

注: 弹身采用主动段模态: 一阶频率: 42Hz, 二阶频率: 103Hz。

单位为 m/s。

### 3.3 颤振裕度分析

经弹道计算分析, 该型空空导弹 20m 高度发射条件下, 导弹飞行动压为全空域最大动压: 740179Pa。按照 GJB1544-1992《战术导弹强度和刚度通用规范》中要求: 导弹及其部件在全部设计规定的飞行高度和机动载荷条件下, 在达到  $1.15V_L$  ( $V_L$  为极限速度) 的全部速度范围内都不应发生颤振<sup>[4]</sup>, 导弹颤振速度应至少有 15% 的裕度, 0km 高度颤振速度不低于 1190m/s。

表 5 和表 6 中分析数据表明: 导弹颤振速度均大于 1190m/s。对舵面边界频率组合, 在主动段和被动段进行了典型马赫数下颤振分析, 各马赫数下颤振裕度都大于 1.15, 该型导弹颤振裕度满足设计要求。

## 4 结论

本文给出了钛合金超塑成型 / 扩散连接 4 层结构舵面颤振的设计方法。对某型空空导弹舵面外形及舵面重心对颤振特性的影响进行了对比分析, 确定了满足全空域导弹颤振裕度的舵面结构。仿真表明:

(1) 舵面平面形状对舵面颤振特性影响较大, 舵面外形设计中, 不仅要考虑具有好的气动特性, 还需兼顾具有良好的颤振特性, 外形上尽量选取形心在舵轴前的舵面平面形状。

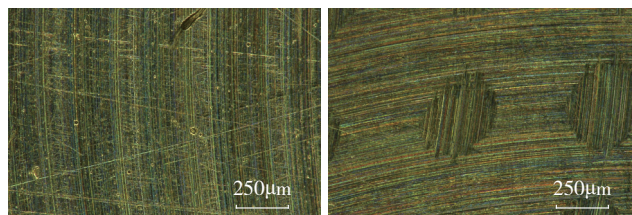
(2) 合理的舵面重心可提高导弹颤振速度, 舵面重心布局应尽量在舵轴前, 设计中舵面重心需综合导弹颤振特性和系统对舵面重量要求综合确定。

### 参考文献

- [1] 张鹏, 廖金华. 钛合金超塑成型 / 扩散连接弹翼结构设计. 航空制造技术, 2014(13):87-90.
- [2] 吴小胜, 黄晓鹏. 一种弹翼颤振临界速度的快速计算方法. 弹箭与制导学报, 2004, 24(3):68-70.
- [3] 杨超, 吴志刚. 飞行器气动弹性原理. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [4] 樊会涛, 吕长起. 空空导弹系统总体设计. 北京: 国防工业出版社, 2007.

(责编 玲犀)

(上接第 94 页)



(a) 平直处铣削表面

(b) 拐角处铣削表面

图5 试验3铣削表面形貌

Fig.5 Surface topography of test 3

## 3 结论

通过对 2198 铝锂合金进行铣削试验, 分析其铣削表面质量和表面形貌, 得到以下结论。

(1) 受机床主轴振动和实际进给量变化的影响, 同一切削参数下平直处表面质量要好于拐角处表面质量。

(2) 对于平直处表面粗糙度, 每齿进给量对其影响最大; 而对于拐角处表面粗糙度, 对其影响最大的因素为切削宽度。在选定的切削参数范围内, 无论平直处和拐角处, 当  $v_c=628.32\text{m/min}$ 、 $f_z=0.08\text{mm/z}$ 、 $a_p=1\text{mm}$ 、 $a_e=3.5\text{mm}$  时, 能够获得最好的表面质量。

(3) 对铣削表面形貌进行观察可以发现, 表面缺陷极易在交叉刀纹处出现, 因此应尽量避免刀具跳动和表面划痕。

### 参考文献

- [1] 陈建. 铝锂合金的性能特点及其在飞机中的应用研究. 民用飞机设计与研究, 2010(1):39-41.
- [2] 孙中刚, 郭旋, 刘红兵, 等. 铝锂合金先进制造技术及其发展趋势. 航空制造技术, 2012(5):60-63.
- [3] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望. 中国有色金属学报, 2010(9):1705-1715.
- [4] 赵选民. 试验设计方法. 北京: 科学出版社, 2006.

(责编 亿霖)