铝锂合金高速铣削表面完整性实验研究

牟海阔^①, 黄信达^①, 袁益楚^②, 张小明^{①*}, 丁汉^①

① 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074;

② 上海飞机制造有限公司, 上海 200436

* E-mail: cheungxm@hust.edu.cn

收稿日期: 2013-09-13; 接受日期: 2013-10-23

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2013CB035805)、国家自然科学基金(批准号: 51375005)和国家商飞公司创新基金(批准号: SAMC12-JS-15-006)资助项目

摘要 铝锂合金密度低、比强度高、比刚度高等优良特性使得其成为新一代航空航天飞行器的主要结构材料。飞机蒙皮作为维持飞机外形的主要结构件, 在飞机起飞降落过程中承受舱内外压差变化所引起的交变载荷作用, 因此对于蒙皮结构零件的疲劳强度要求十分苛刻。零件的疲劳裂纹萌生往往是从表面的微观缺陷开始, 并且表层以及亚表层的力学状态将影响裂纹萌生以及扩展速度。表面完整性包括表面的几何轮廓、显微硬度、金相组织、残余应力等, 这些因素综合影响着零件的疲劳性能。与此同时, 表面完整性表征参数与被加工材料属性、热处理状态以及加工工艺等具有密切的联系。研究了铝锂合金的机械铣削加工工艺对于其表面完整性的影响。传统蒙皮结构加工往往采用化学铣削的方法进行, 占用厂房面积大, 污染严重, 废液处理费用高等, 不符合现代可持续绿色制造的理念。目前对于铝锂合金的超塑成形工艺研究较多却鲜见有相关铝锂合金切削表面完整方面的相关研究。研究在干切情况与液氮冷却情况下切削三要素以及上一道滚压工艺对于表面完整性的影响, 通过正交试验的方法全面考察了工艺参数对于表面形貌各个指标、表层亚表层金相组织以及残余应力的影响权重, 并且验证了其显著性。比较了干切与液氮低温切削情况下表面形貌以及残余应力状态的异同点, 验证了液氮冷却切削对于铝锂合金表面完整性提升的有效性, 为提高铝锂合金疲劳性能提供了实验依据。

关键词

表面完整性
铝锂合金
低温切削
铣削加工
正交试验

铝锂合金具有低密度、高比强度和比刚度、优良的低温性能和耐腐蚀性以及良好的超塑性等优点。相比较纯铝而言, 每增加 1% 质量分数的锂元素将能够减少 3% 的密度, 与此同时增加 6% 的弹性模量。用铝锂合金替代常规铝合金将可以使构建质量减轻 15%, 刚度提高 15%~20%。因此被认为是航空航天工业中的理想结构材料^[1]。

为了最大程度的减小飞行器重量, 必须对铝锂合金结构件进行减薄加工。传统的减薄工艺采用化学铣削的方法, 此方法能够较好满足蒙皮减薄加工厚度公差要求, 但其废弃的化铣液会污染环境, 不符合绿色加工要求^[2]。随着先进制造技术的不断发展, 近年来, 国内和国际上的一些飞机制造公司开始逐步采用高速铣削代替化铣的新工艺。因此高速铣削过后

引用格式: 牟海阔, 黄信达, 袁益楚, 等. 铝锂合金高速铣削表面完整性实验研究. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 89–98
Mou H K, Huang X D, Yuan Y C, et al. Investigation of surface integrity of aluminum lithium alloy in high speed machining (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 89–98, doi: 10.1360/092013-1026

飞机蒙皮结构件的表面完整性将是一个重要的问题。

Field 和 Kahles 于 1964 年首次提出了表面完整性的概念, 他们将其定义为切削或者其他工艺方法加工后, 对零件表面造成的无损伤或强化的表面状态^[3]。表面完整性的主要指标可以分为几何特征与物理性能特征: 其中几何特征主要指已加工表面的表面粗糙度、表面纹理以及波纹度等; 物理性能特征主要指已加工表面的残余应力、显微组织转变、加工硬化以及塑性变形等。

目前表面完整性建模方法主要分为解析建模、有限元建模和基于切削实验的回归分析建模。Grzesik^[4]结合摩擦行为的分子动力学理论与 Hencky 塑性理论实现了切屑刀具接触解析模型的建立, 并且利用最小未变形切屑厚度作为表征参数预测了车削后的表面粗糙度。Lee 等人^[5]通过采用切削过程中的振动加速度信号来替代切削力信号, 进行了铣削表面形貌的预测, 实验证实了主轴高速运动下的振动引起切削表面几何精度的降低, 并且提出了基于切削参数、刀具与工件几何、偏心等的表面形貌预测计算方法。Thiele 和 Melkots^[6]详细考察了刀具刃口形状参数、工件材料硬度对于精加工表面粗糙度和切削力的影响, 并且提出了基于切削刃钝圆半径和硬度的表面粗糙度回归预测模型。Jacobus 等人^[7,8]对正交切削和斜角切削条件下的残余应力进行了实验研究和解析法建模, 在 Merwin 和 Johnson^[9]关于弹塑性滚动/划擦接触理论的基础上考虑切削热影响, 建立了二维正交切削下的残余应力的力-热解析计算模型。Liang 和 Su^[10]综合了 Oxley 和 Young^[11]的剪切力模型, Waldorf 等人^[12]的犁耕力模型及 Komanduri 和 Hou^[13]的解析热源模型进行力-热载荷解析预测, 并通过 McDowell^[14]关于弹塑性滚动/划擦接触问题的算法计算了正交切削下的残余应力。Rotella 等人^[15]利用 Deform-3D 软件研究了车削 7075 航空铝合金时的晶粒动态回复效应, 预测了切削前后表层以及亚表层显微组织在力-热强耦合情况下的晶粒大小变化, 并且结合晶粒大小的变化利用 Hall-Petch 公式推导出了加工后工件表层显微硬度与切削速度的定量关系。Pu 等人^[16]利用液氮喷淋冷却的方法, 考察了车削 AZ31B 镁合金后的显微组织变化, 发现在液氮冷却情况下在工件表层会出现 31 nm 大小的极细晶粒, 该层组织厚度在 5~10 μm 并且结构致密, 对于零件的抗磨损性能有较大提升。

本文以中国商用飞机 C919 项目机身蒙皮结构件用铝锂合金为研究对象, 考察在干式切削以及液氮冷却切削条件下切削工艺参数对于零件表面粗糙度、残余应力以及显微组织的影响规律。通过正交试验设计的方法, 辨识铝锂合金这种新型轻金属材料的表面完整性敏感工艺参数, 并且总结了切削工艺参数对零件表面粗糙度和表层残余应力的影响规律。

1 铝锂合金切削实验

切削加工工艺参数对零件表面完整性具有重要的影响, 切削区域内的强烈的力热耦合效应导致工件表层及亚表层的残余应力等发生变化, 引起切削区域内的表层缺陷。同时在剧烈塑性变形条件下, 材料表层发生动态再结晶效应, 引起显微组织的变化, 对残余应力在亚表层内的分布重新分配, 形成了如图 1 的表面结构。为了探究切削参数对于表面完整性的影响规律, 采用五水平四因素正交试验设计, 考虑的试验因素为切削三要素: 主轴转速、进给速度、轴向切深以及进给方向与滚压方向之间的夹角。此处需要特别指出的是, 国内外已经有大量文献表明切削三要素对于零件加工后的表面形貌轮廓算术均值 R_a 以及残余应力有影响。轮廓算术均值定义为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

轮廓偏斜度定义为

$$R_{sk} = \frac{1}{NR_q^3} \left(\sum_{i=1}^N y_i^3 \right) \quad (2)$$

如图 2 所示, 两种轮廓具有相同的 R_a 值但是具有不同的 R_{sk} 取值, 第 2 种轮廓由于具有负的 R_{sk} 值使得靠近零件实体一侧更加容易形成裂纹萌生区, 从而影响零件的疲劳性能。但是却少有切削参数对于其他表面粗糙度参数, 如轮廓偏斜度 R_{sk} 的影响规

图 1 已加工表面截面组成示意图^[17]

图 2 轮廓算术均值与轮廓偏斜定义

律研究, 亦鲜见有将前一道加工工艺(如成形滚压)和最后一道工序(如切削)对于表面质量的影响进行综合性和定量描述的. 实验表明, 本文中选择的进给方向与滚压方向之间的夹角因素对于零件加工后表面的粗糙度以及残余压应力的影响不可忽略, 对于指导新型铝锂合金的切削加工工艺具有参考意义.

本实验所采用的铝锂合金为中国商用飞机提供的第 3 代铝锂合金板材, 牌号为 2060, 板厚 6 mm, 实验样品被制作为 90 mm×92 mm 的矩形, 样品用螺栓固定于 Kistler 测力仪上并用虎钳夹住测力仪, 见图 3. 由于切削区域对于螺栓固定处较远, 根据圣维南原理, 螺栓的紧固力对于切削过程的残余应力不会产生影响. 这种铝锂合金的化学成分为 0.7% Li, 3.7% Cr, 0.7% Mg, 0.34% Ag, 0.11% Zr, 0.29% Mn, 0.32% Zn. 其热处理方式为固溶热处理后经滚压成型, 然后进行人工时效处理, 以达到内部残余应力为零. 其最终的物理性能参数如表 1.

本试验在 MikronUCP800 五轴高速机床上进行, 该机床主轴转速最高可达 20000 r/min. XYZ 轴定位精度: 0.006 mm. 重复定位精度: 0.004 mm. 所选择的刀具为 Sandvick 面铣刀, 刀具的具体几何参数为: 刀

图 3 切削实验现场

表 1 铝锂合金物理性能

材料名称	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	硬度 (HRWB)	导电率 (IACS%)
2060 T8	472	518	81.8	23.0

柄直径 100 mm. 刀具材料为: PCD 聚晶金刚石, 刀具轴向前角为 5°, 径向前角为 10°, 切削方式为两齿顺铣, 采用干切和液氮冷却两种加工方式.

2 实验设计与结果

本节旨在通过正交试验设计的方法, 采用三维形貌测量技术以及 X 射线衍射残余应力测量技术提取相关表面完整性指标, 揭示新型铝锂合金加工过程中的工艺参数对表面完整性的影响规律.

2.1 实验步骤

在高速加工中, 影响加工表面完整性的主要因素可以分为以下几类: 1) 加工工艺参数的选取; 2) 材料本身的可加工性; 3) 刀具的几何角度以及涂层. 本文中的材料以及刀具几何以及涂层均为固定因素变量. 本文中的实验设置如图 3 所示. 试验中涉及 4 个工艺参数, 分别为切削速度 V_c , 每齿进给 f_z , 切深 a_p , 进给方向与滚压方向夹角 θ , 4 个工艺参数的示意图如图 4 所示.

正交试验法是一种科学合理安排与分析多因素试验的方法, 通过正交试验结果的分析可以确定待考察问题的影响因素. 本文所考察的试验因素以及各个水平如表 2, 以下分别用符号: A, B, C, D 表示转速、切深、进给、夹角. 选择 $L_{25}(5^4)$ 正交表进行试验安排(第 5, 6 列为空列), 试验相应的水平与因素安排如表 2 所示.

工件表面形貌测量系统采用基恩士超景深激光

图 4 切削参数示意图

表 2 正交试验安排

水平	转速 (r/min) 因素 A	切深 (mm) 因素 B	进给 (mm/z) 因素 C	夹角 (°) 因素 D
I	5000	2	0.25	90
II	4500	1.5	0.2	60
III	4000	1	0.15	45
IV	3000	0.7	0.12	30
V	2500	0.3	0.1	0

共聚焦显微镜, 图 5~9 为显微镜采集的三维景深信息, 显微镜采用的放大倍数为 50 倍, 在当前放大倍数下的视场范围是 $700\ \mu\text{m} \times 520\ \mu\text{m}$. 为了保证测量结果的准确性, 在每一组工艺参数的试样上面沿着进给方向在 1/2 径向切宽处均匀取 3 个点用于评估其表面完整性, 如图 10. 本文中考察的表面形貌参数包括线粗糙度 R_a , 线粗糙度 R_{sk} , 面粗糙度 R_a , 面粗糙度 R_{sk} . 其中线粗糙度的评定长度为视场范围内的斜对角线, 面粗糙度的评定范围为整个视场范围. 图 5 为由于加工过程中刀具后刀面与工件表面摩擦挤压形成的微凸体, 是表面缺陷的一种. 图 6~9 表示在干切与液氮冷却情况下的 4 种表面三维形貌.

图 5 加工表面缺陷

图 6 第 1 号样品干切表面三维形貌

转速 4500 r/min、切深 2 mm、进给 0.15 mm/z、角度 0°

图 7 第 1 号样品低温切削表面形貌

转速 4500 r/min、切深 2 mm、进给 0.15 mm/z、角度 0°

图 8 第 3 号样品干切表面三维形貌

转速 5000 r/min、切深 1 mm、进给 0.12 mm/z、角度 0°

图 9 第 3 号样品低温切削表面形貌

转速 5000 r/min、切深 1 mm、进给 0.12 mm/z、角度 0°

需要说明的是, 为了全面考察加工工艺参数对于表面完整性参数的影响, 避免随机因素对于测试结果的干扰. 本文选择的表征表面形貌以及残余应力测试点为均布在样品上的 3 个点, 最终该组切削参数下的表面完整性参数为 3 点的平均值. 图 10 为采用的 X-350 残余应力测量系统, 测试参数如表 3.

2.2 实验结果及数据分析

表 4 和 5 分别为干切情况下和液氮冷却切削情况

图 10 残余应力测点分布及测试现场

表 3 残余应力测试条件

参数	数值
X 光管工作电压	27 kV
X 光管电流	7 mA
辐射源	CrK α
衍射晶面	(311)
2θ 扫描角度	$142^\circ \sim 136^\circ$
2θ 扫描步长	0.1°

表 4 干切表面完整性参数测试结果

序号	转速 (r/min)	切深 (mm)	进给 (mm/z)	夹角 (°)	线粗糙度		面粗糙度		残余应力 (MPa)
					R_a	R_{sk}	R_a	R_{sk}	
1	4500	2.0	0.15	0	0.547	0.061	0.898	0.023	-47.5
2	3000	1.5	0.25	0	0.429	0.277	0.816	0.186	-62.1
3	5000	1.0	0.12	0	0.421	0.117	0.419	0.390	-58.7
4	4000	0.7	0.20	0	0.425	0.046	0.409	0.393	-80.2
5	2500	0.3	0.10	0	0.398	0.086	0.411	0.406	-150.2
6	3000	2.0	0.10	30	0.635	-0.027	0.784	-0.094	-105.8
7	5000	1.5	0.15	30	0.422	0.081	0.665	0.090	-135.2
8	4000	1.0	0.25	30	0.339	0.432	0.551	0.269	-58.5
9	2500	0.7	0.12	30	0.438	0.072	0.398	0.144	-61.2
10	4500	0.3	0.20	30	0.388	0.031	0.386	0.338	-90.8
11	5000	2.0	0.20	45	0.689	-0.101	1.080	-0.200	-98.6
12	4000	1.5	0.10	45	0.522	-0.105	0.749	-0.036	-235.5
13	2500	1.0	0.15	45	0.360	0.166	0.531	0.015	-36.7
14	4500	0.7	0.25	45	0.440	0.215	0.510	0.103	-179.3
15	3000	0.3	0.12	45	0.308	0.231	0.314	0.406	-178.2
16	4000	2.0	0.12	60	0.319	0.572	0.548	-0.066	-24.5
17	2500	1.5	0.20	60	0.345	0.404	0.497	0.066	-245.1
18	4500	1.0	0.10	60	0.416	0.197	0.490	0.253	-34.1
19	3000	0.7	0.15	60	0.365	-0.110	0.365	0.229	-66.9
20	5000	0.3	0.25	60	0.452	-0.039	0.405	0.104	-32.9
21	2500	2.0	0.25	90	0.515	-0.156	0.558	0.117	-135.5
22	4500	1.5	0.12	90	0.605	-0.206	0.558	0.031	-48.3
23	3000	1.0	0.20	90	0.740	0.020	0.646	0.130	-138.7
24	5000	0.7	0.10	90	0.668	-0.115	0.640	0.179	-47.5
25	4000	0.3	0.15	90	0.567	-0.188	0.681	0.160	-59.8

表 5 低温切削条件下的表面完整性测试结果

序号	转速 (r/min)	切深 (mm)	进给 (mm/z)	夹角 (°)	线粗糙度		面粗糙度		残余应力 (MPa)
					R_a	R_{sk}	R_a	R_{sk}	
1	4500	2.0	0.15	0	1.162	-0.126	1.294	-0.089	-145
2	3000	1.5	0.25	0	0.689	-0.055	0.788	-0.007	-192
3	5000	1.0	0.12	0	0.521	0.152	0.474	0.255	-130
4	4000	0.7	0.20	0	1.236	0.002	1.099	-0.062	-164
5	2500	0.3	0.10	0	1.312	-0.001	1.222	-0.071	-90.1
6	3000	2.0	0.10	30	1.006	-0.124	0.721	-0.112	-171
7	5000	1.5	0.15	30	0.352	0.430	0.577	0.124	-146.1
8	4000	1.0	0.25	30	0.547	0.461	0.508	0.136	-121.2
9	2500	0.7	0.12	30	0.497	0.001	0.429	0.111	-85
10	4500	0.3	0.20	30	0.683	0.259	0.603	0.323	-231.5
11	5000	2.0	0.20	45	1.280	-0.115	0.895	-0.092	-312
12	4000	1.5	0.10	45	1.048	-0.154	0.765	-0.075	-202
13	2500	1.0	0.15	45	0.926	0.073	0.711	0.012	-173
14	4500	0.7	0.25	45	0.769	0.031	0.624	0.081	-368
15	3000	0.3	0.12	45	0.359	0.370	0.511	0.424	-148
16	4000	2.0	0.12	60	0.894	-0.192	0.750	-0.022	-240
17	2500	1.5	0.20	60	0.462	0.183	0.644	0.190	-264
18	4500	1.0	0.10	60	0.451	0.352	0.552	0.308	-204
19	3000	0.7	0.15	60	0.637	-0.154	0.508	0.036	-158
20	5000	0.3	0.25	60	0.569	-0.196	0.469	0.012	-207
21	2500	2.0	0.25	90	0.644	0.231	0.725	0.386	-228
22	4500	1.5	0.12	90	1.636	-0.075	1.641	0.013	-110
23	3000	1.0	0.20	90	1.988	-0.090	2.075	0.029	-259
24	5000	0.7	0.10	90	1.431	-0.075	1.505	0.088	-173
25	4000	0.3	0.15	90	0.663	0.209	0.678	0.213	-112

下, 线粗糙度 R_a , 线粗糙度 R_{sk} , 面粗糙度 R_a , 面粗糙度 R_{sk} 以及残余应力的测量结果, 以下分别用记号 $LineR_a$, $LineR_{sk}$, $FaceR_a$, $FaceR_{sk}$ 和 σ_r 来表示.

综合干切以及液氮冷却情况下的铝锂合金切削表面完整性数据, 通过平均响应分析可以判断各个因素对于考察指标的影响大小, 从而为合理选择切削参数提供依据.

线粗糙度 R_a 的平均响应趋势和线粗糙度 R_{sk} 的平均响应趋势如图 11~20.

利用方差分析对每一个指标进行显著性检验, 表 6 为干切情况下, 线粗糙度 R_a 的方差分析结果. 结果表明角度对于线粗糙度 R_a 具有显著影响.

图 13 干切时 $LineR_{sk}$ 的响应

图 11 干切时 $LineR_a$ 的响应

图 14 液氮冷却时 $LineR_{sk}$ 的响应

图 12 液氮冷却时 $LineR_a$ 的响应

图 15 干切时 $FaceR_a$ 的响应

图 16 液氮冷却时 Face R_a 的响应 图 19 干切时 σ_r 的响应 图 17 干切时 Face R_{sk} 的响应 图 20 液氮冷却时 σ_r 的响应 图 18 液氮冷却时 Face R_{sk} 的响应

表 6 干切线粗糙度方差分析

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	F_{α}	显著性
A(转速)	0.0456	4	0.0114	1.41	$F_{0.05(4,8)} = 3.8$	显著
B(切深)	0.0376	4	0.0094	1.16		
C(进给)	0.0489	4	0.0122	1.51		
D(角度)	0.1596	4	0.0399	4.93		
误差项	0.0649	8	0.0081			
总和	0.3567	24				

2.3 实验结论

1) 高速加工情况下的已加工表层金相组织

图 21~24 为不同切削速度下的铝锂合金 2060-T8 经过切削加工后的表层金相组织形态. 进行金相观

察的表面为已加工表面的横截面, 方向与进给方向相同. 切削后的铝锂合金样品采用线切割下料, 通过金刚石砂纸从粗磨到精磨去除热影响变质层后, 采用 Metropmet 抛光液从 $3\text{ }\mu\text{m}$ 一直抛光到 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒度. 随后采用 10% 质量分数的 NaOH 溶液腐蚀 10 min、蒸馏水清洗后用蔡司专业金相显微镜进行观测. 图示 21~24 显示的是加工表层以下沿深度方向的铝锂合金金相组织变化情况. 在金相取样的方向上为已加工表面的截面, 因此可以由金相图片显示出在高速切削运动后的晶粒大小变化与拉伸挤压情况.

在铣削转速从 2500~5000 r/min 变化时, 铝锂合

图 21 干切表层金相

转速 2500 r/min、切深 0.3 mm、进给 0.1 mm/z、角度 0°

图 22 液氮冷却切削表层金相

转速 2500 r/min、切深 0.3 mm、进给 0.1 mm/z、角度 0°

图 23 干切表层金相

转速 5000 r/min、切深 2 mm、进给 0.2 mm/z、角度 45°

图 24 液氮冷却切削表层金相

转速 5000 r/min、切深 2 mm、进给 0.2 mm/z、角度 45°

金的晶粒大小没有明显的变化, 晶粒沿刀具进给方向没有明显的拉伸或者挤压的现象.

2) 表面形貌及残余应力规律

铝锂合金结构件疲劳强度对表面形貌以及残余应力等参数敏感, 因此表面完整性参数的准确预测具有重要意义. 此处考察的表面形貌指标 R_a 和 R_{sk} 以及残余应力指标, 对于零件的疲劳强度而言, R_a 越小、 R_{sk} 越大、残余压应力越大均有助于疲劳强度的提升.

在干切情况下, 对线粗糙度 $LineR_a$ 影响最显著的为因子 D (角度), 随切深减小而减小, 其次为因子 A (转速)、因子 B (切深)、因子 C (进给). 其中随着切深减小, 线粗糙度 $LineR_a$ 的数值单调减小. 从整体趋势上看, 随着转速的升高, $LineR_a$ 呈现出增大的趋势, 这与一般材料切削中切削转速提高, 粗糙度减小的趋势相反. 对线粗糙度 $LineR_{sk}$ 影响最显著的仍然为因子 D (角度), 其次为因子 B (切深)、因子 A (转速)、因子 C (进给). 从整体上看, 随着因子 D 的减小, 线粗糙度 $LineR_{sk}$ 趋于饱和, 因此因子 D 的最佳水平应该为 30° . 随着转速的升高, $LineR_{sk}$ 呈现出减小的趋势, 并且还有为负的可能. 对面粗糙度 $FaceR_a$ 影响最显著的为因子 B (切深), 其次为因子 C (进给)、因子 D (角度)、因子 A (转速). 值得注意的是, $FaceR_a$ 随着因子 B 的增加而单调增加, 因此为了获得较好的 $FaceR_a$ 值, 应该在实际加工中尽量采取小切深. 从整体上看, $FaceR_a$ 随着转速的升高而增大, 这种变化规律与 $LineR_a$ 随转速的变化一致. 对面粗糙度 $FaceR_{sk}$ 影响最显著的为因子 B (切深), 其次为因子 D (角度)、因子 C (进给)、因子 A (转速). 随着因子 B 的减小, $FaceR_{sk}$ 呈现出线性增长的趋势, 并且整体上看

$\text{Face}R_{sk}$ 随转速增加而减小, 该趋势与 $\text{Line}R_{sk}$ 随转速变化趋势一致. 对于残余应力影响最显著的为因子 B (切深), 其次为因子 D (角度)、因子 C (进给)、因子 A (转速). 特别需要指出的是, 铝锂合金铣削过程中, 残余压应力随着转速升高而单调减小. 因子 D 的选择对于残余压应力也具有显著的影响, 在角度选择为 45° 的方向产生的残余压应力大于其他任何方向.

在有液氮冷却的情况下, 对线粗糙度 $\text{Line}R_a$ 影响最显著的为因子 D (角度), 其次为因子 C (进给)、因子 B (切深)、因子 A (转速). 因子 D 应该选择在 30° 附近以减小 $\text{Line}R_a$. 从整体上看, 因子 B (切深)减小有利于减小 $\text{Line}R_a$ 的值, 这一点与干切情况下的规律一致. 从减小 $\text{Line}R_a$ 的角度出发, 冷却和干切情况均表明, 当进给方向与滚压方向呈 30° 时, $\text{Line}R_a$ 值取最小值. 与干切相比, 液氮冷却情况下工件的线粗糙度 $\text{Line}R_a$ 值均增大, 因此表面冷却切削条件下对于 $\text{Line}R_a$ 指标是恶化了. 对线粗糙度 $\text{Line}R_{sk}$ 影响最显著的为因子 B (切深), 其次为因子 D (角度)、因子 A (转速)、因子 C (进给). 从均值响应图可以看出, 无论是干切还是液氮冷却切削, 因子 B 的取值都应该为水平 III(见表 2), 以提高 $\text{Line}R_{sk}$. 对于面粗糙度 $\text{Face}R_a$ 影响最显著的为因子 D (角度), 其次为因子 C (进给)、因子 A (转速)、因子 B (切深). 当选择因子 D 为 30° 时, 无论是冷却还是干切情况, 均可以获得最小的 $\text{Face}R_a$ 值. 特别需要指出的是, 冷却情况下, 随着因子 B (切深)的减小, $\text{Face}R_a$ 亦单调减小, 这与干切时候的规律一致. 对于面粗糙度 $\text{Face}R_{sk}$ 影响最显著的为因子 B (切深), 其次为因子 D (角度)、因子 C (进给)、因子 A (转速). 从整体上看, $\text{Face}R_{sk}$ 随切深的减小而增加, 这与干切时候的变化一致. 对于残余应力影响最显著的为因子 C (进给), 其次为因子 D (角度)、因子 B (切深)、因子 A (转速). 从整体上看, 采用液氮冷却后, 工件表层的残余压应力与干切相比提高了 150~200

Mpa, 这对于疲劳强度的提高是大有裨益的. 残余压应力值随着转速升高而增加, 这一点与干切时候的规律相反. 随着因素 B (切深)的增加, 残余压应力值亦随之增加. 从整体上看, 随着因素 C (进给)的增加, 残余压应力值也增加. 可以看出, 铝锂合金在液氮冷却条件下, 若采用高转速、大切深、高进给情况下将能够获得很好的表层压应力状态, 有利于提升被加工构件的疲劳强度, 此时的材料去除率也将提高.

3 总结

本文采用正交试验的方法研究了在干切与液氮冷却情况下新型铝锂合金材料机械铣削表面完整性问题. 结合方差分析手段, 指出了切削工艺参数对于铝锂合金表面轮廓、表层金相组织以及残余应力影响的显著性大小. 证实了除切削三要素之外, 滚压铝锂合金方向与切削进给方向夹角亦对表面轮廓参数以及残余应力具有显著影响, 并且指出了某些方向能够产生最优的表面微观轮廓以及残余应力. 主要结论如下.

1) 在干切过程中对于线粗糙度 $\text{Line}R_a$ 、线粗糙度 $\text{Line}R_{sk}$ 的影响, 因素 D (角度)均占最大的权重, 并且在角度选择为 45° 方向时, 残余压应力大于其他任何方向.

2) 在液氮冷却过程中对于线粗糙度 $\text{Line}R_a$ 、面粗糙度 $\text{Face}R_a$, 因素 D (角度)均占最大的权重, 并且当因素 D 为 30° 时, 两种条件下的面粗糙度 $\text{Face}R_a$ 均为最小状态.

3) 通过实验研究揭示了液氮冷却对残余压应力值具有极大的提升, 并且发现在液氮低温冷却与干切工况下表面轮廓以及残余应力变换规律显著不同, 证实了在液氮低温冷却情况下高转速、大切深、高进给情况下可以获得很好的表层压应力状态, 与此同时提高材料去除率.

参考文献

- 1 De P S, Mishra R S, Baumann J A. Characterization of high cycle fatigue behavior of a new generation aluminum lithium alloy. *Acta Mater*, 2011, 59: 5946–5960
- 2 鲁达. 新一代飞机蒙皮绿色加工技术. 航空制造技术, 2010, 16: 29
- 3 杨振朝, 张定华, 姚倡锋, 等. TC4 钛合金高速铣削参数对表面完整性影响研究. 西北工业大学学报, 2009, 27: 538–543
- 4 Grzesik W. A revised model for predicting surface roughness in turning. *Wear*, 1996, 194: 143–148

- 5 Lee K Y, Kang M C, Jeong Y H, et al. Simulation of surface roughness and profile in high-speed end milling. *J Mater Process Tech*, 2001, 113: 410–415
- 6 Thiele J D, Melkote S N. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. *J Mater Process Tech*, 1999, 94: 216–226
- 7 Jacobus K, DeVor R E, Kapoor S G, et al. Predictive model for the full biaxial surface and subsurface residual stress profiles from turning. *J Manuf Sci Eng*, 2001, 123: 537–546
- 8 Jacobus K, DeVor R E, Kapoor S G. Machining-induced residual stress: experimentation and modeling. *J Manuf Sci Eng*, 2000, 122: 20–31
- 9 Merwin J E, Johnson K L. An analysis of plastic deformation in rolling contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1963, 177: 676–690
- 10 Liang S Y, Su J. Residual stress modeling in orthogonal machining. *CIRP Anna-Manuf Techn*, 2007, 56: 65–68
- 11 Oxley P L B, Young H T. *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*. 1989
- 12 Waldorf D J, DeVor R E, Kapoor S. A slip-line field for ploughing during orthogonal cutting. *J Manuf Sci Eng*, 1998, 120: 693
- 13 Komanduri R, Hou Z B. Thermal modeling of the metal cutting process—Part III: temperature rise distribution due to the combined effects of shear plane heat source and the tool – chip interface frictional heat source. *Int J Mech Sci*, 2001, 43: 89–107
- 14 McDowell D L. An approximate algorithm for elastic-plastic two-dimensional rolling/sliding contact. *Wear*, 1997, 211: 237–246
- 15 Rotella G, Dillon Jr. O W, Umbrello D, et al. Finite element modeling of microstructural changes in turning of AA7075-T651 Alloy. *J Manuf Process*, 2013, 15: 87–95
- 16 Pu Z, Outeiro J C, Batista A C, et al. Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components. *Int J Mach Tool Manu*, 2012, 56: 17–27
- 17 Astakhov V P. *Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance*. London: Springer, 2010. 1

Investigation of surface integrity of aluminum lithium alloy in high speed machining

MOU HaiKuo¹, HUANG XinDa¹, YUAN YiChu², ZHANG XiaoMing¹ & DING Han¹

¹ State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Wuhan 430074, China;

² Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China

Aluminum-lithium alloy takes the advantage of low density, high specific strength and specific stiffness that make it the candidate for the structural material in the new generation of aerospace vehicles. Aircraft skin is under the cabin pressure changes caused by alternating loads while the aircraft taking off and landing, so the fatigue strength of structural components is very important. Structural fatigue crack initiates from the surface of microscopic defects, and surface and subsurface mechanical state affects the crack initiation and propagation speed. The surface integrity includes surface contours, micro-hardness, microstructure, residual stress, etc. These factors affect the fatigue performance of the structure. Meanwhile, the surface integrity associates with the material character, machining parameters, and heat treatment process. This paper studies the surface integrity of aluminum-lithium alloy in mechanical milling process. Traditional skin structures are obtained using chemical machining methods, by which the plant occupy large area with serious pollution and the waste disposal costs higher. At present, studies on superplastic forming process of aluminum-lithium alloys are carried out extensively and those on surface integrity of aluminum-lithium alloy in cutting process are very lacking. In this paper we investigate the contributions of machining parameters and the previous rolling process on the surface integrity of aluminum-lithium alloy with liquid nitrogen and dry cutting conditions. Also we give the comparison of the surface topography as well as the residual stress in liquid nitrogen and dry conditions. The experiment results verify the enhancement of surface integrity of aluminum-lithium alloy in liquid nitrogen condition, which supplies the experimental basis for the improvement of the fatigue properties of aluminum-lithium alloy by using the mechanical milling process.

surface integrity, aluminum-lithium alloy, cryogenic machining, milling, orthogonal test

doi: 10.1360/092013-1026