

铝锂合金高速铣削力的试验研究

Experimental Study of Cutting Forces in High Speed Milling of Aluminum-Lithium Alloy

南京航空航天大学 徐海进 杨吟飞 李亮 何宁
上海飞机制造有限公司 张烘州 王冬生

[摘要] 针对新型轻量化航空结构材料铝锂合金的高速切削加工,研究分析了切削速度和每齿进给量对其切削力的影响规律,同时对高速铣削铝锂合金、7085、6061 和 Ly12 过程中的切削力进行了对比试验研究。试验结果表明,高速铣削铝锂合金时,随着每齿进给量的提高,切削力显著增大;随着切削速度的提高,切削力变化趋势并不明显,呈现出先稍有增大后又逐渐减小的趋势;高速铣削铝锂合金与高速铣削 7085、6061 和 Ly12 时的切削力变化规律相似,数值接近。

关键词: 高速铣削 铝锂合金 切削力 切削速度 每齿进给量

[ABSTRACT] An experimental study of influence of the cutting parameters including cutting speed and feed per tooth on the cutting forces in high speed peripheral milling of new aeronautical material Aluminum-Lithium alloy is presented. Meanwhile, contrast experiments of cutting forces in high speed milling of Aluminum-Lithium alloy, 7085、6061 and Ly12 are carried out. The experimental results show that the cutting forces increase linearly as the feed per tooth increases. However, as the cutting speed increases, the cutting forces increase firstly and then decrease; In addition, the changing rules of cutting forces in milling of Aluminum-Lithium alloy, 7085, 6061 and Ly12 are similar and the numerical sizes of cutting forces are close.

Keywords: High speed milling Aluminum-Lithium alloy Cutting force Cutting speed Feed per tooth

高速切削技术作为先进制造技术的核心技术之一已成为加工技术的主流。相对于传统的切削加工技术,高速切削不仅能够大大地提高加工质量、加工效率和加工经济性,而且为面向绿色生态的可持续制造提供了先进的技术支撑。

诸多研究表明,高速切削技术在航空整体结构件的加工过程中可以发挥其高效率、相对切削力小、切削热少等优点^[1]。

* 国防技术基础科研项目(C152012C002), C919 客机新型金属材料高效数控加工技术攻关(20120213-12-4)资助。

铝锂合金材料是近年来航空航天材料中发展最为迅速的一种先进轻量化结构材料,具有密度低、弹性模量高、比强度和比刚度高、疲劳性能好、耐腐蚀及焊接性能好等诸多优异的综合性能,还具有超塑性成形性能、低温性能良好的优点,可以制成形状复杂、难以成形的零件,其强度、断裂韧性、屈服强度、疲劳性能都是随着温度的降低而提高,用其代替常规的高强度铝合金可以使结构的重量减轻 10%~20%,而刚度则可以提高 15%~20%,因此铝锂合金在航空航天领域显示出了广阔的应用前景^[2-5]。

国外铝锂合金的研制和成形技术日趋成熟,在军用和民用飞机和航天器都得到了大量的应用^[6-8]。但国内外在铝锂合金的高速铣削方面的报道很少,尤其在切削力方面的研究文献相对匮乏。

为此,本文从切削用量对切削力的影响和不同材料切削力的对比两方面研究了铝锂合金的切削加工性能,为铝锂合金在航空航天技术中的应用提供基础数据和技术参考。

1 试验条件和方案

1.1 试验条件

试样材料及尺寸:某牌号新型铝锂合金、7085、6061、Ly12 4 种铝合金,其中铝锂合金主要成分如表 1 所示,试样尺寸均为 36mm × 36mm × 50mm。

表1 铝锂合金的主要成分质量百分数 %

Li	Cu	Mg	Zr	Zn	Mn	Al 及其他
1.2~1.8	2.5~5.2	0.3~0.9	0.05~0.14	<0.5	0.1~0.6	其余

数控机床:UCP 710 五坐标高速加工中心,转速范围 0~18000r/min,最大工作进给速度为 20m/min。

刀具:M.A.FORD 的整体硬质合金立铣刀,直径 12mm,2 刃,螺旋角 30°,底部倒角 $r=0.5\text{mm}$ 。

测试仪器:Kistler 9265B 动态测力仪。

1.2 试验方案

针对转速 n 和每齿进给量 f_z 对铝锂合金和 7085、6061、Ly12 4 种铝合金进行高速铣削试验,对切削过程中的切削力进行测量;试验过程中,保持切削宽度 a_c 和切削深度 a_p 不变,铣削方式为顺铣干切削,具体参数如

表 2 所示,每个转速对应 4 个不同的每齿进给量,共 20 组参数。

表2 铣削参数

$n / (r \cdot \min^{-1})$	$v / (m \cdot \min^{-1})$	$f_z / (mm \cdot z^{-1})$	a_p / mm	a_e / mm
6000	226.19	0.08 0.12 0.16 0.20	10	2
9000	339.29			
12000	452.39			
15000	565.49			
18000	678.58			

2 试验结果分析

试验结果中, F_x 为进给方向上的力, F_y 为垂直于进给方向上的力, F_z 为刀具轴向方向上的力, 3 者分别取其各自方向上 20 个峰值力的平均值。 F_{xy} 为铣削平面内的合力即 F_x 和 F_y 的合力, 具体如图 1 所示, F 为 3 向合力。

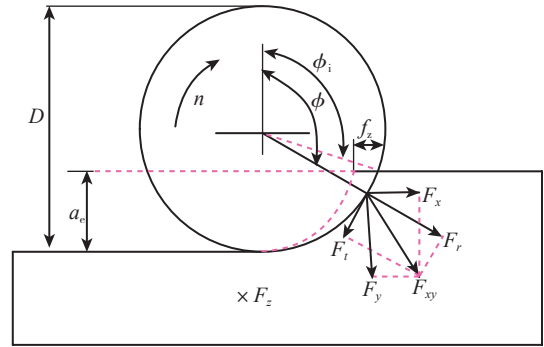


图1 侧铣时的切削力示意图
Fig.1 Cutting forces of side milling

2.1 铣削速度对切削力的影响

如切削力曲线图 2 (a) 所示, F_x 随着转速的提高, 即切削速度的提高, 呈现先逐渐增大, 在转速 $n=15000r/min$ 处达到最大之后又开始降低的趋势。图 2 (b) 可以看出, 随着切削速度的提高, F_y 逐渐增大, 但增大幅

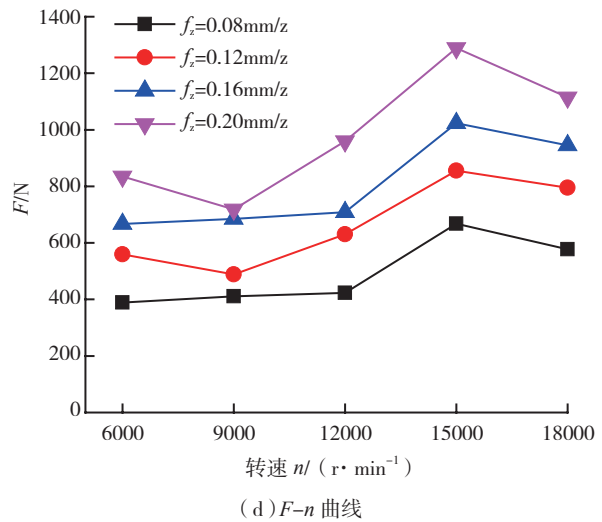
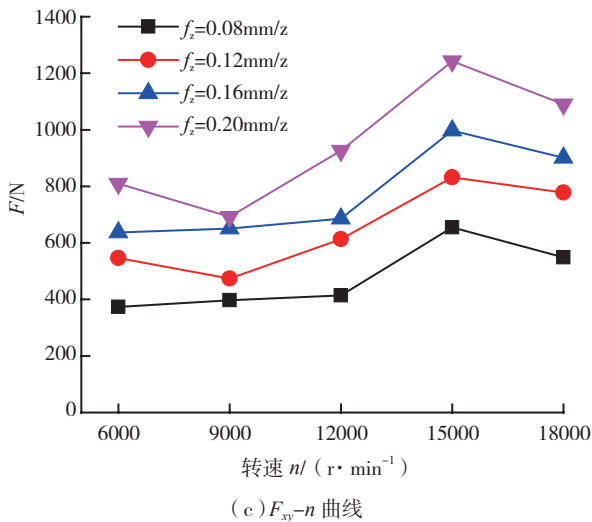
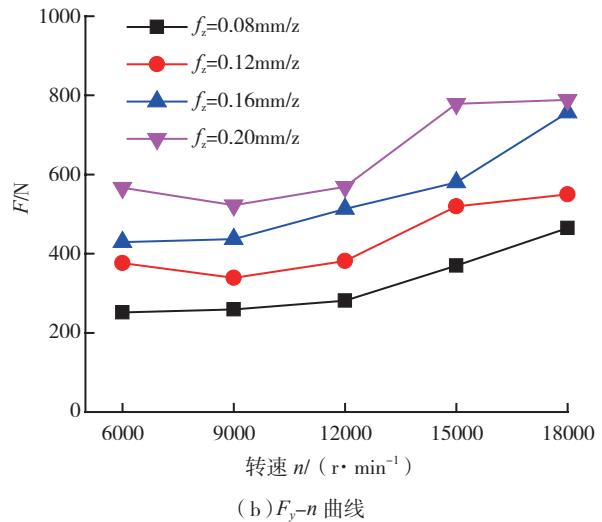
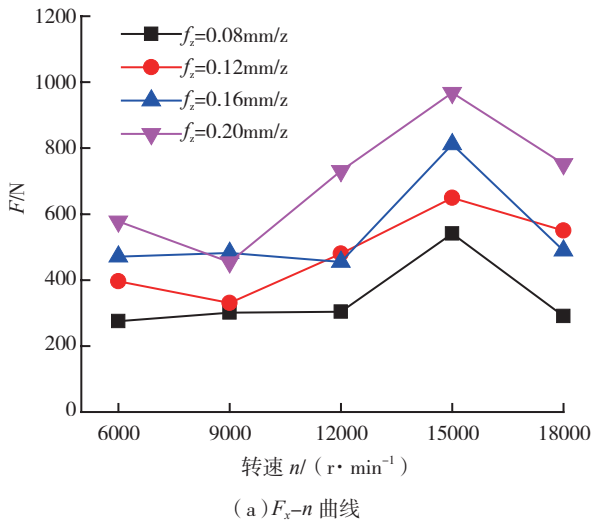


图2 切削速度对切削力的影响
Fig.2 Influence of cutting speed on cutting forces

度不大。 F_y 主要反映工件的回弹,随着切削速度的提高,后刀面对已加工表面的挤压速度随之上升,故在一定程度上会导致 F_y 的增加。图2(c)、(d)可以看出,对于不同的每齿进给量,切削力 F_{xy} 和 F 与 F_x 有着相似的规律,随着转速的提高, F_{xy} 和 F 有逐渐增大的趋势,在转速达到15000r/min后增大趋势有所放缓,且有减小的趋势。分析其原因,切削速度较低时,随着切削速度提高,摩擦系数增大,剪切角 ϕ 减小,如公式(1)所示,会导致剪切力 F_s 增大,从而引起切削力的增大^[9]。

$$F_s = S_s \times A_c / \sin \phi, \quad (1)$$

式中: F_s 为剪切力, S_s 为材料动态剪切强度, A_c 为切削层截面积, ϕ 为剪切角。

切削速度较高时,随着切削速度的提高,剪切角 ϕ 增大,剪切面减小,再加上材料的软化,从而切削力呈现下降的趋势,但同时如公式(2)所示,转速 n 增大必然导致进给速度 V_f 提高,从而造成进给切削抗力增大;且

高速切削时,高频冲击增大,会导致切削力的提高^[10]。

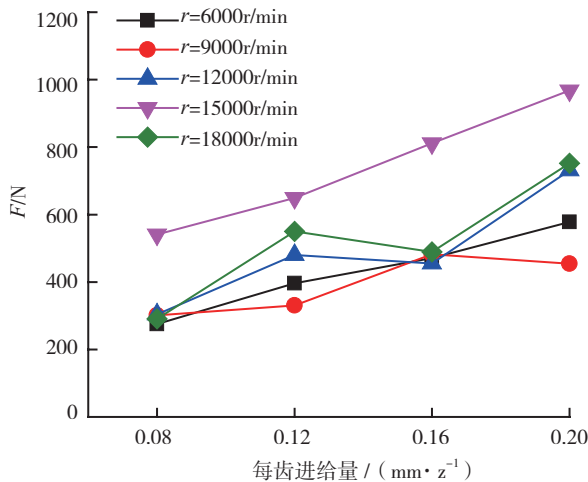
$$V_f = n \times z \times f_z, \quad (2)$$

式中: V_f 为进给速度, n 为主轴转速, z 为刀具齿数, f_z 为每齿进给量。

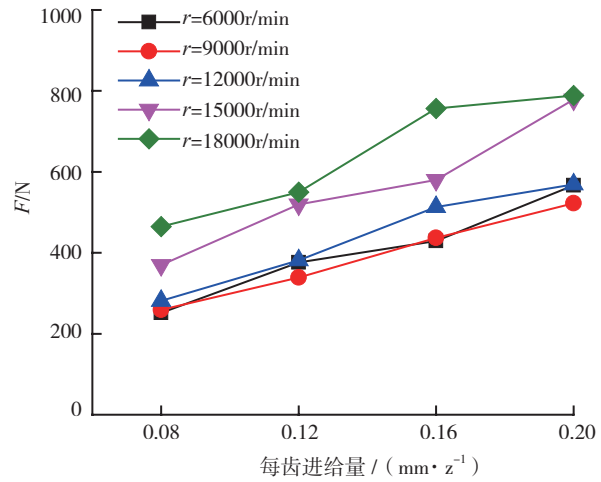
综合考虑以上多种因素的影响,在转速低于15000r/min时,进给切削抗力和摩擦系数对整体切削力的影响较大,导致切削力有增大的趋势;转速大于15000r/min之后,由于切削速度较高引起材料热软化对整体切削力的影响较大,致使切削力的增大趋势放缓和稍许降低。

切削过程中,切削力的增大,必然导致刀具磨损的加剧,加工效率的下降,生产成本的提高。而对于一些薄壁结构件的加工,切削力的增大会导致严重的加工变形。因此在铝锂合金的实际生产过程中,应尽量避免选择 $n=15000$ r/min附近的转速。

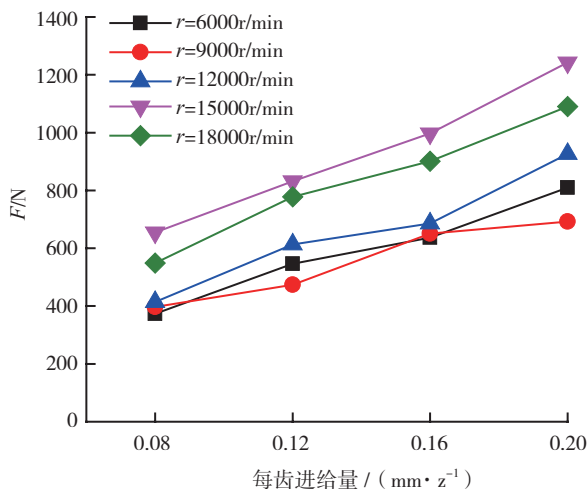
2.2 每齿进给量对切削力的影响



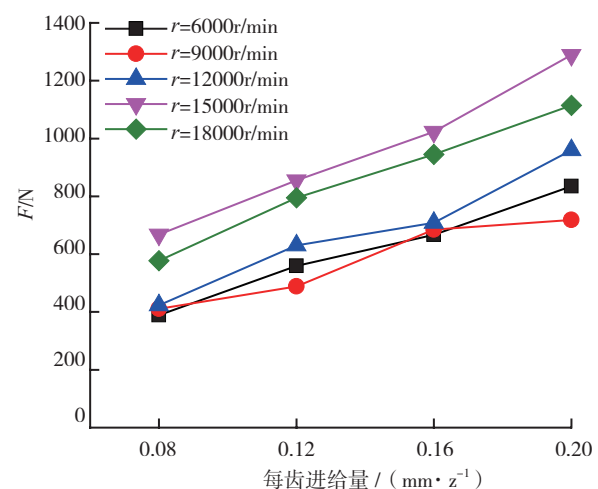
(a) F_x-f_z 曲线



(b) F_y-f_z 曲线



(c) $F_{xy}-f_z$ 曲线



(d) $F-f_z$ 曲线

图3 每齿进给量对切削力的影响

Fig.3 Influence of feed per tooth on cutting forces

相比于切削速度,每齿进给量对切削力的影响规律则比较显著。

根据图3(a)和图3(b)可以看出,随着每齿进给量的增大,切削力 F_x 、 F_y 都逐渐增大,且增大的幅度和趋势比较明显,由此必然导致合力 F_{xy} 、 F 的增大。从图3(c)、(d)中可以看出,对于不同的转速,合力 F_{xy} 、 F 确实呈现出随着每齿进给量增大而不断增大的规律。

分析其原因,随着每齿进给量的增大,切除材料的厚度将会增大,如公式(3)所示,根据切削原理可知,在单齿侧铣时,切向力 F_t 在一个铣削周期内和铣削层截面积 A_c 成正比,可近似为公式:

$$F_t = \begin{cases} k_c A_c = k_c a_p f_z \sin \phi & \phi_i < \phi < 180^\circ \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: k_c 为系数, A_c 为铣削层截面积, ϕ_i 为切入角, a_p 为轴向切削深度, f_z 为每齿进给量, 180° 为切出角,具体几何参数如图1所示。

显然,随着每齿进给量的增加,切向力 F_t 将会增大。根据力的合成与分解原理可知,对应的其他分力如径向力 F_r 、 F_x 、 F_y 以及合力 F_{xy} 、 F 也是随着每齿进给量的增加而增大。且主轴转速保持不变时,随着每齿进给量的增加,根据公式(2)可知,进给速度不断提高,从而进给切削抗力增大,另一方面材料去除率增大,刀-屑接触区摩擦增大,刀具磨损过程加快,且加上高频冲击等原

因,必然导致切削力增大。

因此,在铝锂合金的实际生产加工过程中,在保证加工效率的情况下,应尽量降低每齿进给量的大小,有助于降低刀具的磨损和破损速度,增加刀具寿命,减少加工过程中的换刀次数,提高生产效率,降低生产成本。

2.3 4种铝合金切削力的对比分析

试验采用与铣削铝锂合金相同的切削参数和刀具对常见的铝合金7085、6061以及LY12进行切削试验以及切削力的测量,从切削力角度分析铝锂合金的切削加工性能。

部分结果如图4所示,主轴转速为 $n=9000\text{r/min}$ 和 $n=15000\text{r/min}$ 时,在4种不同的每齿进给量的情况下,4种不同的铝合金材料的切削力有着同样的规律,其沿进给方向上的切削力 F_x 与垂直于进给方向的切削力 F_y 相比稍大,但两者都明显比沿主轴方向上的力 F_z 大得多。且相同铣削参数下,从图中可以看出,几种材料的切削力的数值大小有微小的差别,例如:图4(a)中,6061在 $n=9000\text{r/min}$, $f_z=0.16\text{mm/z}$ 时,切削力和其余3种材料相比稍大一些;但在 $n=15000\text{r/min}$, $f_z=0.08\text{mm/z}$ 时,如图4(c)切削力与其余3种材料相比又稍小一点。但总体来说,如图4(b)和(d)所示,几种材料的切削力相差并不大;高速铣削铝锂合金的切削力总体与7085比较接近。

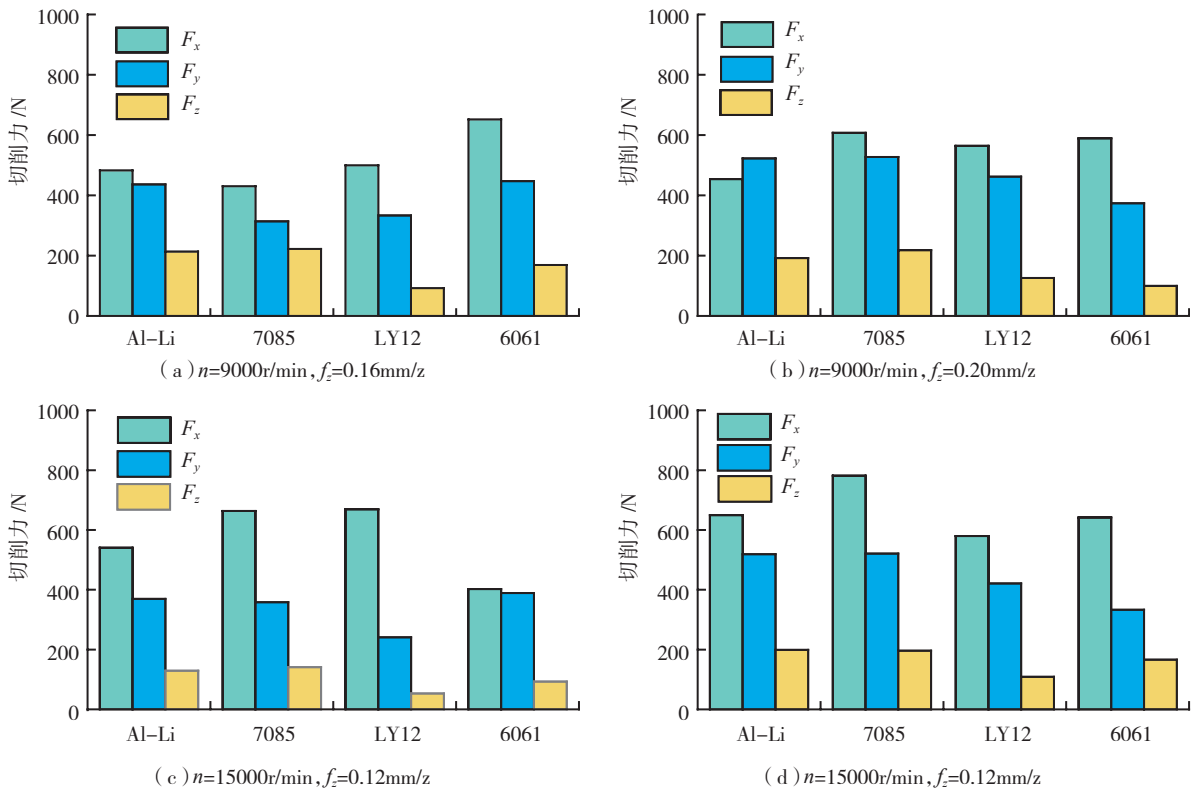


图4 高速铣削不同铝合金时的切削力对比
Fig.4 Cutting forces of different aluminum alloys

(下转第90页)

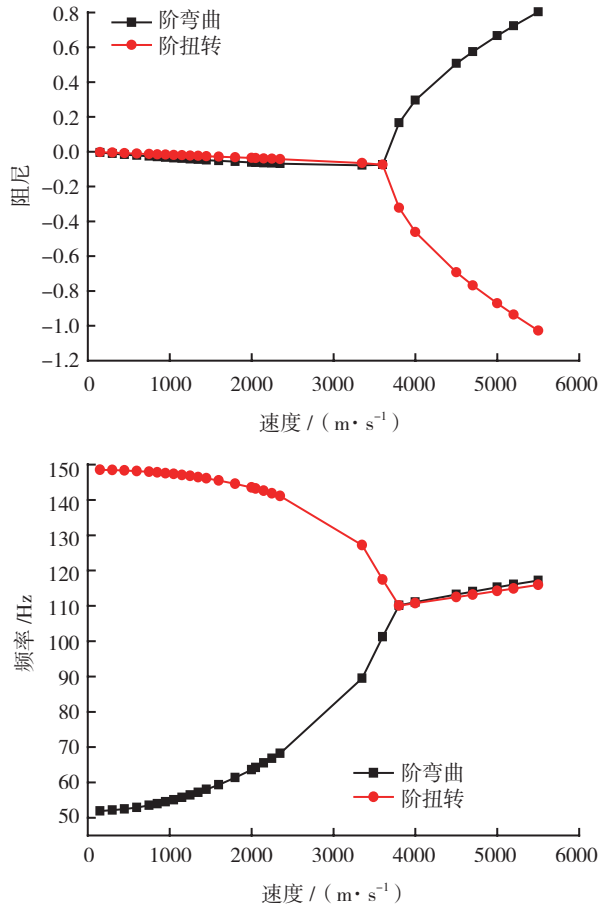


图5 弹翼颤振计算的V-g、V-w图 (H=0km, M=3.5)
Fig.5 Chattering result of V-g、V-w graph
(H=0km, M=3.5)

服机构总装后完成,采用实测的结构频率、模态完成弹翼的颤振特性评估。

弹翼通过设计载荷下(一般为使用载荷的1.15~1.5倍)地面静力强度考核,其颤振临界动压裕量评估满足相应要求(临界动压不低于实际飞行最大动压的1.15倍),可正式装机进行飞行试验考核,满足实际使用后最终确定弹翼的结构。

6 结论

本文给出了超塑成形/扩散连接四层网格结构弹翼的设计方法。对某型空空导弹弹翼设计的5种结构布局工况进行了对比分析计算,采用接触算法对弹翼根部连接部分进行了分析,确定了初步的弹翼结构方案,对弹翼颤振分析、结构试验提出了设计要求和实现方法。

结果表明,通过增加弹翼纵、横加强梁数量、增加成形板料厚度都可以有效减小弹翼的应力和变形水平,但通过增加纵向、横向加强梁的数量和优化布局形式可最大程度减小弹翼设计重量,提高弹翼的强度和刚度。

参考文献

- [1] 张永杰,孙秦. 层合板预紧螺栓搭接孔边应力分析. 北京: 科学出版社,2007.
- [2] 赵永辉编著. 气动弹性力学与控制. 应用力学学报,2009, 26(2):389-391.

(责编 杰一)

(上接第86页)

对于新型材料铝锂合金来说,在实际加工过程中,仅从切削力的角度来讲,其加工工艺可以采用与常规的高强度铝合金如7085的相同的加工工艺。

3 结论

(1)通过对铝锂合金进行的高速切削试验得出了高速铣削铝锂合金的切削力与切削速度和每齿进给量的关系曲线。试验发现高速铣削铝锂合金过程中,切削力随着每齿进给量的提高而增大,随着转速的提高,由于受到多种因素的共同影响,切削力变化趋势不明显,呈现出先稍有增大后又逐渐减小的趋势。

(2)通过试验将铝锂合金与7085、ly12和6061几种常用铝合金的切削力进行对比,发现几种材料切削力变化规律相似,数值差别不大;铝锂合金的切削性能与7085比较接近。本研究为新型航空材料铝锂合金的实际加工生产过程中切削参数的选择以及加工规范的制定提供重要的参考数据。

参考文献

- [1] 何宁, Schulz H, Abele E. 高速加工理论与应用. 科学出版, 2010.
- [2] 张荣霞,曾元松. 铝锂合金的发展、工艺特性及国外应用现状. 航空制造技术,2007(增刊):438-441.
- [3] 尹登峰,郑子樵. 铝锂合金的研究开发的历史现状. 材料导报,2003(2):19-23.
- [4] 邱惠中. 铝锂合金的发展概况及其应用. 宇航材料工艺, 1993(4):38-45.
- [5] 刘斌,陈铮铮. 铝锂合金的发展与应用. 现代机械,2001(4): 71-75.
- [6] Lytle M T, Weft J A. The plastic anisotropy of an Al-Li-Cu-Zr alloy extrusion in unidirectional deformation. Metal Mater Trans A, 1996, 27(11): 3503-3511.
- [7] Li H Y, Yi T G, Zeng Z D, et al. Effect of aging time on strength and microstructures of an Al-Cu-Li-Zn-Mg-Mn-Zr alloy. Materials Science and Engineering A, 2008 (498): 314-320.
- [8] Gupta R K, Nayan N, Sharma S C. Development and characterization of Al-Li alloys. Materials Science and Engineering A, 2006, 420: 228-234.
- [9] Recht R F. A Dynamic Analysis of High-speed Machining. ASME, High Speed Machining,1984. PED(12): 83-93.
- [10] 吴自浩. 高速铣削铝合金刀具选型及模糊综合评判. 电子机械工程,2005(2):44-48.

(责编 小城)