

铆钉数量及间距对自冲铆接头性能的影响

张先炼 何晓聪 程强 赵伦

(昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500)

文 摘 为研究铆钉数量及铆钉间距对自冲铆接头性能的影响,首先采用数值模拟和试验的方式优化了铆接参数,制备了三组不同形式接头;基于拉伸-剪切实验研究了各组接头的静力学性能及其失效形式;并运用 MATLAB 2014b 用户自定义开发平台精确计算出各组接头的能量吸收值。结果表明:数值模拟结果与实验具有良好的一致性;单铆钉接头失效形式为铆钉从下板完全拉出,双铆钉接头失效形式为板材断裂失效;双铆钉接头性能明显优于单铆钉接头,而铆钉间距对接头静失效载荷和能量吸收性能的影响较小。

关键词 自冲铆,数值模拟,失效形式,静失效载荷,能量吸收

中图分类号:TH131.1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.02.012

Influence of Number and Distance of Rivets on the Performance of Self-Piercing Riveted Joints

ZHANG Xianlian HE Xiacong CHENG Qiang ZHAO Lun

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract In order to study the influence of the number and distance of rivets on the performance of self-piercing riveted joints, the numerical simulation and experiments were conducted to optimize the parameters of self-piercing riveting (SPR), and three different types of joints were made. The static performance and failure modes of different joints were studied based on the tensile-shear tests. And the energy absorption value was calculated accurately through the user defined development which is based on MATLAB R2014b platform. The results show that the numerical simulation result was highly identical to the experimental result. The single-riveted joints failed by the rivet being pulled out from the lower sheet, and the double-riveted joints failed due to the sheet fracture. The performance of double-riveted joints was obviously superior to that of single-riveted joints. However, the distance of rivets had little influence on the static failure strength and energy absorption performance.

Key words Self-piercing riveting, Numerical simulation, Failure mode, Static failure strength, Energy absorption

0 引言

随着人们环境意识的不断增强,越来越多的轻量化材料被用在汽车工业中以减少能源损耗和降低二氧化碳排放量。本研究以铝锂合金为载体,其低密度、高弹性模量、高比强度及比刚度,采用铝锂合金替代传统铝合金结构材料,可使构件质量减轻 15%,刚度提高 15%~20%^[1]。然而,传统的连接方式很难甚至不能对这些材料进行连接;近年来快速发展的自冲铆技术^[2-3]可以实现对轻量化材料的有效连接。

针对自冲铆接技术,国内外学者已经进行了大量的研究。邢保英等^[4]研究了铆钉分布形式对自冲铆接头性能的影响,得出纵向分布铆钉接头比横向分布铆钉接头的缓冲吸震性能更好,当疲劳载荷水平较高时,纵向分布铆钉形式的接头可提高疲劳寿命,而当疲劳载荷水平较低时,横向分布铆钉形式接头可提高疲劳寿命。HOANG 等^[5]通过 LS-DYNA 有限元分析软件模拟了自冲铆接过程,并研究了不同的网格划分尺寸和摩擦因数对铆接过程的影响。HE 等^[6]对铝

收稿日期:2015-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51565023,51565022);国家科技重大专项项目(2012ZX04012-031)

作者简介:张先炼,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为薄板材料连接新技术。E-mail:zxlian4gd@163.com

通讯作者:何晓聪,教授,博士生导师,从事薄板材料连接新技术研究。E-mail:xiaocong_he@126.com

合金与铜合金多种板材组合形式的自冲铆接头进行了研究,发现铜合金同种搭接接头静强度最高且疲劳性能最优。KANG 等^[7]采用实验和数值模拟的方法比较了 T 型、十字型和拉剪自冲铆接头的静强度和疲劳强度。FU 等^[8]研究了铆接参数变化对铝合金自冲铆接头机械性能的影响及接头疲劳失效机理,发现疲劳循环次数至 75% 时,接头强度逐渐降低,90% 时强度突然下降,还发现穿刺力在一定范围内变化会影响接头静失效载荷,而对疲劳性能几乎没有影响。钟毅等^[9]研究了低碳钢和铝合金自冲铆的剪切-拉伸过程,并就接头破坏形式和拉剪强度提出了预测方法。而上述研究主要针对常规材料和一般单搭自冲铆接头,对采用 1420 铝锂合金板材的多铆钉自冲铆接头方面的研究相对较少。

本文通过数值模拟和试验对铆接参数进行了优化获得了最佳铆接接头,制备了三种不同形式接头;基于拉伸-剪切实验分析对比了各组接头的静失效载荷及能量吸收值;讨论了各组接头的失效形式及其原因。以期为后续对 1420 铝锂合金板材及多铆钉自冲铆接头的进一步研究提供相关参考。

1 实验

1.1 试件制备

所用材料为 1420 铝锂合金板,几何尺寸均为 110 mm×20 mm×1.5 mm。为获得板材力学性能参数,采用标距为 20 mm 的引伸计在 MTS 电液伺服材料试验机上进行力学性能实验。获得 1420 铝锂合金板弹性模量为 69 GPa,抗拉强度为 364.6 MPa,屈服强度为 294.9 MPa,伸长率为 14.2%。

铆接前,首先采用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对自冲铆接过程进行数值模拟分析。根据铆钉、板材及下模的实际尺寸建立二维轴对称有限元模型如图 1 所示,其中冲头、压边圈和下模被定义为刚体,铆钉和板材被定义为分段多线性弹塑性材料模型。整个铆接模拟过程设定用时为 0.6 s,各部分之间采用二维单面自动接触。同时采用沙漏控制以节约计算时间和降低沙漏对计算结果的影响。数值模拟中铆钉及 1420 铝锂合金板材料参数如表 1 所示。评价自冲铆接头成形质量通常参考国际常用的三个检测标准:钉脚张开度、残余底厚以及钉头高度^[10]。故数值模拟中通过微调上板塑性应变比和接触动静摩擦因数,对比数值模拟结果,选取最优结果。

铆接试验在德国 Böllhoff 公司生产的自冲铆接设备[RIVSET VARIO-FC(MTF)]上进行,试验过程参照 GB 2649—89 焊接接头机械性能试验取样方法。结合数值模拟结果,并通过剖面直观检测法对比试验接头成形质量,确定最优截面。图 2 为数值模拟结果

与实际接头截面对比图,可看出二者具有良好的一致性。通过数值模拟可以更直观地观察到铆接过程中铆钉和板材的变形情况,有利于优化实际铆接参数以提高接头成形质量。为便于叙述,将各类接头命名如下:SR 接头:单铆钉接头;DF 接头:双铆钉距离为 15 mm 接头;DT 接头:双铆钉距离为 30 mm 接头。以最优截面铆接参数分别制成 SR、DF 和 DT 接头各 8 个,各组接头试样尺寸如图 3 所示。

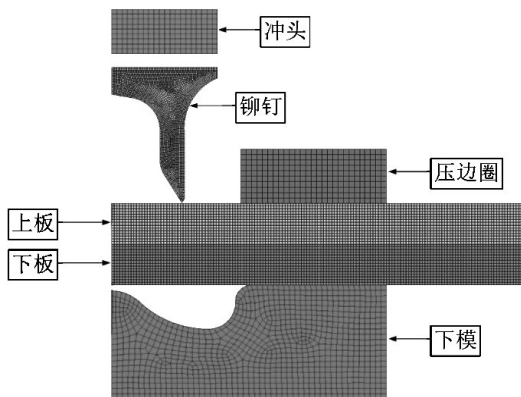


图 1 自冲铆接过程有限元模型

Fig. 1 Finite element model of SPR process

表 1 数值模拟材料参数

Tab. 1 Materials parameters of numerical analysis

材料	密度 /kg·m ⁻³	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服强度 /MPa	切线模量 /MPa
1420 铝锂合金板	2470	69	0.33	295	384
铆钉	7800	207	0.3	1720	2070

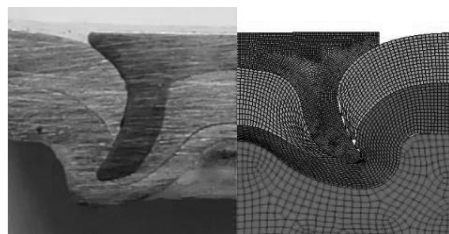


图 2 最优截面与模拟结果对比

Fig. 2 Cross-section comparison between test and simulation

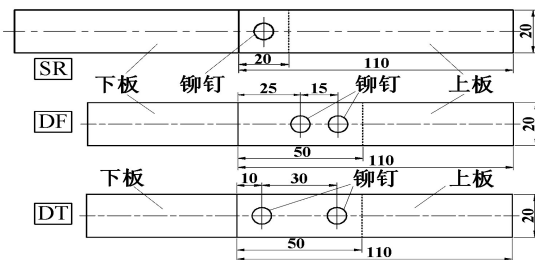


图 3 各类接头试样尺寸

Fig. 3 Specimen geometry of different joints

1.2 拉伸-剪切实验

拉伸—剪切实验在美国 MTS 公司生产的 land-mark100 型电液伺服材料试验机上进行。为减小试样受力不对中附加扭矩导致的影响,在所有试件两端分别夹持尺寸为 25 mm×20 mm×1.5 mm 的垫片;设定试验拉伸速率为 5 mm/min,分别对各组接头进行 8 次重复拉伸—剪切试验。

2 结果及分析

2.1 静失效载荷及失效模式分析

通过拉伸剪切实验获得各组接头的载荷—位移曲线,以便比较分别从中取一条具有代表性的载荷—位移曲线绘制图 4。各组接头的失效试样见图 5。

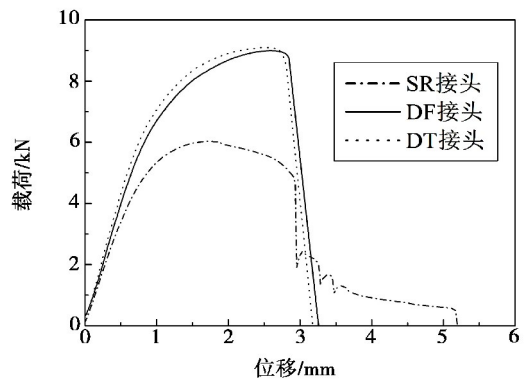


图 4 各组接头载荷—位移曲线对比

Fig. 4 Load-displacement curves of different specimens

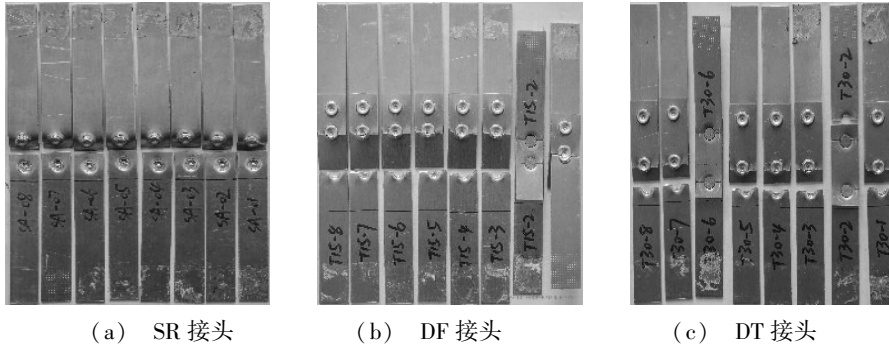


图 5 各组接头失效试样

Fig. 5 Failed specimens of different joints

对于实验结果,依据 GB 4883—1985 数据的统计处理和解释正态样本异常值的判断和处理,选用奈尔(Nair)检验法处理异常值。首先求得 SR 接头、DF 接头和 DT 接头的实验样本数据均值及标准差如表 2 所示。然后将各组样本数据按大小顺序排列,确定检出水平 $\alpha = 5\%$,查表得对应 $n = 8$ 的数据临界值 $R_{(0.95)} = 2.334$,计算统计量:

$$R_n = (x_{(n)} - \bar{x}) / \sigma,$$

$$R'_n = (\bar{x} - x_{(1)}) / \sigma$$

式中, σ 为总体样本标准差, \bar{x} 是样本均值, $x_{(1)}$ 为最小值, $x_{(n)}$ 为最大值。经检验,所有个体样本统计量均小于临界值,故实验数据中没有异常值,实验结果有效。

表 2 各组接头统计量

Tab.2 Statistics of different joints

数据类型	静失效载荷		失效位移	
	均值/kN	标准差	均值/mm	标准差
SR 接头	6.02	2.44	5.03	0.23
DF 接头	9.01	2.01	3.40	0.33
DT 接头	9.13	1.37	3.37	0.20

由表 2 可知各组接头的静失效载荷均值,DF 和宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 2 期

DT 接头的静失效载荷均值分别 9.01 和 9.13 kN,后者仅比前者高 1.33%,这种微小的差距是受铆钉分布形式的影响,而 DT 接头铆钉分布形式更为合理。SR 接头所能承受的静载荷在三组接头中最小,为 6.02 kN,这是因其为单铆钉接头所致。同时,双铆钉铆接可提高自冲铆接头静强度约 50%。因此在单铆钉接头无法提供所需承载能力时,建议采用双铆钉接头以达到工程实际要求。

图 5 展示了各组接头的失效试样。SR 接头失效模式均为铆钉从下板完全拉出,其根本原因是该组接头上下板材相同,板材强度大于铆钉与下板所形成的机械内锁强度,在拉伸—剪切过程中机械内锁遭到破坏。对于 DF 接头,7 个试样因下板断裂而失效,仅有 1 个是因为上板断裂而失效;而 DT 接头有 6 个试样为下板断裂失效,2 个试样为上板断裂失效;两者失效模式相同。总体来讲,双铆钉接头失效形式为板材断裂失效,且主要为下板断裂失效。由图 5 可以看出双铆钉接头承载主要依靠其中一颗铆钉的连接,而另一颗铆钉连接区域未遭到任何破坏;同时,板材断裂主要发生在下板与内侧铆钉接触区域,且断裂路线呈现出沿下板突出区域而失效的特征;板材断裂过程中,下板内部机械内锁遭到破坏。

2.2 能量吸收分析

能量吸收值的大小直接反映自冲铆接头的缓冲吸震能力强弱。本文基于 MATLAB R2014b 软件平台用户自定义开发求解各组自冲铆接头试样的能量吸收值,以拉伸-剪切实验结果中的载荷-位移曲线数据文本档为数据来源,采用 spline 三次样条插值函数、ppval 分段插值多项式函数、integral 定积分函数、mean 平均值函数等编程求解各接头能量吸收值及该组接头能量吸收均值,其求解精度可达 0.001。

$$S_i(x) = M_i \frac{(x_{i+1}-x)^3}{6h_i} + M_{i+1} \frac{(x-x_i)^3}{6h_i} + \left(y_i - \frac{M_i h_i^2}{6} \right) \frac{x_{i+1}-x}{h_i} + \left(y_{i+1} - \frac{M_{i+1} h_i^2}{6} \right) \frac{x-x_i}{h_i}$$

$$h_i = x_{i+1} - x_i, (i=0, 1, \dots, n-1); S''(x_i) = M_i, (i=0, 1, \dots, n); S(x) = \sum S_i(x)$$

式中, n 为变量个数, $S(x)$ 为载荷-位移曲线多项式表达式, $S_i(x)$ 为其分段曲线多项式表达式。

运用该方法计算各组接头能量吸收均值。SR 接头能量吸收值为 16.67 J, 远低于 DF 接头 (22.37 J) 和 DT 接头 (21.54 J); 而 DF 和 DT 接头两者能量吸收值较为接近, 前者仅高出后者 3.85%。故在工程实际中, 当单铆钉无法达到所需缓冲吸震性能要求时, 建议采用双铆钉进行铆接。综上所述, 双铆钉接头性能明显优于单铆钉接头, 而铆钉间距对接头静强度和能量吸收性能影响较小。

3 结论

(1) 铆接过程的数值模拟结果与实际铆接结果具有良好的-致性, 有利于优化铆接参数。

(2) 拉伸-剪切实验结果有效; DT 接头铆钉分布形式更为合理, 其静失效载荷为 9.13 kN 稍高于 DF 接头 9.01 kN, SR 接头静失效载荷最低, 为 6.02 kN; 当单铆钉接头无法提供所需承载能力时, 建议采用双铆钉接头以达到工程实际要求。SR 接头失效模式全部是铆钉从下板完全拉出; DF 和 DT 接头失效模式为板材断裂失效, 主要为下板断裂失效; 三种接头在拉伸-剪切过程中下板中的机械内锁均遭到破坏。

(3) 采用 MATLAB 2014b 用户自定义开发平台精确计算出接头能量吸收值; SR 接头能量吸收值为 16.67 J, 远低于 DF 接头 (22.37 J) 和 DT 接头 (21.54 J); 双铆钉接头缓冲吸震能力明显优于单铆钉接头。

(4) 双铆钉接头性能明显优于单铆钉接头, 而铆钉间距对接头静失效载荷和能量吸收性能的影响较

小。该程序所需输入变量仅为文本文档保存路径及数量。为使程序更加快捷易用, 特别采用 int2str、strcat 和 importdata 函数使程序对文本文档名称识别趋于多样化, 同时尽量减少使用循环以提高计算效率。最后运用 plot 图形绘制函数绘出对应组自冲铆接头试样拉伸-剪切实验载荷-位移曲线, 以使用户直观检查数据是否出现异常。该方法依据数值分析原理:

参考文献

- [1] 周昌荣, 潘青林, 朱朝明, 等. 新型铝锂合金的研究和发展[J]. 材料导报, 2004(5):30-32.
- [2] HE X, PI T, Y K. Self-pierce riveting for sheet materials: state of the art[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(1/3): 27-36.
- [3] HE X, GU F, BALL A. A review of numerical analysis of friction stir welding[J]. Progress in Material Science, 2014, 65:1-66.
- [4] 邢保英, 何晓聪, 唐勇, 等. 铆钉分布形式对自冲铆接头力学性能的影响[J]. 工程力学, 2013, 12:280-285.
- [5] HOANG N H, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M, et al. Failure of aluminum self-piercing rivets: An experimental and numerical study[J]. Materials and Design, 2013, 49: 323-335.
- [6] HE X, ZHAO L, DENG C, et al. Self-piercing riveting of similar and dissimilar metal sheets of aluminum alloy and copper alloy[J]. Materials and Design, 2015, 65:923-933.
- [7] KANG SH, KIM H K. Fatigue strength evaluation of self-piercing riveted Al-5052 joints under different specimen configurations[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 80:58-68.
- [8] F U M, MALLICK P K. Fatigue of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 6111[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25:183-189.
- [9] 钟毅, 林健, 雷永平, 等. 自冲铆接接头拉剪强度的数值模拟研究[J]. 材料工程, 2011(11):18-22.
- [10] 何晓聪, 何家宁, 柯建宏, 等. 自冲铆接头的质量评价及强度可靠性预测[J]. 湖南大学学报, 2010(12):1-4.