

1420 铝锂合金同种异种自冲铆单搭接接头力学性能

程 强 何晓聪 张先炼 卢 毅

(昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500)

摘 要 为探究 1420 铝锂合金自冲铆接头的力学性能,本文采用自冲铆连接设备对 1420 铝锂合金 (AL1420) 同种及其与铜合金 (H62) 异种板材组合进行铆接,并通过拉伸-剪切试验测试接头的力学性能,运用 SPSS 数据分析软件对接头的最大载荷和最大位移量进行分析。结果表明:AL1420-AL1420 和 AL1420-H62 两种接头的失效形式皆为铆钉从下板拉脱,铆钉头与上板接触区域出现不同程度撕裂;H62-AL1420 接头除铆钉从下板拉脱,铆钉头与下板接触区域仅出现凹陷。AL1420-AL1420 接头最大载荷最高(6 026.8 N),能量吸收性能最好(16.84 J)。对于异种板材组合,H62-AL1420 接头的最大载荷(5 304.0 N)大于 AL1420-H62 接头(5 229.3 N),AL1420-H62 接头的能量吸收值(16.79 J)大于 H62-AL1420 接头(15.08 J),异种板材铆接时则优先采用能量吸收性能较好的 AL1420-H62 搭接形式。

关键词 自冲铆,工艺参数,1420 铝锂合金,失效形式,能量吸收

中图分类号:TH131.1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.01.015

Mechanical Properties of Single-Lap Self-Pierce Riveted Joints in Similar and Dissimilar Sheets About 1420 Aluminum-Lithium Alloys

CHENG Qiang HE Xiaocong ZHANG Xianlian LU Yi

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

Abstract To study the mechanical properties of the self-piercing riveted joints about 1420 aluminum-lithium alloys, the equipment of self-piercing riveting was applied to join 1420 aluminum-lithium alloys (AL1420) with itself and copper alloys (H62). Tensile-shear tests was used to test mechanical properties of self-pierce riveted joints and SPSS was utilized to analyze the maximum loads and maximum displacements of joints. The results show that the rivets of AL1420-AL1420 joint and AL1420-H62 joint are pulled out from lower sheet, and the location in upper sheet contacted with the head of rivet has different tear. The rivet of H62-AL1420 joint is pulled out from lower sheet also, but the upper sheet merely has some indentation. The mean value of maximum loads of AL1420-AL1420 joint(6 026.8 N) is supreme among these joints, and the energy absorption value of the AL1420-AL1420 joint(16.84 J) is greater than the two other joints. For the dissimilar metal sheet combinations, the mean value of maximum loads of H62-AL1420 joint(5 304.0 N) is superior to the AL1420-H62 joint(5 229.3 N), and the energy absorption value of the AL1420-H62 joint(16.79 J) is higher than the H62-AL1420 joint (15.08 J). For the combinations of dissimilar sheets, the joints of AL1420-H62 is a better choice for its higher energy absorption value.

Key words SPR (Self-piercing riveting), Technical parameters, 1420 Aluminum-Lithium alloys, Failure mode, Energy absorption

收稿日期:2015-06-17

基金项目:国家自然科学基金(50965009);昆明理工大学分析测试基金项目(20150507)

作者简介:程强,1989 年出生,硕士研究生,主要从事薄板材料连接新技术工作。E-mail:qiangcheng1214@163.com

通讯作者:何晓聪,1955 年,教授,博士生导师,主要从事薄板材料连接新技术工作。E-mail:xiaocong_he@126.com

0 引言

铝锂合金是一种具有低密度、高强度和良好损伤容限性的合金材料。与常规铝合金材料相比,可使构件密度降低 3%,弹性模量提高约 6%,质量减轻 10%~15%,刚度提高 15%~20%^[1]。运用点焊技术难以实现铝锂合金的有效连接^[2-3],而自冲铆(SPR)技术对连接焊接性能差的材料有着绝对优势。SPR 技术实质是一种冷成型技术,用于实现多层板材及异种板材的有效连接。在连接过程中,利用铆钉在刺入板材的过程中发生塑性大变形并向四周张开形成铆扣,这种变形在基板中形成一个永久性紧固结构,从而将基板紧紧连接在一起^[4-5]。

针对自冲铆接头,国内外学者对其进行了相关研究,何晓聪等^[6]对自冲铆接头的质量评价方法进行介绍并补充了钉脚张开度的检测标准,同时还给出了自冲铆接头强度可靠性预测方法。Abe 等^[7-8]分析了不同板料厚度、组合方式对自冲铆接头静强度的影响,指出自冲铆接头强度取决于自锁量。Sun 等^[9]研究了同种板材和异种板材组合自冲铆接头的疲劳特性,并对使用黏合剂的复合接头进行了疲劳性能分析,得到了黏合剂对接头的疲劳强度的影响。万淑敏等^[10]对自冲铆铆接过程和连接质量进行了有限元模拟分析,并研究了模具主要工艺参数对自冲铆接头质量的影响。许竞楠等^[11]利用阳极化覆膜的方法制备 5052 金相试样,对接头进行了微观分析,观测接头机械自锁区材料组织及流向,探明了在接头自锁区附近由于纤维组织的形成,使金属特性各向异性化,并沿纤维方向的强度和塑性将高于垂直方向。以上主要是对常规铝合金的研究。

目前对 1420 铝锂合金(AL1420)的自冲铆接头力学性能的研究相对较少,本文将采用自冲铆接工艺对 AL1420 同种及其与 H62 组合的三组接头进行试验,对比异种合金组合时不同刺穿方向对接头性能的影响,并对同种组合接头的力学性能进行分析,以期实现对铝锂合金的有效连接。

1 实验

1.1 自冲铆试件的制备

被连接板材为 1420 铝锂合金(AL1420)和铜合金(H62),两种材料的基本力学性能如表 1 所示。采用 Bollhoff 公司生产的 RIVSET VARIO-FC(MTF)型自冲铆接系统对三组接头进行连接,这三组接头分别为 AL1420-AL1420 接头(AA)、H62-AL1420 接头(HA)和 AL1420-H62 接头(AH)。试件结构的形式如图 1 所示。

表 1 AL1420 和 H62 力学性能表

Tab. 1 Mechanical properties of AL1420 and H62

材料	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%
AL1420	69	364.6	294.9	14.2
H62	110	424.5	340.3	30

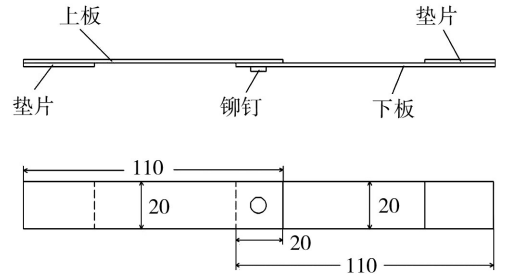


图 1 试件结构

Fig. 1 Configuration of SPR joint

通过直观检测法对接头成形质量予以评价,通常自冲铆接头质量是根据钉头高度 h 、残余底厚 t 及钉脚张开度 x 三个参数进行评价^[6],如图 2 所示。

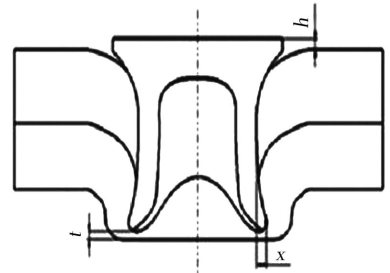
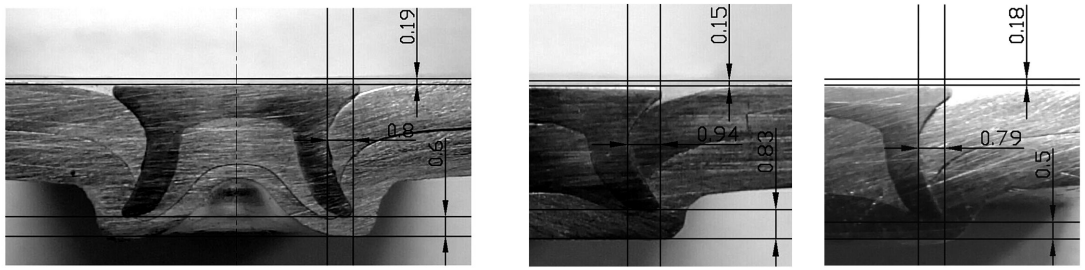


图 2 SPR 接头截面模型

Fig. 2 Cross-section model of the SPR joint

图 3 所示分别为 AA 组、AH 组和 HA 组接头的截面图。HA 组接头钉脚张开度 $x=0.94$,大于 AH 组接头的 0.79 mm,HA 组接头可形成较好的机械内锁,接头强度更高;HA 组接头钉头高度 $h=0.15$ mm,低于 AH 组接头的 0.18 mm,且其残余底厚 $t=0.94$ mm,大于 AH 组接头的 0.5 mm,与 AH 组比较,HA 组接头既能保证外观要求和强度要求又具有较好的密封抗蚀能力;HA 组以 H62 为上板,由于 H62 较 AL1420 耐磨,故该组合形式又可提高接头的耐磨性。在 AL1420 和 H62 异种板材组合的工程应用中,当承载、密封抗蚀、耐磨要求高时,优先采用 HA 组接头。对 AA 组接头分析,其成形质量很好。与异种板材接头的成形质量相比,其钉脚张开度大于 AH 组接头的,小于 HA 组接头的。



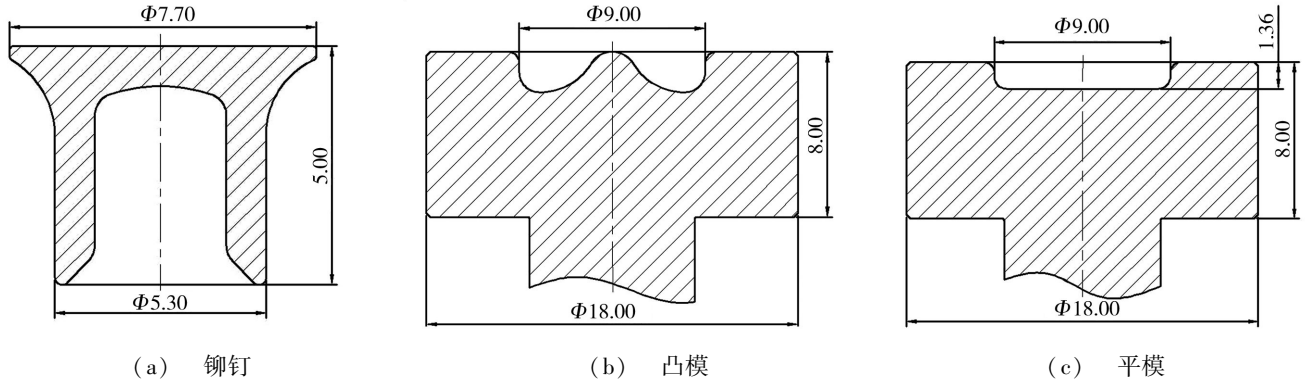
(a) AA 组接头截面 (b) HA 组接头截面 (c) AH 组接头截面

图3 接头截面

Fig. 3 The cross-section of joints

经上述试铆及截面成形质量的分析,最终确定铆接 AA 组时下模采用凸模,铆接 HA 组及 AH 组时皆采用平模,铆接所用铆钉及模具如图 4 所示。在铆接过程中通过

载荷—行程曲线在线监控系统保证铆接质量。铆接试验得到 AL1420—AL1420、H62—AL1420 和 AL1420—H62 接头各 10 个,三组试件最优铆接工艺参数如表 2 所示。



(a) 铆钉 (b) 凸模 (c) 平模

图4 自冲铆连接工具尺寸

Fig. 4 Geometry of SPR tools

表 2 铆接最优工艺参数表

Tab. 2 Optimum parameters for SPR

试件 编号	预压紧压力 /MPa	刺穿压力 /MPa	整形压力 /MPa	行程 /mm
AA	5	19	14	132.40
HA	5	18	10	132.40
AH	5	18	10	132.40

1.2 静力学拉伸—剪切试验

在 MTS Landmark 100 电液伺服材料试验机上进行拉伸—剪切试验。(1)为了减小拉伸—剪切过程中力不对中产生的附加弯矩,在试件两端加持 25 mm × 20 mm × 1.5 mm 垫片;(2)拉伸速率为 5 mm/min,每组接头进行 10 次重复性拉伸—剪切试验。三组接头的载荷—位移曲线如图 5 所示。

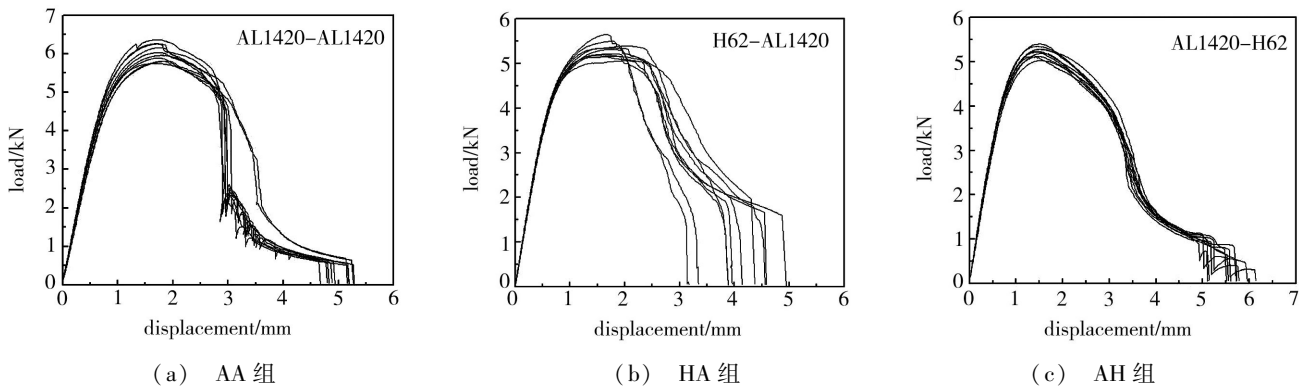


图5 载荷—位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves

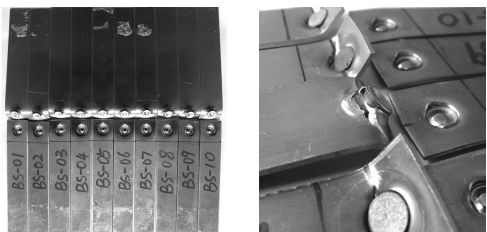
2 结果分析

2.1 失效形式分析

三组试件的失效形式如图 6 所示,AA 组失效形
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第1期

式为铆钉从下板拉脱,内锁结构破坏,铆钉拔出时在下板留有严重划痕;上板处与铆钉头接触区域出现撕裂,这主要是由铆钉材料的强度远大于 AL1420 强度

所致。AH 组失效形式为铆钉从下板拉脱,内锁破坏,下板留有严重划痕;在上板处同样出现了撕裂,但撕裂程度较 AA 组更重,这是因为 AH 组中下板 H62 的抗拉强度和延伸性要优于 AA 组中下板 AL1420,当 AH 组中铆钉从下板拉脱时所需载荷更大,从而上板撕裂现象更严重。HA 组铆钉从下板中拉脱,内锁结构破坏,在下板亦留有严重划痕;但在上板处与铆钉头接触区域仅出现一定程度凹陷,并未撕裂,分析原因可知上板 H62 的延伸性及抗拉强度皆大于下板 AL1420 的,在上板发生撕裂前铆钉已从下板拉脱。



(c) AH 组

图 6 接头拉伸—剪切试验的失效形式

Fig. 6 Failure mode of joints by tensile-shear tests

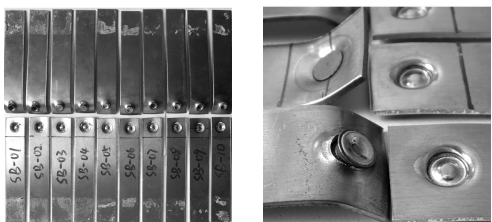
2.2 强度分析

通过 SPSS 统计分析软件对试验数据进行分析,得到各组试件拉伸—剪切的最大载荷和最大位移量的正态 Q-Q 图,如图 7 所示。Q-Q 图是用来检验样本分布是否来自指定的理论分布的一种统计图形,其横轴是观测值的分位数,纵轴为指定的理论分布的分位数,散点分布越接近标准直线,则数据越服从正态分布。由图 7 知最大载荷和最大位移量的散点分布接近 Q-Q 图中的标准直线,所得的最大载荷和最大位移量均服从正态分布,数据有效。试件最大载荷和最大位移量的统计量见表 3。

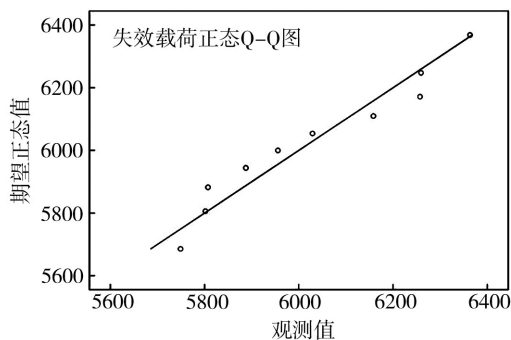
由表 3 知 AA 组最大载荷均值为 6 026.8 N,三组中 AH 组最大载荷均值最小,为 5 229.3 N。



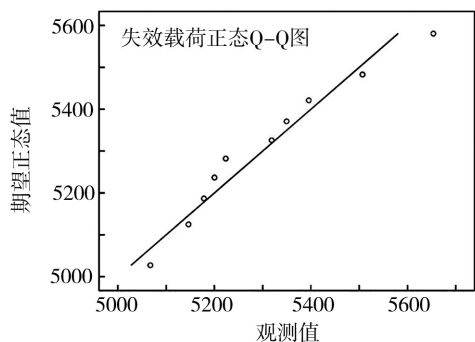
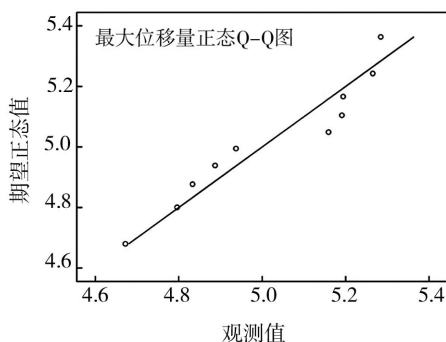
(a) AA 组



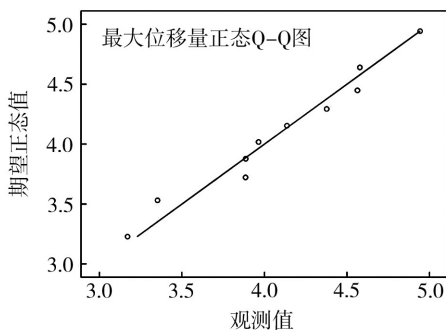
(b) HA 组

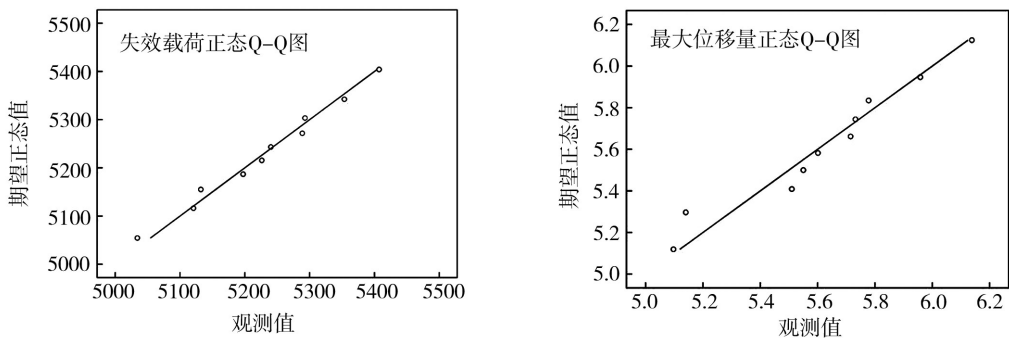


(a) AA 组



(b) HA 组





(c) AH 组

图7 最大载荷和最大位移量标准 Q-Q 图

Fig. 7 Normal Q-Q plot of maximum loads and maximum displacements

表3 最大载荷及最大位移量统计量

Tab. 3 Statistic of maximum loads and maximum displacements

组合	最大载荷 /N	最大载荷 标准差/N	最大载荷 置信区间/N	最大位移量 /mm	最大位移量 标准差/mm	最大位移量 置信区间/mm
AA	6026.8	220.66	[5868.9, 6184.6]	5.02	0.22	[4.86, 5.18]
HA	5304.0	178.84	[5176.0, 5431.9]	4.09	0.55	[3.69, 4.48]
AH	5229.3	113.05	[5148.4, 5310.2]	5.62	0.32	[5.39, 5.85]

自冲铆连接是靠铆接过程中板材和铆钉的塑性变形和回弹形成的机械内锁来实现的,影响接头强度的因素除板材强度外还有内锁强度^[12]。由前述接头成形质量分析知,HA 组钉脚张开度大于 AH 组,HA 组的机械内锁强度大于 AH 组,故 HA 组最大载荷均值大于 AH 组。AA 组因上板 AL1420 强度较 HA 组上板 H62 强度低,在铆钉刺穿 AA 组上板过程中上板对铆钉的强度及内部结构的影响较小,铆钉在 AA 组中形成机械内锁的强度较大,故 AA 组的最大载荷大于 HA 组。三组试件最大位移量最大为 AH 组的 5.62 mm,最大位移量最小为 HA 组的 4.09 mm。HA 组和 AH 组相比较,因 AH 组下板为 H62,其延伸性和抗拉强度皆优于 AL1420,从而提高了铆钉从下板脱落时的失效位移,而 HA 组的下板为 AL1420,故失效位移较 AH 组小。

2.3 能量吸收分析

AA 组和 AH 组能量吸收值分别为 16.84、16.79 J,两组接头均具较好的能量吸收性能,HA 组能量吸收值最小为 15.08 J。由表 3 中的统计量可分析出,在异种板材铆接时,虽 HA 组的最大载荷约为 AH 组的 1.01 倍,而 AH 组下板因 H62 具有较好的延伸性,其最大位移量为 HA 组的 1.37 倍,故 AL1420-H62 的能量吸收值大于 H62-AL1420,约为其 1.11 倍。在工程应用中对 AL1420 和 H62 进行铆接时,使用宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 1 期

AH 组搭接形式其能量吸收性能更优。

3 结论

(1) AL1420-AL1420 和 AL1420-H62 两种接头的失效形式皆为铆钉从下板拉脱,内锁破坏,下板有严重划痕,铆钉头与上板接触区域出现不同程度撕裂;H62-AL1420 接头的失效形式除铆钉从下板拉脱,内锁破坏,下板有严重划痕外,铆钉头与下板接触区域出现凹陷,并未撕裂。

(2) AL1420-AL1420 接头质量最优,其最大载荷最高为 6 026.8 N,其次为 H62-AL1420 接头,AL1420-H62 接头的承载能力最小,为 5 229.3 N。工程应用中,对承载要求高时,优先采用 AL1420-AL1420 接头;对 H62 和 AL1420 异种板材组合时可采用 H62-AL1420 接头。

(3) AL1420-AL1420 接头能量吸收值最大,为 16.84 J,其次为 AL1420-H62, H62-AL1420 接头最小,为 15.08 J。在车身轻量化应用中,AL1420-AL1420 接头,能量吸收性能最优;H62 和 AL1420 异种板材铆接时则优先采用能量吸收性能较好的 AL1420-H62 接头。

参考文献

- [1] 孙洁琼, 张宝柱. 先进铝锂合金的特点及其在民用飞机上的应用[J]. 航空工程进展, 2013, 4(2): 158-163.
- [2] HE XIAOCONG, PEARSON I, YOUNG K. Self-pierce

riveting for sheet materials; state of the art[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(1): 27-36.

[3] PICKIN C G, YOUNG K, TUERSLEY I. Joining of lightweight sandwich sheets to aluminum using self-pierce riveting[J]. Materials and Design, 2007, 28(8): 2361-2365.

[4] 邓成江, 何晓聪, 周森, 等. 铝-铜合金异质材料单搭自冲铆接头疲劳特性研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(17): 20-23.

[5] MUCHA J. A study of quality parameters and behaviour of self-piercing riveted aluminium sheets with different joining conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 57(4): 323-333.

[6] 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]. 湖南大学学报自然科学版, 2010, 37(12): 1-4.

[7] ABE Y, KATO T, MORI K. Join ability of aluminum alloy and mild steel sheets by self-piercing rivet[J]. Journal of

Material Processing Technology, 2006, 177(1-3): 417-421.

[8] ABE Y, KATO T, MORI K. Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminum alloy sheets using conventional rivet and die[J]. Journal of Material Processing Technology, 2009, 209(8): 3914-3922.

[9] SUN X, STEPHENS E V, KHALEEL M. Fatigue behaviors of self-piercing rivets joining similar and dissimilar sheet metals[J]. Int. J Fatigue, 2007, 29(2): 370-386.

[10] 万淑敏, 胡仕新, 张连洪, 等. 模具工艺参数对自冲铆接工艺过程及铆接质量的影响[J]. 机械设计, 2008, 25(4): 62-65.

[11] 许竞楠, 何晓聪, 曾凯, 等. 自冲铆接头组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 91-95.

[12] 严柯科, 何晓聪, 张玉涛, 等. 轻型车身自冲铆接头拉伸剪切实验研究[J]. 机械设计, 2012, 29(2): 79-82.



(上接第 80 页)

参考文献

[1] TRAN H, JOHNSON C, RASKY D, et al. 31st Thermophysics Conference, June 17-20, 1996[C]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.

[2] WILLCOCKSON W H. Stardust sample return capsule design experience[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1999, 36(3): 470-474.

[3] MILOS F S, CHEN Y K. Ablation and thermal response property model validation for phenolic impregnated carbon ablator[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2010, 47(5): 786-805.

[4] RAWAL S P, WILLCOCKSON W H, HUND R A. Carbon phenolic ablative gap filler[P]. U. S. Patent 8,367,178, 2013-2-5.

[5] AGRAWAL P, CHAVEZ-GARCIA J F, PHAM J. Fracture in phenolic impregnated carbon ablator[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2013, 50(4): 735-741.

[6] TRAN H K, JOHNSON C, HSU M T, et al. 32nd Ther-

mophysics Conference, June 23-25, 1997[C]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.

[7] 王筠, 杨云华, 冯志海. 深空探测用热防护材料的现状及发展方向[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(5): 1-11.

[8] MILOS F S, CHEN Y K. Ablation and thermal response property model validation for phenolic impregnated carbon ablator[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2010, 47(5): 786-805.

[9] BECK R A, ARNOLD J O, WHITE S, et al. 21st AIAA aerodynamic decelerator systems technology conference and seminar[C]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, May 23-26, 2011.

[10] 冯坚, 冯军宗, 姜勇刚, 等. 碳气凝胶的传热规律及其在防隔热中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(2): 1-6.

[11] 高庆福, 张长瑞, 冯坚, 等. 氧化铝气凝胶复合材料的制备与隔热性能[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(4): 39-42.