

文章编号: 1001-4888(2018)03-0461-08

# 铝合金泡沫金属夹层板自冲铆接头力学性能研究<sup>\*</sup>

刘洋, 何晓聪, 赵得锁, 邢保英

(昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650500)

**摘要:** 对 AA5052 铝合金泡沫金属夹层板进行自冲铆接试验, 对接头的可连接性进行探究。通过静力学试验对比各组接头的静力学性能, 分析不同种类泡沫金属对自冲铆接头力学性能的影响; 用扫描电子显微镜对接头典型断口进行研究, 分析其微观失效机理。结果表明: 自冲铆技术可以实现泡沫金属夹层板的有效连接, 接头具有良好的成形质量; 泡沫金属夹层提高了自冲铆接头的静力学性能, 其中泡沫镍夹层使 AA5052 自冲铆接头静失效载荷提高了 4.1%; 夹层板自冲铆接头失效形式均为铆钉与下板分离, 其中泡沫铁镍夹层自冲铆接头下板铆扣断裂区域粘附在铆钉脚底部, 为韧性断裂机制; 下板内锁区域失效时铆钉与下板发生剧烈刮擦, 呈现具有分层现象的片状组织。

**关键词:** 自冲铆; 泡沫金属; 夹层板; 力学性能; 断口分析

**中图分类号:** TH131.1      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-020

## 0 引言

随着绿色设计理念得到广泛应用, 车身轻量化是当今汽车设计的一种趋势, 大量轻金属应用到汽车制造业中。泡沫金属是一种新型的低密度材料, 具有体积密度小、相对质量轻、比表面积大、比力学性能高和阻尼性能好等特点, 泡沫金属“三明治”夹层结构因具有轻质、高强度等特点被广泛应用<sup>[1,2]</sup>。对于轻合金及三层板结构的连接, 通常使用机械连接、焊接和粘接等技术, 由于传统的机械连接需要预先打孔, 通过机械外锁方式实现板材连接, 造成接头不美观及密封性差; 轻合金及异种金属焊接性能差, 且粘接技术在工程应用中不适宜高温和低温的工作环境。自冲铆接作为一种新型连接技术, 通过铆钉和板材的塑性变形形成机械内锁进行连接, 可用于异种金属、非金属和难焊接板材间的连接<sup>[3-6]</sup>, 近年来自冲铆接技术受到制造业的青睐。

国内外学者对自冲铆接技术进行了相关研究。Mori 等<sup>[7]</sup>探究了自冲铆接技术应用于钢铝多层板连接的可行性, 并运用 ANSYS/LS-DYNA 对接头的成形过程进行数值模拟。Zhang 等<sup>[8]</sup>对铝合金和热塑性复合材料(GFRP/CFRP)自冲铆接头的连接性能进行研究, 研究表明, 自冲铆接能够实现其有效连接, 当 CFRP 复合板作为下板时接头能够获得更优的力学性能。Gay 等<sup>[9]</sup>研究了铆钉形状、温度等因素对铝合金(AA5182-O)和玻璃纤维增强热塑性复合材料(PA6.6-GF50, PA6.6-GF63)异质组合自冲铆接头疲劳性能的影响, 研究表明复合材料的种类会显著影响自冲铆接头疲劳极限值。Huang 等<sup>[10]</sup>通过试验分析了 AA6111-T4 铝合金和 HSLA340 钢板组合自冲铆接头的疲劳性能, 并通过建立相关数学模型对接头疲劳寿命进行了预测。Zhang 等<sup>[11]</sup>研究了热处理对 TA1 钛合金同质异质自冲铆接头力学性能的影响, 研究表明退火处理对自冲铆接头疲劳性能产生显著影响。Zhao 等<sup>[12]</sup>研究了基板厚度对

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-02-09; 修回日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(51565023, 51565022); 云南省教育厅科学研究基金重大专项(ZD201504)

通讯作者: 何晓聪(1955-), 男, 教授, 博导。主要研究领域: 薄板材料连接新技术。Email: xiaocong\_he@126.com

AA5052 自冲铆接头疲劳寿命及微动磨损的影响,研究表明随着板厚增加接头疲劳寿命在一定范围内增大,在低疲劳载荷下接头疲劳寿命受板厚影响较大。Casalino 等<sup>[13]</sup>用 ANSYS/LS-DYNA 对不同板厚的 AA6060 铝合金自冲铆接头进行有限元仿真,研究表明仿真和试验结果具有良好的一致性,且仿真结果很大程度取决于网格划分尺寸、塑性应变的合适假设和相关失效准则。

目前自冲铆接技术主要集中于金属板及其与非金属材料间连接性能的研究,自冲铆接应用于泡沫金属连接还未见相关研究。本文通过对铝合金泡沫金属夹层板进行自冲铆接试验,探究接头的可连接性能;通过静力学试验分析泡沫金属夹层对铝合金自冲铆接头力学性能的影响;采用扫描电子显微镜(SEM)对接头失效断口进行观测,探究接头的微观失效机理。



图1 Böllhoff 自冲铆接设备  
Fig. 1 Self-piercing riveting (SPR) equipment of Böllhoff

## 1 试验

### 1.1 试件制备

试验所用金属板材为 5052 铝合金板(AA5052),泡沫金属板为泡沫镍、泡沫铜和泡沫铁镍,所用泡沫金属材料参数如表 1 所示,其中泡沫铁镍中铁含量占 50%。金属板尺寸为 110mm×20mm×1.5mm,泡沫金属夹层板尺寸为 20mm×20mm×1.0mm。采用德国 Böllhoff 公司生产的自冲铆接设备(RIVSET VARIO-FC(MTF))进行试铆试验,图 1 为自冲铆接试验所用设备。经过多次试铆试验得出接头铆接参数如下:预压紧压强 5MPa,刺穿压强 15MPa,整形压强 10MPa,冲头行程 132.46mm,下模为凸模,铆钉长 5mm,铆钉和模具尺寸如图 2 所示。分别制备 AA5052-AA5052 自冲铆接头(AA)、AA5052-泡沫镍-AA5052 自冲铆接头(AN)、AA5052-泡沫铜-AA5052 自冲铆接头(AC)、AA5052-泡沫铁镍-AA5052 自冲铆接头(AF),泡沫金属夹层板自冲铆接头试件如图 3 所示。

表 1 泡沫金属材料参数

Tab. 1 The parameters of metal foam materials

材料	面密度/(g/m <sup>2</sup> )	孔数/PPI	通孔率/%	孔隙率/%
泡沫镍	280	90	≥98	98
泡沫铜	450	90	≥98	98
泡沫铁镍	350	90	≥98	98

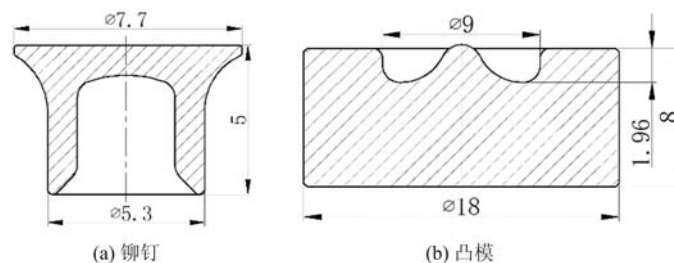


图 2 铆接工具尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SPR tools

### 1.2 静力学试验

在美国 MTS landmark100 型电液伺服材料试验机(如图 4 所示)上进行静力学试验,为了防止拉伸过程中不对中产生的附加扭矩,试验过程中在试件两侧各夹持相应厚度的垫片。设定拉伸速率为 5mm/min,对四组接头分别进行 12 次重复性试验,获得的载荷一位移曲线如图 5 所示。

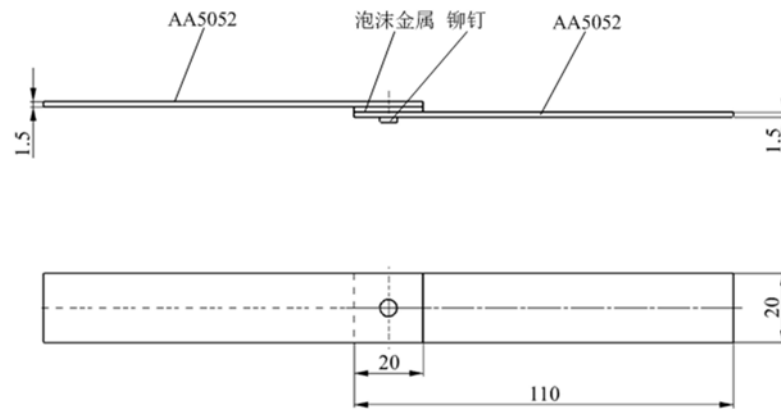


图 3 试件示意图

Fig. 3 Sketch of specimen

## 2 结果与分析

### 2.1 接头成形质量

自冲铆连接机理是铆钉在被连接板材内部塑性大变形,形成机械内锁来连接板材。从接头外观很难准确判断接头质量,实际中常用剖面直观检测法来判定自冲铆接头成形质量。目前公认判别自冲铆接头成形质量的三个指标为钉头高度(H)、钉脚张开度(S)和残余底厚(T),其中钉脚张开度和残余底厚对接头强度影响较大<sup>[14]</sup>。如图 6 所示,AA 接头 H 为 -0.24mm, S 为 0.67mm, T 为 0.27mm; AN 接头 H 为 -0.18mm, S 为 0.78mm, T 为 0.35mm; AC 接头 H 为 -0.39mm, S 为 0.60mm, T 为 0.45mm; AF 接头 H 为 -0.56mm, S 为 0.50mm, T 为 0.46mm。四组接头均具有良好的钉脚



图 4 MTS 材料试验系统

Fig. 4 Mechanical test system of MTS

张开度和残余底厚值;相对于 AA 接头,AN 接头钉脚张开度明显增大,AC 和 AF 接头钉脚张开度减小,三组泡沫金属夹层自冲铆接头残余底厚均增大。以上研究表明自冲铆接能够有效连接泡沫金属夹层板结构,不同泡沫金属对自冲铆接头成形质量的影响略有差异;总体来看,泡沫镍有利于铝合金自冲铆接头的成形,AN 接头钉头下陷程度减小,其钉脚张开度和残余底厚增加,接头成形质量最优。

### 2.2 静失效载荷及能量吸收

对于获得的试验结果,采用 MATLAB 中 lillietest 正态分布拟合优度测试函数验证所得静失效载荷与最大位移量是否服从正态分布;再使用 normifit 正态分布参数估计函数验证数据有效性。经检验所得数据均符合正态分布,所得数据如表 2 所示。

表 2 静失效载荷及最大位移量统计量

Tab. 2 Statistic of static failure loads and maximum displacements

试件 编号	静失效载荷			最大位移		
	均值(N)	标准差	置信区间(N)	均值(mm)	标准差	置信区间(mm)
AA	3233.4	200.70	[3105.9, 3360.9]	5.29	0.836	[4.8, 5.8]
AN	3365.6	124.71	[3286.3, 3444.8]	5.22	0.418	[4.9, 5.5]
AC	3297.7	166.50	[3191.9, 3403.5]	4.68	0.348	[4.5, 4.9]
AF	3300.8	82.46	[3248.5, 3353.2]	4.66	0.314	[4.4, 4.9]

四组接头静失效载荷均值由小到大依次为 AA 组(3233.4N)、AC 组(3297.7N)、AF 组(3300.8N)

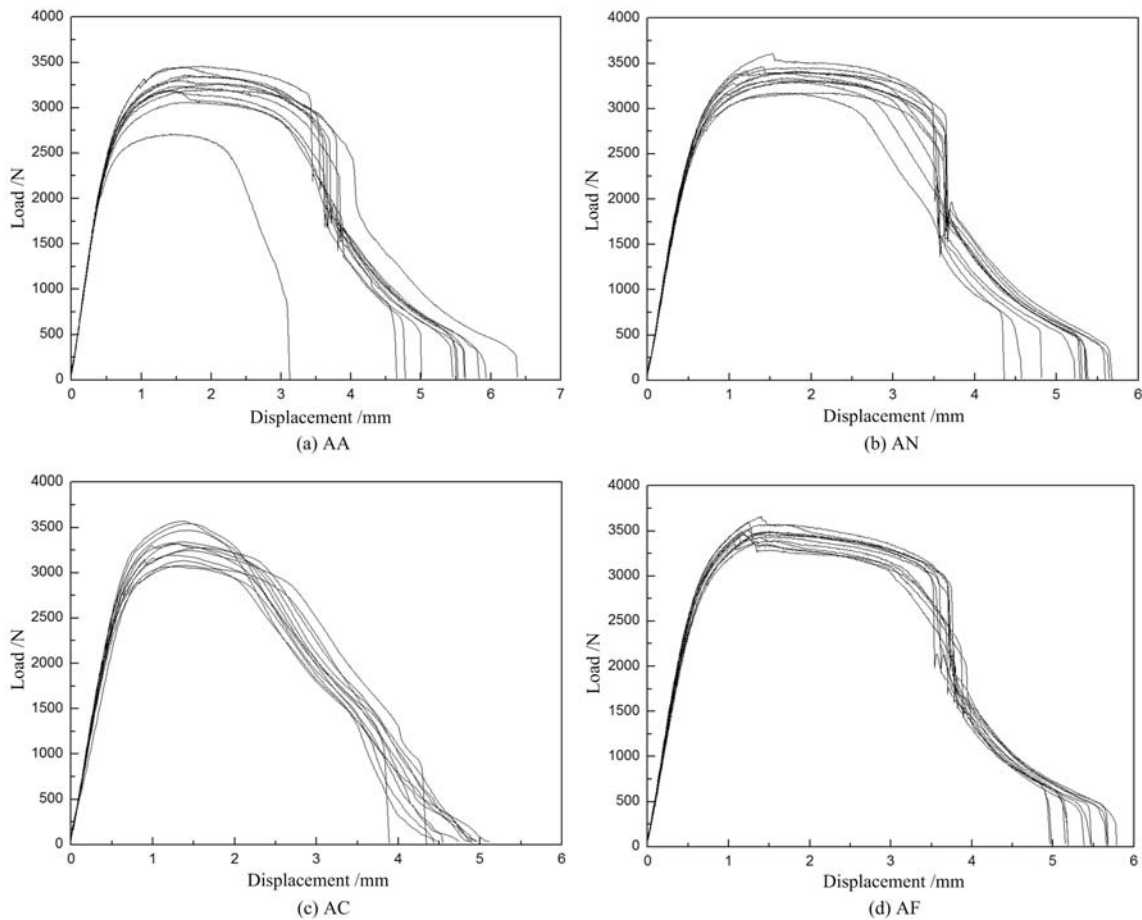


图5 各组接头载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of different joints

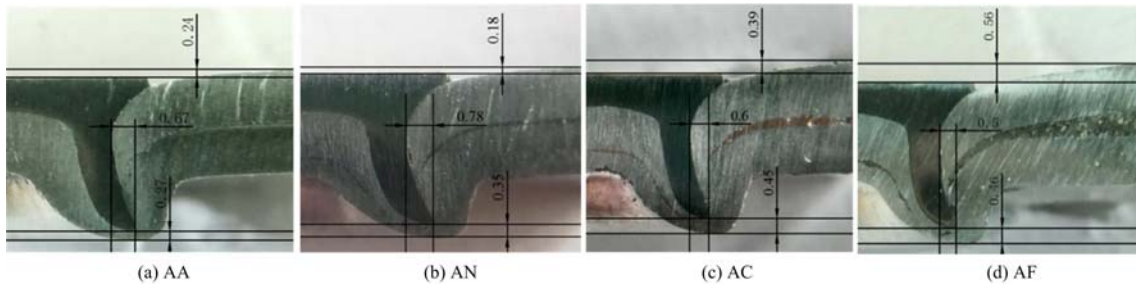


图6 接头截面

Fig. 6 The cross-sections of joints

和 AN 组(3365.6N)。由上述结果可知,泡沫金属夹层板提高了自冲铆接头的静失效载荷,其中泡沫镍夹层自冲铆接头强度最高,AN 接头比 AA 接头静失效载荷提高了 4.1%。由于泡沫镍材质较软,相对于其他泡沫金属,泡沫镍受压后厚度最薄,在相同铆接参数下铆钉发生大变形,结合 AN 接头截面成形质量可知,AN 接头钉脚张开度最大,其残余底厚值较 AA 接头也有所增大。钉脚张开度是衡量接头机械内锁量的重要指标,其直接影响接头强度大小,由于 AN 接头截面成形质量最优,导致 AN 接头强度最高。AC 和 AF 接头与 AA 接头强度较接近,由于 AC 和 AF 接头钉脚张开度减小但其残余底厚增大,同时泡沫金属作为夹层结构在接头成形过程中使铆钉与基板的连接结构更加紧凑,增大了接触表面积,导致泡沫金属夹层自冲铆接头强度小幅度提高。

能量吸收值是反映接头缓冲吸震性能的重要指标,其大小受载荷和位移的共同影响。本文基于 MATLAB 软件,采用 integral 定积分函数、spline 三层样条插值函数、ppval 分段插值多项式函数等编

程求解接头的能量吸收值。通过计算得出 AN 接头能量吸收值为 11.98J, 大于 AA 接头(11.79J)、AC 接头(9.76J)和 AF 接头(11.10J), 总体来看 AA、AN 和 AF 三组接头能量吸收值相差不大, AC 接头由于其静失效载荷和失效位移相对较小, 且接头载荷一位移曲线形状没有其余三组“饱满”, 造成其能量吸收值较小。

### 2.3 失效机理

各组接头的宏观失效形式如图 7 所示, 接头失效形式均为铆钉与下板分离, 接头的内锁结构被破坏。由于泡沫金属夹层种类不同, 四组接头失效形式存在一定差异。AF 接头失效时下板铆扣区域板材连同铆钉一起被拉出, 下板断裂区域粘附在铆钉脚底部, 由于泡沫铁镍材质相对较硬且表面较粗糙, 铆钉刺入过程中下板铆扣区域板材受到损伤, 由图 6(d)可知铆钉脚附近泡沫金属层下的基板厚度相对较薄, 此处为接头薄弱区域。AA、AN 和 AF 接头上板翘曲程度相对较严重, 铆钉在拉伸过程中沿板材中轴线旋转幅度较大, 其对应下板两侧出现明显刮痕和金属堆积, 表明铆钉从下板逐渐被拉出过程中, 通过破坏内锁区域使下板产生塑性变形, 最终导致接头失效; AC 接头上板翘曲程度最低, 下板铆接区域两侧出现轻微刮痕, 沿拉伸方向下板中轴线上侧出现明显刮痕和金属堆积现象, 表明拉伸过程中铆钉一侧从下板拔出相对容易, 但铆钉另一侧与下板铆接区域上方由于镶嵌作用导致下板上侧塑性变形程度较大。由于接头失效关键部位和发生塑性变形部位不同, 导致 AC 接头的载荷一位移曲线与其余三组接头差别较大。

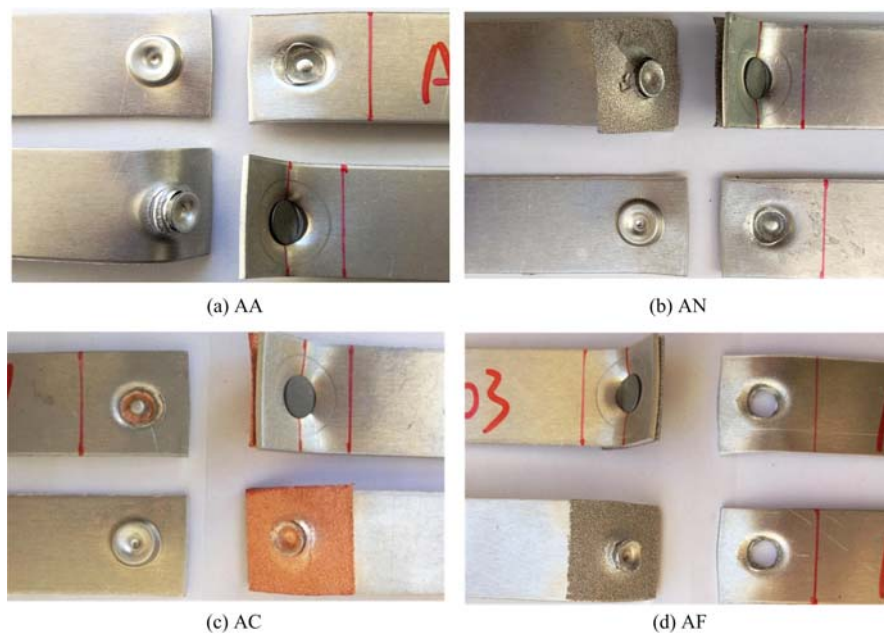


图 7 接头失效模式

Fig. 7 Failure modes of different joints

为了研究接头的微观失效机理, 选取 AA 接头和 AF 接头断口, 在捷克 TESCAN 公司生产的 VE-GA3 SCAN 型高真空电子扫描显微镜下进行微观断口观测。图 8(a)为 AA 接头铆钉头与上板撕裂区域宏观形貌图; 图 8(b)和(c)呈现出撕裂韧窝形貌并出现大量的撕裂棱, 由于撕裂韧窝方向指向裂纹源并向反方向扩展, 可知断裂路径由接头中心向两侧扩展, 呈现出韧性断裂机制<sup>[15]</sup>。图 8(d)为 AA 接头铆钉从下板拉出过程中接头内锁失效区域宏观形貌; 图 8(e)呈现明显分层现象并出现大量的刮痕, 同时观察到碎屑的存在, 表明拉伸过程中铆钉与下板接触区域发生剧烈刮擦最终导致接头内锁失效。

图 9(a)为 AF 接头下板断口宏观形貌; 图 9(b)呈现大量的撕裂棱并分布有一定数量的韧窝; 图 9(c)呈现出密集的韧窝形貌, 表明下板铆扣区域在失效时为韧性断裂; 图 9(d)与图 8(e)形貌较相似, 出现大量片状组织并有分层现象, 同时可看到刮痕的存在, 片状组织的方向指向铆钉脚且与铆钉被拉出的方向相反, 可知铆钉被拉出过程中下板内锁区域受到严重损伤。

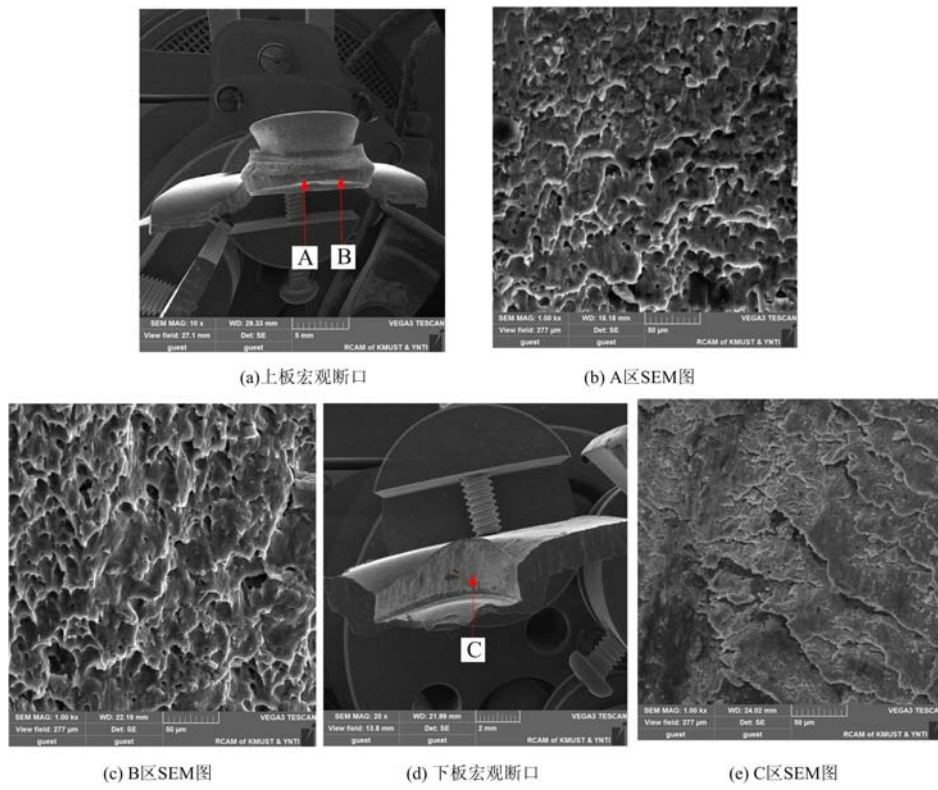


图 8 AA 接头断口形貌  
Fig. 8 Fracture morphology of AA joints

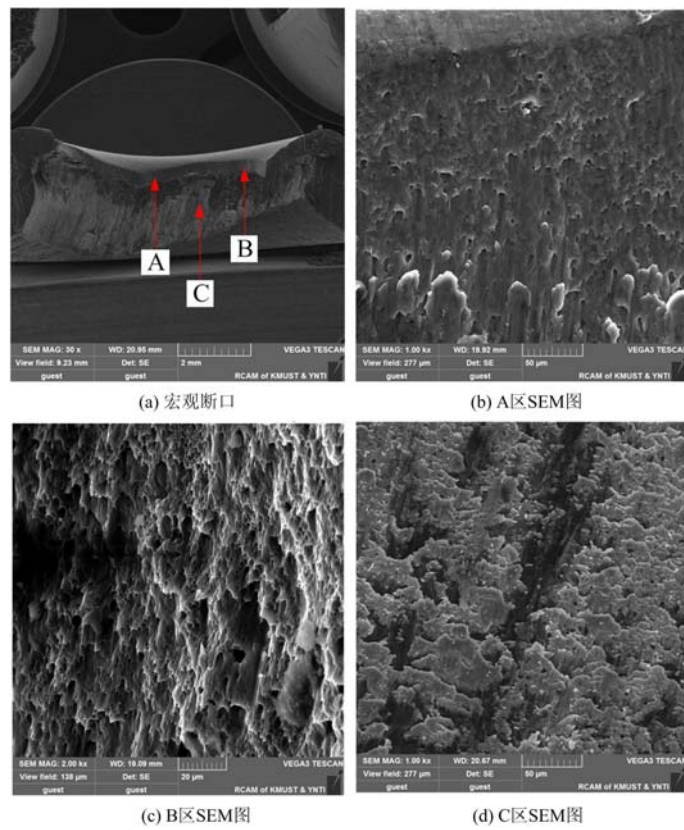


图 9 AF 接头断口形貌  
Fig. 9 Fracture morphology of AF joints

### 3 结论

(1) 自冲铆接技术可以实现泡沫金属夹层板的有效连接,不同泡沫金属对自冲铆接头成形质量的影响具有差异性,其中 AA5052-泡沫镍-AA5052 自冲铆接头成形质量最优,相对于 AA5052 自冲铆接头其钉脚张开度和残余底厚增加,钉脚下陷程度减小。

(2) 泡沫金属夹层对 AA5052 自冲铆接头静力学性能有影响,总体看来,泡沫金属夹层提高了自冲铆接头的静强度,其中泡沫镍夹层对自冲铆接头静力学性能影响最显著。

(3) 四组接头失效形式均为铆钉与下板分离,其中 AF 接头失效时下板断裂区域沾附在铆钉脚底部,AC 接头失效关键部位与其余三组接头不同造成其载荷-位移曲线具有差异性。

(4) AA 接头铆钉头与上板撕裂部位呈现撕裂韧窝形貌,为韧性断裂机制;AF 接头下板铆扣区域断裂处出现韧窝和撕裂棱;AA 和 AF 接头下板内锁失效部位出现片状组织,具有明显分层现象,铆钉被拉出过程中钉脚与下板发生刮擦造成基板受损。

#### 参考文献:

- [1] 张士卫. 泡沫金属的研究与应用进展[J]. 粉末冶金技术, 2016, 34(3):222-227 (ZHANG Shiwei. Foam metal research and application progress[J]. Powder Metallurgy Technology, 2016, 34(3):222-227 (in Chinese))
- [2] 王刚, 杨红新, 焦孟旺, 等. 泡沫铝在汽车上的开发应用[J]. 稀有金属, 2015, 39(7):660-665 (WANG Gang, YANG Hongxin, JIAO Mengwang, et al. Development and application of aluminum foam material in automobiles [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(7):660-665 (in Chinese))
- [3] He X C, 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.
- [4] Sun X, Khaleel M A. Dynamic strength evaluations for self-piercing rivets and resistance spot welds joining similar and dissimilar metals[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(10):1668-1682.
- [5] He X C, Wang Y F, Lu Y, et al. Self-piercing riveting of similar and dissimilar titanium sheet materials[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9-12):1-11.
- [6] Han L, Chrysanthou A. Evaluation of quality and behaviour of self-piercing riveted aluminium to high strength low alloy sheets with different surface coatings[J]. Materials and Design, 2008, 29(2):458-468.
- [7] Mori K, Abe Y, Kato T. Self-pierce riveting of multiple steel and aluminium alloy sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(10):2002-2008.
- [8] Zhang J, Yang S. Self-piercing riveting of aluminum alloy and thermoplastic composites[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(12):1493-1502.
- [9] Gay A, Lefebvre F, Bergamo S, et al. Fatigue performance of a self-piercing rivet joint between aluminum and glass fiber reinforced thermoplastic composite[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 83:127-134.
- [10] Huang L, Shi Y, Guo H, et al. Fatigue behavior and life prediction of self-piercing riveted joint[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 88:96-110.
- [11] Zhang X L, He X C, Xing B Y, et al. Influence of heat treatment on fatigue performances for self-piercing riveting similar and dissimilar titanium, aluminium and copper alloys[J]. Materials and Design, 2016, 97:108-117.
- [12] Zhao L, He X C, Xing B Y, et al. Influence of sheet thickness on fatigue behavior and fretting of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 5052[J]. Materials and Design, 2015, 87:1010-1017.
- [13] Casalino G, Rotondo A, Ludovico A. On the numerical modelling of the multiphysics self piercing riveting process based on the finite element technique[J]. Advances in Engineering Software, 2008, 39(9):787-795.
- [14] 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, 37(12):1-4 (HE Xiaocong, HE Jianing, KE Jianhong, et al. Quality evaluation and strength reliability prediction of self-pierce riveted joints[J]. Journal of Hunan University, 2010, 37(12):1-4 (in Chinese))
- [15] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:131-240 (ZHONG Qunpeng, ZHAO Zihua. Fractography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:131-240 (in Chinese))

## Study on mechanical properties of self-piercing riveted joints of aluminum alloy metal foam sandwich sheet

LIU Yang, HE Xiao-cong, ZHAO De-suo, XING Bao-ying

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

**Abstract:** Self-piercing riveting tests of AA5052 aluminum alloy metal foam sandwich sheet was carried out to investigate the join-ability. Static properties of each group of joints were compared by static tests, and the influence of different kinds of metal foam on mechanical properties of self-piercing riveted joints were analyzed. Typical joint fracture was investigated by scanning electron microscope, and the microscopic failure mechanism was analyzed. Results show that self-piercing riveting can realize effective connection of metal foam sandwich sheet, and the joint has good forming quality. The metal foam interlayer improves the static performance of self-piercing riveted joint. Among them, the nickel foam interlayer makes static failure load of AA5052 self-piercing riveted joint to increase by 4.1%. The failure mode of self-piercing riveted joint of sandwich sheet is the separation of rivet from lower sheet. The fracture region of the lower sheet of self-piercing riveted joint of iron-nickel foam sandwich sheet attached at the bottom of the rivet tail, exhibiting ductile fracture mechanism; the rivet and the lower sheet scratch violently when the inner lock region fails, showing a lamellar structure with delamination.

**Keywords:** self-piercing riveting; metal foam; sandwich sheet; mechanical properties; fracture analysis