

镁-铝异种合金自冲铆接接头的力学性能

卢杰豪^{1,2}, 赵伦^{1,3}, 张俊凯², 雷乐¹, 李承旺¹, 刘高宇¹,
刘纪元¹, Md Shafiqul Islam⁴

(1. 深圳职业技术大学 超声技术研究所, 广东 深圳 518055; 2. 辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051;
3. 云南开放大学 机电工程学院, 云南 昆明 650599; 4. 瑞典布京理工学院 机械学院, 瑞典 卡尔斯克鲁纳 37179)

摘要: 镁合金材料在车身轻量化制造方面具有巨大的潜力和应用空间, 选取不同厚度的 AZ31B 镁合金和 5083 铝合金薄板材料进行自冲铆接, 并通过拉伸实验和扫描电镜分析接头的静力学性能及微观组织。结果表明: 自冲铆接能实现对 AZ31B 镁合金和 5083 铝合金薄板的有效连接; 板厚搭配均匀的自冲铆接接头的整体力学性能最优; 镁板厚度较小的自冲铆接接头的失效形式均为上板断裂, 其余两组自冲铆接接头的失效形式均为下板拉脱; 3 组不同镁板厚度组合的自冲铆接接头断口均呈脆性断裂形貌。

关键词: 车身轻量化; 自冲铆接; 镁合金; 铝合金; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.021

中图分类号: TH131.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 09-0157-08

Mechanical properties of self-piercing riveted joint for Mg-Al dissimilar alloys

Lu Jiehao^{1,2}, Zhao Lun^{1,3}, Zhang Junkai², Lei Le¹, Li Chengwang¹, Liu Gaoyu¹, Liu Jiyan¹, Md Shafiqul Islam⁴

(1. Institute of Ultrasonic Technology, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China;

2. Faculty of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

3. College of Electromechanical Engineering, Yunnan Open University, Kunming 650599, China;

4. Department of Mechanical Engineering, Blekinge Tekniska Högskola, Karlskrona 37179, Sweden)

Abstract: Magnesium alloy have great potential and application space in lightweight manufacturing of car body. Therefore, AZ31B magnesium alloy and 5083 aluminum alloy thin plates with different thicknesses for the self-piercing riveting were selected, and the static properties and microstructure of joints were analyzed by tensile test and scanning electron microscopy (SEM) test. The results show that the self-pierce riveting can achieve effective connection between AZ31B magnesium alloy and 5083 aluminum alloy thin plates. The overall mechanical properties of the self-piercing riveting joints with uniform plate thickness are optimal. The failure mode of the self-piercing riveting joints with smaller magnesium plate thickness is the fracture of upper plate, and the failure mode of the other two sets of the self-piercing riveting joints is the pulling off of lower plate. The fracture surface of the self-piercing riveting joints with three different magnesium plate thicknesses shows brittle fracture morphology.

Key words: lightweight of car body; self-piercing riveting; magnesium alloy; aluminum alloy; mechanical properties

近年来, 汽车产业的快速发展, 在给人类生活带来极大方便的同时, 也对节能减排、提高能源利用率和环境保护提出了新的要求^[1-2]。汽车结

构轻量化被认为是最有效的方法, 在车身构架中使用镁合金作为一部分, 不仅可以实现减轻车重的目的, 更能实现节能、安全和环保^[3-4]。汽车轻量化连接技术包括自冲铆接、搅拌摩擦焊、压印连接和激光焊接等。

自冲铆接作为近年来新兴的机械冷连接技术, 可连接异种材料, 其工艺简单、操作便捷, 已成为汽车车身制造工艺中最具有潜力的技术^[5]。镁合金因其优良的力学性能、减震性能和环境友好等特点, 在汽车工业中有着广泛的应用前景。但在常温下, 镁合金的塑性能力和变形能力较弱, 达不到自冲铆接的要求, 杜越等^[6]采用摩擦加热的方法对厚度

收稿日期: 2024-01-16; 修订日期: 2024-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12104324); 高层次人才科研启动项目 (6022310046k); 深职大-新烁力超声波焊接技术研发中心 (602331009PQ); 深圳职业技术大学博士后出站后期资助项目 (4103-6023271014K1); 云南省教育厅科学研究基金资助项目 (2022J0599)

作者简介: 卢杰豪 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 13229438230@163.com

通信作者: 赵伦 (1988-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: zhaolun@szpt.edu.cn

为 2 mm 的 AZ31 镁合金板材进行加热, 然后对其进行自冲铆接, 研究表明镁合金在 180 ℃ 以上能进行自冲铆接, 板材不发生开裂且铆接效果好。郭兴伍等^[7]研发了一种爆炸驱动的超高速自冲铆接用铆枪, 从而实现镁合金板与钢板的实心铆钉自冲铆接。Li Y 等^[8]通过不同钢制铆钉杆尺寸的摩擦自冲铆接连接实现了碳纤维增强复合材料和 AZ31B 镁合金间的连接, 研究表明, 随着铆钉钉柄尺寸的增大, 搭接剪切断裂载荷和机械互锁距离增大。Easton M 等^[9]采用铝合金材质的铆钉对 3.3 mm 厚的 AZ31 镁合金板材进行自冲铆接, 研究表明, 下层板的底部和铆钉腿部周围有裂纹产生。刘洋等^[10]探究了铝合金-泡沫铜“三明治”夹层结构的可连接性, 研究表明, 自冲铆接可以实现铝合金泡沫铜夹层板的有效连接, 不仅使接头残余底厚增大, 还提高了接头的静失效载荷。杜爱民等^[11]研究了 3 层板自冲铆接各层厚度组合对铆接质量的影响, 通过对多层板的自冲铆合实验, 发现每层板的厚度越均匀, 其自冲铆接成形质量越佳, 且连接处的抗拉断能力越强。综上, 目前对镁合金的铆接和不同厚度板材的搭接方式进行的研究还较少, 而且对于不同厚度的镁合金搭接铝合金的研究尚未发现。

本文以不同厚度的 AZ31B 镁合金为基板, 采用自冲铆接技术实现 AZ31B 镁合金和 5083 铝合金的有效连接, 并对不同厚度组合的接头进行力学性能分析, 探究不同厚度组合的搭接方式对接头性能的影响, 为实际汽车结构轻量化研究提供参考。

1 实验

1.1 试样制备

实验选取 AZ31B 镁合金和 5083 铝合金薄板作为连接板材, 镁板和铝板的尺寸分别为 110 mm×20 mm×1 mm、110 mm×20 mm×1.5 mm 和 110 mm×20 mm×2 mm, 试样组合方案见表 1, 保持板材总厚度为 3 mm。上基板材料为 AZ31B 镁合金, 下基板材料为 5083 铝合金, 其力学性能如表 2 所示。

表 1 试样组合方案 (mm)

Table 1 Schemes of sample combination (mm)

组合名称	上板厚度	下板厚度	铆钉直径	铆钉长度
SMA	1.0	2.0	Φ5.3	5
SMB	1.5	1.5	Φ5.3	5
SMC	2.0	1.0	Φ5.3	5

表 2 板材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of sheet materials

板材	杨氏模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %
AZ31B 镁合金	43	235	152	12
5083 铝合金	70	300	168	24

1.2 自冲铆接实验

实验采用自冲铆接 (Self-piercing Riveting, SPR) 技术对镁和铝异种合金进行铆接, 在自冲铆接机器人设备 (EPRN-TF 型) 上进行, 所有试件设计均参照 GB/T 16957—2012^[12], 所有铆件均在同一铆接工艺参数下连接, 铆接位移统一为 183.2 mm, 实验设备显示在图 1a 中。所选择的铆钉材料为 36MnB4-H4 钢, 铆钉高度为 5 mm, 其规格如图 1b 所示, 下模具为带凸台的凹模, 如图 1c 所示, 实验得到的 SPR 接头试样尺寸如图 1d 所示。

1.3 接头拉伸-剪切实验

力学特性的测定是在美国 MTS 微型计算机控制的通用实验机 (CMT4304 型号) 上进行的。每组选取 10 个样件。为减少试件在实验中受到的附加弯矩的影响, 在试件左右两端分别加持尺寸各为 25 mm×20 mm×1.0 mm、25 mm×20 mm×1.5 mm、25 mm×20 mm×2.0 mm 的垫片, 使试件两端保持相同的厚度, 将实验拉伸速率设定为 5 mm·min⁻¹。然后在 MATLAB 平台进行峰值载荷均值、能量吸收均值和失效位移均值的统计及计算。

2 结果与讨论

2.1 接头成形质量

进行自冲铆接实验后, 使用光学电镜进行观察分析, 以内锁值 I 、残余底厚 T 及钉头高度 H 这 3 个参数为依据, 对接头成形质量进行分析, 如图 2 所示。可知: SMB 接头的钉头高度 (0.09 mm) 和 SMC 接头的钉头高度 (0.07 mm) 均大于 SMA 接头的钉头高度 (0.01 mm), SMA 接头的内锁值 (0.33 mm) 大于 SMB 接头的内锁值 (0.19 mm) 和 SMC 的内锁值 (0.16 mm), SMA 接头、SMB 接头和 SMC 接头的残余底厚均相差不大。这是由于板材在连接成形过程中, 当铆钉穿过上基板时, SMA 接头上板 AZ31B 镁合金的厚度较 SMB 接头上板更薄, 室温下, 镁合金的塑性和变形能力较低, 铝合金具有较好的延展性和韧性, 由于下基板具有较好的流动性, 所以当钉腿刺入板材时, 容易随板材的塑性流动向凹模四周进行膨

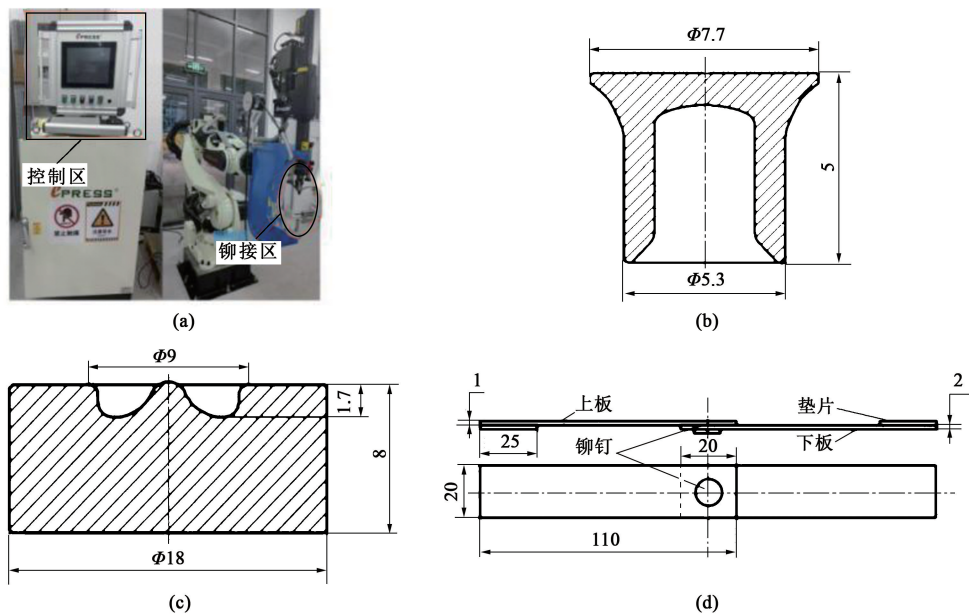


图 1 自冲铆接实验
(a) 自冲铆接机器人 (b) 铆钉尺寸 (c) 凸模尺寸 (d) 试样尺寸
Fig. 1 Self-piercing riveting test
(a) Self-piercing riveting robot (b) Rivet sizes (c) Punch size (d) Sample size

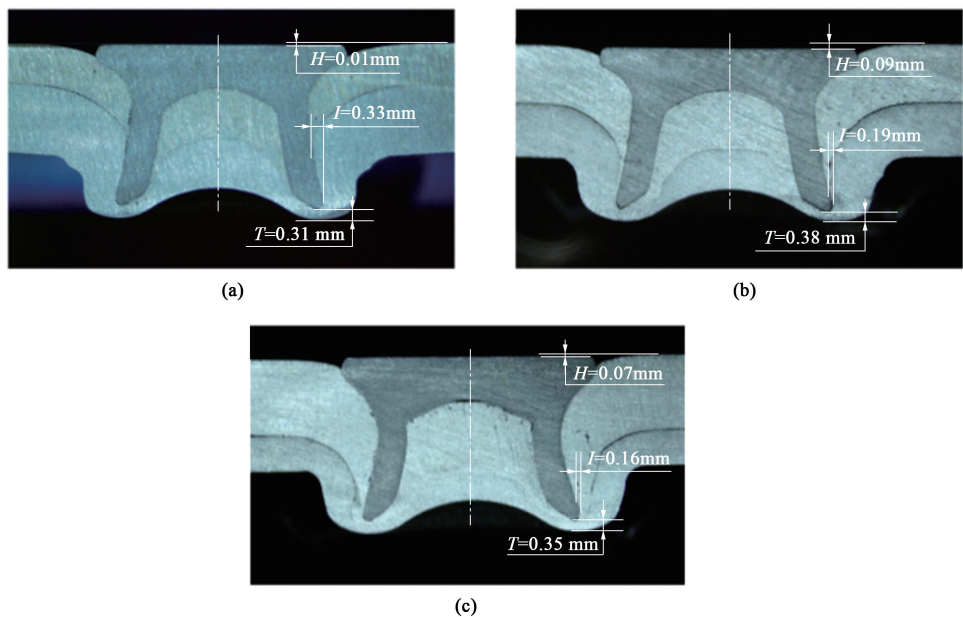


图 2 接头成形质量
(a) SMA (b) SMB (c) SMC
Fig. 2 Forming quality of joints

胀，导致板材受到冲压时 SMA 接头的半空心铆钉的铆腔更容易被填满，进而加剧了铆钉脚扩张，从而形成更优的机械内锁结构。在铆钉长度、基板总厚度一致的情况下，下板 5083 铝合金的屈服强度和抗拉强度比 AZ31B 镁合金更大（表 2），镁合金的塑性较差，SMB 接头的钉头高度相比于 SMA 接头的钉头高度更

高，导致 SMB 接头的残余底厚更大。

2.2 静力学性能

图 3 为接头的载荷-位移曲线，为保证实验结果的准确性，3 组接头均采用 10 个样件进行平行实验。总体上看，3 条曲线均呈快速、线性上升趋势，SMA 接头和 SMB 接头的上升趋势十分接近，而 SMC 接头

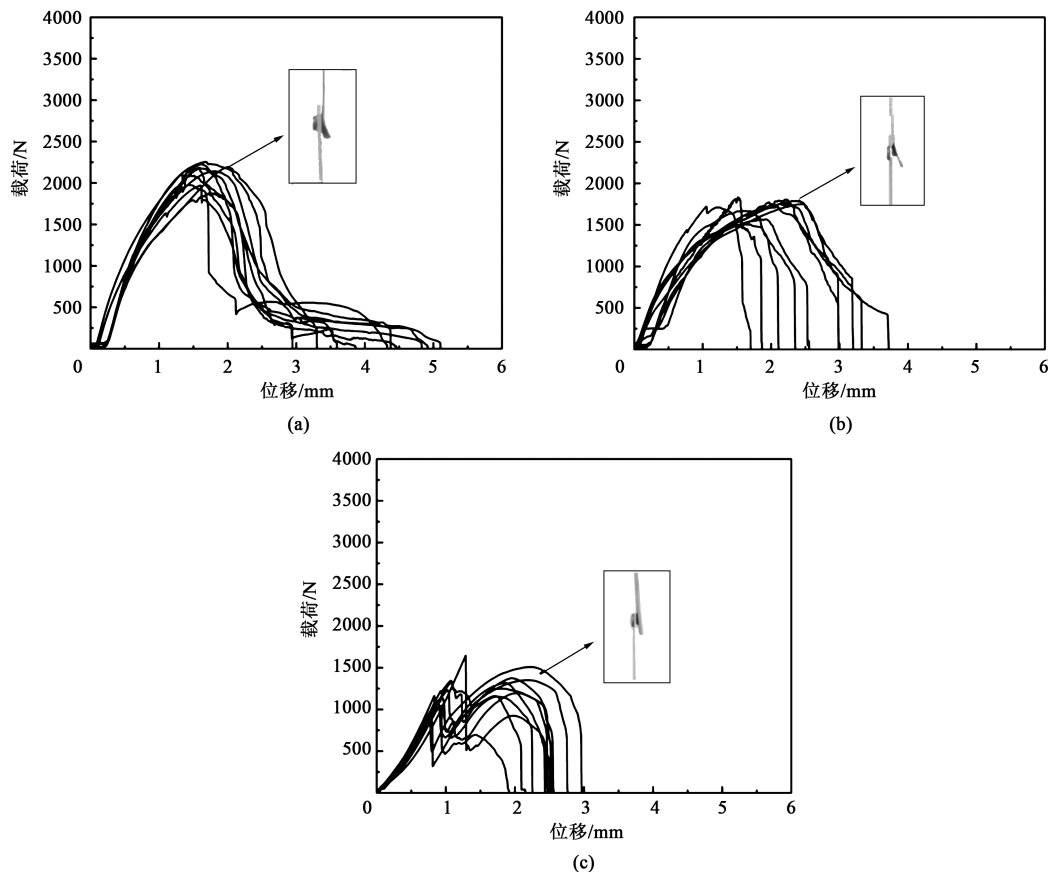


图 3 不同接头的载荷-位移曲线

(a) SMA (b) SMB (c) SMC

Fig. 3 Load-displacement curves of different joints

的上升趋势比较快,这是镁板厚度影响而导致的。

图 4 为两组接头的峰值载荷、失效位移均值以及能量吸收散布图。图 4 中的散布区间为各组接头力学性能参数均值加减两倍标准差得到的,即各组接头在该温度下的置信区间,散布区间可以有效表示数值的离散程度。总体上看,SMB 接头比 SMA 接头稳定,其原因在于 SMA 接头的镁板较薄,且镁板的塑形能力和变形能力较差,铆接时铆钉处易产生裂纹,从而导致不稳定。

由图 4a 可知,SMB 接头的峰值载荷均值(2.11 kN)高于 SMA 接头(1.70 kN)及 SMC 接头(1.31 kN),比 SMA 接头提高约 24%,比 SMC 接头提高约 61%,这是由于不同厚度的镁板影响接头的成形质量,材料厚度均匀搭配的组合能有效提高自冲铆接接头的力学性能。

由图 4b 可知,SMB 接头的失效位移均值(4.17 mm)为 3 组试件中最大,这是由于 AZ31B 镁合金的塑韧性较 5083 铝合金好,板材厚度均匀有助于提高材料间的流动性,使上下基板更好地嵌合在一起。

由图 4c 可知,SMB 接头的能量吸收均值(4.10 J)最大,SMC 接头的能量吸收均值(2.05 J)最小,接头的能量吸收均值是衡量缓冲吸震性能的重要指标,由各自的失效位移、静载荷强度共同决定,说明 SMB 接头具有更优的缓冲吸震性能。

2.3 接头失效形式分析

通过静力学性能测试实验可知,3 组接头的典型失效形式如图 5 所示。SMA 接头的失效形式均为上板断裂,伴随拉伸-剪切力的不断增大,SMA 接头的上板在铆钉钉头边缘逐渐出现断裂,最终导致上板断裂,这是因为铆钉与下板间的机械内锁强度比上板的薄弱区域更强,导致在拉伸中该区域先出现裂纹,使接头失效。而 SMB 接头和 SMC 接头的主要失效形式均为拉脱失效,这是由于在拉伸过程中载荷力越来越大,直至大于铆钉与基板间的摩擦力,SMB 接头和 SMC 接头的机械内锁结构遭到破坏,内锁质量较弱,导致铆钉随上板拉脱而出。由此可见,厚度的变化会导致接头的失效形式随之变化,且其力学性能也会受到很大的影响。

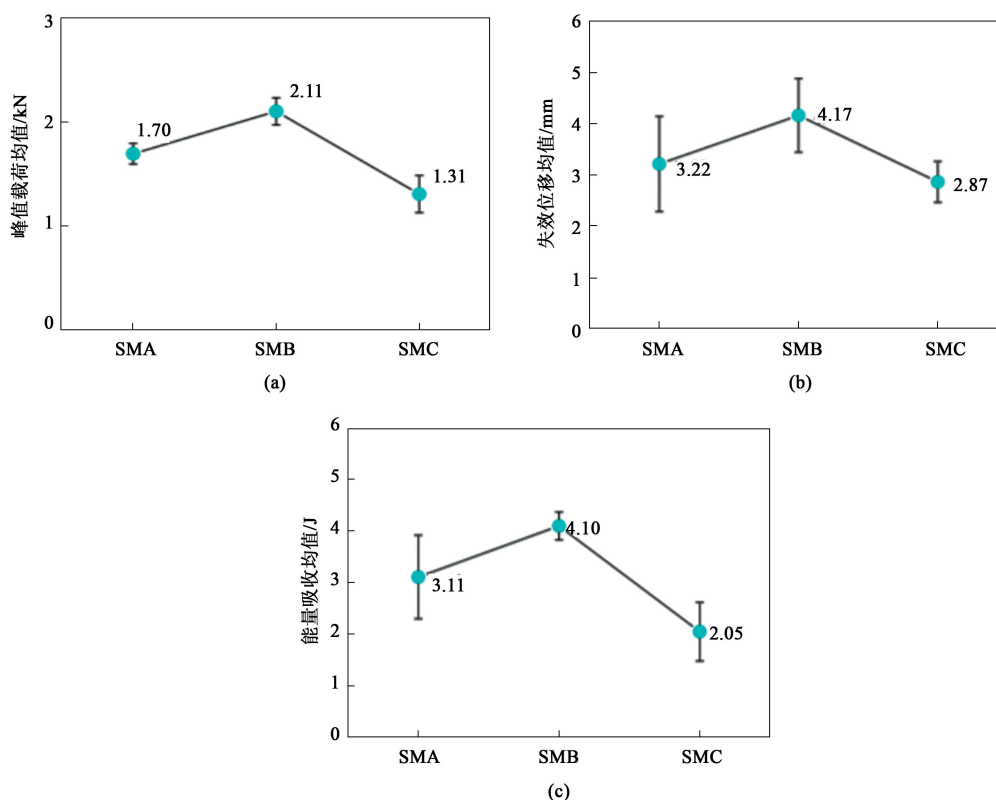


图4 不同接头的力学性能参数对比

(a) 峰值载荷均值 (b) 失效位移均值 (c) 能量吸收均值

Fig. 4 Comparison mechanical property parameters for different joints

(a) Mean value of peak load (b) Mean value of failure displacement (c) Mean value of energy absorption

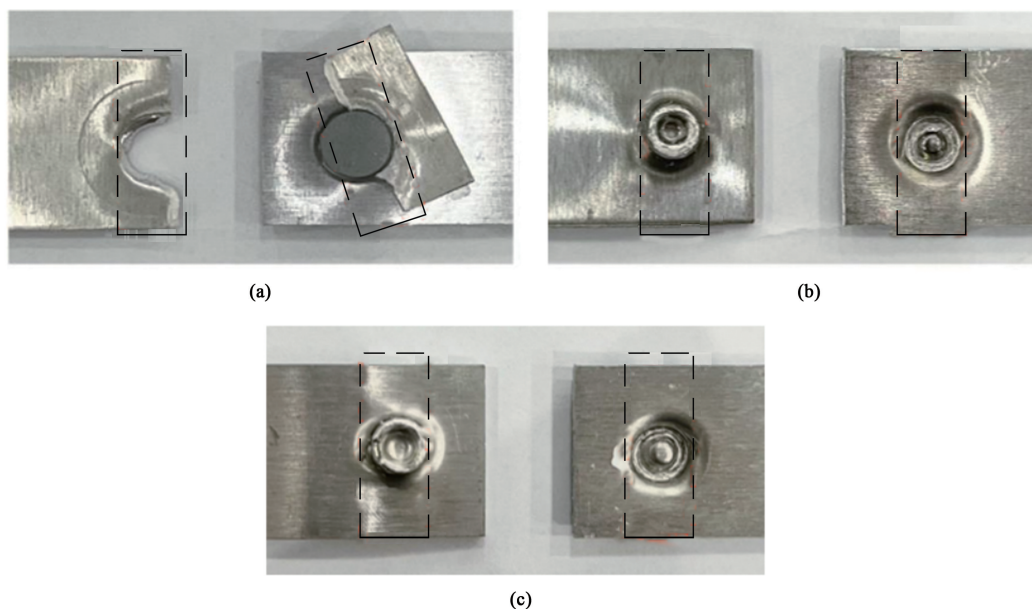


图5 不同接头的失效形式

(a) SMA (b) SMB (c) SMC

Fig. 5 Failure modes of different joints

2.4 微观失效分析

通过接头的静载失效分析可知,失效形式为上板断裂的 SMA 接头的上板断口的宏观图像如图 6a

所示,选取 AZ31B 镁合金上板断口进行扫描电镜微观分析,其中 I 区域和 II 区域分别为断口的边缘区域和中间区域,其微观结果如图 6b 和图 6c 所示。

I 区域可见明显的摩擦痕迹,基本上没有韧窝的存在,其微观形貌呈河流状,具有脆性断裂的特点;II 区域中可观察到“舌”状花样的微观形貌,这是

脆性断裂的典型表现形式之一。综上可知,在铆接过程中,铆钉与镁板之间存在微小裂纹,在应力的作用下,裂纹由板材中心向板材边缘扩展。

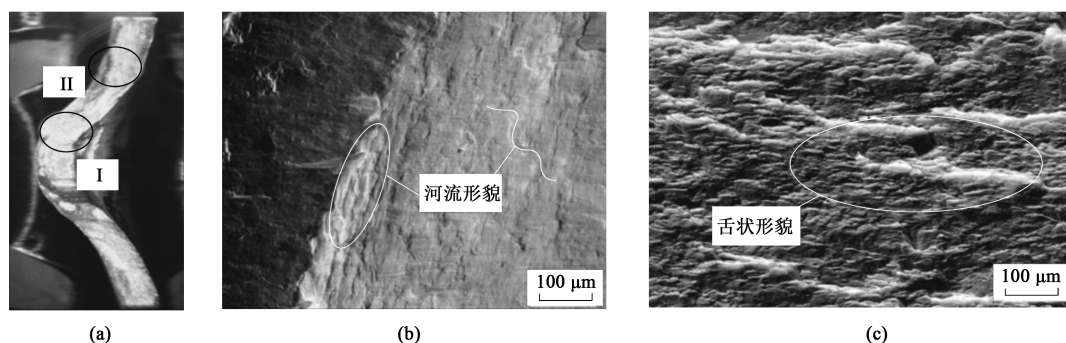


图 6 SMA 接头上板断裂失效的 SEM 分析结果

(a) 上板断口宏观形貌 (b) 边缘区域 I (c) 中间区域 II

Fig. 6 SEM analysis results of upper plate fracture failure for SMA joints

(a) Macro morphology of upper plate fracture (b) Edge area I (c) Middle area II

图 7 为 SMB 接头拉脱失效中下板拉脱的 SEM 分析结果。图 7a 为 SMB 接头失效后的宏观形貌,可见铆钉与板材的交界处存在大小不一的裂纹,且钉脚处发现板材脱落的屑片,可知在剪切-拉伸过程中接头与板材间的机械内锁结构遭到破坏,失效源于裂纹的出现,从而导致板材拉脱而出。SMB 接头上板拉脱处

呈现两种形貌:(1) 低倍微观形貌中,在上板的破坏部位出现了“方块面”台阶形貌,呈阶梯状,这是脆性断裂的特征;(2) 高倍微观形貌中,能够看到局部撕裂棱和显著的阶梯形态,也属与脆性断裂特征之一。出现这种失效模式的主要原因是铆钉与下板所形成的机械内锁强度弱于 AZ31B 镁板的强度。

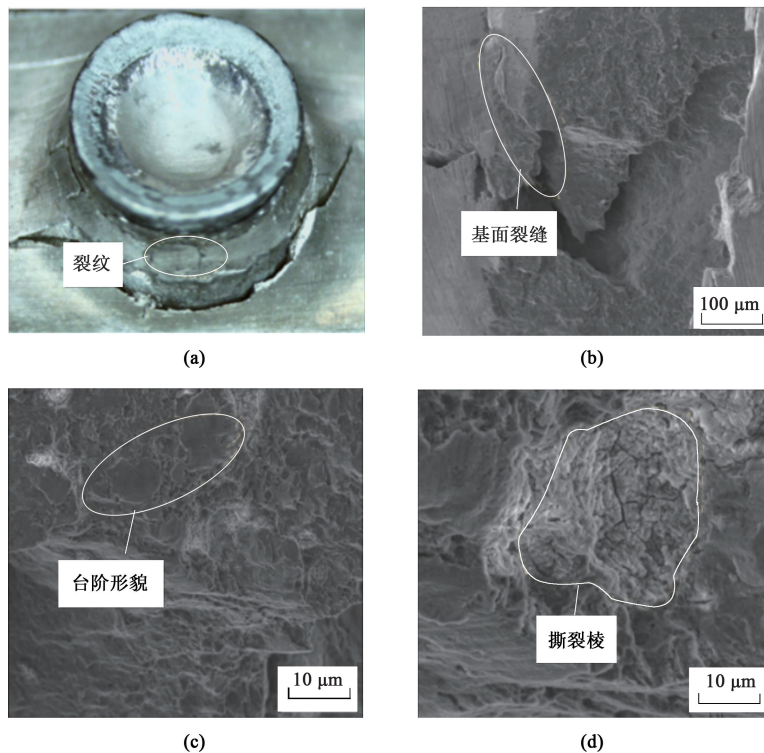


图 7 SMB 接头下板拉脱失效的 SEM 分析结果

(a) 断口宏观形貌 (b) 微观裂缝区 (c) 台阶形貌区域 (d) 撕裂棱

Fig. 7 SEM analysis results of lower plate pull-out failure for SMB joint

(a) Macro morphology of fracture (b) Microcrack area (c) Step morphology area (d) Tearing ridge

图8为SMC接头拉脱失效中下板拉脱的SEM分析结果,存在明显的刮痕,说明铆钉与下板间进行了剧烈的摩擦,失效处呈现方块型的台阶形貌,属于脆性断裂特征之一,且靠铆钉边缘区域可以看到塑性变形,说明SMC接头在发生拉脱失效时,铆

钉是从下板边缘拉脱而出,导致边缘区域的塑性变形更大,附近存在明显的刮痕。SMC接头的成形质量差于SMB接头,SMC接头的机械内锁结构较差,导致其在剪切拉伸过程中,容易被破坏,且其力学性能较差,这也是导致SMC接头失效的主要原因。

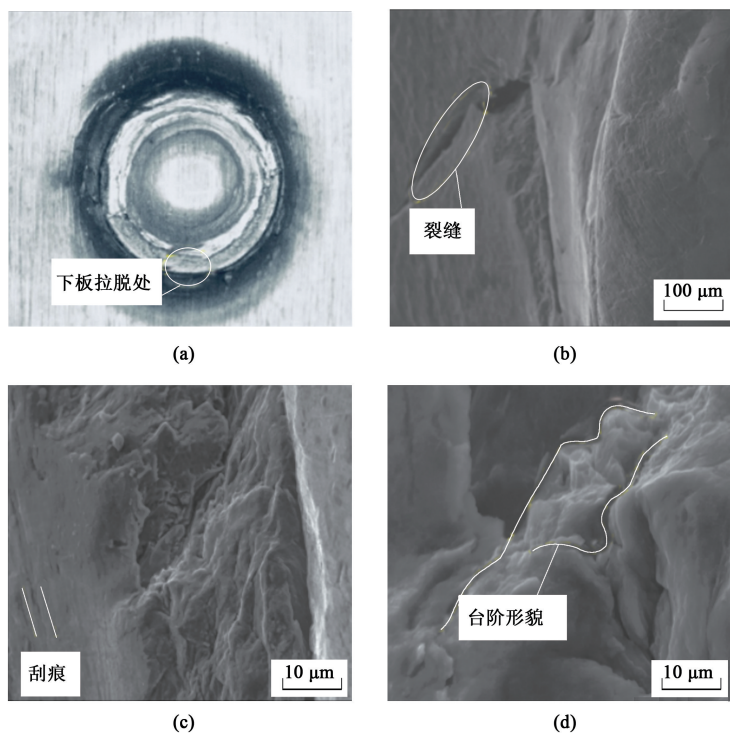


图8 SMC接头下板拉脱失效的SEM分析结果

(a) 下板拉脱处宏观形貌 (b) 裂缝 (c) 刮痕 (d) 台阶形貌区域

Fig. 8 SEM analysis results of lower plate pull-out failure for SMC joint

(a) Macro morphology of pull-out failure position for lower plate (b) Crack (c) Scratch (d) Step morphology area

3 结论

(1) 自冲铆接能够实现镁-铝异种合金(AZ31B镁合金和5083铝合金)薄板之间的有效连接,且成形质量较好。

(2) 3组接头中SMB接头的力学性能最优,其接头的静载强度(2.11 kN)均大于SMA接头(1.70 kN)和SMC接头(1.31 kN)。原因在于:基于上基板AZ31B镁合金的力学强度和厚度影响,板材厚度会影响镁板与铝板之间的流动性,板厚越均匀,接头的力学性能越佳。

(3) 从静失效形式来看,SMA接头铆钉与下板形成的机械内锁强度优于上板的抗剪能力,SMA接头均为上板断裂失效;SMB接头和SMC接头与下板形成的机械内锁相对较弱,其失效形式均为拉脱失效形式。自冲铆接接头的失效形式与板材的性能有较大的关系,板材的性能会影响其接头的机械内锁强度。

(4) SMA接头上板断口区域呈现出河流形貌和舌状形貌特点,属于脆性断裂中的解理断裂特征;对于出现下板拉脱的SMB接头和SMC接头,其断口形貌均呈现出台阶形貌和撕裂棱特点,也是属于脆性断裂特征。

参考文献:

- [1] 戴云鹏. 汽车轻量化中自冲铆连接技术的工艺特点[J]. 机电技术, 2017 (1): 61-63.
Dai Y P. Process characteristics of self-pierce riveting connection technology in automotive lightweighting [J]. Mechatronics, 2017 (1): 61-63.
- [2] 谢贵山, 黄宗斌, 赵肖斌, 等. 汽车车身的轻量化设计探讨[J]. 汽车零部件, 2023, 176 (2): 80-84.
Xie G S, Huang Z B, Zhao X B, et al. Discussion on lightweight design of automobile body [J]. Automobile Parts, 2023, 176 (2): 80-84.
- [3] 张娜, 李海鹏, 葛广跃, 等. 车身轻量化设计方法及应用[J]. 汽车实用技术, 2022, 47 (10): 179-183.

(下转第185页)