

# 钛-铝异种合金自冲铆接接头力学性能与 微观组织分析\*

赵伦<sup>1,2</sup>, 林森<sup>1</sup>, 甘增康<sup>1</sup>, 雷乐<sup>1,3</sup>, 高山凤<sup>3</sup>, 霍小乐<sup>1</sup>, 郭子鑫<sup>1</sup>, MD Shafiqul Islam<sup>4</sup>

(1 深圳职业技术学院智能制造技术研究院, 深圳 518055;

2 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055;

3 山西大学自动化与软件学院, 太原 030006;

4 布京理工大学机械工程学院, 卡尔斯克鲁纳 37179)

**摘要:**自冲铆接作为一种绿色、新型和高效的机械连接技术,可实现同种、异种薄板板材的连接,在汽车领域有极大的应用前景。选用钛合金 TA1 薄板和铝合金 5A06 薄板作为基板,采用自冲铆接技术进行连接;对接头成型性、力学性能、失效形式和机理进行了系统的研究。研究表明:当钛合金 TA1 基板为上板时,接头的内锁值更大,但其钉头高度偏高;当铝合金 5A06 基板作为上板时,接头的钉头与上板基本平齐,但其内锁值偏小。两种接头的静载强度、失效位移和抗振吸收能力均相当。接头的主要失效形式为基板断裂,且失效均发生在强度较弱的铝合金 5A06 基板上。接头静载失效属于塑性断裂。

**关键词:**车身轻量化;异种材料连接;自冲铆接;力学性能;微观组织分析

**中图分类号:**TH131 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-3133(2023)01-0077-06

**DOI:**10.16731/j.cnki.1671-3133.2023.01.011

## Mechanical properties and microstructure analysis of self-piercing riveted joints of titanium-aluminum dissimilar alloys

ZHAO Lun<sup>1,2</sup>, LIN Sen<sup>1</sup>, GAN Zengkang<sup>1</sup>, LEI Le<sup>1,3</sup>, GAO Shanfeng<sup>3</sup>, HUO Xiaole<sup>1</sup>,  
GUO Zixin<sup>1</sup>, MD Shafiqul Islam<sup>4</sup>

(1 Institute of Intelligent Manufacturing Technology, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China;

2 Shenzhen Institutes of Advanced Technology, China Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;

3 School of Automation and Software, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

4 Department of Mechanical Engineering, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona 37179, Sweden)

**Abstract:** As a green, new, and efficient mechanical joining technology, Self-Piercing Riveting (SPR) can realize the joining of similar and dissimilar substrates, and has great application prospects in the automotive field. Titanium alloy TA1 sheet and aluminum alloy 5A06 sheet were selected as the substrates, and the SPR technology was used for joining; the formability, mechanical properties, failure mode, and mechanism of the joint were systematically studied. The results showed that the interlock value of the joint was larger when the titanium alloy TA1 substrate was used as the upper substrate, but the height of the rivet head was higher; the height of the rivet head was nearly flushed with the upper substrate when the aluminum alloy 5A06 substrate was used as the upper substrate, but the interlock value of the joint was relatively small. The static load strength, failure displacement, and vibration absorption capacity of the two joints were comparable. The main failure form of the joints was the fracture of the substrate, and the failure occurred in the aluminum alloy 5A06 substrate with weaker strength. The static load failure of the joints was a plastic fracture.

**Keywords:** lightweight of car body; dissimilar material joining; self-piercing riveting; mechanical property; microstructure analysis

\* 国家自然科学基金青年基金项目(12104324);中国博士后科学基金面上项目(2021M703392);深圳职业技术学院深圳市高端人才科研启动项目(6022310046k);深圳职业技术学院博士后启动项目(6021330001K)

## 0 引言

《中国汽车工业发展年度报告》<sup>[1]</sup>指出,未来汽车技术三大发展方向为智能、新能源和节能。国内外学者已对汽车节能化问题进行了大量研究,并发现车辆总重每下降 100 kg,其百公里油耗也将随之下降 0.3~0.6 L<sup>[1]</sup>,因此降低车辆总重是实现节能化的有效方式。值得指出的是,车身重量约占汽车总重量的 40%,车身轻量化对于汽车轻量化存在巨大的影响<sup>[2]</sup>。实现车身轻量化最直接有效的方式是对车身薄板材料进行轻量化,即采用铝、钛、镁等轻合金薄板材料代替传统的钢板材料。传统电阻点焊因其具有操作简单、成本低和易于自动化等优势,已成为钢质车身结构最常用的连接方法,但因轻合金薄板材料的特殊物理和化学性能,难以采用电阻点焊对其进行有效优质连接,尤其是异种轻合金薄板材料的连接<sup>[3]</sup>。

自冲铆接是一种可实现同种、异种和多层薄板间有效连接的新型连接技术。自冲铆接成型过程主要分为 4 个阶段,其示意如图 1 所示。第一阶段为预紧(见图 1a),压边圈对板材施加预紧力,以固定待铆接板材。第二阶段为刺穿(见图 1b),在冲头的作用下铆钉刺穿上板同时刺入下板。第三阶段为整型(见图 1c),即铆钉在冲头的作用下继续刺入下板,并在凹模和板材的作用下铆钉腿逐渐向四周展开,进而形成牢固的机械内锁。第四阶段为释放(见图 1d),冲头到达设定的行程或者到达机械限位后,保压后释放。

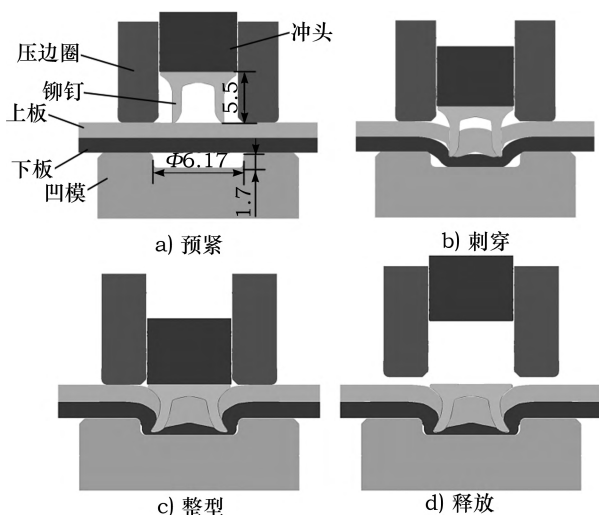


图 1 自冲铆接成型过程示意

自冲铆接技术具有耗能少、耐腐蚀性强以及铆接质量稳定等优势,并且在铆接过程中可以实现自动化和在线监控,可实现汽车制造过程的全自动化,目前

该技术已广泛应用于中高端汽车车身薄板连接中<sup>[4]</sup>。吕枫等人<sup>[5]</sup>研究了铝-钢异种金属板自冲铆接中不同的板料组合方式下的材料受力及变形情况,并发现在厚板作为下连接板时,其结构参数与性能较好。梁钜松<sup>[6]</sup>研究了一种电磁自冲铆接新型连接工艺,结果表明电磁自冲铆接相比于传统的自冲铆接具有更好的接头质量。宋庆军等人<sup>[7]</sup>研究了不同铆模深度、铆钉长度及板材搭接顺序对铆接接头几何形状和力学性能的影响,认为对于钢-铝异种材料,采用“钢上铝下”的板材搭接方式所获得的自冲铆接接头成型质量和力学性能更佳。师俊峰等人<sup>[8]</sup>研究了航空紧固件钛合金材料的应用现状,分析认为 Ti-45Hb 材料、TB2 材料等具有一定的冷成型性能,且焊接性能良好。李宽等人<sup>[9]</sup>研究了自穿刺铆接技术在新能源汽车加工中的实际应用,认为自穿刺铆接技术连接可靠,在钢-铝、铝-铝板材连接上效果显著,具有广泛的应用前景,此研究为自穿刺铆接技术在新能源汽车上的应用提供了指导。黄志超等人<sup>[10]</sup>对采用空心铆钉和半空心铆钉自冲铆接碳纤维复合板和 5052 铝合金板的问题进行研究,发现空心铆钉接头具有更好的机械自锁性能,半空心铆钉接头具有更好的平整度和静拉伸强度。

目前国内外针对钛合金和铝合金薄板材料自冲铆接技术的研究非常少,本研究采用自冲铆接技术实现了 TA1 和 5A06 材料的有效连接,并对其力学性能和微观组织进行深入分析,为自冲铆接技术在汽车加工中的应用提供相应支持。

## 1 试验

试验过程中,首先制备自冲铆接试样,然后测量出接头的成型质量参数,最后进行静拉伸测试,以获取接头的载荷-位移曲线,即测试成型接头的静力学性能,从而获得接头的平均峰值载荷、平均失效位移和平均能量吸收值,为后续分析做准备。

### 1.1 自冲铆接准备

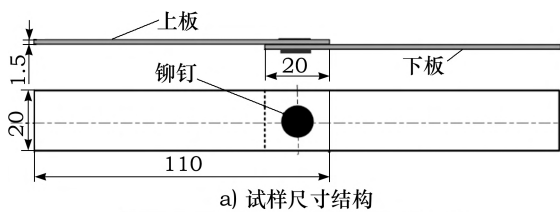
本文选用钛合金 TA1 薄板和铝合金 5A06 薄板作为基板,基板均沿轧制方向制备,基板尺寸为 110 mm×20 mm×1.5 mm。板材的力学性能在带有引伸计(标距:20 mm)的 MTS CMT4304 型微机控制电子万能试验机上测试,测试结果见表 1。

本试验采用 EPRESS 公司生产的 EPRN-TF 型自冲铆接机,所有试样均参照文献[11]取样。试验中采用 36MnB4 半空心平头刃口铆钉,其高度为 5.5 mm;模具选用凹模,凹模的直径和深度分别为 6.17 mm 和

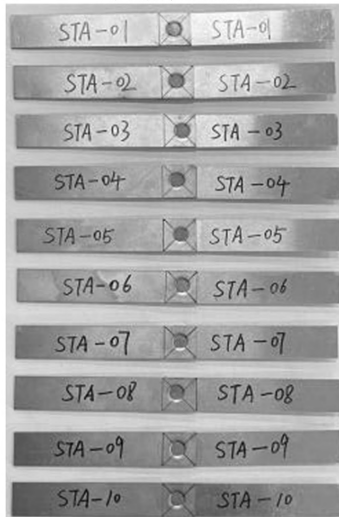
1.7 mm(见图1a))。自冲铆接试样尺寸结构及其接头类型如图2所示。为了便于描述不同板材的自冲铆接接头,使用以下命名法:STA接头表示钛合金TA1基板为上板、铝合金5A06基板为下板的接头;SAT接头表示铝合金5A06基板为上板、钛合金TA1基板为下板的接头。

表1 板材力学性能测试结果

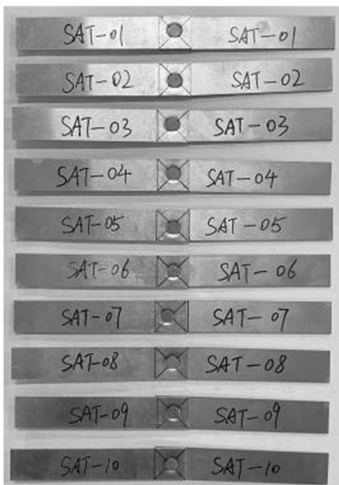
基板	拉伸模量/ GPa	拉伸强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %
TA1	96	353	316	49
5A06	80	256	223	20



a) 试样尺寸结构



b) STA接头



c) SAT接头

图2 自冲铆接试样尺寸结构及其接头类型

## 1.2 测量接头成型质量参数

所有接头皆是在相同的铆接工艺参数下获得,采用剖面法分析接头截面对称性、密封性,并且参考国际上常用的3个检测指标(钉头高度、内锁值以及残余底厚)<sup>[12]</sup>,从多维度分析各接头的成型质量。

从铆接好的接头中随机挑选出2个不同类型的接头,用电火花线切割机床从接头中间切开,通过工业电子显微镜电镜获取接头截面图像,并通过视觉测量技术测量出接头截面的相关参数,接头成型质量参数如表2所示。

表2 接头成型质量参数

接头类型	钉头高度/mm	内锁值/mm	残余底厚/mm
STA	0.15	0.75	0.80
SAT	0.04	0.40	0.28

图3所示为自冲铆接接头剖面,其中钉头高度为上板上表面与铆钉头上表面的垂直距离;内锁值为上板、下板以及铆钉的交点与钉脚尖的水平方向最外点的水平距离;残余底厚为钉尖尖的垂直方向最下点与下板下表面的垂直距离;钉脚张开度为铆钉腿外表面圆弧最凹点与钉脚尖的水平方向最外点之间的水平距离。

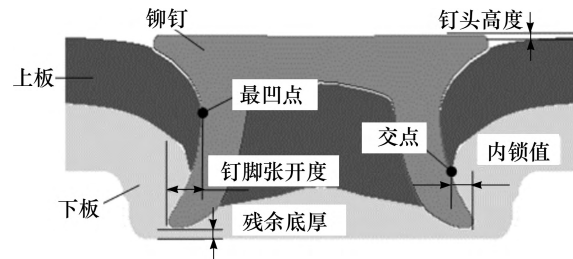


图3 自冲铆接接头剖面

## 1.3 静拉伸测试

拉伸试验在MTS CMT4304型微机控制电子万能试验机上进行。为了减少弯曲变形,在拉伸试验期间将相应的尺寸垫片连接到所有接头上<sup>[3]</sup>。2种类型的接头每种有10个试样,以5 mm/min的恒定位移速率进行拉伸试验。

图4所示为STA接头和SAT接头的载荷-位移曲线,图4a)、图4b)中分别有10条曲线,分别对应10个试样。拉伸后获得的2种类型接头静态失效模式如图5所示。观察失效接头实物,发现SAT接头和STA接头的静态失效模式主要是基板断裂,且均失效于铝合金5A06基板上。

通过图4的数据可以进一步计算出每种接头的平

均峰值载荷、平均失效位移,以及平均能量吸收值。其中,每种接头的平均峰值载荷为该种10个接头试样峰值载荷的平均值;每种接头的平均失效位移为该种10个接头试样最大失效位移的平均值;而每种接头的平均能量吸收值为图4中该种10个接头试样载荷-位移曲线与位移横坐标所围成面积的平均值。2种类型接头的平均峰值载荷、平均失效位移和平均能量吸收值对比结果如图6所示。

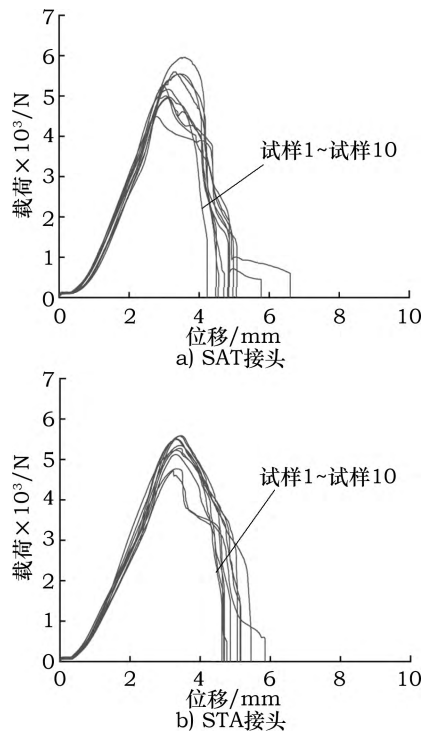


图4 2种类型接头的载荷-位移曲线

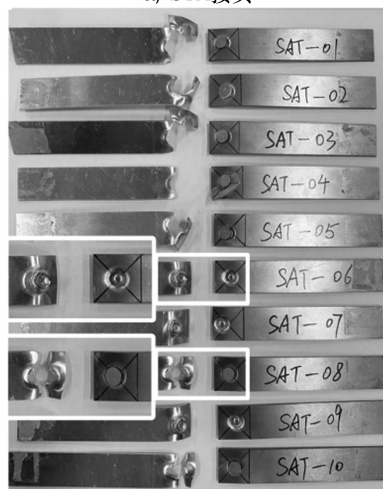
## 2 试验结果及分析

### 2.1 接头成型质量分析

由表2所示可知,STA接头的钉头高度(为0.15 mm)约为SAT接头的钉头高度(为0.04 mm)的4倍,说明STA接头相对SAT接头更加难以成型;STA接头的内锁值(为0.75 mm)约为SAT接头的内锁值(为0.40 mm)的2倍,这是因为接头在成型过程中,STA接头上板为钛合金TA1,SAT接头上板为铝合金5A06,TA1有更高的屈服强度(见表1),导致铆钉在刺穿STA接头上板时铆钉空腔并没有被填满,在载荷的作用下,钉脚继续刺入较软的下板,而残留在铆钉空腔中的基材在下板的作用下向上运动,同时迫使钉脚向水平方向运动,形成更大的钉脚张开度,从而形成更大的内锁值;STA接头的残余底厚(为0.80



a) STA接头



b) SAT接头

图5 拉伸后获得的2种类型接头静态失效模式

mm)约为SAT接头的残余底厚(为0.28 mm)的3倍,这是因为在铆钉长度、基板厚度一致的情况下,STA接头的钉头高度相比于SAT接头的钉头高度更高,而STA接头的钉脚张开度较SAT接头更大,导致STA接头的残余底厚更大。

### 2.2 力学性能分析

由图6a)所示可知,STA接头的平均峰值载荷为5263.6 N,与SAT接头的平均峰值载荷5246.0 N大小基本相同,说明二者的静载荷强度十分接近,这是由于钛合金TA1基板与铝合金5A06基板自身性能相差过大,从而导致2种搭接方式都是在性能相对较弱的铝合金5A06基板处发生失效。

由图6b)亦可知,STA接头的平均失效位移(为5.02 mm)与SAT接头的平均失效位移(为5.01 mm)基本相等,这与STA接头和SAT接头的失效形式密切相关,都失效于性能相对较弱的铝合金5A06基板,从而导致二者虽然搭接方式不同,但其失效位移与载荷强

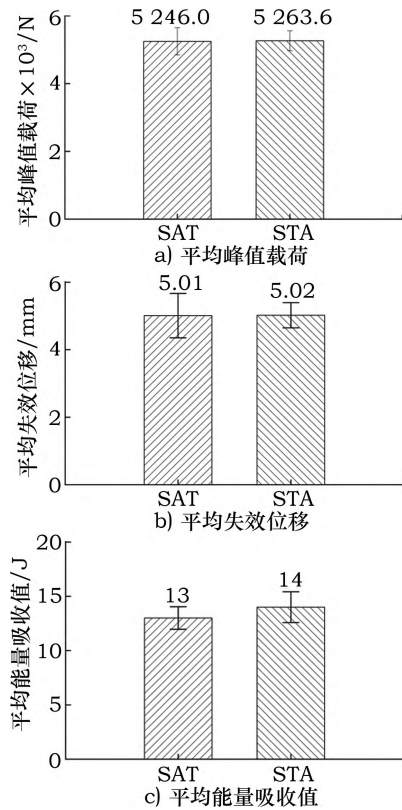


图6 2种类型接头的平均峰值载荷、平均失效位移和平均能量吸收值对比结果

度都十分接近。

由图6c)可知,STA接头的平均能量吸收值(为14 J)与SAT接头的平均能量吸收值(为13 J)基本相等,接头的平均能量吸收值高低表征其缓冲吸振性能的优劣,由各自的失效位移、静载荷强度共同决定,而SAT接头和STA接头的平均能量吸收值差距仅为1 J,进一步证明二者同时失效于性能相对较弱的铝合金5A06基板。

### 2.3 静载失效分析

分析接头的失效机理,有助于找到接头失效的根本原因,并针对失效过程进行优化,提出减少甚至避免接头失效发生的措施,从而达到可靠、安全的目的。通过静拉伸测试,得到接头的静态失效模式如图5所示。SAT接头和STA接头的失效模式主要为板材断裂,其中每种类型接头10个试样中,SAT接头有7个试样是上板断裂(即铝合金5A06板),STA接头有8个试样是下板(即铝合金5A06板)断裂,由于钛合金TA1基板的拉伸强度(为353 MPa)远高于铝合金5A06基板的拉伸强度(为256 MPa),所以断裂失效均发生在铝合金5A06基板上。这也验证了本文第2.2节分析所得结论的可靠性。

### 2.4 接头静失效机理分析

通过接头的静载失效分析可知,接头的主要失效形式为基板断裂。选取铝合金5A06作为上板时断裂后的断口进行扫描电镜(SEM)微观分析,接头失效宏观断口和微观SEM结果如图7所示。图7a)所示为接头失效宏观断口;图7b)、图7c)、图7d)和图7e)分别为图7a)宏观断口上区域b、区域c、区域d、区域e的SEM结果;图7f)和图7g)分别为图7b)、图7c)中区域f和区域g的SEM结果放大图。

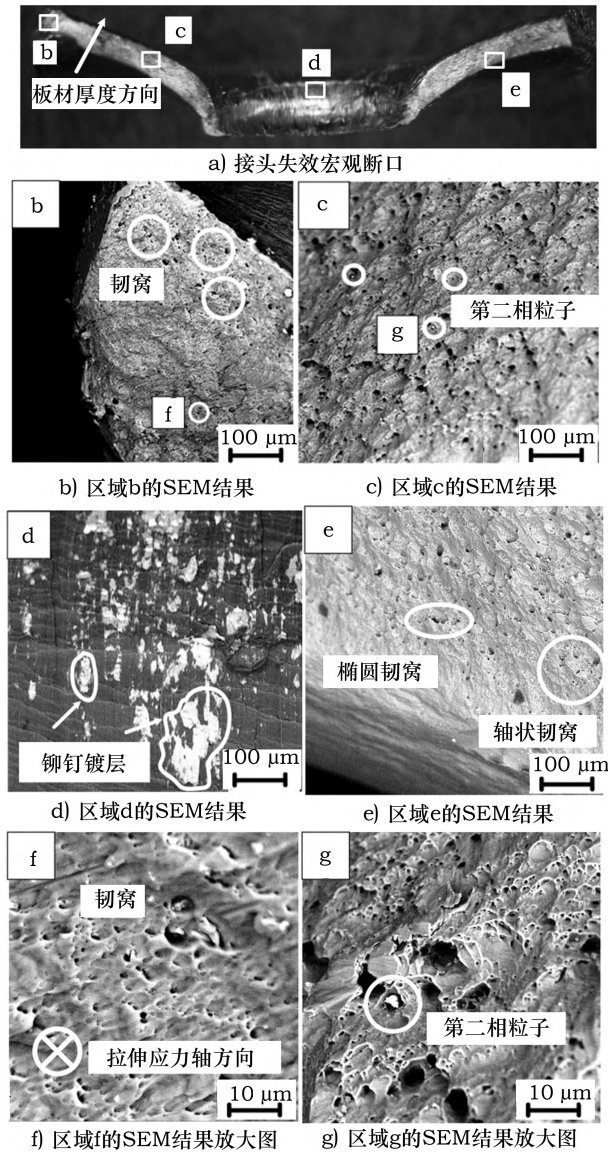


图7 接头失效宏观断口和微观SEM结果

在图7b)所示的接头上板断口区域b中,通过SEM观察到大量由材料塑性变形产生的聚集性显微孔洞即韧窝(见图7b)中白色圆圈内),其放大图如图7f)所示,且断口未出现拉伸撕扯痕迹,表面较为平整,韧窝朝向与拉伸应力轴成约45°夹角,该种形貌为典

型的剪切唇微观形貌;因为断裂时的名义应力高于材料的屈服强度,发生剪切撕裂而形成断口;观察发现韧窝的扩展方向为从基板边缘向板材厚度方向(见图7a))扩展。

图7c)所示为接头上板断口区域c的形貌,断口有大量微小韧窝(见图7c)白色圆圈内),属于微孔聚集型断裂,呈现灰色纤维状并具有显著的塑性变形,图7g)所示为图7c)中区域g的局部放大图,在SEM下观察到在韧窝中心起裂处析出少量第二相粒子(见图7g)中白色圆圈内),韧窝深,说明接头上板(即铝合金5A06基板)具有良好的塑性。

图7d)所示区域为自冲铆接接头成型区,白色块体为铆钉镀层,这是由于铆接时铆钉与板材因较大的铆接力而产生塑性变形,铆钉镀层附着在接触区域的板材上。

图7e)所示为图7a)宏观断口区域e的SEM结果,在图7e)上观察到大量轴状韧窝,少量由于切应力的作用而产生的椭圆韧窝,表明在基板开始发生断裂后,该区域应力三轴度增大,进而在断口处形成轴状韧窝。

### 3 结语

1) 自冲铆接可实现钛-铝异种合金(TA1和5A06)薄板材料优质的点连接,平均峰值载荷可达5 200 N。

2) 从成型上看,当钛合金薄板为上板时,接头的内锁值更大,但其钉头高度偏高;当铝合金薄板作为上板时,接头的钉头与上板接近平齐,但其内锁值偏小。

3) 从力学性能看,2种接头的静载强度、失效位移和抗振吸收能力均相当。从静失效形式来看,接头的主要失效形式为基板断裂,且均失效于强度较弱的铝合金板上。

4) 从失效机理来看,基板断裂区域具有大量微小韧窝,在韧窝中心有起裂过程中析出的第二相粒子,接头静载失效属于塑性断裂。

### 参考文献:

- [1] 赵伦. 5052 铝合金自冲铆接头微动损伤研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [2] ZHAO L, HE X C, XING B Y, et al. Fracture mechanism of titanium sheet self-piercing riveted joints [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 14(11): 1-9.
- [3] 张先炼. 航空轻合金薄板自冲铆接微动疲劳机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [4] 王兰, 范青山, 王学敏. 自冲铆接技术在汽车上的应用[J]. *汽车与配件*, 2017(20): 72-73.
- [5] 吕枫, 邓将华, 陈如明, 等. 板料组合方式对铝/钢异种金属板自冲铆接头性能的影响[J]. *塑性工程学报*, 2019, 26(4): 134-141.
- [6] 梁钜松. 电磁自冲铆接工艺及剪切力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [7] 宋庆军, 张林阳, 李军, 等. 钢铝异种材料自冲铆接模拟及工艺研究[J]. *汽车工艺与材料*, 2021(7): 1-6.
- [8] 师俊峰, 韩珍梅. 航空紧固件钛合金材料的应用现状[J]. *机械管理开发*, 2020, 35(5): 258-259.
- [9] 李宽, 覃小攀. 自穿刺铆接技术在新能源汽车上的应用研究[J]. *汽车工艺师*, 2020(10): 17-22.
- [10] 黄志超, 李玲玲, 李海洲. 碳纤维复合材料与 5052 铝合金空心与半空心自冲铆接静强度分析[J]. *塑性工程学报*, 2022, 29(2): 20-27.
- [11] 国家技术监督局. 焊接接头机械性能试验取样方法: GB/T 2649—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [12] 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.

作者简介: 赵伦, 博士, 特聘副研究员, 研究方向: 智能连接新技术。

林森, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向: 智能连接新技术。

甘增康, 通信作者, 博士, 特聘副研究员, 研究方向: 智能连接新技术、机器人技术。

E-mail: zhaolun@szpt.edu.cn; linsen233keep@163.com;

gan0185@szpt.edu.cn

收稿日期: 2022-08-06

(上接第 96 页)

- [19] 高波, 高超, 何吉东, 等. 强流脉冲电子束作用下纯钛的微观组织结构变化及其性能研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(7): 156-160.
- [20] 赵鹏程. 温度及应力诱发超细晶工业纯钛再结晶与晶粒长大的机理研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.
- [21] HERBERT E G, JOHANNIS K E, SINGLETON R S, et al. On the Measurement of Energy Dissipation Using Nanoindentation and the Continuous Stiffness Measurement

Technique [J]. *Journal of Materials Research*, 2013, 28(21): 3029-3042.

作者简介: 李思雪, 硕士研究生, 主要研究方向为精密与超精密加工技术。

孙桓五, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密与超精密加工技术。

E-mail: 3098200840@qq.com; sunhuanwu@163.com

收稿日期: 2022-06-21