不同钢板与THAS铸铝自冲铆接力学性能及失效形式研究

张华 张林阳 刘博洋 齐丹 杨清竹 赵心桥

（高端汽车集成与控制全国重点实验室，长春 130013）

摘要：为研究不同强度级别钢板与THAS铸铝形成的自冲铆接（SPR）接头的力学性能与失效形式，设计了不同搭接形式、不同受力工况下的准静态力学性能对比试验，试验结果表明：采用合理的工艺设计与钉、模选型，可获得良好的SPR连接质量，且接头的最小剩余底部厚度、左/右互锁值等均处于合格范围内；质量合格的SPR接头的十字剪切、十字剪剥混合、十字剥离以及拉伸剪切下的峰值力均随钢板强度的提升而增长，而其失效形式则表现出由钢板侧失效逐渐向铸铝侧失效演变的趋势；十字搭接样品的峰值力从大到小依次为十字剪切、十字剪剥混合、十字剥离，一字搭接样品的拉伸剪切强度高于同种钢板的点焊接头强度。

关键词：自冲铆接 力学性能 失效形式

中图分类号：U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260136

Mechanical Properties and Failure Modes of Self-Piercing Riveted Joints Between Steel Sheets and THAS Cast Aluminum Alloy

Zhang Hua, Zhang Linyang, Liu Boyang, Qi Dan, Yang Qingzhu, Zhao Xinqiao

(National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, Changchun 130013)

Abstract: To investigate the mechanical properties and failure modes of Self-Piercing Riveted (SPR) joints between steel sheets of varying strength grades and THAS cast aluminum alloy, quasi-static comparative tests are conducted under different overlap configurations and loading conditions. The results indicate that sound SPR joint quality is achieved through appropriate process design and optimized rivet-die selection, with the minimum residual bottom thickness and left/right interlock values remaining within acceptable limits. For qualified SPR joints, the peak loads under cross-tension, combined shear-tension, cross-tension peeling, and lap-shear loading conditions all increase with rising steel sheet strength, while the dominant failure mode transitions progressively from steel-side failure to aluminum-side failure. Under cross-tension loading, the peak load follows a descending order: pure cross-tension, combined shear-tension, and cross-tension peeling. Additionally, the lap-shear strength of single-rivet joints with linear overlap exceeds that of spot-welded joints employing steel sheets of equivalent grade.

Key words: Self-piercing riveting, Mechanical properties, Failure Modes

1 前言

近年来，全球电动汽车销量爆发式增长，消费者对续驶里程的诉求进一步推动了轻量化技术的快速迭代。当前，一体化压铸结构件代替车身钢板冲焊件是实现轻量化的热点方案，以提高集成度与轻量化水平。然而，随着压铸件尺寸不断增大，钢-铝异质材料连接场景变得愈加复杂，对现有车身连接技术提出了严峻挑战[1]。自冲铆接（Self-Piercing Riveting，SPR）技术作为解决压铸件

作者简介：张华（1996—），男，工程师，硕士学位，研究方向为先进多材料连接技术的创新开发、应用及推广。

基金项目：吉林省、长春市重大科技专项（超大型压铸结构件连接、防腐等量产技术研究20210301025GX）。

参考文献引用格式：

张华，张林阳，刘博洋，等. 不同钢板与THAS铸铝自冲铆接力学性能及失效形式研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(8)：33-38.

ZHANG H, ZHANG L Y, LIU B Y, et al. Mechanical Properties and Failure Modes of Self-Piercing Riveted Joints Between Steel Sheets and THAS Cast Aluminum Alloy[J]. Automobile Technology & Material, 2026(8): 33-38.

连接难题的主流技术[2]，其接头力学性能直接决定着车身结构安全性及轻量化开发目标的达成。

丁志勇等[3]基于 DP590 与 6063-T6 挤压铝及 AlSi10MnMg-T7、JDA1b 两类压铸铝材料，研究了不同材料厚度、搭接顺序对 SPR 和热熔自攻丝铆接（Flow Drill Screw，FDS）连接质量和接头力学性能的影响，结果表明，对于钢-铝连接，同种材料组合下 SPR 接头强度优于 FDS 接头，且随着上层板厚度增加，SPR 接头的峰值力进一步增大。顾成波等[4]研究了 AlSi10MnMg 压铸铝材料成分波动及其热处理状态对钢-铝 SPR 接头的连接质量及力学性能的影响，结果表明，铸铝延伸率降低会影响接头的互锁值与能量吸收功，而提高铸铝抗拉强度能够提升接头的连接强度。李明等[5]基于 DP590 与 AlSi10MnMg-T7、JDA1b 压铸铝材料，研究了下层铸铝板厚度变化对钢-铝 SPR 接头连接质量及力学性能的影响，研究发现，随着下层板厚度的增加，接头连接质量下降，并最终导致拉伸剪切、十字剥离工况下接头连接强度及能量吸收功的同时减小。

上述研究多聚焦单一牌号钢板与压铸铝的 SPR 连接，主要围绕其连接质量与力学性能展开分析。而在实际生产中，伴随压铸件尺寸的不断增大，周边与其匹配的钢板件的材料种类也在逐渐增多。因此，本文针对不同强度级别钢板与压铸铝 SPR 接头的力学性能变化趋势及规律开展研究，为大尺寸铸铝压铸结构的应用提供可靠连接技术解决方案与相关数据支撑。

2 试验方法

2.1 试验材料及设备

钢板材料选用车身压铸件周边零件常用材料，覆盖 3 个典型强度级别，牌号分别为 St16、FC340/590DP、FC650/980DH，详细信息如表 1 所示。

表 1 钢板材料信息

钢板牌号	厚度/mm	硬度/HV0.5	伸长率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
St16	0.7	101	42	158	290
FC340/590DP	1.0	188	23	389	642
FC650/980DH	1.2	299	18	660	1005

压铸铝合金材料牌号为 THAS，由中国一汽联合清华大学自主开发，其化学成分、力学性能分别如表 2、表 3 所示。

表 2 THAS 材料化学成分（质量分数） %

元素类别	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Sr	Ti	V	Sn	Pb	Zr	Al
质量分数	9.250	0.017	0.100	0.650	0.290	0.024	0.081	0.079	0.004	0.003	0.027	其余

表 3 THAS 材料力学性能

铸铝牌号	厚度/mm	伸长率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
THAS	3.0	10.7	148	293

SPR 连接设备采用 TUCKER 自冲铆枪，匹配 KUKA60RH 型机器人及相关控制系统，设备最大铆接力为 80 kN，如图 1 所示。



图 1 SPR 连接设备

连接质量的检测采用德国蔡司 Observer.A1m 型金相显微镜，连接性能的测试采用 Zwick/Roell Z100 型电子拉力试验机。

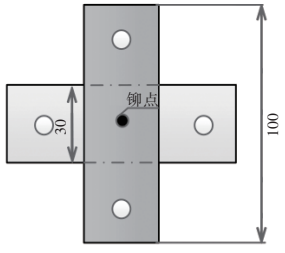
2.2 方案制定

连接方案共涉及 3 类钢-铝材料组合，覆盖 6 组连接试验，包括十字搭接、一字搭接 2 种连接形式，具体信息以及试验所需的优选钉、模型号如表 4 所示。十字搭接及一字搭接样品尺寸要求如图 2 所示，连接点位于搭接面的中心处，铆接方向为由钢到铝，FC650/980DH 超高强钢板采用球形模铆接，可有效避免铆点背部铸铝侧微裂纹的产生。十字搭接样品用于评价 SPR 接头的十字剪切、十字剪剥混合以及十字剥离性能，通过变换拉伸夹具的测试角度实现测试，如图 3 所

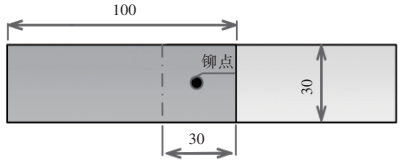
示。测试角度为样品受拉方向与样品搭接面所在平面形成的夹角,十字剪切的夹角为0°,十字剪剥混合的夹角为45°,十字剥离的夹角为90°。一字搭接样品用于评价SPR接头的拉伸剪切性能。为提高试验数据的准确性,每种材料组合涉及的每一类连接性能均设计3次重复试验。为降低偏心距对接头力学性能测试结果的影响,在十字剪切、十字剪剥混合以及拉伸剪切性能测试前,均在相应样品的夹持端垫入合适厚度的工艺垫片。

表4　连接方案

样品编号	材料组合	铆钉型号	铆模型号	连接形式	评价性能
S1	St16&THAS	直径5.3 mm,长度7.0 mm,硬度H2	平底模	十字搭接	十字剪切 十字剪剥混合 十字剥离
S2	FC340/590DP&THAS	直径5.3 mm,长度7.0 mm,硬度H4	平底模		
S3	FC650/980DH&THAS	直径5.3 mm,长度7.0 mm,硬度H4	球形模		
L1	St16&THAS	直径5.3 mm,长度7.0 mm,硬度H2	平底模	一字搭接	拉伸剪切
L2	FC340/590DP&THAS	直径5.3 mm,长度7.0 mm,硬度H4	平底模		
L3	FC650/980DH&THAS	直径5.3 mm,长度7.0 mm,硬度H4	球形模		

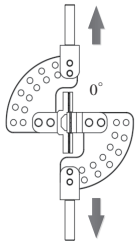


(a)十字搭接

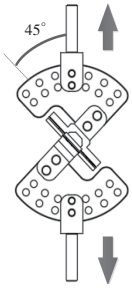


(b)一字搭接

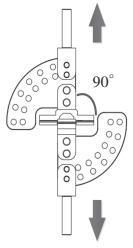
图2　力学性能测试样品



(a)十字剪切测试(0°)



(b)十字剪剥混合测试(45°)



(c)十字剥离测试(90°)

图3　十字搭接样品测试状态

3　结果与讨论

3.1　接头连接质量检测与分析

制备SPR连接性能测试样品前,需确认SPR连接质量的合格性,其中,每种材料组合用于质量评价的样品数量为3个。SPR连接质量包括外观质量、内部质量。借助放大镜、头部高度仪对连接后的样品接头区域进行观察和测试,未见铆接裂纹且其铆钉头部高度h均处于合理范围内(−0.5 mm≤h≤0.5 mm),可知其外部质量合格,如图4所示。内部质量的核心指标包括最小剩余底部厚度d(d≥0.1 mm)、左互锁值C_1(C_1≥0.25 mm)和右互锁值C_2(C_2≥0.25 mm),如图5所示。图6所示为最小剩余底部厚度d随St16&THAS、FC340/590DP&THAS以及FC650/980DH&THAS组合的变化曲线,由图6可知,3种材料组合接头的剩余底部厚度d均满足设计要求。图7所示为左互锁值C_1和右互锁值C_2随St16&THAS、FC340/590DP&THAS以及FC650/980DH&THAS组合的变化曲线,由图7可

知，左互锁值 C_1 和右互锁值 C_2 均满足设计要求，且 C_1 与 C_2 的数值较为接近，均不小于 0.85 mm 且稳定性较高，意味着铆钉在铆接成形过程中的变形较为均匀，是铆接质量控制所期望的一种连接形态。此外，伴随钢板强度的提升，C_1 与 C_2 均有一定程度的降低，推测原因为与铆钉在刺穿上部板材时产生的墩粗，钢板强度越高，铆钉刺穿时所受到的阻力就会越大，墩粗量越大。

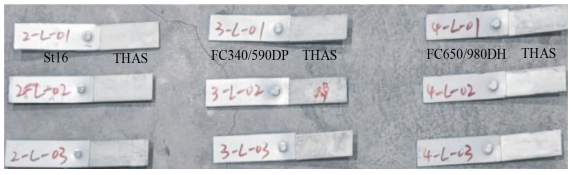


图 4　3 种钢-铝材料组合 SPR 连接接头外观形貌

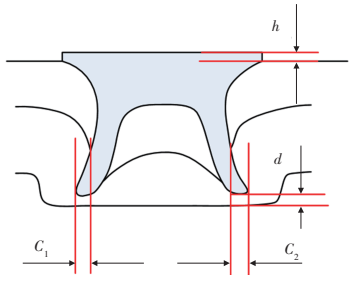


图 5　SPR 接头断面连接质量控制指标示意

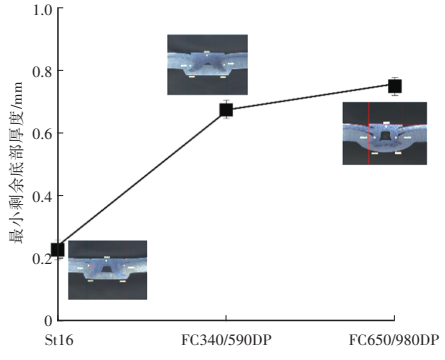


图 6　3 种钢-铝材料组合 SPR 连接接头最小剩余底部厚度检测结果

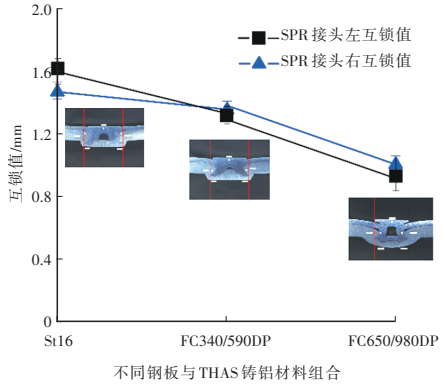


图 7　3 种钢-铝材料组合 SPR 连接接头互锁值检测结果

3.2　十字搭接样品连接性能检测与分析

图 8 所示为 St16、FC349/590DP 以及 FC650/980DH 与 THAS 铸铝材料制备的 SPR 十字搭接样品的连接性能测试结果。由图 8 可知，固定同一种材料组合，3 种测试形式下的峰值力由大到小依次为十字剪切、十字剪剥混合、十字剥离，说明垂直于连接点方向的剥离应力在接头受力失效的过程中占据主导地位并一定程度降低其连接性能。对于上述 3 种材料组合，随钢板材料强度的提升，十字剪切、十字剪剥混合、十字剥离 3 种接头测试形式下接头峰值力均呈现增大的趋势。其中，十字剪切的峰值力提升最为明显，从 St16 的 2.8 kN 提升至 FC650/980DH 的 8.5 kN。

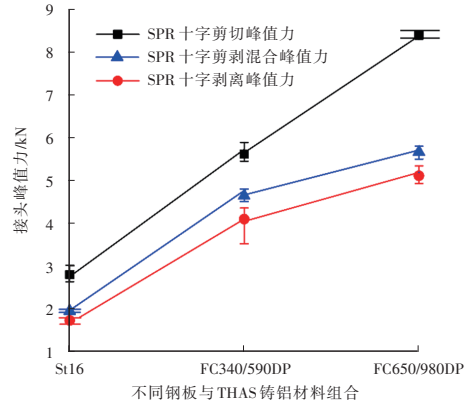


图 8　3 种钢-铝材料组合 SPR 十字搭接样品连接性能测试结果

表 5 所示为 3 种钢板材料与 THAS 铸铝材料 SPR 十字搭接样品失效形式统计结果，图 9 所示为其典型失效形式，由表 5、图 9 可知：对于 S1 样品，十字剪切、十字剪剥混合及十字剥离性能测试的失效形式均为上层钢板沿铆点脱出，说明接头连接点附近的强度薄弱点位于钢板侧。对于 S2 样品，十字剪切、十字剪剥混合性能测试的失效形式与 S1 样品基本一致，但在十字剥离性能测试中，出现了上层钢板沿铆点脱出、铸铝板撕裂或断裂 2 类失效形式，意味着在此种受力条件下，接头连接点附近的强度与双侧母材的强度基本相同，导致双侧母材均存在断裂的可能性。对于 S3 样品，失效形式与上述 2 组样品存在明显差异，3 种性能测试的接头失效形式均为铸铝板撕裂或断裂，说明接头连接点附近的强度薄弱点位于铸铝侧。

表5　3种钢板与THAS铸铝SPR十字搭接样品失效形式

样品编号	材料组合	评价性能	接头失效形式
S1	St16&THAS	十字剪切	上层钢板沿铆点脱出
		十字剪剥混合	上层钢板沿铆点脱出
		十字剥离	上层钢板沿铆点脱出
S2	FC340/590DP&THAS	十字剪切	上层钢板沿铆点脱出
		十字剪剥混合	上层钢板沿铆点脱出
		十字剥离	2个样件为上层钢板沿铆点脱出，1个样件为铸铝板撕裂或断裂
S3	FC650/980DH&THAS	十字剪切	铸铝板与钢板均撕裂，铆钉脱落
		十字剪剥混合	铸铝板撕裂或断裂
		十字剥离	铸铝板撕裂或断裂

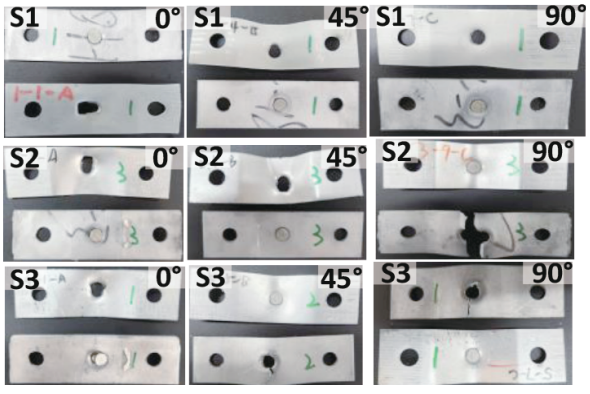


图9　3种钢板材料与THAS铸铝材料十字搭接样品典型失效形式

3.3　一字搭接样品连接性能检测与分析

图10所示为3种钢板与THAS铸铝SPR一字搭接样品与对应钢板点焊一字搭接样品连接性能对比结果，由图10可知，随着钢板强度等级的提升，钢-铝SPR接头与对应钢板点焊接头的拉伸剪切峰值力均呈增大趋势。SPR接头的拉伸剪切强度比相应钢板点焊接头高约1 000 N。因而，在以拉伸剪切为主导的受力环境下，钢-铝SPR连接工艺可替换钢板点焊工艺。

表6所示为3种钢板材料与THAS铸铝SPR一字搭接样品拉伸剪切性能测试失效形式结果，图11所示为其失效形式照片。由表6、图11可知：对于L1与L2组样品，其失效形式均为上层钢板沿铆点脱出，说明此时接头的薄弱侧为钢板。对于L3组测试样品，接头铸铝板与钢板均发生撕裂或变形，说明接头连接点附近的强度与双侧母材的强度基本一致。上述结果与十字剪切性能测试样品的失效形式基本吻合。

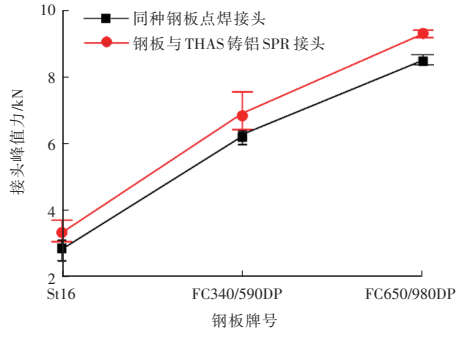


图10　3种钢-铝材料组合SPR连接接头与钢板点焊接头拉剪性能测试结果

表6　3种钢板与THAS铸铝SPR一字搭接样品失效形式

样品编号	材料组合	评价性能	破坏/失效形式
L1	St16&THAS	拉伸剪切	上层钢板沿铆点脱出
L2	FC340/590DP&THAS	拉伸剪切	上层钢板沿铆点脱出
L3	FC650/980DH&THAS	拉伸剪切	铸铝板与钢板均撕裂



图11　3种钢板与THAS铸铝SPR一字搭接样品典型失效形式

4　结论

a. 通过合适的工艺设计与钉、模选型，可在不同强度等级的钢板与THAS铸铝间获得良好的

SPR 连接质量，且其接头最小剩余底部厚度、左/右互锁值均处于合格范围内。

b. 在连接质量合格的前提下，SPR 接头的十字剪切、十字剪剥混合、十字剥离以及拉伸剪切峰值力均随钢板强度的提升而提高，且其失效形式也表现出由钢板侧失效向铸铝侧失效演变的趋势。

c. 十字搭接样品的 SPR 连接的峰值力由大到小依次为十字剪切、十字剪剥混合、十字剥离；一字搭接样品的 SPR 连接的拉伸剪切峰值力高于上述同种钢板之间的点焊接头。

参考文献：

[1] 张顺, 鲁后国, 阚洪贵 . 高真空压铸铝合金车身应用部位推荐研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(1): 161-163.

[2] 张华, 刘博洋, 张林阳, 等 . 乘用车车身压铸铝结构件应用现状及连接技术开发应对[J]. 汽车工艺与材料, 2024(7): 9-13.

[3] 丁志勇, 李海洋, 顾成波 . 钢-铝及铝-铝接头自冲铆接和流钻螺钉连接对比研究[J]. 锻压技术, 2024(4): 138-145+160.

[4] 顾成波, 龙广鹏, 于万元, 等 . 压铸铝材料稳定性对自冲铆接接头成形质量和力学性能影响[J]. 锻压技术, 2023, 48(11): 125-132+140.

[5] 李明, 尹辉俊, 顾成波 . 压铸铝与高强度钢自冲铆接成形质量与力学性能的研究[J]. 锻压技术, 2023(11): 87-94.

AT&M