汽车覆盖件铝合金薄板自冲铆接接头疲劳性能研究及寿命预测

咎大千 寇宏滨

（泛亚汽车技术中心有限公司，上海 201208 ）

摘要：为研究薄铝自冲铆接（SPR）接头疲劳性能，通过一系列薄铝板SPR接头的疲劳性能物理试验，获得了拉伸和剪切载荷下的载荷与寿命关系。基于Rupp理论，结合仿真方法分别得到拉伸和剪切下的应力范围与寿命关系，通过Excel和Hyperstudy对Rupp本构中9个参数进行优化，最终归一化拟合构建薄铝板SPR接头疲劳寿命的*S-N*曲线，建立了薄铝板SPR接头的疲劳寿命预测方法，支持了薄铝板SPR接头结构的正向设计。

关键词：薄铝板自冲铆接 疲劳寿命 *S-N*曲线 归一化拟合 疲劳仿真预测

中图分类号：U465.2；TG938 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250156

Fatigue Performance Study and Fatigue Life Prediction of Self-piercing Riveting Joint of Thin Aluminum Alloy Sheet for Automotive Covering

Zan Daqian, Kou Hongbin

(Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201208)

Abstract: This article focuses on the fatigue performance of thin aluminum plate SPR riveted joint. Through a series of physical tests on the fatigue performance of thin aluminum plate SPR joint, the fatigue life relationship under tensile and shear loads are obtained. Based on the Rupp theory and combined with simulation method, the stress range and fatigue life relationship under tension and shear loads are obtained. Nine parameters of Rupp constitutive model are optimized using Excel & Hyperstudy, and a normalized *S-N* curve for the fatigue life of thin aluminum plate SPR joint is constructed. The fatigue life prediction method for thin aluminum plate SPR joint is established, supporting the forward design of thin aluminum plate SPR joint structure.

Key words: SPR of thin aluminum plate, Fatigue life, *S-N* curve, Normalization fitting, Fatigue simulation prediction

1 前言

2020年至2024年中国乘用车产销量统计数据显示，乘用车整体产销量从2 531.1万辆突破至3 143.6万辆，新能源汽车产销量从140万量左右突破至近1 300万，占比从7%增长到超40%，呈现出爆发式增长，新能源汽车已成为乘用车市场的销售主流[1-2]。由于新能源汽车充电特性会带来用户里程焦虑，导致续航里程成为消费者选车时首要考虑的性能指标之一，迫使各大主机厂将提高续航里程定为技术攻关的核心。因为续航里程与滚动阻力成反比，滚动阻力与整车质量成正比，因此车辆轻量化是提升续航里程的、有效措施。目前，车用轻质铝合金和复合材料的应用对于车辆

作者简介：咎大千（1990—），男，博士学位，工程师，研究方向为整车覆盖件结构耐久性分析、结构优化和材料与连接工艺耐久性能。

参考文献引用格式：

咎大千，寇宏滨．汽车覆盖件铝合金薄板自冲铆接接头疲劳性能研究及寿命预测[J]. 汽车工艺与材料，2026(5)：21-27.

ZAN D Q, KOU H B. Fatigue Performance Study and Fatigue Life Prediction of Self-piercing Riveting Joint of Thin Aluminum Alloy Sheet for Automotive Covering[J]. Automobile Technology & Material, 2026(5): 21-27.

轻量化贡献最为显著，是各主机厂实现车辆轻量化的重要手段[3]。由于传统焊接工艺对异质材料连接存在热膨胀系数不一致、界面硬脆相等问题[4]，因此，轻质材料的应用促使异质材料连接成为连接工艺领域的研究热点。

自冲铆接（Self-Pierce Riveting，SPR）因具有良好的钢-铝异质材料连接适应性，广泛应用于钢-铝混合或全铝汽车车身及覆盖件[5]。自冲铆连接技术是一种高效的新型连接技术，由铆钉对铝合金的互锁而实现稳定连接的冷连接技术，特别适用于铝合金、镁合金等轻质合金连接[6-12]。该工艺对材料的表面状态不敏感，不会由于表面状态等因素的差异而产生质量异常。

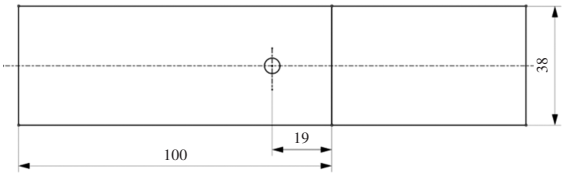
目前，国内外已对SPR接头性能进行广泛的研究，包含连接使用可行范围、失效模式和机理、静/动强度和吸能性能、车身厚铝板SPR疲劳性能[3,7,13-20]，但对车用覆盖件薄铝板SPR接头的力学性能，特别是疲劳性能的定量研究和精益化工程应用，国内研究还十分少见。

为更加有效地支持整车正向设计开发，开展了应用于车身覆盖件的薄铝板SPR接头疲劳性能研究，设计了SPR接头十字拉伸/剪切疲劳性能试验，以获得载荷-寿命对应关系，分析失效模式。基于Rupp单点连接疲劳性能预测方法[21]，结合仿真与试验方法，建立了SPR接头的疲劳应力-寿命曲线（S-N曲线），目标实现较好的工程应用对标，以期填补车用覆盖件薄铝板SPR接头疲劳仿真定量分析能力的空白。

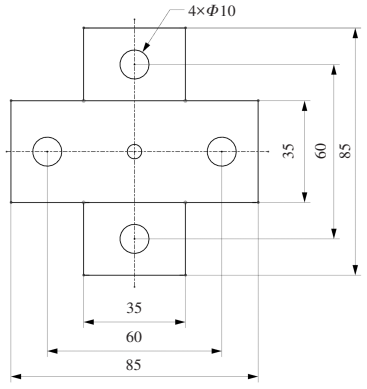
2 试验方法

2.1 材料与样件

本文选用某企业的GMW2M-ST-S-CR3、GMW3032M-ST-S-340LA和某企业6000系铝合金板材，设计了剪切试样和十字拉伸试样，具体几何尺寸如图1所示。



（a）剪切试样



（b）十字拉伸试样

图1 薄铝板SPR疲劳试样几何尺寸

SPR接头连接某公司负责完成，铆钉类型为C30N42A，直径为5 mm，铆模类型为DZ07-000。铆接时，铝材为上板，钢材为下板。显微镜测量SPR接头锁止质量如图2所示，最小厚度（T_{min}）和互锁量满足SPR工艺要求。

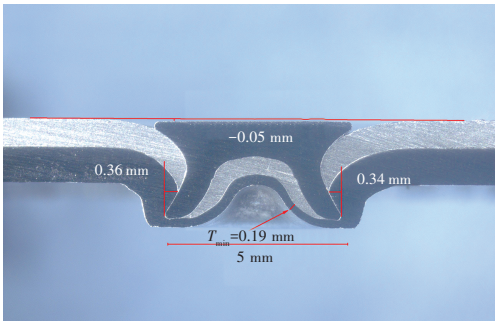


图2 SPR接头锁止质量

本文试验样件厚度组合基于某公司实际产品铝制覆盖件设计，分别选定0.7 mm和0.8 mm的6000系铝材，建立薄铝板SPR接头疲劳性能研究样件矩阵，其中包括6种剪切试样和2种十字拉伸试样，如表1所示。

2.2 试验测试

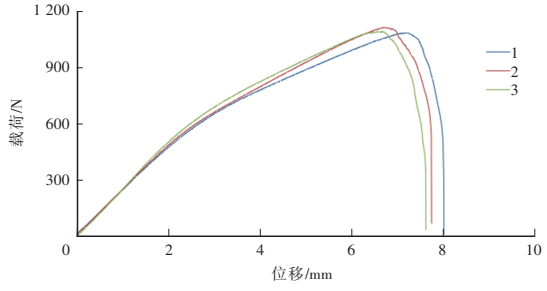
样件疲劳性能试验首先采取静强度试验确认疲劳载荷，静强度试验采用Instron 5982万能试验机进行，拉伸速度10 mm/min，以0.7 mm GMW15192M-AL-S-6000-S-90 & 1.2 mm GMW2M-ST-S-CR3样件组合为例，SPR接头静强度试验结果如图3所示，十字拉伸平均拉伸极限力为1 098 N，剪切平均拉伸极限力为1 520 N。

疲劳试验采用Instron 8872拉伸试验机，依照GB/T 3075-2021试验标准执行，整个试验过程采用载荷控制方式，施加恒幅正弦载荷，载荷比

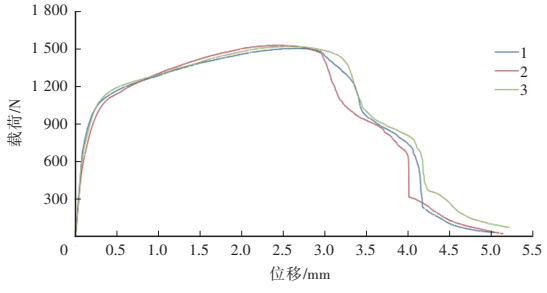
表1　薄铝板SPR铆接接头疲劳性能样件矩阵

试样	组合	t1		t2	
		材料牌号	厚度/mm	材料牌号	厚度/mm
剪切试样	1	GMW15192M-AL-S-6000-S-90	0.8	GMW2M-ST-S-CR3	1.0
	2	GMW15192M-AL-S-6000-S-90	0.8	GMW2M-ST-S-CR3	1.2
	3	GMW15192M-AL-S-6000-S-90	0.8	GMW3032M-ST-S-340LA	1.2
	4	GMW15192M-AL-S-6000-S-90	0.7	GMW2M-ST-S-CR3	1.0
	5	GMW15192M-AL-S-6000-S-90	0.7	GMW2M-ST-S-CR3	1.2
	6	GMW15192M-AL-S-6000-S-90	0.7	GMW3032M-ST-S-340LA	1.2
十字拉伸试样	1	GMW15192M-AL-S-6000-S-90	0.7	GMW2M-ST-S-CR3	1.2
	2	GMW15192M-AL-S-6000-S-90	0.8	GMW2M-ST-S-CR3	1.2

R=0.1,加载频率5 Hz,样件初始呈现SPR接头剥离时,判定视为疲劳失效,记录此时循环次数标定为SPR接头的疲劳失效寿命,每个载荷等级选择3个有效样本点,最终得到完整SPR接头的载荷-寿命关系结果。



(a)十字拉伸试样静强度试验结果

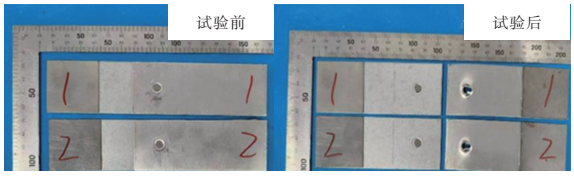


(b)剪切试样静强度试验结果

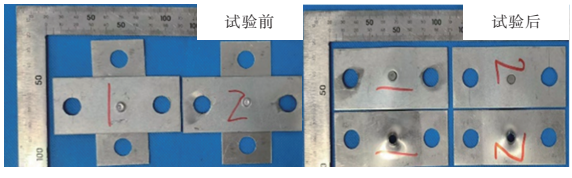
图3　0.7 mm GMW15192M-AL-S-6000-S-90及1.2 mm GMW2M-ST-S-CR3样件SPR接头静强度试验结果

3　薄铝板SPR接头疲劳试验结果汇总及讨论

SPR接头疲劳试验样件失效模式如图4所示,在循环载荷下,剪切和十字拉伸试样疲劳裂纹全部出现在铆钉与薄铝板母材连接处,并在薄铝板一侧沿铆钉圆周扩展,最终贯穿,SPR接头完整保留在厚板钢材一侧。从破坏机理来看,初始裂纹均萌生于铆钉与薄铝板母材连接处,因此,将2种失效形式合并考虑,研究SPR接头耐久性预测方法。



(a)剪切试样



(b)十字拉伸试样

图4　SPR接头疲劳失效模式

图5所示为8种SPR接头样件的疲劳试验结果。

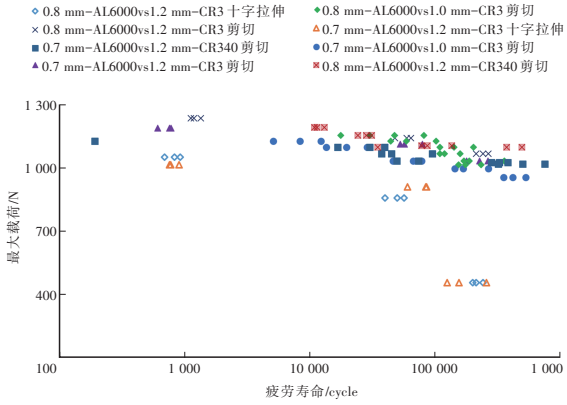


图5　薄铝板SPR接头剪切/十字拉伸试样疲劳性能

从图4疲劳试验结果得出,剪切试样的疲劳数据高于十字拉伸样件的疲劳数据,说明载荷方向

（受载形式）对 SPR 接头疲劳寿命有很大的影响。另外，在剪切试样中，被铆接母材铝板的厚度对 SPR 接头的疲劳性能有较大影响，钢材下板厚度对 SPR 接头的疲劳性能影响不大。母材厚度组合相同或者相似时，虽然钢材牌号不一样，但两者的耐久性能表现基本一致。在十字拉伸试样中，0.7 mm 和 0.8 mm 铝板样件的疲劳性能相似。综上，SPR 接头受剪切疲劳性能高于受拉疲劳性能，铆接母材薄铝板厚度对疲劳性能影响较大，并且呈正相关。

4 SPR 接头疲劳寿命分析

4.1 疲劳预测方法

目前，Rupp 本构已成为行业内进行单点连接接头疲劳分析的主流方法，并已集成到商业疲劳分析软件 nCode 中[22]。Rupp 方法的疲劳评估基本过程如图 6 所示，母材采用 4 节点四边形壳单元仿真，接头采用 CBAR 或者 ACM 单元仿真。外力施加下，读取通过接头单元的力和力矩，应用 Rupp 本构方法计算出连接核心附近的等效结构应力，以此作为疲劳分析的输入，构建接头应力-寿命（S-N 曲线），预测接头的疲劳寿命。图 6 中 S 为母材厚度，d 为直径。

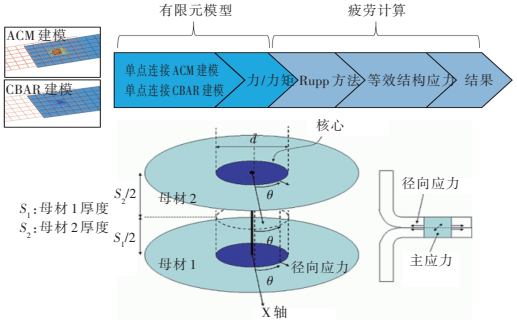


图 6 Rupp 方法疲劳预测流程和模型本构示意

Rupp 方法计算等效结构应力过程如下，

$$\sigma_{\text{sheet1}} = -\sigma_{\max}(\text{FX1})\cos\theta - \sigma_{\max}(\text{FY1})\sin\theta + \sigma(\text{FZ1}) + \sigma_{\max}(\text{MX1})\sin\theta - \sigma_{\max}(\text{MY1})\cos\theta \quad (1)$$

$$\sigma_{\max}(\text{FX1}) = \frac{\text{FX1}}{\pi d S_1} \times \text{SFFXY} \times d^{\text{DEFXY}} \times S_1^{\text{TEFXY}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\max}(\text{FY1}) = \frac{\text{FY1}}{\pi d S_1} \times \text{SFFXY} \times d^{\text{DEFXY}} \times S_1^{\text{TEFXY}} \quad (3)$$

$$\sigma(\text{FZ1}) = \frac{1.774 \times \text{FZ1}}{S_1^2} \times \text{SFFZ} \times d^{\text{DEFZ}} \times S_1^{\text{TEFZ}} \quad (4)$$

$$\sigma_{\max}(\text{MX1}) = \frac{1.872 \times \text{MX1}}{d S_1^2} \times \text{SFMXY} \times d^{\text{DEMXY}} \times S_1^{\text{TEMXY}}$$

$$\sigma_{\max}(\text{MY1}) = \frac{1.872 \times \text{MY1}}{d S_1^2} \times \text{SFMXY} \times d^{\text{DEMXY}} \times S_1^{\text{TEMXY}} \quad (6)$$

式中：σ 为应力，d 为焊核直径，S 为厚度，FX、FY、FZ、MX、MY 为经过 ACM 单元的力和力矩，SFFXY、SFMXY、SFFZ、DEFXY、DEMXY、DEFZ、TEFXY、TEMXY、TEFZ 为 Rupp 本构参数。

此方法的优点在于，采用简化后的稳定接头“结构应力”代替复杂的、不可测准的接头局部高应力，简化了焊点建模过程，节省了建模时间，并且通过简化的“结构应力”代替复杂、不可预测的接头局部高应力，提高工程应用便捷性[21]。

4.2 构建 SPR 接头疲劳 S-N 曲线

采用 nCode 读取等效结构应力与疲劳试验测试寿命相结合方式得出 S-N 曲线。首先根据样件尺寸和厚度组合建立剪切和十字拉伸试样的有限元模型，如图 7 所示，被连接母材为 5 mm 四边形壳单元，SPR 接头单元采用 CBAR 1D 单元，直径为 5 mm，母材材料属性分别设置为线性铝材和钢材材料参数，SPR 接头材料属性设置为线性的钢材材料参数。选用 Nastran Sol101 求解器进行线性静力学分析，获得 CBAR 1D 单元的力和力矩结果。

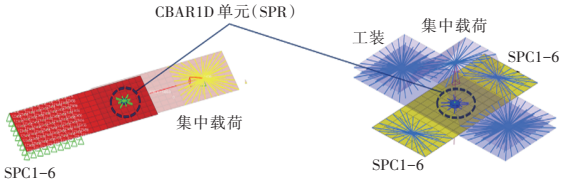


图 7 SPR 接头疲劳样件的有限元模型

将 Nastran Sol101 求解器计算得出 CBAR 1D 单元传递的力和力矩引入到 nCode 软件当中，采用 Rupp 方法，应用如表 2 所示 nCode-DesignLife-Spot weld CAE Fatigue 模块中默认 9 个 Rupp 本构参数计算等效结构应力 S，分别建立如表 3 所示 8 种试验样件的外加载荷 F 与等效应力 S 之间的比例关系，进而将 SPR 接头样件疲劳试验数据结果转换成对应的 SPR 接头疲劳应力 S-寿命 N 关系。

表 2 nCode 软件中 Rupp 本构默认参数（钢材）

载荷	因子	直径指数	厚度指数
FX,FY	SFFXY= 1.0	DEFXY=0.0	TEFXY=0.0
MX,MY	SFMXY= 0.6	DEMXY=0.0	TEMXY=0.5
FZ	SFFZ=0.6	DEFZ=0.0	TEFZ=0.5

表3　SPR接头外加载荷与等效结构应力关系对照表

试样	组合	样件牌号	厚度/mm	载荷/N	等效结构应力/MPa
剪切试样	1	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.8/1.0	1 500	307.6
	2	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.8/1.2	1 450	280.9
	3	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW3032M-ST-S-340LA	0.8/1.2	1 500	290.5
	4	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.7/1.0	1 300	280.6
	5	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.7/1.2	1 350	271.4
	6	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW3032M-ST-S-340LA	0.7/1.2	1 300	262.1
十字拉伸试样	1	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.7/1.2	1 050	1 876
	2	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.8/1.2	1 150	1 682

转换后得到的应力*S*-寿命*N*关系如图8所示,采用nCode默认Rupp本构参数,剪切和十字拉伸疲劳试验得出的*S*-*N*曲线偏差很大,剪切样件的结果分布在带状区域内,十字拉伸样件的结果分布在带状区域内,一致性良好,可以分别得到2条SPR接头*S*-*N*曲线。但实际工程应用当中,SPR接头会受到拉伸和剪切的共同作用,不能应用纯剪切或纯拉伸受载下得出的*S*-*N*曲线进行疲劳预测,会带来较大误差,不满足工程应用的定量需求,因此需要对Rupp本构参数优化,将剪切和十字拉伸疲劳试验得出2条*S*-*N*曲线进行归一化拟合为一条*S*-*N*曲线,以方便疲劳预测工程应用。

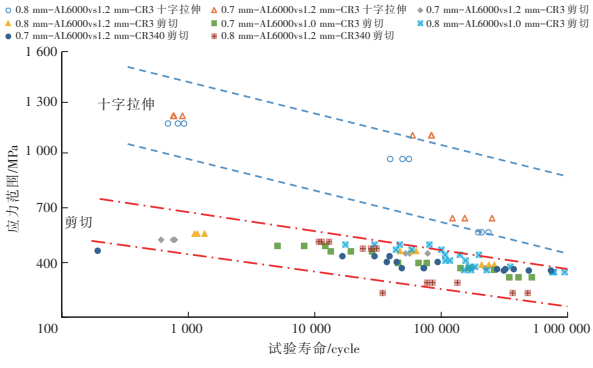


图8　SPR接头*S*-*N*曲线

4.3　参数拟合归一化*S*-*N*曲线

采用Excel&Hyperstudy联合优化来进行Rupp本构参数拟合,以表2所示SFFXY、DEFXY、TEFXY、SFFZ、DEFZ、TEFZ、SFMXY、DEMXY、TEMXY共9个参数作为设计变量,以R^2为评价标准,当R^2越趋近于1时,曲线拟合精度越高。经优化后的9个参数,使得效结构应力*S*与该工况下的循环次数*N*在对数坐标系下具有较好的线性回归关系,即将图9剪切和十字拉伸疲劳试验拟合得出的2条*S*-*N*曲线归一化为1条。

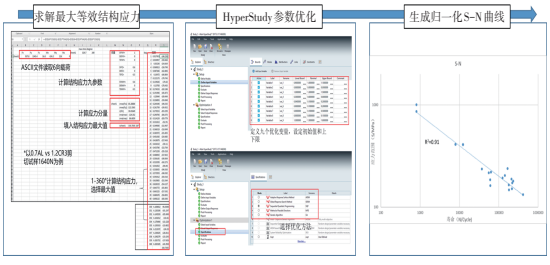


图9　归一化拟合曲线过程

将6个剪切试样和2个十字拉伸共8个试样组合重新划分为6个拟合组和2个验证对照组,如表4所示。

将6个拟合组试样进行归一化拟合,过程如图9所示,通过nCode软件生成ASCII文件读取SPR CBAR 1D单元6向载荷,通过Excel计算得出最大等效结构应力,生成对数寿命*N*-应力范围*S*关系,确定相关性(R^2)。将Excel引入Hyperstudy,设置Rupp本构9个参数为设计变量,设置相关性为响应,响应目标大于0.9,选择序列二次规划(Sequence Quadratic Program,SQP)优化方法进行参数寻优,完整的寻优过程只需5 min,优化效率高。

生成的归一化*S*-*N*曲线进行样件级可行性验证,通过验证对照组和拟合组共同验证,即将*S*-*N*曲线逆向对样件进行耐久仿真预测,对标结果如图10所示,绝大多数逆向仿真结果位于1/3~3倍的疲劳预测精度可接受区间内,且仿真结果相对试验结果恶劣,且偏差一致,有利于工程应用,可用于后续指导SPR接头的疲劳预测分析。

表 4 归一化 *S-N* 曲线试验样件分组

试验组	组合	牌号	厚度/mm	样件样式
曲线拟合组	1	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.7/1.2	十字拉伸
	2	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.7/1.2	剪切
	3	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.8/1.2	十字拉伸
	4	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.8/1.2	剪切
	5	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.7/1.0	剪切
	6	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW2M-ST-S-CR3	0.8/1.0	剪切
验证对照组	7	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW3032M-ST-S-340LA	0.7/1.2	剪切
	8	GMW15192M-AL-S-6000-S-90/GMW3032M-ST-S-340LA	0.8/1.2	剪切

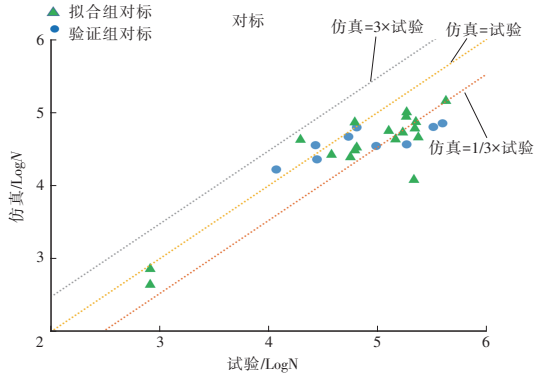
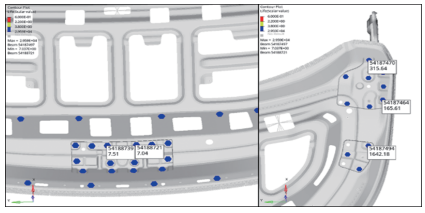
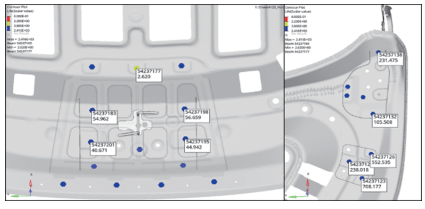


图 10 样件级 SPR 接头耐久性预测对标结果

将生成的归一化 *S-N* 曲线进行项目应用对标，泛亚汽车技术中心有限公司对于乘用车前盖耐久试验认证规定需要满足 2.2 倍完整试验循环次数。选择上汽通用汽车有限公司 2 个已量产的 GL8 前盖项目，这 2 个前盖项目在耐久试验认证中无 SPR 接头耐久失效的设计问题，当前对标结果如图 11 所示，仿真结果均满足大于 2.2 倍耐久要求，与试验对标良好。



(a)GL8-项目 A 前盖 SPR 接头耐久仿真结果



(b)GL8-项目 B 前盖 SPR 接头耐久仿真结果

图 11 项目级 SPR 接头耐久性预测对标结果

5 结论

a. 通过样件级物理疲劳试验，获得了多种厚度、材料组合下的薄铝板 SPR 接头分别在十字拉伸和剪切载荷下的载荷 *F*-寿命 *N* 关系。

b. 分析与总结了载荷类型、母材材料牌号、母材厚度因素对薄铝板 SPR 接头疲劳耐久性能和失效模式影响的一般规律。

c. 基于商业 nCode 软件中的 Rupp 方法，对薄铝板 SPR 接头样件进行 CAE 建模和仿真分析，将样件级疲劳试验得到的 *F-N* 关系转换得到 *S-N* 关系图，由于十字拉伸和剪切试样 *S-N* 关系，存在较大偏差，导致拟合成 2 条 *S-N* 曲线，无法直接进行工程预测应用。因此，采用 Excel&HyperStudy 对 Rupp 本构 9 个参数进行优化，对十字拉伸和剪切下的 2 条 *S-N* 曲线归一化拟合成一条 *S-N* 曲线，并进行了样件级和项目级对标，取得了较好的疲劳仿真预测精度，可用于薄铝板 SPR 接头的疲劳寿命预测分析。

参考文献：

[1] 人民日报海外版. 中国汽车销量连续十二年全球第一[EB/OL].(2021-01-15)[2025-06-20].https://paper.people.com.cn/rmrbhwb/html/2021-01/15/content_2029221.htm?f_link_type=f_linkinlinenote&flow_extra=eyJpb-mxpbmVfZGlzcGxheV9wb3NpdGlvbiI6MCwiZG9jX3Bvc210aW9uIjowLCJkb2NfaWQiOiI1ZDJlNWQ5YT-BhMGM4MGQzLWViZTc0YzJjYjYzODkxNjkifQ%3D%3D.

[2] 新华社. 2024 年我国新能源汽车产销量均超 1 200 万辆[EB/OL]. (2025-01-13)[2025-06-20]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202501/content_6998270.htm.

[3] 羊军, 许倩. 铝合金自冲铆接工艺及力学性能研究[J]. 汽车工艺与材料, 2020(4):45-52.

[4] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化薄壁结构点连接技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(6):125-146.

[5] 冯永旺, 孙广丰, 张剑. 汽车车身连接工艺现状及发展趋势分析[J]. 汽车工业研究, 2020(1):28-30.

[6] YAN W, XIE Z, CHENG Y, et al. Experimental Investigation and Design Method for The Shear Strength of Self-piercing Rivet Connections in Thin-walled Steel Structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 231-240.

[7] 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 Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3914-3922.

[8] LI D Z, HAN L, SHERGOLD M, et al. Influence of Rivet Tip Geometry on the Joint Quality and Mechanical Strengths of Self- Piercing Riveted Aluminum Joints[J]. Materials Science Forum, 2013, 765:746-750.

[9] HAQUE, REZWANUL. Quality of Self-Piercing Riveting (Spr) Joints from Cross-Sectional Perspective: A Review[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18 (1):83-93.

[10] 丁文有, 何晓聪, 刘洋, 等. 粘接剂对三明治结构自冲铆接头力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 248-253.

[11] 金鑫, 李永兵, 楼铭, 等. 基于正交试验的铝合金——高强钢异种金属自冲铆接工艺优化[J]. 汽车工程学报, 2011, 01(4):185-191.

[12] 吴小丹, 王敏, 孔谅,等. SPR 自冲铆接技术研究现状及应用前景[J]. 电焊机, 2016, 46(4):31-36.

[131] 张杰, 何晓聪, 冯煜阳, 等. 铝合金板材不同连接工艺接头强度对比研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41 (4):19-23.

[14] HAN L, THORNTON M, SHERGOLD M. A Comparison of The Mechanical Behaviour of Self-piercing Riveted and Resistance Spot Welded Aluminum Sheets for The Automotive Industry[J]. Materials & Design, 2010, 31 (3):1457-1467.

[15] 叶雨寒, 袁艺宁, 刘庆涛, 等. 汽车车身铝合金连接构件的拉伸试验分析[J]. 锻压技术, 2020, 45(4):189-194.

[16] SØNSTABØ J K, MORIN D, LANGSETH M. Macroscopic Modelling of Flow -Drill Screw Connections in Thin-walled Aluminum Structures[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 105:185-206.

[17] ANSSEN A G, OLOVSSON L, PORCARO R, et al. A Large Scale Finite Element Point-connector Model for Self-piercing Rivet Connections[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2010, 29(4):484-495.

[18] HALLQUIST J O, DYNA L S. Keyword User's Manual (971R6. 0.0)[J]. Livermore Software Technology Corporation, 2012:10-33.

[19] IER M, SOMMER S. Advanced Investigations on A Simplified Modeling Method of Self-piercing Riveted Joints for Crash Simulation[C]// 11 th LS-DYNA Anwenderforum, 2012.

[20] 熊维清, 周平, 石军锋. DP590/AA6111 钢铝 FDS 与 SPR 接头强度试验及仿真[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(6):87-94.

[21] 寇宏滨, 王得天. 铝合金点焊接头疲劳性能研究及寿命分析[J]. 汽车工艺与材料, 2021(2):1-6.

[22] RUPP A, STORZEL K, GRUBISIC V. Computer Aided Dimensioning of Spot-welded Automotive Structures[C]// SAE Technical Paper 950711, 1995.

AT&M