钢铝混合自冲铆接头高效数值仿真及应用研究

李婷 朱瑞蝶 何志高 邵家杰 张梦琪

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518000）

摘要：为实现钢铝混合自冲铆接头力学响应与碰撞失效的精准高效预测，支撑钢铝混合车身轻量化与耐撞性设计，采用自适应网格技术建立高强钢与铸铝自冲铆成形仿真模型，分析工艺参数对接头成形质量的影响规律；通过残余应力应变场映射构建含工艺历史的精细化实体模型，结合力学试验揭示接头失效机理；开发并标定自冲铆接(SPR)高效数值仿真模型，应用于整车小偏置碰撞工况分析。结果表明，成形仿真截面特征尺寸误差不超过10%，考虑工艺历史的模型峰值载荷预测误差低于6%，SPR高效模型峰值载荷误差低于2%，整车仿真可准确复现接头失效与结构变形行为。

关键词：自冲铆连接 力学响应 数值仿真 钢铝混合材料 失效预测

中图分类号：U463.833 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260248

Research on High Efficiency Numerical Simulation and Application of Steel-Aluminum Hybrid SPR Joint

Li Ting, Zhu Ruidie, He Zhigao, Shao Jiajie, Zhang Mengqi

（BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518000）

Abstract: To achieve accurate and efficient prediction of mechanical response and crash failure of steel-aluminum hybrid self-piercing riveted joints, and support the lightweight and crashworthiness design of steel-aluminum hybrid vehicle bodies, adaptive mesh technology is adopted to establish an SPR forming simulation model for high-strength steel and cast aluminum, and the influence law of process parameters on joint forming quality is analyzed. A refined solid model incorporating process history is constructed through residual stress-strain field mapping, and the joint failure mechanism is revealed combined with mechanical tests. An efficient numerical simulation model for self-piercing riveting (SPR) is developed and calibrated, and applied to the analysis of vehicle small-overlap crash conditions. The results show that the error of characteristic cross-sectional dimensions from forming simulation is no more than 10%; the peak load prediction error of the model considering process history is less than 6%, and that of the efficient SPR model is below 2%. Vehicle-level simulation can accurately reproduce joint failure and structural deformation behaviors.

Key words: Self-piercing riveting, Mechanical response, Numerical simulation, Steel-aluminum hybrid material, Failure prediction

1 前言

新能源汽车的发展对能效及结构轻量化提出了更高要求[1]。为延长续航里程并优化车辆动力学性能，车身轻量化已成为提升新能源汽车核心竞争力的关键途径[2-3]。鉴于单一材料难以兼顾轻量化与碰撞安全性，多材料混合车身设计在工程实践中被广泛采用。其中，高强度钢（High Strength Steel，HSS）与超高强度钢（Ultra-High Strength Steel，UHSS）具备极高的抗拉强度，常用于保障乘员舱的结构完整性[4-5]；铝合金密度低且比吸能高，逐渐被用于碰撞吸能区与承载部件[6-7]。

作者简介：李婷（1996—），女，工程师，博士学位，研究方向为汽车新材料及连接工艺失效表征与工程应用。

参考文献引用格式：

李婷，朱瑞蝶，何志高，等. 钢铝混合自冲铆接头高效数值仿真及应用研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(10): 54-64.

LI T, ZHU R D, HE Z G, et al. Research on High Efficiency Numerical Simulation and Application of Steel-Aluminum Hybrid SPR Joint[J]. Automobile Technology & Material, 2026(10): 54-64.

然而,由于钢与铝的熔点存在显著差异,在高温下界面易生成脆性的 Fe-Al 金属间化合物,导致传统的电阻点焊(Resistance Spot Welding,RSW)工艺难以保障接头质量[8]。相比之下,自冲铆接(Self-Piercing Riveting,SPR)技术依靠材料塑性变形形成机械互锁,从根本上规避了异种金属的冶金相容性问题;此外,该技术对表面涂层及结构胶具有良好的适应性,因此在钢铝混合车身制造中获得了广泛应用[9-10],尤其在双相钢(Dual-Phase Steel,DP 钢)与压铸铝的异种材料连接中,SPR 技术展现出显著优势[11-13]。因此,开展高强钢和铸铝材料 SPR 接头力学响应、高效数值仿真方法及其工程应用研究,对推动钢铝混合车身设计和汽车轻量化具有重要的工程价值。

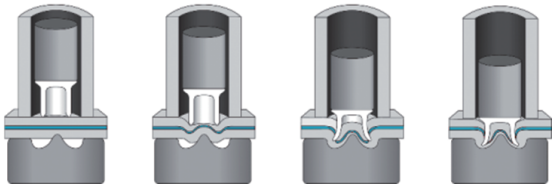
近年来,国内外学者围绕SPR技术开展了大量研究,主要集中在工艺参数优化[14-16]、接头力学性能评价[17-19]及数值模拟方法[20-22]3 个方面。针对铸造铝合金 AlSi10MnMg,Wang 等研究了热处理状态对铆接性能的影响,发现通过热处理可以显著提高材料的局部延性,从而抑制底部裂纹的产生[14]。在数值模拟领域,由于SPR成形过程涉及材料的大变形、断裂及接触非线性,传统的拉格朗日(Lagrangian)有限元方法因网格严重畸变而受到限制,为此,Porcaro 等人、基于 LS-DYNA 验证了采用二维轴对称模型和 r-自适应网格技术模拟SPR成形过程的有效性[20]。随着计算能力的提升,当前研究热点已逐渐转向“工艺-性能”全流程仿真,即通过成形仿真获取接头残余应力应变场,并将其映射至含工艺历史的精细化实体模型,进而开展接头力学行为与失效机理分析。

尽管现有研究已取得显著进展,但钢铝混合车身设计仍面临 SPR 连接失效带来的碰撞安全风险。铸铝部件的引入虽然实现了减轻质量和零件集成,但其固有的低延展性和脆性断裂特征使 SPR 接头成为车身传力路径上的薄弱点。特别是在小偏置碰撞等极端工况下,局部载荷大,SPR 接头的失效可能导致关键传力路径中断,引发乘员舱的严重侵入。因此,在车辆正向设计阶段精确预测 SP 接头的力学响应和失效行为,对于保障混合材料车身的碰撞安全性至关重要。

2　SPR成形工艺及数值表征

2.1　试制与成形质量评价

SPR是一种通过液压或伺服机构驱动,将半空心铆钉直接压入待接板材的机械连接技术。图1展示了SPR的工艺流程,主要包括预紧、刺入、扩张与回程4个阶段[23]。首先,铆模支撑底层板材,压边圈下行预紧顶层板材。随后,冲头驱动铆钉刺透上层板材并侵入下层板材;在铆模型腔的导向作用下,铆钉腿部发生塑性扩张,迫使下板材料发生塑性流动并充盈模具,进而与下层板材形成牢固的机械互锁。最后,冲头复位脱模,完成铆接。



(a)冲头前进　(b)铆钉刺穿　(c)钉腿张开　(d)铆接完成

图1　SPR成形工艺过程[23]

自冲铆成形质量决定接头的连接强度,掌握工艺控制参数和质量评价方法是确保连接可靠性的基础。通过将成形后的SPR接头沿中心面剖开,如图2所示,获取横截面的特征尺寸来评价成形工艺质量。在图2中,机械互锁值、剩余厚度、铆钉头部高度等是关注度较高的连接性能和外观性能指标。机械互锁值也称为底切量,为铆钉腿部尖端外缘与上层板下边缘的水平距离,代表铆钉与下板的自锁程度,与连接强度强相关。剩余厚度表示上板下边缘或铆钉腿部下边缘到下板底部的最小距离,当剩余厚度过大时易出现连接强度不足,过小会导致接头底部开裂失效,影响接头质量。具体截面尺寸特征的范围标准如表1所示。

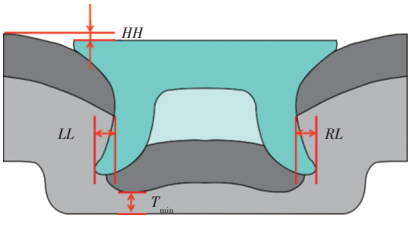
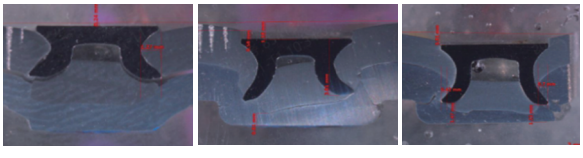


图2　SPR接头工艺指标

表1 SPR接头截面特征标准

评定项	标准要求
显微头高 HH	−0.3 mm≤HH≤0.2 mm
互锁值 LL/RL	LL+RL≥0.8 mm，LL、RL≥0.2 mm
剩余厚度 T_{min}	T_{min}≥0.2 mm

不同工艺参数会导致SPR截面特征产生显著差异，成形质量难以统一控制，因此必须明晰影响成形特征的因素及其作用机制。其中一个关键因素是铆钉硬度。当铆钉硬度等级过低（H1）时，铆钉在穿透钢板过程中腿部易发生明显的塑性镦粗和压缩变形，导致穿透力不足、张开不充分，因而互锁值极小甚至未形成有效互锁（图3a、图3b）；硬度过高（H4）则使铆钉表现近似刚体，虽穿透力较强，但在随后的扩张阶段缺乏必要的适应性变形，易引起铝板底部应力集中、撕裂，甚至导致铆钉腿部发生脆性断裂（图3c）。此外，铆模几何尺寸决定了成形过程中的材料流动行为：增大铆模深度可容纳更多铝料流入，提升底部厚度并有效降低切向拉应力，降低裂纹风险；但深度过大易导致材料难以填满型腔，铆钉腿部与模壁产生间隙，互锁值反而下降。铆模直径变化亦具有类似影响：直径较小时径向约束较强，材料向中心聚集，有利于抑制间隙和裂纹，但会限制铆钉的横向扩张；直径过大则易使材料向外围流动，底部拉应力增大进而诱发裂纹。综上所述，合理匹配铆钉硬度并优化铆模几何尺寸，是实现高质量铆接、最大化互锁值并防止裂纹产生的关键。



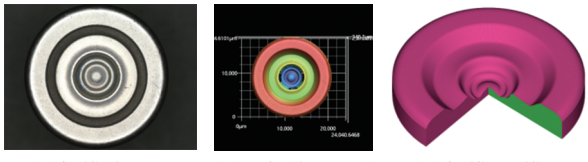
（a）铆钉镦粗 （b）未形成自锁 （c）底板开裂

图3 SPR成形缺陷

2.2 成形过程仿真模拟

为避免铆钉镦粗、地板开裂、机械互锁值过小等成形缺陷，减少工艺参数物理试错，开展SPR成形过程的仿真模拟至关重要。通过成形过程仿真模拟，可以揭示铆钉穿透与模具冲压下材料的复杂流动规律及应力应变演化机制，高效优化铆钉与凹模的几何尺寸组合，准确预测成形后机械互锁值、残余应力以及底部厚度等关键质量指标，大幅降低连接工艺的研发时间与试验成本。此外，成形仿真能够为提取高精度的接头力学特性与失效参数提供底层依据，从而直接提升整车宏观碰撞安全模型中连接失效预测的可靠性。

一体压铸铝AlSi10MnMg材料具有轻量化、工序少等优势，被应用于多款高端车型减振塔，涉及与纵梁等关键传力部位的钢铝连接。因此，本文研究的SPR接头母材分别为厚度3 mm的铸造铝合金AlSi10MnMg和厚度1.2 mm的高强钢HC340/590DP。在SPR生产线上，因铸铝件延展性较差，在用平底铆模进行连接时易产生裂纹，因此采用了如图4所示的异型铆模，通过多级台阶的设计来降低铸铝板材填充下铆模时的拉伸应力，有效避免铆接下板开裂，提高SPR连接质量和力学性能。通过对异性铆模的直径、内部曲率及深度等特征的提取，为后续成形过程的仿真奠定基础。为在铆接时提供足够的连接强度，半空心铆钉采用φ5.5 mm型号，其几何尺寸如图5所示。



（a）铆模俯视图 （b）几何特征测绘 （c）铆模3D模型

图4 铆模几何特征

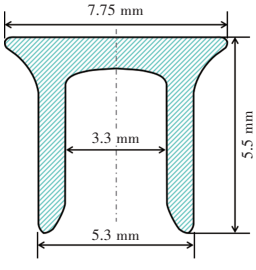


图5 铆钉几何尺寸

为提高计算效率，采用LS-DYNA中2D轴对称模型对SPR成形过程进行数值模拟。有限元模型包括冲头、压边圈、铆钉、上板双相钢HC340/590DP、下板铸铝AlSi10MnMg和铆模6个部分，如图6所示。由于成形过程包含铆钉刺穿上板，涉及到上板大变形和失效，常规的拉格朗日网格易产生畸变导致计算不稳定。因此，本文采用r-自适应网

格技术动态优化,对计算迭代过程中上下板变形状态的几何构型重划分网格,如图7所示,网格的特征尺寸维持在0.1 mm来消除畸变现象,保障网格质量和提高计算稳定性。采用*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE关键字控制各部件的接触,防止仿真过程各部件间的干涉穿透。按照产线工艺参数设置压边圈的压力值并释放z向平动自由度,铆模6个自由度全约束。考虑到冲头、压边圈和铆模强度高、变形量小,将其视作刚体并赋予MAT20材料特性。铆钉和上、下板均采用MAT24材料本构,上、下板通过广义增量应力状态相关损伤模型(Generalized Incremental Stress-State Model, GISSMO)控制失效和网格删除,而铆钉不涉及失效而未启用失效准则。

图8给出了自冲铆成形工艺仿真过程,涵盖刺入、张开互锁等阶段,d为下压的位移。在成形过程中,铆钉腿部尖端位置应力集中,上板与铆钉接触处及下板底部产生初始变形;随着冲头下行,下板底部接触铆模凸台,下板开始挤压变形并向凸台周边塑性流动。冲头进一步下压导致铆钉刺穿上板,此时模型内部中心区被下板材料填充,引导铆钉变形扩张,填充铆模边缘区域并与上板形成有效互锁。

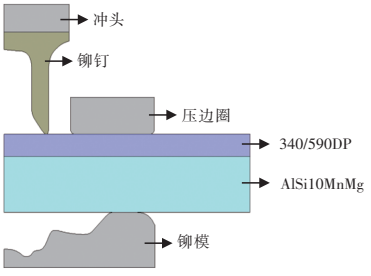


图6　SPR成形工艺仿真模型

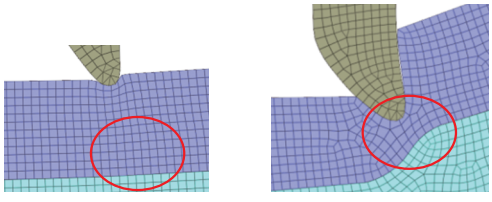
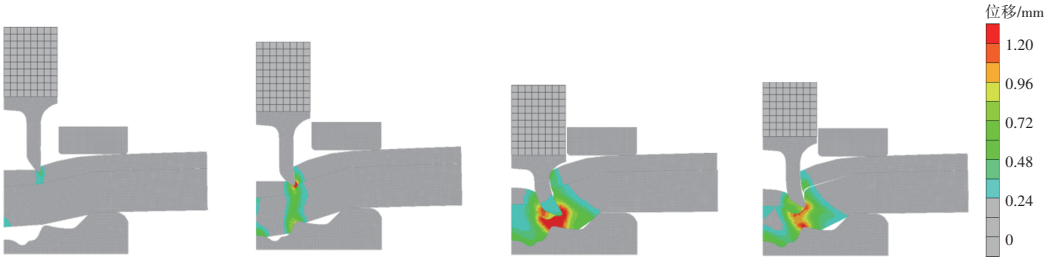


图7　网格自适应调节示意



(a)d=1.4 mm　(b)d=2.8 mm　(c)d=4.2 mm　(d)d=5.5 mm

图8　SPR成形工艺仿真应变变化过程

对比成形仿真和试验接头横截面形状和关键特征尺寸,如图9所示,数值仿真得到的互锁值、剩余厚度和头高值与试验测得的结果吻合较好,在表2中,数值仿真的截面特征尺寸误差不超过10%,证实有限元模型及仿真设置的可靠性,可以较为准确的预测钢铝混合自冲铆成形工艺过程,并为后续SPR接头的失效过程仿真提供可靠的基础。

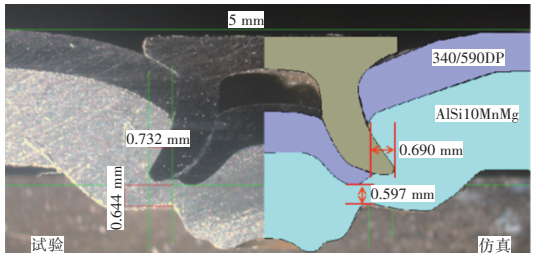


图9　SPR接头试验与仿真成形截面特征对比

表2　成形截面特征尺寸及仿真误差

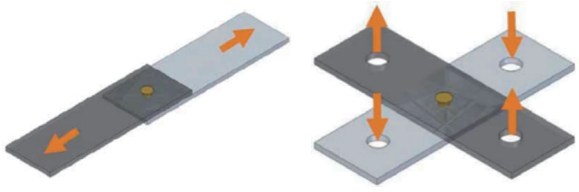
几何特征参数	试验结果/mm	仿真结果/mm	误差/%
互锁值	0.732	0.690	5.7
剩余厚度	0.644	0.597	7.3
头高	0.235	0.215	8.5

3　SPR失效表征与机理研究

3.1　样件制备与力学性能测试

为全面评估SPR接头的静态力学性能,并为仿真模型提供标定数据,依据国际标准开展了系列力学测试。依据ISO 14272:2016《Resistance welding-Destructive testing of welds-Specimen dimensions and procedure for cross tension testing of resistance spot and embossed projection welds》开展十字

拉伸测试(Cross-Tension Test,CTT),如图10a所示,获取接头的抗拉脱(Pull-out)能力及铆钉头部的抗拉穿性能。2块50 mm×150 mm的板材呈十字交叉状铆接,并在四端钻孔以便夹具施加法向拉力。根据ISO 14273:2016《Resistance welding-Destructive testing of welds-Specimen dimensions and procedure for tensile shear testing resistance spot and embossed projection welds》开展单搭接剪切测试(Lap-Shear Test),如图10b所示,评估接头在剪切载荷下的抗剪承载力及失效模式。试样由2块板材搭接而成,搭接区中心铆接一颗铆钉。试样宽度45 mm,搭接长度45 mm,标距105 mm。采用Zwick力学试验机对钢铝混合自冲铆接头进行十字拉伸和剪切拉伸测试,如图11所示,拉伸速度为5 mm/min,进行3次重复性试验,测试结果如图12所示。



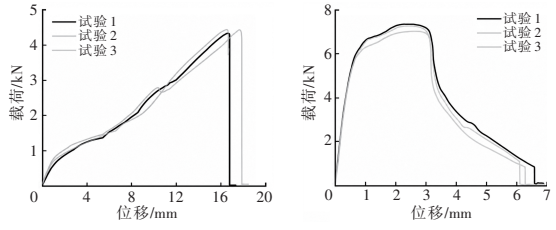
(a)十字拉伸样件 (b)剪切样件

图10 SPR力学试验样件



(a)十字拉伸工况 (b)剪切拉伸工况

图11 SPR接头不同载荷工况下拉伸试验



(a)十字拉伸 (b)剪切拉伸

图12 SPR接头试验载荷位移曲线

3.2 失效过程有限元仿真

在成形过程中,铆钉周围的板材经历了超过100%的塑性变形,产生了显著的强度硬化,此外,残余压应力场可抑制接头裂纹扩展,若忽略应力场会导致接头强度偏差。为实现对接头力学性能的高精度预测,解析SPR接头失效过程及机理,必须建立包含成形工艺历史的3D精细化实体模型。

模型搭建过程包括以下步骤:首先,通过自冲铆成形工艺仿真获取精确的铆接接头几何构型,并输出2D轴对称模型铆钉及上下板的应力应变场,作为3D精细化有限元模型的基础。接下来,通过绕对称轴旋转将2D轴模型转化成3D实体模型。在几何生成过程中,由于靠近对称轴区域的2D单元在旋转时会产生细长的实体单元导致模型网格质量差,因此将靠近对称轴的部分实体单元进行网格重构。为节约计算资源,对铆钉和内外板的网格尺寸进行调整,如图13所示。在创建好实体网格模型后,将2D轴对称应力应变场映射到3D实体上。最后,需将SPR接头样件的几何模型补充完整。从图13中的应变云图可以看出,2D模型外缘几乎未发生塑性变形,母材力学性能未发生改变,可直接与外部板材连接,完成SPR接头力学模型的创建。

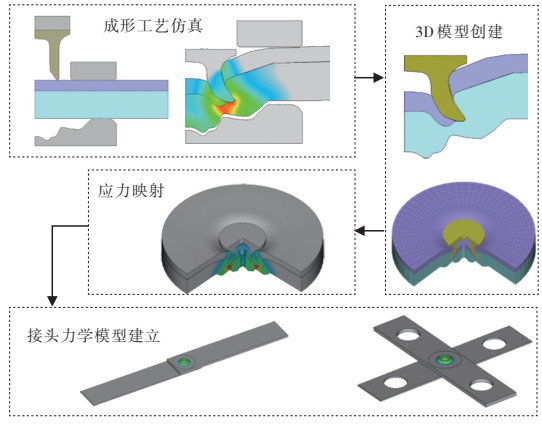


图13 SPR接头实体模型生成过程

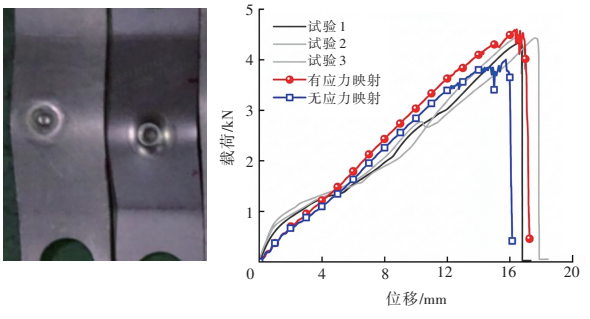
在相同的铆接工艺参数下,忽略人工误差,认为铆钉和内外板的变形、残余应力应变场及铆钉成形构型一致,因此SPR接头单搭接剪切模型和十字拉伸模型内部结构一致,仅样件样式和边界加载设置有区别。采用LS-DYNA对单搭接剪切和十字拉伸接头力学试验进行仿真模拟。设置面-面接触(*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE)防止仿真计算过程中铆钉、上下板三者之间相互穿透。

基于以上SPR接头精细化模型搭建过程,可

以创建不同铆接工艺参数下的接头几何构型,进一步获取不同工艺参数下的接头的力学性能,成功建立“工艺成形-性能表征”的桥梁。

3.3　失效机理分析

图 14 给出了十字拉伸工况下 SPR 接头的试验载荷-位移曲线、失效模式及与仿真结果的对比。图 14b 中实线为 3 条试验曲线,一致性较好,均表现出较高的承载能力。十字拉伸峰值载荷约为 4.5 kN,直至断裂的总吸能可达 37.6 J。载荷-位移曲线先呈明显的线弹性上升段,随后进入塑性硬化阶段,最终因铆钉从下板中拔出而导致载荷突降;整个过程中上板和下板均未出现材料失效,失效模式为铆钉完整拔出。与之对应的数值仿真曲线(红色点线)在弹性段刚度、屈服点及硬化斜率上均与试验基本重合,峰值载荷与试验均值的误差为 5.5%,吸能误差为 4 J(约 9%),且仿真模型亦能准确再现铆钉完整拔出的过程。进一步对比图 14b 中有、无应力应变场映射的 2 组仿真结果(红色点线与蓝色点线)可知:2 组模型均能预测 SPR 接头的变形与失效过程,但在载荷峰值和吸能方面,引入应力应变场映射的模型预测精度更高;未映射模型的峰值载荷和吸能分别偏低 9%、10%。

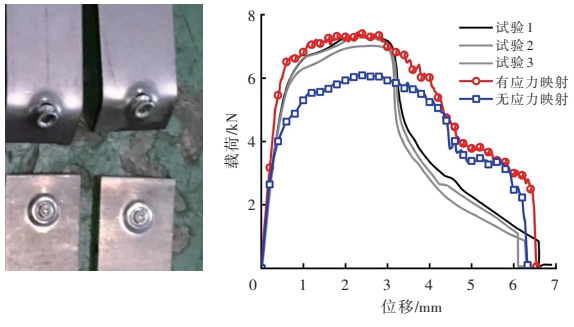


(a)试验失效模式　　(b)载荷-位移曲线

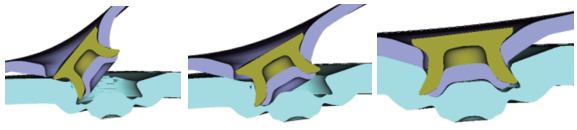
(c)失效过程

图 14　十字拉伸试验与仿真力学特性及失效行为对比

图 15 给出了单搭接剪切工况下 SPR 接头的试验载荷-位移曲线、失效模式及与仿真结果的对比。3 条试验曲线的趋势和失效时刻基本一致,峰值载荷略有波动,峰值剪切载荷均值为 7.2 kN,波动系数为 2.5%,平均总吸能可达 27.3 J。剪切工况下的失效同样表现为铆钉从铸铝板材中完整拔出;上层钢板虽产生塑性变形导致孔径扩张,但未出现撕裂现象;在铆钉拔出过程中,下层铸铝板有少量基体材料随铆钉一并带出。图 15c 所示的仿真铆钉拔出失效过程与试验过程基本一致。



(a)试验失效模式　　(b)载荷-位移曲线



(c)失效过程

图 15　剪切拉伸试验与仿真力学特性及失效行为对比

对比图 15b 中实线(试验)与点线(仿真)可以看出:在弹性阶段,无论是否施加应力应变场映射,2 种仿真模型的载荷-位移曲线均与试验基本重合,说明模型在几何、材料本构及接触参数的设定上能够准确捕捉接头的整体刚度;在峰值载荷预测方面,引入应力应变场映射的仿真预测剪切峰值载荷与试验的误差仅为 2.2 %,而未映射模型的误差高达 16 %,表明应力应变场映射显著提升了接头强度的预测精度;在载荷下降段,试验中铆钉拔出后接触面迅速失效、摩擦力骤降,导致载荷出现突降并形成明显下降段,而数值模型因采用恒定摩擦因数或接触失效后仍保留一定接触刚度,致使仿真曲线在该阶段呈平滑软化趋势,难以再现试验中的快速下降过程。总体而言,1 种工况下的试验均表明 SPR 接头在拉伸和剪切方向上均具有良好的结构完整性与较高的承载能力,所建立的精细化有限元模型能够可靠捕捉 SPR 接头的力学响应与失效过程。

4　高效 SPR 失效仿真技术研究

4.1　高效仿真模型的失效机制

由于钢铝混合车身 SPR 接头尺寸小且数量

多，在整车碰撞安全仿真分析中，用精细化实体单元有限元仿真模型来评估SPR的连接强度和失效风险需要耗费大量的建模和计算成本，难以满足车型快速开发和迭代的应用需求。因此，在掌握接头的变形和失效机理后，建立能够表征SPR接头力学特性和失效行为的高效数值仿真模型至关重要。

在LS-DYNA中，目前发布了多种被用于连接的等效宏观模型，其中最具代表性的有以下4种方式：基于力和应力的点焊材料模型MAT_SPOTWELD（MAT_100及MAT_100_DA）、基于连续损伤力学的内聚力混合模型（MAT_COHESIVE_MIXED_MODE，MAT_240）以及专门针对SPR连接开发的约束型无网格连接模型（CONSTRAINED_SPR2，SPR2）和（CONSTRAINED_SPR3，SPR3）。

MAT_100及MAT_100_DA最初是为传统电阻点焊开发的宏观力学模型，通常将其与8个六面体实体单元组成的单元簇配合使用，并通过绑定接触连接至壳单元，来缓解单点连接带来的应力集中并提供稳定的刚度矩阵。其失效机制通过法向正应力、弯曲应力和剪切应力控制，失效模型可模拟失效后的力值衰减行为。在表征SPR连接时，MAT_100_DA通过分离弯曲项和引入软化函数来描述力值退化，但在涉及大角度拉伸和剥离时仍存在吸能特性预测失真的不足。

MAT_240模型原本被广泛应用于结构胶粘接失效和复合材料分层失效的模拟，因其模拟混合加载模式的优势也被尝试用于SPR的宏观等效仿真。模型遵循牵引-分离法则，将变形和失效过程划分为弹性变形、塑性屈服、损伤起始与损伤演化4个阶段。在混合加载模式下，其失效判定不再依赖于宏观等效应力，而是基于I型（法向张开）和II型（切向滑移）临界断裂能量释放率。为令牵引-分离法则在数值上收敛并准确捕捉裂纹，内聚力单元的尺寸受到限制，影响整车仿真中控制时间步的质量缩放，导致计算效率降低。此外，在滑移剪切大变形下，内聚力单元极易发生剧烈的沙漏现象和负体积报错，影响计算稳定性。

SPR2模型是基于大量铝合金SPR连接试验，专为显式有限元碰撞计算开发的一种基于约束的无网格点连接模型，其特点在于其动态映射算法与高度工程化的宏观力学失效模型。模型通过定义影响域半径（通常取铆钉头半径）和板材中心的参考节点，基于法向正交投影自动识别并绑定上下2层板材中落入影响域内的壳单元节点。在求解过程中，力与力矩的传递通过追踪上下板材参考节点之间的相对平动位移、相对转动位移来实现。模型支持解耦定义法向与切向的归一化力-位移关系，法向和切向力学行为能够被独立控制和标定。当归一化函数达到临界条件时，模型通过一条平滑的指数或线性损伤演化曲线，稳定模拟SPR在失效后承载力逐渐下降直至完全脱离的物理过程。

为进一步提升在复杂加载条件下的模拟精度，SPR3在SPR2的架构基础上进行了扩展，保留了无网格影响域约束特性和正交投影算法，引入更复杂的塑性流动函数与损伤演化机制，能够表征铆接点在受力过程中的非对称撕裂程度。此外，SPR3模型支持定义不同加载角度和不同应变率下，材料从损伤起始等效位移到完全失效等效位移的确切演化路径，复现不同受力状态下的物理试验结果。SPR3模型虽具备最高的理论精度上限，但其参数多，需开展不同速度、不同角度下的拉伸及剥离物理测试，增加了测试及人力标定成本。

综上所述，在当前有限元显式动力学计算硬件的算力及现代汽车工业极度压缩的开发周期双重制约下，SPR2模型是目前应对SPR失效模拟工程实用性较强的优选方案，接下来重点阐述其本构机理和失效演化机制。

SPR2宏观等效模型提取铆接点在上、下被连接板件之间的相对运动，计算出等效的内力与内弯矩，并据此在宏观层面上判定铆接接头的损伤演化与失效断裂。定义最大开口平面$\boldsymbol{n}_o$，如图16所示。

$$\boldsymbol{n}_o = \boldsymbol{n}_l \times \boldsymbol{n}_u \tag{1}$$

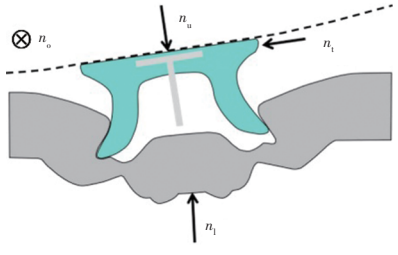


图16 最大开口平面示意

式中:$\boldsymbol{n}_l$、$\boldsymbol{n}_u$分别为上、下板的单位法向量。

3铆钉的切向单位法向量表示为:

$$\boldsymbol{n}_t = \boldsymbol{n}_o \times \boldsymbol{n}_u \tag{2}$$

在定义接头法向后,需确定接头的局部变形$\boldsymbol{\delta}$,如图所示,由法向拉伸位移矢量$\boldsymbol{\delta}_n$和切向拉伸位移矢量$\boldsymbol{\delta}_t$定义:

$$\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\delta}_n + \boldsymbol{\delta}_t \tag{3}$$

基于实时更新的局部坐标系,SPR2模型将上、下层板在三维空间中的总相对相对位移矢量$\boldsymbol{\delta}$精确地分解为相互正交的运动分量,如图17所示,其中法向相对位移为:

$$\boldsymbol{\delta}_n = \boldsymbol{\delta} \cdot \boldsymbol{n}_n \tag{4}$$

切向相对位移为:

$$\boldsymbol{\delta}_t = \boldsymbol{\delta} \cdot \boldsymbol{n}_t \tag{5}$$

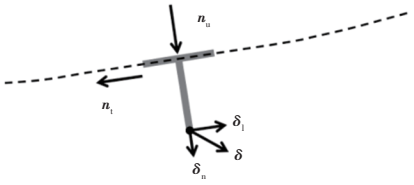


图17　SPR接头变形局部分解

通过严谨的内积投影操作,复杂的全局三维几何变形被降维解耦为独立的标量运动学变量。在完成运动学分解后,需确定法向力f_n和切向力f_t。对于SPR接头上板的力矩M_u和下板的力矩M_l,始终满足以下公式:

$$M_u + M_l = \frac{(h_1 + h_2) f_t}{2} \tag{6}$$

平面内法向和纯剪切下的局部力位移关系通过以下非线性损伤模型定义:

$$\begin{cases} f_n = \dfrac{f_n^{\max}\delta_n}{\eta_{\max}\delta_n^{\text{fail}}} f_n(\eta_{\max}) \\ f_t = \dfrac{f_t^{\max}\delta_t}{\eta_{\max}\delta_t^{\text{fail}}} f_t(\eta_{\max}) \end{cases} \tag{7}$$

式中:$f_t^{\max}$、$f_t^{\max}$分别为拉伸和纯剪切对应的极限载荷,δ_n^{faill}、δ_t^{fail}分别为失效时法向和纯剪切下的相应局部变形。$\eta_{\max}$是从0到1的损伤度量值,在纯拉伸和纯剪切工况下,

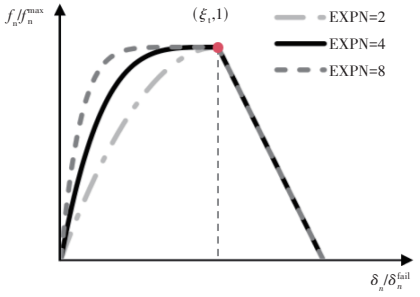
$$\begin{cases} \eta_{\max} = \delta_n^{\max}/\delta_n^{\text{fail}} \\ \eta_{\max} = \delta_t^{\max}/\delta_t^{\text{fail}} \end{cases} \tag{8}$$

$f_n(\eta_{\max})$无量纲函数可分别表示为:

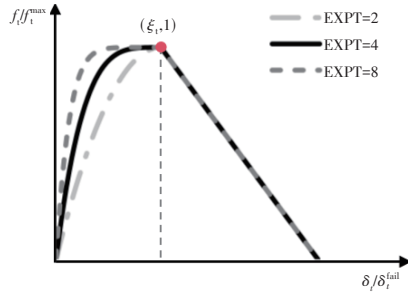
$$f_n(\eta_{\max}) = \begin{cases} 1 - \left(\dfrac{\xi_n - \eta_{\max}}{\xi_n}\right)^{\text{EXPN}} & \eta_{\max} \leqslant \xi_n \\ 1 - \dfrac{\eta_{\max} - \xi_n}{1 - \xi_n} & \eta_{\max} > \xi_n \end{cases} \tag{9}$$

$$f_t(\eta_{\max}) = \begin{cases} 1 - \left(\dfrac{\xi_t - \eta_{\max}}{\xi_t}\right)^{\text{EXPT}} & \eta_{\max} \leqslant \xi_t \\ 1 - \dfrac{\eta_{\max} - \xi_t}{1 - \xi_t} & \eta_{\max} > \xi_t \end{cases} \tag{10}$$

式中:参数ξ_n、ξ_t分别表示拉伸和纯剪切下载荷退化的起始点,如图18所示。



(a)纯拉伸工况



(b)纯剪切工况

图18　SPR2模型中的载荷位移曲线示意图

在实际车身碰撞压溃过程中,SPR接头处于拉、剪及剥离高度耦合的混合加载模式下。为表征混合受力状态,定义一个有效位移函数$\eta(\theta, \eta_{\max}, t)$:

$$\eta(\theta,\eta_{\max},t) = \left[\xi(\theta) + \frac{1-\varepsilon(\theta)}{\alpha(\eta_{\max})}\right]\sqrt{\left[\frac{\delta_n(t)}{\delta_n^{\text{fail}}}\right]^2} + \left[\frac{\delta_t(t)}{\delta_t^{\text{fail}}}\right]^2 \tag{11}$$

式中:θ为混合模式参数或称为加载角,表示为当前法向位移$\boldsymbol{\delta}_n$与切向位移$\boldsymbol{\delta}_t$比值的反正切值:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\boldsymbol{\delta}_n}{\boldsymbol{\delta}_t}\right) \tag{12}$$

$\xi(\theta)$是一个依据经验的三阶多项式,取值范围从0到1,可以缩放有效位移函数,用于应对不同加载方向的变形能力差异:

$$\xi(\theta)=1-\frac{27}{4}\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^2+\frac{27}{4}\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^3 \tag{13}$$

另外，定义一个形状系数 $\alpha(\eta_{max})$ 来表征不同加载方向的损伤积累和载荷软化：

$$\alpha(\eta_{max})=\begin{cases}\dfrac{\xi_n-\eta_{max}}{\xi_t}\alpha_1+\dfrac{\eta_{max}}{\xi_t}\alpha_2 & \eta_{max}<\xi_t\\ \dfrac{1-\eta_{max}}{1-\xi_t}\alpha_2+\dfrac{\eta_{max}-\xi_t}{1-\xi_t}\alpha_3 & \eta_{max}\geqslant\xi_t\end{cases} \tag{14}$$

其中，系数 α_1、α_2、α_3 是材料参数，调整 α_1、α_2 可修正剥离和斜向加载工况下的载荷，调整 α_3 可修正斜向加载方向上的失效位移。通过上述参数，可以控制 SPR 接头不同加载角度和不同变形阶段的力-位移曲线的形状差异。

4.2 开发技术路线与结果对比

在 LS_DYNA 软件中，定义 SPR2 约束模型有 4 个卡片信息，卡 1 和卡 2 是必选项，包含连接参数定义、强度定义及失效参数定义；卡 3 是修正指数项，默认值为 8；卡 4 为设置多层 SPR 的选项。在卡 1 和卡 2 中，MID 和 SID 分别表示 SPR 接头上层和下层母材部件 ID 号；NSID 为铆钉位置节点集 ID 号；THICK 为上下母材总厚度；*D* 为铆钉直径；DENS 为铆钉密度。*FN* 和 *FT* 分别为法向和纯剪切载荷下的铆钉强度；*DN* 和 *DT* 分别为法向和切向方向的失效位移。*XIN* 和 *XIT* 分别表示最大法向力对应的位移与失效位移的比值。因数 ALPHA1、ALPHA2 和 ALPHA3 均为无量纲参数，用于缩放有效位移。EXPN 和 EXPT 为法向和切向载荷函数的指数值。

图 19 展示了 SPR2 约束模型的参数获取及开发标定流程。首先根据试验及仿真模型确定初始输入参数，确定模型中铆接点的位置节点，并选取连接的两个母材部件 ID 号，输入板材总厚度、铆钉直径及铆钉密度。随后，基于试验曲线获取损伤开始和失效参数，包括拉伸和剪切工况下的载荷峰值、失效位移及失效位移比值。将十字拉伸和剪切工况下的仿真载荷-位移曲线和试验曲线对比，进行精度判断，修正迭代法向和切向的载荷函数指数，完成十字拉伸和剪切工况的标定。最后通过对 ALPHA1、ALPHA2 和 ALPHA3 位移缩放参数的调整和修正，达到对标精度要求，完成剥离工况对标。

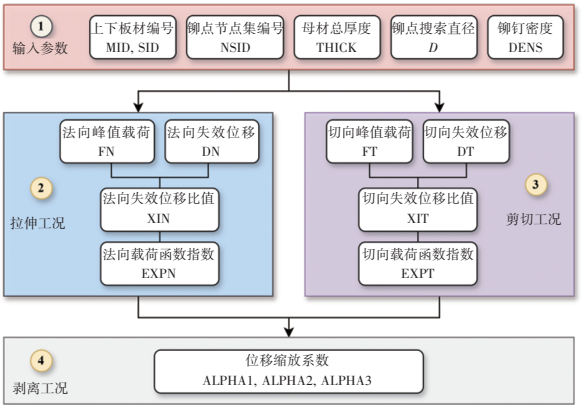
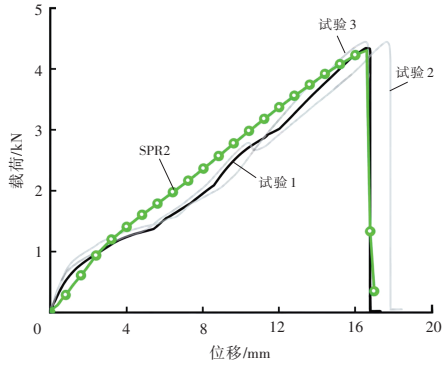


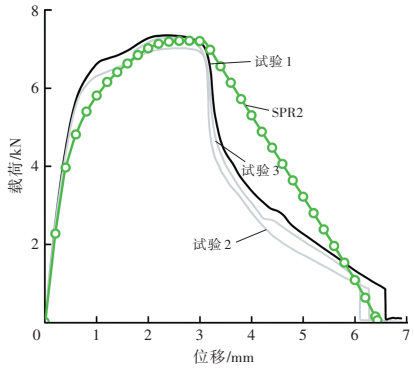
图 19 SPR2 模型参数仿真标定流程

图 20a 和图 20b 分别表示十字拉伸和剪切工况下 SPR 接头试验和 SPR2 高效仿真模型载荷-位移曲线结果对比。在十字拉伸加载工况下，仿真结果和试验曲线一致性程度较高，准确地模拟了载荷峰值及铆钉拔出的载荷骤降，失效位移也无差别，如图 21a 所示。载荷峰值误差、失效位移误差和吸能误差分别仅 2%、1% 和 8%。但试验曲线的斜率变化情况未能准确表达，这是因为在 SPR2 模型中，载荷函数是一个指数函数，即使系数可调节，也无法模拟试验中出现的斜率变化波动。

在图 20b 中，剪切工况下，仿真和试验载荷位移曲线在载荷上升段贴合较好，载荷峰值误差仅 1%，失效位移误差仅 3%。但在软化过程存在差异，这个差异同样源自 SPR2 约束模型的限制，模型失效过程采用线性损伤退化，而试验中铆钉从下板拔出，力值呈现先快速下降后缓慢下降的过程，导致仿真和试验的吸能误差为 6%。总的来说，SPR2 高效仿真模型能够较为准确的模拟 SPR 接头在拉伸和剪切工况的力学特性、吸能能力和失效行为，可在整车级碰撞仿真中等效表征 SPR 接头的力学响应。



(a)十字拉伸工况



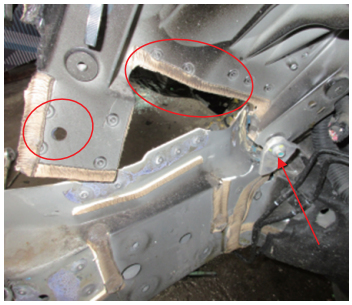
(b)剪切拉伸工况

图20　SPR2模型仿真与试验曲线对比

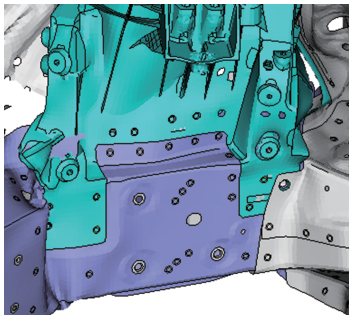
5　整车碰撞仿真应用

在前舱模块中,采用高压铸铝减振塔替代传统高强钢冲压件,并用SPR实现异种材料连接,已在多款量产车型上验证轻量化的有效性。然而,受铝合金材料的低延展性和SPR接头复杂的力学失效行为影响,整车级碰撞仿真结果易出现失真的情况。某车型试制车在25%小偏置碰撞(Small Overlap Boundary, SOB)物理试验中,减振塔严重挤压前围板,而仿真未出现该现象。SOB测试定义为:车辆以64.4 km/h的速度,沿车宽25%的重叠率撞向侧面的刚性圆角壁障。在SOB碰撞中,冲击能量并未通过传统的前纵梁等主要吸能结构,而是直接作用于悬架系统、轮罩、A柱根部、门槛梁等关键部位。对比分析发现,减振塔与纵梁连接区域的SPR接头发生了大规模的失效,如图21a所示。这种局部连接失效直接导致了前机舱载荷传递路径过早断裂,使应由纵梁和吸能盒吸收的动能被迫由前围板结构刚性承担。

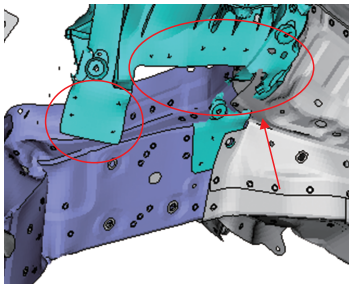
由于此前未开发合适的SPR连接失效仿真建模方法,在仿真模型中采用传统点焊的建模和失效准则表征SPR连接,未能模拟出接头在复杂应力状态下的损伤演化和失效过程,无法复现试验中减振塔区域接头成片失效的物理现象,如图21b所示,导致仿真结论与物理试验产生较大偏差,失去了工程指导意义。针对上述痛点,将前文建立的高效SPR失效数值模型导入该试制车型的整车有限元模型中,能够同时兼顾计算效率与接头在拉、剪、剥离及复合载荷下的力学响应。更新失效模型后的仿真结果在变形模式上与物理试验展现了高度的一致性,成功复现了减振塔关键连接区域的失效和铸铝母材失效现象,如图21c所示。这充分证明了精准的SPR连接失效表征是实现复杂工况下整车碰撞响应预测的前提。



(a)试验现象



(b)SPR2模型应用前



(c)SPR2模型应用后

图21　试验和仿真塔包纵梁连接失效对比

6　结束语

本文面向汽车极致轻量化与被动安全的核心需求,针对钢铝混合车身自冲铆接艺敏感度高、失效预测难的工程痛点,成功构建了涵盖“工艺成形-性能表征-简化建模-整车应用”的全流程高精度仿真技术,为混合材料车身设计提供了坚实的理论支撑,形成了以下重要结论:

首先,探明了SPR工艺参数对接头互锁质量的影响规律。借助r-adaptive自适应网格精细化有限元模型,完整重现了铆接成形全过程,进一步,通过将成形残余应力与应变场精确映射至三维结

构模型，实现了“工艺-性能”的一体化评估。结果表明，考虑工艺历史的模型能以较高精度预测接头峰值载荷及失效模式，为工艺优化奠定了基础。

其次，针对整车级大规模仿真的效率痛点，系统评估了多种宏观等效模型。研究证实，SPR2模型通过约束域映射实现了法向与切向力-位移的独立控制，其峰值载荷与吸能预测误差分别低于2%与8%。该模型兼顾了计算效率与力学表征精度，成为整车碰撞中等效表征SPR失效的最优方案。

最后，将优化的SPR2模型应用于含高压铸铝减振塔的整车25%小偏置碰撞分析。新模型精准捕捉了复合载荷下的接头损伤累积与铆钉拔脱失效，成功复现了母材破裂失效现象。

参考文献：

[1] 王清政, 高生平, 李会, 等. 新能源汽车轻量化设计与材料创新：提高能源利用效率和续航里程的方法研究[J]. 时代汽车, 2024(16): 122-124.

[2] 洪吉超, 梁峰伟, 杨京松, 等. 新能源汽车产业及其技术发展现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 49-59.

[3] 金丽丽, 杜朋钊, 张凯, 等. 新能源汽车制造关键技术的应用现状与发展趋势[J]. 汽车电器, 2025(12): 78-80.

[4] 刘光明. 我国汽车行业用钢分析[J]. 冶金经济与管理, 2025(5): 29-31.

[5] TRZEPIECIński T, NAJM S M. Current Trends in Metallic Materials for Body Panels and Structural Members Used in the Automotive Industry.[J].Materials,2024, 17(3): 56.

[6] 万鑫铭, 徐小飞, 徐中明, 等. 汽车用铝合金吸能盒结构优化设计[J]. 汽车工程学报, 2013, 3(1): 15-21.

[7] 林佳武, 李玄霜, 陈宗明, 等. 真空高压铸造铝合金车身后纵梁轻量化设计[J]. 汽车工程, 2020, 42(3): 383-389+400.

[8] 张林阳. 全铝及钢-铝混合车身轻量化连接技术[J]. 汽车工艺与材料, 2018(7): 1+8,14.

[9] 胡光山, 顾时茂, 贺丽丽, 等. 钢铝混合后地板总成的自冲铆连接性能研究[J]. 汽车工程学报, 2020, 10(3): 213-218.

[10] VADIM S, GERSON M. Self-Locking Self-Pierce Riveting: a New Self-Pierce Riveting Technology for Multi-Material Applications in Lightweight Car Body Structures[J]. Welding in the World, 2017, 61(5): 1049-1056.

[11] 王超, 于万元, 成艾国, 等. 高强度钢-铝合金热辅助自冲铆接的试验与仿真研究[J]. 汽车工程, 2026, 48(2): 478-489+465.

[12] 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, 48(11): 87-94.

[13] 魏文杰, 何晓聪, 张先炼, 等. DP780/AA6061薄板自冲铆接头微动损伤特性[J]. 机械工程学报, 2020, 56(6): 169-175.

[14] CHAO W, ZHAN PENG D, Aiguo C, et al. Influence of Process Parameters and Heat Treatment on self-Piercing Riveting of High-Strength Steel and Die-Casting Aluminium[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 8857-8878.

[15] 史宝良, 姜发同, 乔蒙, 等. 自冲铆接技术及关键工艺参数设计要点[J]. 汽车工艺师, 2023(4): 39-43.

[16] YUN PENG L,Li HAN L, HUAN Z, et al.Effects of the Die Parameters on the Self-Piercing Riveting Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(7/8): 3353-3368.

[17] HAQUE R, DURANDET Y. Strength Prediction of Self-pierce Riveted Joint in Cross-Tension and Lap-Shear[J]. Materials & Design, 2016, 108: 666-678.

[18] 成艾国, 王超, 于万元, 等. 铆钉数量和分布模式对自冲铆接头力学性能和失效模式的影响[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(7): 102-113.

[19] 于万元, 王超, 马书坤, 等. 搭接形式和板材层数对自冲铆接接头力学性能的影响[J]. 锻压技术, 2025, 50(2): 158-166.

[20] PORCARO R, HANSSEN A G, LANGSETH M, et al. Self-Piercing Riveting Process: An Experimental and Numerical Investigation[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2005, 171(1): 10-20.

[21] 闫科颖. 钢铝自冲铆接工艺和失效模型的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.

[22] 胡晓雅, 黄理, 陈秋任, 等. 铸铝自冲铆接接头裂纹扩展行为研究及仿真预测[J]. 锻压技术, 2023, 48(9): 113-118+141.

[23] ATLAS COPCO. Atlas Copco To Acquire Self-Pierce Riveting Business[EB/OL]. (2014)[2026-10-13]. https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/industrial-technique/general/documents/brochures-leaflets/joining-solutions/henrob-self-pierce-riveting-intro-presentation.pdf.

AT&M