基于Simufact Forming的钢-镁自冲铆接铆模选型与连接性能分析

齐丹 杨清竹 张林阳 张华 刘博洋 赵心桥

（高端汽车集成与控制全国重点实验室，长春 130013）

摘要： 基于Simufact Forming软件，对DC01钢板与压铸镁合金AM50A的自冲铆接（SPR）进行了铆模选型与性能分析，结果表明：相比平底模、球模，梯形模表现出更好的抗裂性；经过优化迭代获得的仿真模型较为准确地预测了梯形模连接成形过程以及十字剥离、拉剪工况下的失效模式，且得到的载荷-位移曲线、峰值力载荷、吸收功与试验结果一致性较高。构建的“工艺仿真-性能预测-试验验证”研究路径能有效支撑钢-镁SPR工艺的铆模选型与优化，仿真方法在抗裂性能分析、失效模式以及连接性能预测等方面具有应用价值。

关键词：钢-镁SPR 铆模选型 连接性能 失效模式

中图分类号：U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260133

Riveting Die Selection and Performance Analysis of Steel-Magnesium Self-Piercing Riveting Based on Simufact Forming

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

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

Abstract: Based on Simufact Forming software, the rivet die selection and performance analysis of Self-Piercing Riveting (SPR) joining between DC01 steel sheet and die-cast magnesium alloy AM50A are investigated. The results show that the trapezoidal die exhibits better crack resistance compared with the flat-bottom die and the spherical die. Focusing on the trapezoidal die, the simulation model obtained through iterative optimization accurately predicts the joint forming process and failure modes under cross-peel and tensile-shear loading conditions. Furthermore, the simulated load-displacement curves, peak load and absorbed energy are highly consistent with the experimental results. The "process simulation - performance prediction - experimental validation" research framework established in this study can effectively support the rivet die selection and optimization for steel-to-magnesium SPR process, where the simulation method holds core value in crack resistance analysis, failure mode study and joint performance prediction.

Key words: Steel-magnesium SPR, Riveting die selection, Joining performance, Failure modes

1 前言

以铝合金、镁合金为代表的轻质材料是实现汽车车身轻量化、降低能耗的关键。其中，镁合金因其具有更低的密度和优异的比强度，被视为下一代超轻量化结构的潜在材料[1-2]。当前，自冲铆接（Self-Piercing Riveting，SPR）已广泛应用于钢-铝混合车身，并实现了铝合金与高强钢的可靠连

作者简介：齐丹（1983—），女，学士学位，正高级工程师，研究方向为汽车新材料及先进工艺技术研究。

基金项目：吉林省、长春市重大科技专项（高性能镁合金开发与制备技术研究20250306006ZD）。

参考文献引用格式：

齐丹，杨清竹，张林阳，等. 基于Simufact Forming的钢-镁自冲铆接铆模选型与连接性能分析[J]. 汽车工艺与材料，2026(8): 27-32.

QI D, YANG Q Z, ZHANG L Y, et al. Riveting Die Selection and Performance Analysis of Steel-Magnesium Self-Piercing Riveting Based on Simufact Forming[J]. Automobile Technology & Material, 2026(8): 27-32.

接[3-5]。然而，SPR 技术钢-镁异质连接中的应用尚缺乏系统的工艺研究与数据积累，属于面向未来轻量化需求的前瞻性技术探索。

在 SPR 工艺中，铆模选型是决定连接成败的核心环节之一。底部铆模型腔的几何形状直接约束底层材料的流动路径与最终应力状态[6]。现生产经验与已有研究均表明：不当的底部铆模型腔设计极易在下层材料连接变形区域产生严重的应力集中，并导致裂纹的萌生与扩展。裂纹直接影响接头的力学性能与服役可靠性[7-8]。因此，系统研究不同铆模几何型腔对材料流动行为、应力分布及开裂倾向的影响规律，对于从工艺根源上抑制裂纹、提升连接可靠性具有重要意义。

本研究采用有限元仿真[9-10]与实际试验相结合的方式，首先基于仿真分析在平底模、球模及梯形模 3 种典型铆模中优选出最优方案；进而通过工艺试验进行对比分析，验证仿真结果的有效性与准确性，为下一步钢-镁 SPR 工艺的快速开发提供理论依据与数据支撑。

2 仿真与试验方法

2.1 材料参数配置

本研究涉及的主要工件包括上层板、下层板、铆钉及铆模，具体材料与尺寸信息如表 1 所示。仿真中所用材料属性赋值均优先基于 Simufact Forming 软件自带数据库选择。上层板为 DC01 钢板，下层所用 AM50A 压铸镁合金因软件库中无完全对应材料，综合自测及手册中的材料性能参数自行导入。上述 2 种材料的力学性能信息如表 2 所示。材料失效行为基于 Simufact Forming 软件嵌套的 Cockcroft-Latham 损伤准则判定，即当等效塑性应变大于被连接材料在该应力状态下的极限断裂应变时判定为断裂。

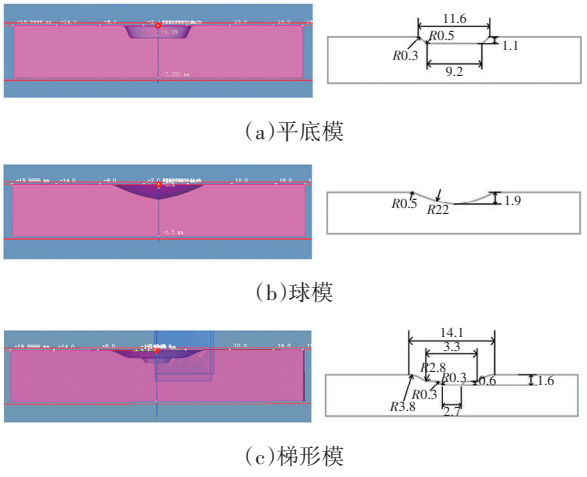
表 1 SPR 铆接主要工件材料与尺寸信息

工件类型	材料规格	尺寸参数
上层板	DC01	100 mm×30 mm×0.7 mm
下层板	AM50A	100 mm×30 mm×3.0 mm
铆钉	22MnB5	铆钉腿长为 5.5 mm，铆钉直径为 5.3 mm，铆钉硬度为(410±30) HV1
底部铆模	Cr12MoV	类型为平底模、球模及梯形模

表 2 材料力学性能信息

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
DC01	225	343	32
AM50A	118	224	9.3

图 1 所示为平底模、球模及梯形模 3 种底部铆模的型腔几何结构示意，各铆模的具体型腔几何参数根据 SPR 工艺设计原则确定。



(a)平底模

(b)球模

(c)梯形模

图 1 3 种铆模的几何型腔结构及中心断面尺寸示意

2.2 模型建立及仿真路径设计

基于 Simufact Forming 软件建立二维轴对称有限元模型。模型包含铆钉、上层板、下层板及 3 种铆模(平底模、球模、梯形模)。上、下板均采用 Advancing Front Quad 四边形网格(局部细化级别为 1)，铆钉采用 Quadtree 四边形网格(最大粗化级为 2)，最小单元尺寸设置为 0.1 mm，并启用自适应网格重划分功能以应对大变形。各接触面均采用复合摩擦准则，其中，库伦摩擦因数为 0.1，剪切摩擦因数为 0.2。

工艺仿真完成后，将成形后的接头几何与应力、应变结果作为初始状态，导入软件的力学性能分析模块。依据 SPR 接头力学性能测试的通用方法，分别建立用于十字剥离试验和拉剪试验的分析模型。在力学仿真中，通过对试样一端施加位移载荷进行准静态加载，直至接头完全失效，获取载荷-位移曲线及失效模式。

2.3 试验设计

物理试验所用材料与仿真设置完全一致。采用 Tucker 伺服电动 SPR 设备进行样品铆接试制。对 3 种铆模形成的接头分别制备金相试样，依次经

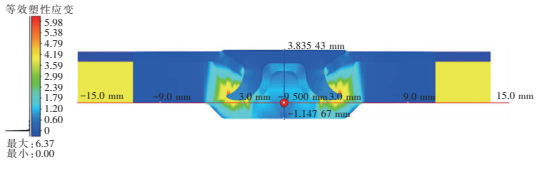
剖切、镶嵌、研磨、抛光后,利用Axio Imager M1m金相显微镜观察截面形貌,测量底切量并检查样品接头区域是否出现裂纹。

基于仿真与试验结果,仅对综合表现最优的铆模所制备的SPR接头进行力学性能测试以及后续的仿真迭代优化,以验证仿真性能预测准确性。力学性能测试在Instron 5969万能试验机上进行。十字剥离试验与拉剪试验均参照相关标准执行,加载速率设为10 mm/min,连续记录载荷-位移曲线,并观察记录失效模式。

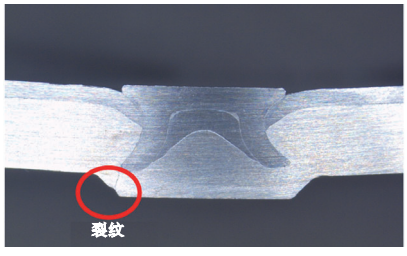
3　结果和讨论

3.1　工艺成形质量与开裂风险分析

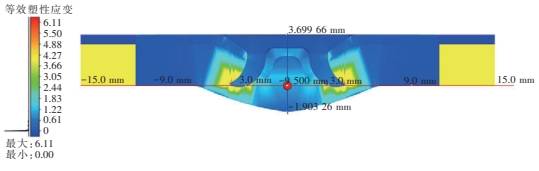
仿真分析再现了3种铆模型腔下的铆接过程。图2所示为3种铆模SPR接头铆接恰好完成后的仿真截面与试验接头金相对比结果。经对比可知:仿真预测的接头整体轮廓与试验结果一致性较高,模型能够合理反映铆钉刺入、板材变形及互锁形成过程。由图2b可知,采用平底模的SPR接头在下板镁合金靠近铆钉左侧钉腿处出现了明显的宏观裂纹,而球模(图2d)及梯形模(图2f)的接头断面中则无明显裂纹。这一现象说明,平底模的几何约束导致钉角前沿区域处的镁合金底部产生了严重的应力集中,从而引发开裂。



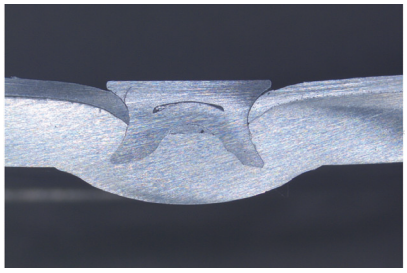
(a)平底模仿真



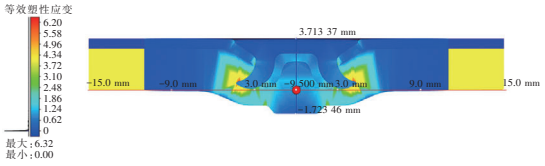
(b)平底模试验



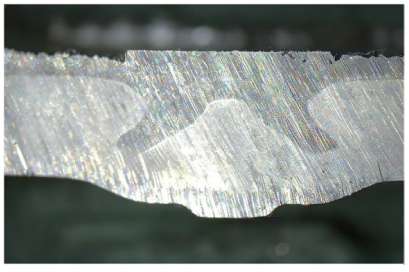
(c)球模仿真



(d)球模试验



(e)梯形模仿真



(f)梯形模试验

图2　SPR接头仿真截面与实际试验金相对比

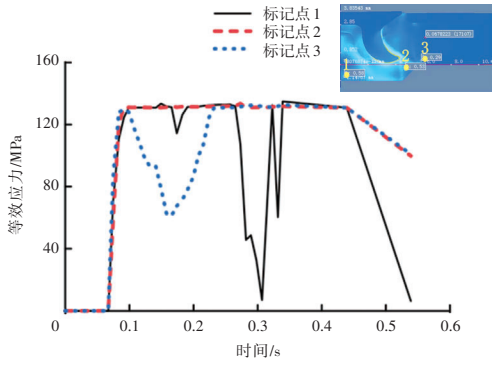
表3所示为3种铆模型腔下SPR接头底切量的仿真值与试验值,由表3可知,3组接头的仿真底切量值与其对应的试验值较为接近,证实了仿真试验过程及结果能够较好地复现试验过程与结果,侧面证实了仿真试验过程的准确性;3种铆模形成的SPR接头底切量从大到小的排序为梯形模、平底模、球模,说明采用梯形模连接获得的接头可能具有最优的力学性能。其中,采用梯形模得到的接头的底切量试验值与仿真值分别为1.68 mm、1.53 mm。

表3　不同铆模型腔下接头底切量的仿真与试验结果　mm

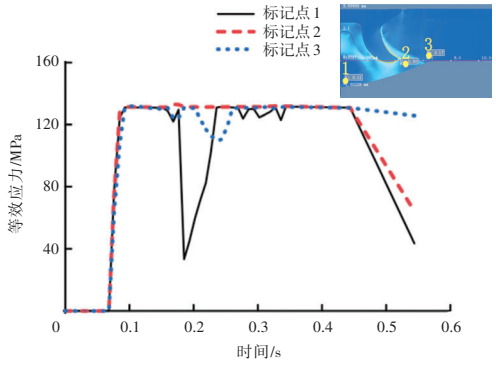
底部铆模类型	仿真底切量	试验底切量
平底模	1.25	1.20
球模	1.07	0.98
梯形模	1.53	1.68

为深入分析开裂机理,提取了仿真过程中铆模中心截面底部中心(位置1)、钉角前沿(位置2)及接头底部最外沿(位置3)区域处特征单元的等效应力时程曲线,如图3所示。平底模的应力曲线

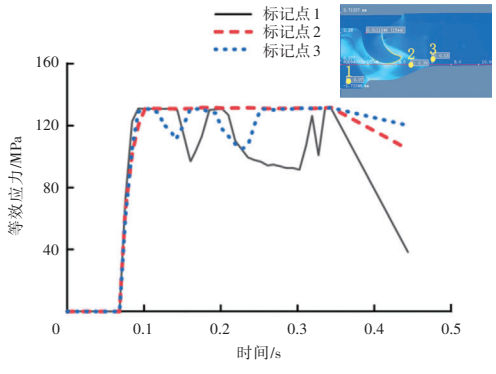
在位置 1 和位置 3 处均出现明显的应力陡降(图 3a),说明对应仿真中的材料出现失稳或者萌生随机裂纹。球模仅在底部中心(位置 1)位置出现了应力的陡降(图 3b),且降低幅度小于平底模,说明其抗裂能力优于平底模,但仍存在开裂的风险。梯形模的 3 个位置处的应力演化均较为平缓且无明显陡降(图 3c),意味着其抗裂性能较优。这归因于其阶梯型腔能有效引导材料流动,从而显著优化了应力状态。



(a)平底模



(b)球模



(c)梯形模

图 3 采用不同底模的钢-镁 SPR 工艺流程仿真在不同底模标记点处的等效应力时程曲线

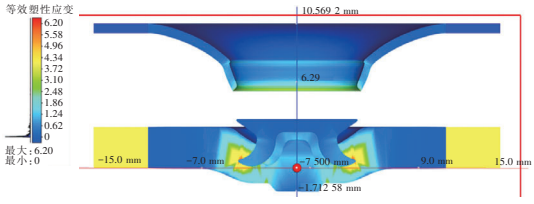
综合上述分析结果,在 3 种铆模中,梯形模的抗裂性能最优,球模次之,平底模最差。

3.2 接头力学性能仿真与试验验证分析

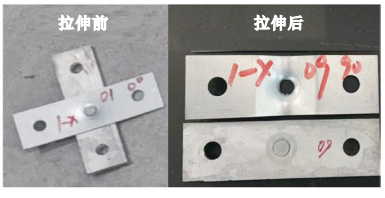
基于成形质量分析结果,梯形模在 3 种铆模中表现最优。因此,重点对梯形模接头进行力学性能仿真,并与实际试验同步开展对比验证。

3.2.1 失效模式验证

图 4、图 5 所示为梯形模 SPR 接头在十字剥离与拉剪工况下的仿真与试验失效模式对比。在十字剥离载荷工况下,接头失效形式均为上钢板围绕铆钉头发生环状撕裂脱出,如图 4 所示;在拉剪载荷工况下,接头失效形式为上层钢板撕裂失效,如图 5 所示,不同点为在仿真中铆钉随撕裂的上层板一侧脱出,在实际试验中铆钉留在下层镁板中,仿真预测的失效模式与物理试验观测结果基本一致,证明了本文所建立的仿真模型预测准确度较高。

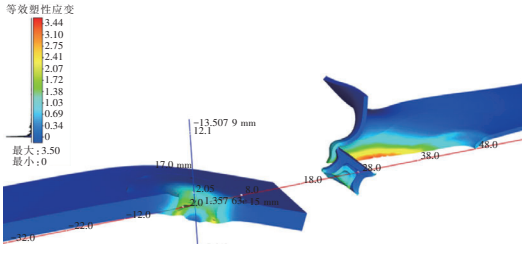


(a)仿真

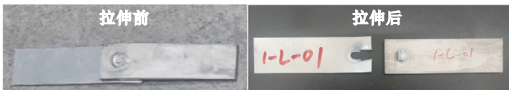


(b)试验

图 4 梯形模 SPR 接头十字剥离试验仿真与试验结果对比



(a)仿真



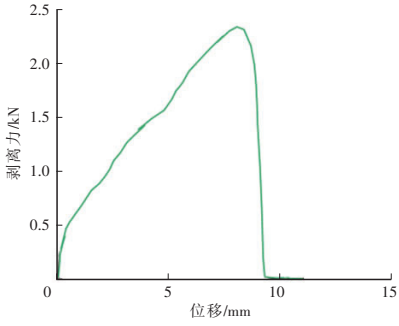
(b)试验

图 5 梯形模 SPR 接头拉剪试验仿真与试验结果对比

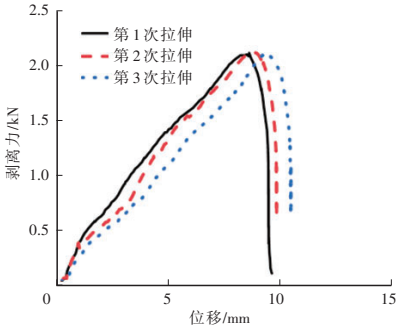
3.2.2 载荷-位移响应分析

图 6 所示为 SPR 接头在十字剥离与拉剪工况下的仿真与试验载荷-位移曲线。从曲线形状来看,仿真与试验的载荷-位移曲线趋势基本一致,

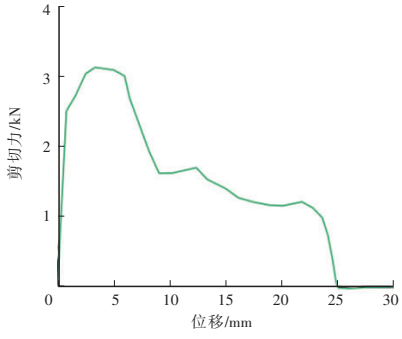
剥离曲线均呈现先上升后缓慢下降的形态,拉剪曲线则表现为先快速上升至峰值,而后进入相对平稳的缓慢下降区,并最终下降至0的典型特征。仿真结果与试验结果的高度吻合进一步说明,仿真模型成功捕捉到了接头在加载过程中的主要力学响应机制与失效演化过程。



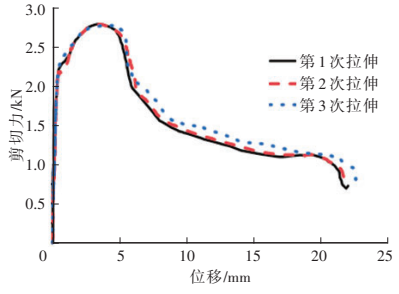
(a)十字剥离工况仿真曲线



(b)十字剥离工况试验曲线



(c)拉剪工况仿真曲线



(d)拉剪工况试验曲线

图6　梯形模SPR接头的仿真与试验载荷-位移曲线对比

表4所示为梯形模SPR接头力学性能的仿真与试验结果对比。在剥离工况下,仿真峰值力载荷(2.3 kN)与试验值(2.1 kN)、仿真剥离功(13.6 J)与试验值(11.9 J)均较为接近。在拉剪工况下,仿真峰值力载荷(3.1 kN)与试验值(2.8 kN)、仿真剪切功(39.2 J)与试验值(35.7 J)同样基本吻合。可见,仿真与试验结果一致性较好,表明经过优化迭代所获得的有限元模型能够较为准确地预测梯形模SPR接头的力学性能。

表4　梯形模SPR接头力学性能仿真与试验对比

性能指标	十字剥离工况		拉剪工况	
	仿真值	试验值	仿真值	试验值
峰值力载荷/kN	2.3	2.1	3.1	2.8
吸收功/J	13.6	11.9	39.2	35.7

综上,梯形模为本研究筛选出的最优铆模方案,其SPR接头成形质量相对较好,且具有优异的力学性能。

4　结论

a. 通过对比平底模、球模及梯形模3种底部铆模的仿真与试验结果,明确了铆模型腔几何对钢-镁SPR接头开裂风险的决定性影响。结果表明,梯形模在3种铆模中抗裂性能最优。

b. 经过优化迭代获得的仿真模型较为准确地预测了梯形模连接成形过程以及十字剥离、拉剪工况下的失效模式,且得到的载荷-位移曲线、峰值力载荷、吸收功与实际试验结果一致性较高。

c. 本研究基于“工艺仿真-性能预测-试验验证”试验策略能够有效支撑钢-镁SPR工艺的铆模选型与优化。

参考文献:

[1] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.

[2] 张泽昭, 李亚妮, 党璐玮. 镁合金在汽车零部件上的应用现状分析[J]. 汽车工艺与材料, 2025(12): 50-55.

[3] 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.

[4] XU K, CUI Q R, LI G Q, et al. Research Status of Steel-Aluminum Joining Technology for Automobile Parts[J].

2nd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2017), 2017, 86: 216-218.

[5] 韩秋生, 姚庆泰, 王子国, 等. 汽车轻量化机械连接工艺技术研究[J]. 汽车工艺与材料, 2024(9): 7-11.

[6] 刘付曙, 黄祥, 万里, 等. 一体化压铸车身结构件的自冲铆接技术开发及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(6): 954-957.

[7] HE Q H, CHEN C. The Effects of Cracks on the Failure Mechanisms, Mechanical Properties, and Fatigue Behaviors of Steel/Aluminum SPR Joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 180.

[8] ZHAO Y Y, SHI X, WANG W R, et al. Study on the Fatigue Properties of SPR-Bonded Aluminum-Steel Sheet Joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2025, 136.

[9] DU Z P, DUAN L B, JING L J, et al. Numerical Simulation and Parametric Study on Self-Piercing Riveting Process of Aluminium-Steel Hybrid Sheets[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 164.

[10] ZHANG A, ZHAO L, LI L Y, et al. Effect of Die Designed Geometrical Parameters on Riveting Quality of Self-Piercing Riveting Joints in 5052 Aluminium Alloy[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1).

AT&M