铆钉裂纹对自冲铆接力学性能影响的仿真与试验研究

成艾国[1] 王 超[1] 于万元[2*] 何智成[1]
1.湖南大学整车先进设计制造技术全国重点实验室,长沙,410082
2.柳州职业技术大学,柳州,545001

摘要:通过有限元模型模拟了自冲铆接在连接高强度钢时产生的铆钉裂纹,并系统研究了铆钉的裂纹深度、位置和数量对钢-铝自冲铆接接头力学性能的影响。首先使用 LS-DYNA 软件建立了 2D 轴对称仿真模型来模拟自冲铆接工艺过程,并通过对比试验和仿真的接头剖面验证了仿真模型的准确性。然后采用一种 2D-3D 有限元模型生成方法建立了模拟接头力学特性的 3D 仿真接头模型,并使用 LS-OPT 软件对铆钉断裂参数进行了标定。所建立的接头模型能够准确地模拟自冲铆接接头的力学特性。参数研究的结果表明:接头的力学性能随着裂纹深度的增大而下降,且随着外部裂纹位置的向下移动而逐渐增强,但内部裂纹的影响不大;当铆钉存在多个裂纹时,接头力学性能取决于最弱的裂纹,与裂纹数量无关。

关键词:自冲铆接;裂纹;仿真模型;力学性能
中图分类号:TG938
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.002 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Numerical and Experimental Study on Effects of Rivet Crack on Mechanics Properties of Self-piercing Riveted Joints

CHENG Aiguo[1] WANG Chao[1] YU Wanyuan[2*] HE Zhicheng[1]
1.State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha, 410082
2.Liuzhou Polytechnic University, Liuzhou, Guangxi, 545001

Abstract: The rivet cracks generated in joining high-strength steels using SPR were simulated through finite element model, and the effects of rivet crack depth, crack position, and crack quantity on the mechanics properties of steel-aluminum SPR joints were systematically investigated. Firstly, a 2D axisymmetric numerical model was established using LS-DYNA software to simulate the SPR processes, and the accuracy of the numerical model was validated by comparing experimental and simulated joint cross-profiles. Secondly, a 2D-3D finite element model generation method was employed to establish a 3D numerical model of SPR joints to simulate the mechanics properties of SPR joints. The fracture parameters of rivets were calibrated using LS-OPT software. The developed 3D numerical model of SPR joints could accurately predict the mechanics properties of SPR joints. The results of parametric study indicate that the mechanics properties of the SPR joints decrease with increasing crack depth and gradually increase as the external crack position moves downward, but the internal crack has minimal influence. When multiple cracks exist in the rivets, the mechanics properties of the joints depend on the weakest cracks and are independent of the quantity.

Key words: self-piercing riveting(SPR); crack; numerical model; mechanics property

0 引言

轻量化作为有效减少运输工具能耗的重要手段,在汽车、航空航天和轨道交通等领域得到快速发展[1-3]。在汽车制造中,多材料混合结构设计的使用已成为轻量化的最重要途径[4]。然而,使用传统的电阻点焊技术(resistance spot welding, RSW)难以实现不同材料的可靠连接。自冲铆接(self-piercing riveting, SPR)作为一种机械连接工艺,是目前多材料结构的主要连接方法,在航空

收稿日期:2024-03-21
基金项目:国家自然科学基金(52172357,U20A20285);广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY1097)

航天、汽车和铁路运输等行业有着广泛的应用[5-6]。SPR 技术能够连接具有不同机械性能的材料，例如铝合金、高强度钢、镁合金和碳纤维复合材料等[7]。

SPR 接头质量通常取决于工艺参数设计，如铆钉形状[8]、铆钉硬度[9]、模具轮廓[10]和铆接速度等[11]。为了确保接头具有良好的接头强度，为特定的板材组合选择合适的铆钉至关重要。铆钉的选择对 SPR 接头强度的影响主要来自于由此产生的成形质量的差异[7]。WANG 等[9]的研究表明，铆钉硬度的选择取决于要连接的板材组合，对于材料强度更高和更厚的板材，应该选择一个硬度和刚度更高的铆钉。DU 等[12]发现增加铆钉长度可以减小最小厚度并增加互锁，导致接头强度和能量吸收的增加。KARIM 等[13]研究了不同铆钉涂层对 SPR 接头强度的影响，结果表明摩擦因数高的涂层铆钉会提高接头的剪切和拉伸峰值载荷。当铆钉连接高强度和厚板材时，铆接过程中铆钉会出现铆钉损伤，包括铆钉镦粗、铆钉腿弯曲和铆钉腿部断裂等[14]。ECKSTEIN 等[15]发现当铆钉腿被压缩并沿着压缩褶皱断裂时会产生外部裂纹，当铆钉腿中的负载过大时会出现内部裂纹。HOANG 等[16]研究了铝合金铆钉在铆接过程中的压缩断裂机理，结果表明铆钉裂纹出现在铆接的最后阶段，晶粒受到剪切作用而发生弯曲断裂。MORI 等[17]通过优化模具形状实现了更大厚度范围的超高强度钢和铝合金的连接，但当钢板厚度超过 2.0 mm 时，铆钉仍然会出现裂纹。丁志勇等[18]发现当上层钢板厚度达到 2.0 mm 后，铆钉腿上出现的裂纹导致接头在力学测试中的能量吸收显著降低，但接头强度未受影响。WANG 等[19]在局部加厚自冲铆接工艺中得到了相似的结论。

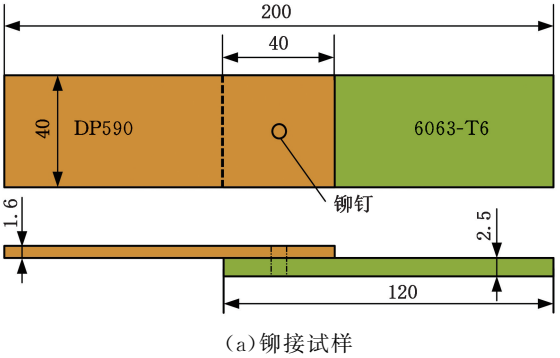
近年来，越来越多的学者采用有限元仿真模拟技术来预测接头质量，并研究工艺参数对接头质量的影响。ABE 等[20]使用商业软件 LS-DYNA 开发了二维(2D)轴对称 SPR 模型，并研究了铝板和钢板的可连接性。RUSIA 等[21]开发了一种三维(3D)接头有限元模型，所建立的模型能够准确地模拟 SPR 接头在准静态载荷下的特性。WANG 等[22]采用 smooth particle Galerkin 算法建立了 3D 接头有限元模型，并研究了铆钉长度、铆钉刃角、铆钉壁厚、模具直径和模具深度对接头成形质量和接头强度的影响。

虽然现有研究发现了铆钉裂纹产生机理和对力学性能的影响，但关于铆钉裂纹对 SPR 接头的力学性能的影响机理研究鲜见有报道。此外，使用有限元仿真来研究裂纹对 SPR 接头力学性能和失效机理的报道较少。本文研究了铆钉的裂纹深度、数量和位置对钢-铝 SPR 接头力学性能的影响。首先使用 LS-DYNA 软件建立了 2D 轴对称模型来模拟 SPR 铆接过程，并通过对比试验和仿真的参数来验证仿真模型的正确性；然后通过 2D-3D 的有限元模型的生成方法建立了接头仿真模型来模拟接头的力学特性，并通过 LS-OPT 软件标定了铆钉断裂参数；详细比较了 SPR 接头在试验和仿真中的力学性能；最后基于所建立的接头仿真模型开展了参数研究。

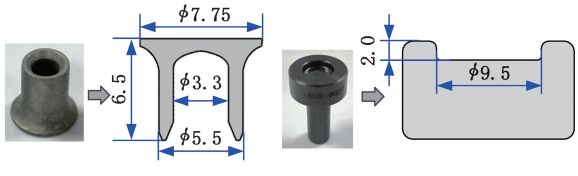
1 试验材料及方法

1.1 铆接试样

本文中的钢-铝接头由 DP590 高强度钢板和 6063-T6 铝合金组成。DP590 和 6063-T6 板材的尺寸为 120 mm× 40 mm，厚度分别为 1.6 mm 和 2.5 mm，重叠长度为 40 mm。钢板作为上层，铝板放置在下层，如图 1a 所示。DP590 和 6063-T6 的机械性能通过单轴拉伸试验获得。铆钉为硼钢制成的半空心铆钉，由一浦莱斯公司制造，硬度为 H6(520HV)。通过轴向试验系统对铆钉进行压缩试验，以表征铆钉的机械性能。铆钉和模具的尺寸由一浦莱斯公司根据连接材料和板材厚度提供，进行了多次试验测试，以获得合适的铆钉和模具尺寸。铆钉和模具的尺寸分别如图 1b 和图 1c 所示。表 1 列出了板材和铆钉的力学性能，图 2 给出了板材和铆钉的应力-塑性应变曲线。



(a)铆接试样



(b)铆钉　　(c)模具

图 1 试样准备

Fig.1 Specimen preparation

表 1　材料属性

Tab.1　Mechanical properties of sheets

材料	弹性模量/GPa	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	屈服强度/MPa
DP590	210	7.83×10^3	0.3	373
6063-T6	70	2.70×10^3	0.3	245
铆钉	210	7.83×10^3	0.3	1900

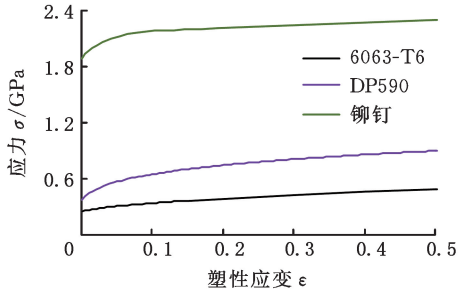


图 2　板材和铆钉的应力-塑性应变曲线

Fig.2　Stress-plastic strain curves for sheets and rivet

1.2　接头剪切力学试验

通过准静态试验来研究 SPR 接头的强度、能量吸收和失效模式，其中能量吸收通过对接头拉伸的力-位移曲线进行积分得到。在室温下，剪切试验在 C43 电子万能试验机上进行，如图 3 所示。加载端和约束端的调节器用于保证剪切试样保持居中，不产生弯矩。拉伸速度设置为 3 mm/min，重复测试三次，在接头上下层板材完全分离后终止测试。在剪切试验完成后，观察接头的断裂界面，在蔡司扫描电子显微镜上进行断口分析，以评估接头的断裂特征。

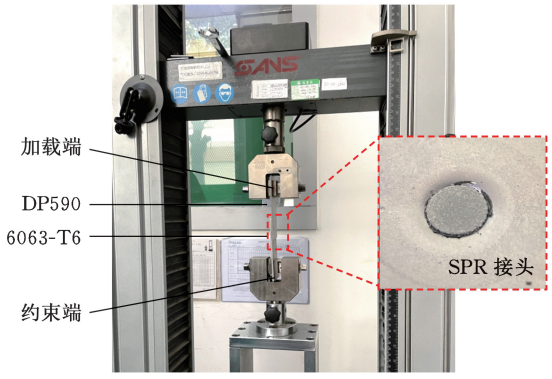


图 3　接头剪切力学试验

Fig.3　Shear mechanical test for joints

2　模型的建立与验证

2.1　材料本构及损伤模型

在 SPR 工艺模拟中，通常采用 LS-DYNA 中的弹塑性材料模型 MAT24（* MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY）对板材和铆钉进行建模。在 SPR 接头模拟中，铆接区域会出现材料失效，本文采用 Johnson-Cook 断裂模型来定义板材的失效行为，DP590 和 6063-T6 的失效参数见表 2 和表 3[12,23]。Johnson-Cook 断裂模型是基于孔洞增长理论提出的，考虑了应力三轴度、应变速率和温度对材料断裂行为的影响[24]。LS-DYNA 中对应的是 MAT15（* MAT_JOHNSON_COOK）材料模型。在不考虑材料温度效应的情况下，Johnson-Cook 模型可以在方程中使用简化的本构关系：

$$\sigma_{eq}=(A+B\varepsilon_p^n)\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \tag{1}$$

式中：A、B、n、C 为模型本构参数；σ_{eq} 为等效应力；ε_p 为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为等效塑性应变率；$\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。

表 2　Johnson-Cook 本构模型参数[12,23]

Tab.2　Parameters of Johnson-Cook constitutive model

材料	A/MPa	B/MPa	n	C
DP590	279	370	0.38	0.084 95
6063-T6	245	402	0.6286	0

表 3　Johnson-Cook 失效模型参数[21,22]

Tab.3　Parameters of Johnson-Cook failure model

材料	D_1	D_2	D_3	D_4
DP590	0.7525	0.35	−9	0.133143
6063-T6	−13.2	13.32	0.0035	0

在不考虑材料温度效应的情况下，应变的断裂公式为

$$\varepsilon_f=(D_1+D_2\exp(D_3\sigma^*))(1+D_4\ln\dot{\varepsilon}_p^*) \tag{2}$$

式中：$D_1\sim D_4$ 为材料损伤参数；ε_f 为断裂应变；σ^* 为应力三轴度。

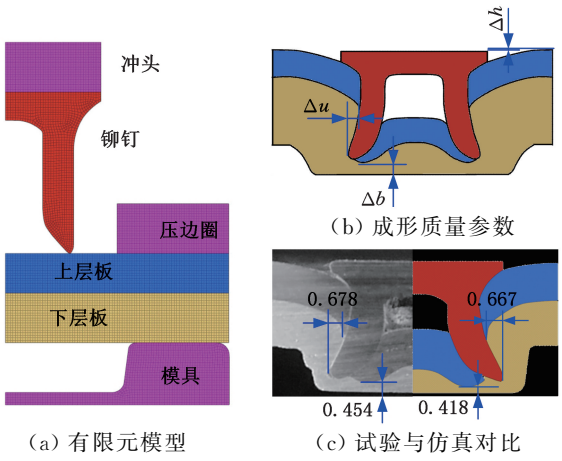
此外，由于铆钉制造过程中经过了热处理和淬火工艺，难以标定其失效模型，故采用 MAT24 材料中的等效塑性应变失效参数 FAIL 来模拟铆钉的断裂。FAIL 为 MAT24 材料模型中的常应变失效模型。常应变模型一般是以单向拉伸试验的临界断裂应变（等效失效塑性应变）作为判断材料发生韧性断裂的主要依据，一旦等效塑性应变达到阈值，材料即发生韧性断裂，即

$$\varepsilon_f=\varepsilon_p \tag{3}$$

2.2　SPR 工艺过程模拟及验证

在 LS-DYNA 中建立了 SPR 铆接过程的 2D 轴对称有限元模型，如图 4a 所示。使用 LS-DYNA 中的 2D 轴对称四边形单元对铆钉和金属板进行建模。根据网格敏感性分析，铆钉、板材和模具的网格尺寸设定为 0.1 mm × 0.1 mm，其他零件的网格尺寸设为 0.2 mm×0.2 mm[12]。在有限元模型中采用 r-adaptivity 方法来解决铆接过程中引起的严重的单元畸变问题。在有限元模型中采用阈值为 0.1mm 的几何失效标准，以模拟铆接过程中上层板的刺穿后的断裂过程。根据表 1 和图 2 中提供的数据，将铆钉和板材的材料模型建模为 MAT24 弹塑性材料，冲头、压边圈和

模具设定为 MAT20（*MAT_RIGID）刚体材料。为了准确地捕捉表面之间的接触，采用摩擦因数为 0.2 的自动 2D 面对面接触算法（*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE）。图 4b 中 SPR 接头的成形质量主要由铆钉与下层板形成的机械互锁 Δu 来表征。若下层板在铆接后的最小厚度 Δb 过小，可能会导致腐蚀问题，因而也常和 Δu 共同评价接头成形质量。在满足机械互锁的前提下，钉头高度 Δh 主要影响表面质量。通过对比试验结果和仿真结果之间的截面形状发现仿真与试验结果吻合良好，仿真结果中铆钉出现镦粗的变形，而且两个关键的成形质量参数 Δu 和 Δb 的相对误差均在 8% 以内，如图 4c 所示。

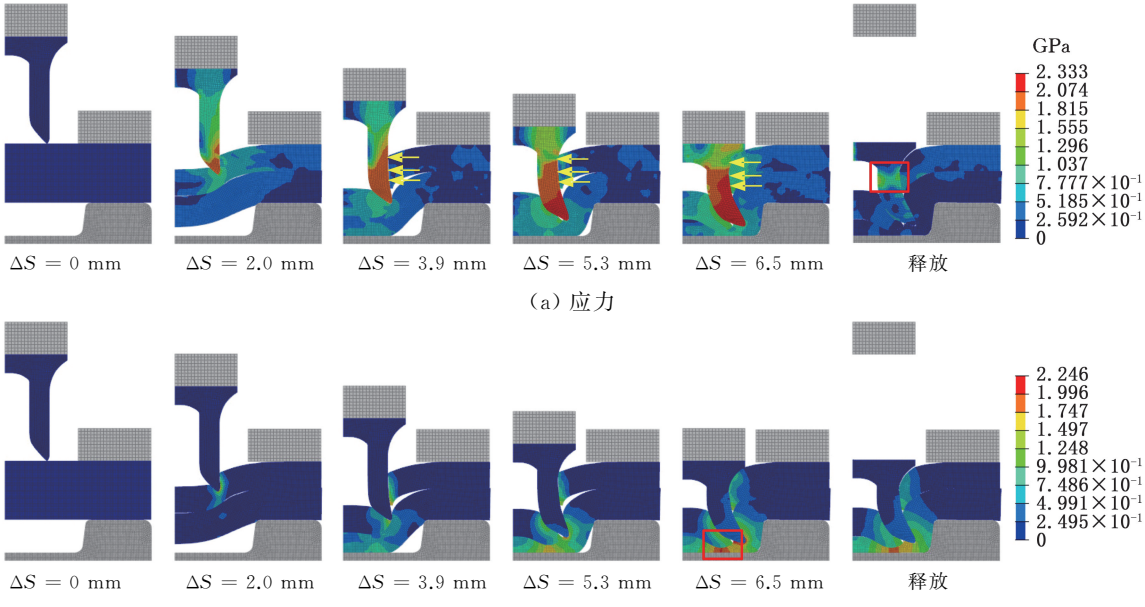


（a）有限元模型　（b）成形质量参数　（c）试验与仿真对比

图 4　SPR 工艺过程模拟

Fig.4　SPR process simulation

不同铆接行程 ΔS 下的铆接应力和应变分布如图 5 所示。首先当板材被压边圈和模具夹在一起时，没有观察到板材变形。其次随着铆钉向下移动，当 ΔS =2.0 mm 时，板材在铆钉的作用下向下弯曲。铆钉尖端出现的应力有所增大，应变主要集中在铆钉尖端周边的上层板上。当 ΔS =3.9 mm 时，下层板开始接触模具底面，并填充模具的空间。铆钉刺穿上层板后，断裂的上层板对铆钉存在侧向的阻力，铆钉的应力分布范围扩大，而下层板受到铆钉和模具的挤压作用，出现塑性变形。当 ΔS =5.3 mm 时，铆钉逐渐刺入下层板，下层板在铆钉的作用下基本填充模腔。铆钉尖端的应力已经超过铆钉的屈服应力，达到 2.3 GPa，并且铆钉倾向于发生镦粗变形。当 ΔS = 6.5 mm 时，冲头已达到指定位置，铆钉在底板之间形成机械互锁，铆钉表现出明显的镦粗变形，下层板与模具接触的区域存在严重的塑性变形，存在断裂的风险。最后释放冲头，SPR 工艺完成。由于铆钉和板材经历了复杂的塑性变形过程，故存在较明显的残余应力和应变。此外铆钉的应力集中主要



（a）应力

（b）应变

图 5　铆接过程的结果云图

Fig.5　Result contour of riveting process

集中在铆钉腿部靠近上层板的位置，这主要是由铆钉空腔内部缺少支撑、上层钢板在铆钉腿上施加的阻力过大造成的[25]。

2.3　SPR 接头模拟及验证

2.3.1　SPR 接头模型的建立

为了简化建模过程和降低计算量，常用的 SPR 接头建模方法为 2D-3D 方式，即使用 2D 的 SPR 工艺过程模拟仿真的结果生成 3D 的 SPR 接头，并考虑铆接过程残余应力和应变的影响[12,21]。该方法的详细过程如下：

1）3D 网格模型的创建。将 SPR 工艺过程模拟生成的 2D 网格模型，围绕对称轴旋转 360°生

成 3D 网格模型，单元类型为 8 节点的六面体单元，如图 6 所示。为了减少计算时间，设定中心区域的网格尺寸为 0.1 mm×0.1 mm，外侧区域的网格尺寸为 0.4 mm×0.4 mm，中心区域和外侧区域之间的过渡区域的网格尺寸为 1.0 mm×0.4 mm。

2）残余应力-应变映射。SPR 工艺过程模拟中冲头释放后的应力和应变即为需要映射的残余应力-应变，如图 7 所示。通过开发 Tcl 脚本程序将2D网格中的残余应力和应变转换为 3D 网格中的应力和应变，并通过 * INITIAL_STRESS_SOLID 和 * INITIAL_STRAIN_SOLID 将应力-应变场自动映射到构建的三维模型中。

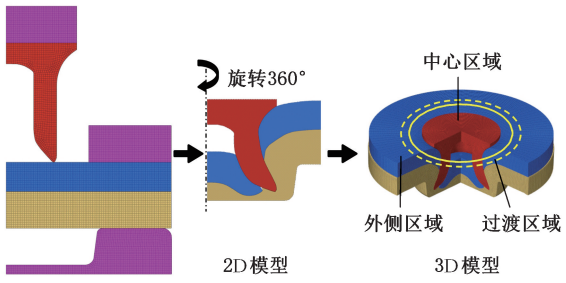


图 6　SPR 接头网格的生成

Fig.6　The generation of elements for SPR joint

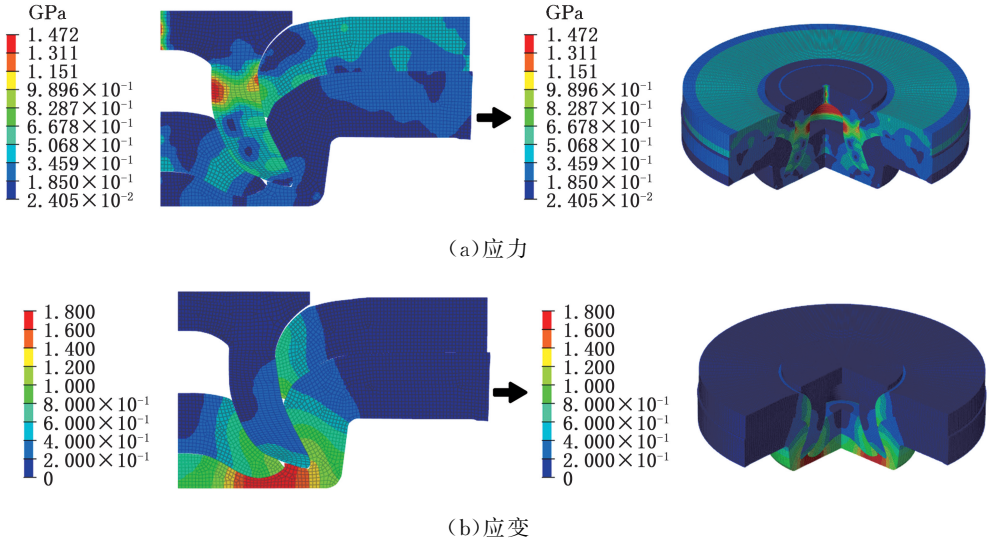


图 7　残余应力和应变的映射

Fig.7　Mapping of residual stress and strain

3）SPR 剪切仿真模型。SPR 接头的三维有限元模型可由内外两模块装配而成，如图 8 所示。内部模块包括铆钉、上层板和下层板，它们的材料特性因铆接过程而变化。外部模块包括 SPR 接头的其余部分，其材料特性在铆接过程中保持不变。内部模块和外部模块通过绑定接触（* CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE）实现连接。采用自动的单面接触（* CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE）模拟不同部件之间接触行为，摩擦因数设置为 0.15[12]。另外，在铆钉与其他部件之间增加了 ERODING_NODES_TO_SURFACE 接触，以保证材料失效时产生稳定的接触。

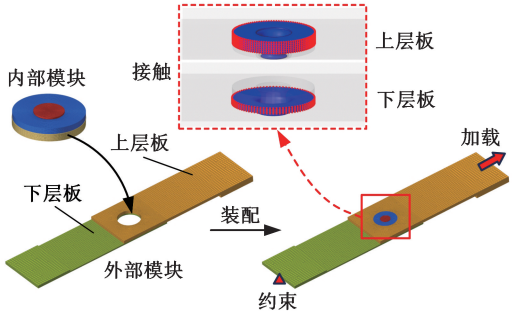


图 8　SPR 剪切仿真模型的生成流程

Fig.8　The generation process of shear simulation model of SPR

2.3.2　铆钉失效参数标定

由于铆接过程中铆钉发生了明显的镦粗问题，导致在剪切试验中铆钉发生断裂，如图 9 所示。板材未发生明显弯曲变形，说明铆钉在剪切试验开始后较短时间内产生失效。此外，铆钉断裂位置与图 5 中的应力集中位置基本一致，进一步证明了所建立的模型的准确性。图 10 所示为扫描电子显微镜观察的铆钉断裂后的断裂界面，分布广泛的断层和解理面证明铆钉发生了脆性断裂。

为了对裂纹进行模拟建模，在观察接头失效形态的基础上对接头剖面进行抛光后，通过金相显微镜观察铆接过程中产生的裂纹，如图 11a 所示。铆钉裂纹垂直于铆钉腿，向内部延伸，裂纹位置与 SPR 工艺过程模拟中的残余应力分布位置基本一致。以上结果说明在铆接过程中，铆钉

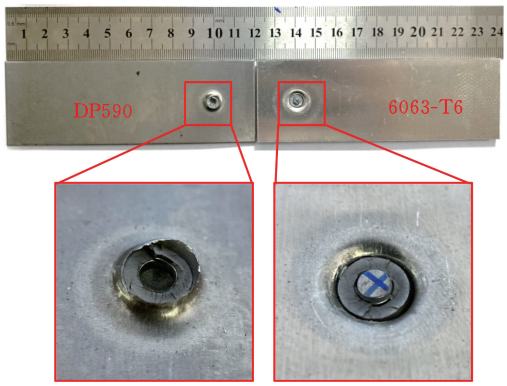


图 9　SPR 接头失效特征

Fig.9　The failure characteristics of SPR joint

受到了侧向挤压力产生裂纹，从而导致接头在剪切测试中的铆钉断裂失效。本文采用 MAT24 材料中的等效塑性应变失效来模拟铆钉的断裂，由于铆钉的其他位置未发生失效，故仅选择在铆钉的裂纹位置创建单独的失效材料，并根据测量的裂纹长度在网格中创建了裂缝，如图 11b 所示。

本节利用 LS-OPT 软件中的参数识别模块，对 MAT24 材料模型中的 FAIL 失效参数进行反求，反求的流程如图 12 所示。通过计算仿真与试验的力-位移曲线之间的面积，构建目标响应函数。基于顺序区间缩减(sequential with domain reduction，SRSM)算法完成参数反求，得到的

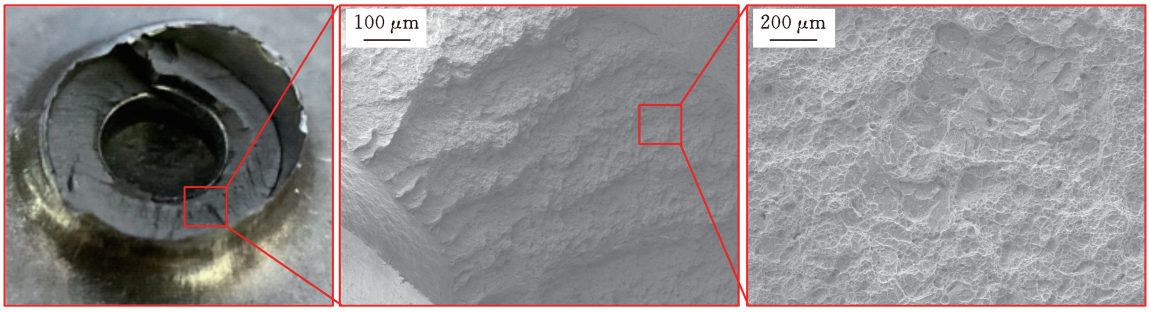
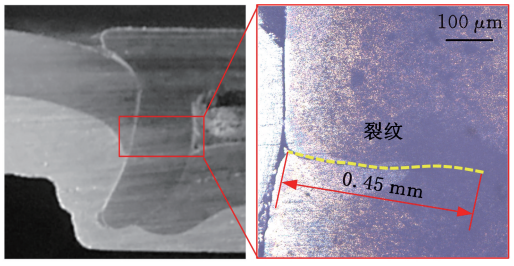
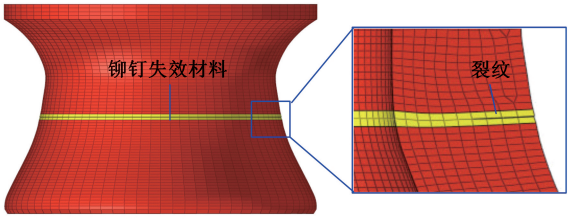


图 10　铆钉失效后的断裂界面

Fig.10　The fracture interface after rivet failure



(a)金相观察



(b)裂纹建模

图 11　铆钉裂纹

Fig.11　Rivet cracks

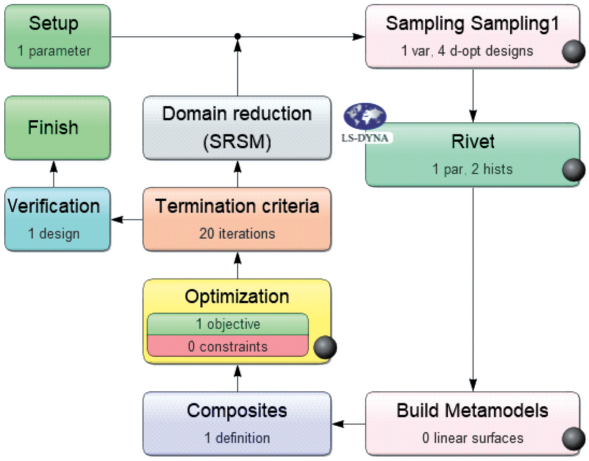


图 12　LS-OPT 参数反求流程

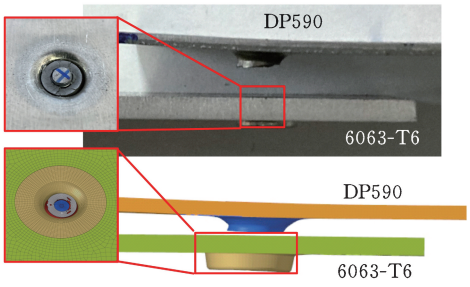
Fig.12　Inverse parameter identification process in LS-OPT

FAIL 值为 0.004。

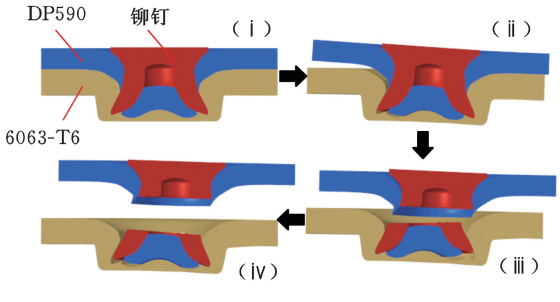
2.3.3　SPR 接头验证

图 13a 所示为试验与仿真的 SPR 接头的失效行为对比结果，可知两者的接头变形行为具有较高的一致性。图 13b 所示为接头失效的过程，当上层板的加载端受到拉力后，铆钉发生倾斜，上层板的约束侧产生轻微翘曲。然而随着载荷继续增大，铆钉发生断裂，导致接头无法继续承载，此时板材均未产生明显塑性弯曲变形。

图 14a 所示为试验与仿真的力-位移曲线的对比结果。尽管在变形的初始阶段，试验曲线与映射(映射铆接过程应力-应变结果)和未映射的仿真曲线之间具有良好的一致性，但未映射的仿真模型的峰值力和最大位移小于映射的仿真模型的相应值。从 SPR 接头初始变形阶段到最终失效，试验与映射的仿真的力-位移曲线都具有较高的一致性。SPR 接头的试验与仿真的力学性能对比结果如图 14b 所示。数据表明，建立的映射



(a)试验与仿真的失效行为对比

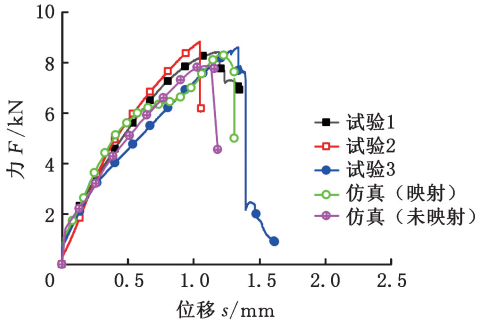


(b)接头失效过程

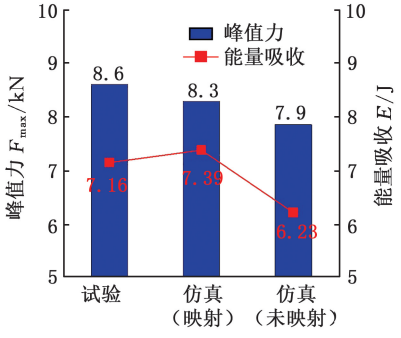
图 13　SPR 接头的失效分析

Fig.13　The failure analysis of SPR joint

的仿真模型能够较为准确地模拟 SPR 接头的峰值载荷和能量吸收值，相对误差分别控制在 −3.5%和 3.2%以内，而未映射的仿真模型的误差分别为 −8.1%和 −13%。因此，本文构建的 SPR 接头仿真模型可以用于模拟剪切试验中的不同参数的接头的力学响应。



(a)试验与仿真的力-位移曲线对比



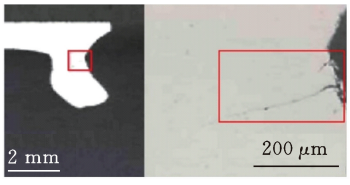
(b)试验与仿真的力学性能对比

图 14　SPR 接头的机械属性

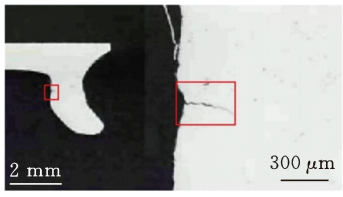
Fig.14　The mechanical properties of SPR joint

3　铆钉裂纹参数设计

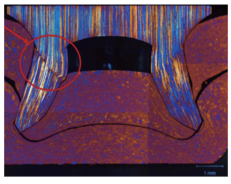
当铆钉穿过厚而坚硬的板材，或者所用铆钉的强度较低时，铆钉断裂可能以多种方式发生，例如外部裂纹和内部裂纹[15]。当铆钉腿被压缩并沿着压缩褶皱断裂时，可以观察到外部裂纹，裂纹深度与铆钉压缩程度有关。在 SPR 工艺的最后一步中移除冲头会导致铆钉轴区域的拉伸应力短暂增大，从而出现内部裂纹，如图 15a 和图 15b 所示[[15]]。此外，铆接过程中铆钉与上层板之间的空腔与冲头作用的铆接力的共同作用下会使接头产生更深的剪切裂纹，如图 15c 所示[16]。这是因为在连接过程接近结束时，铆钉腿上部发生了快速的局部材料变形，导致剪切断裂。当使用的铆钉具有较低的延展性和强度时，可能会在多处产生裂纹，如图 15d 所示[26]。



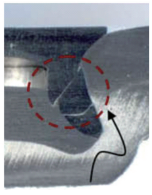
(a)外部裂纹



(b)内部裂纹



(c)剪切裂纹



(d)多裂纹

图 15　铆钉裂纹的类型[15-16,26]

Fig.15　The types of rivet crack[15-16,26]

铆钉裂纹的产生受到铆钉和板材参数的影响，难以通过试验产生特定的裂纹参数，例如裂纹深度、裂纹位置和裂纹数量。为了评估铆钉裂纹对 SPR 接头力学性能的影响，本文在仿真模型中定义了以上三种裂纹参数。首先定义了图 16 中的裂纹位置，P1～P4 为 4 个铆钉外侧裂纹的位置，INR1～INR4 为 4 个铆钉内侧裂纹的位置。其中 P2 为原始裂纹位置，在 P2 位置定义了四种裂纹深度。考虑 P1～P4 不同数量的匹配，定义了 7 种裂纹数量。定义的具体裂纹参数见表 4。

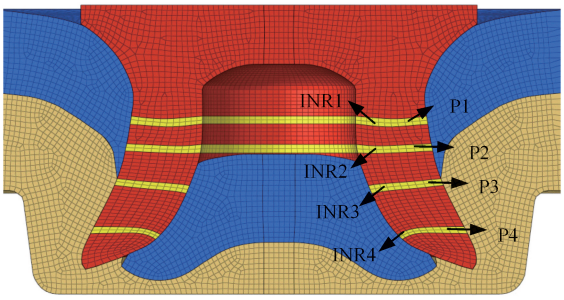


图 16　定义的裂纹位置

Fig.16　The definition of crack location

表 4　裂纹参数

Tab.4　Crack parameters

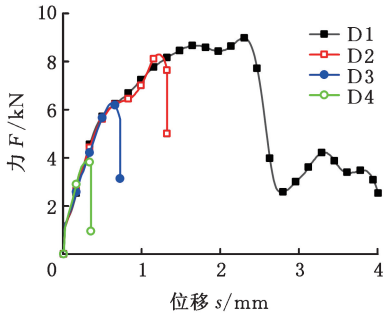
裂纹参数	变量代号	裂纹位置	裂纹深度取值/mm
裂纹深度	D1	P2	0
	D2	P2	0.45
	D3	P2	0.60
	D4	P2	0.75
裂纹位置	P	P1～P4	0.45
	INR	INR1～INR4	0.45
裂纹数量	2-1	P2；P3	0.45
	2-2	P1；P2	0.45
	2-3	P2；P4	0.45
	3-1	P1；P2；P3	0.45
	3-2	P2；P3；P4	0.45
	3-3	P1；P2；P4	0.45
	4-1	P1～P4	0.45

4　结果与讨论

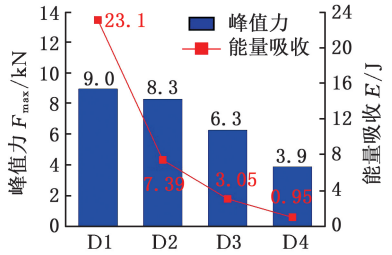
4.1　铆钉裂纹深度的影响

图 17a 所示为不同铆钉裂纹深度的 SPR 接头力-位移曲线。4 个 SPR 接头的曲线在初期均呈现线性上升的趋势，且失效前的变化趋势基本一致。由于铆钉裂纹的影响，接头在不同的时刻发生失效：D1 接头无裂纹（裂纹深度为 0），达到峰值后仍存在较大的波动，而 D2～D4 接头达到峰值后开始快速下降，失去承载能力。失效位移随着裂纹深度的增加而逐渐减小。图 17b 所示为不同铆钉裂纹深度的 SPR 接头的峰值力和能量吸收情况。D1 接头代表无铆钉断裂时的力学性能，随着裂纹的产生，接头的能量吸收水平显著下降。当裂纹深度较小时（D2），裂纹对接头峰值力的影响较小，但随着深度的增大（D3 和 D4），接头峰值力明显减小。由此可见，设计 SPR 连接时需要合理选择连接参数，以避免铆钉裂纹的产生。

图 18 所示为不同铆钉裂纹深度的 SPR 接头的失效行为。D1 接头最终的失效形式是机械互锁失效，具体表现为铆钉从下层板脱出，如图 18a 所示。在此过程中，铆钉在上层板的拉伸作用下翻转，板材均发生较明显的弯曲变形，下层铝板发生明显的塑性变形及材料失效。另外三种接头，



(a)力-位移曲线



(b)力学性能

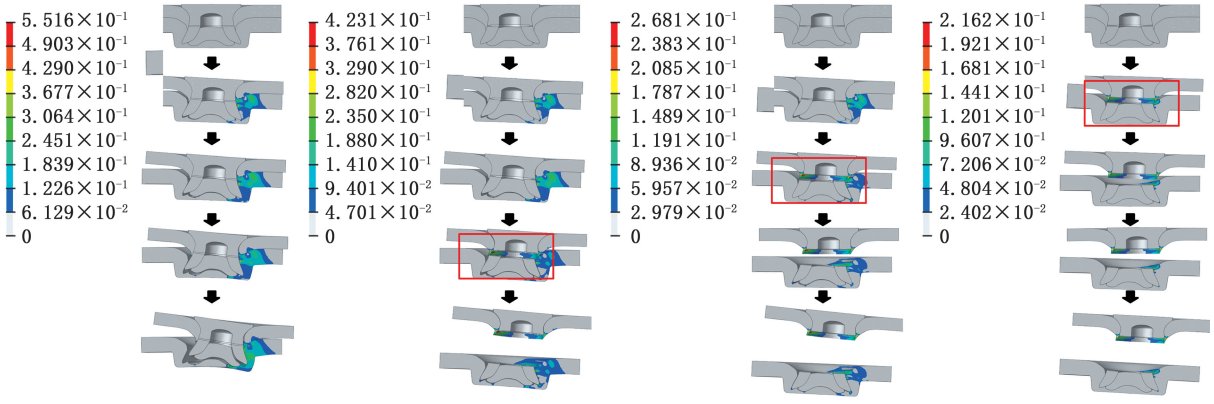
图 17　裂纹深度对 SPR 接头的机械属性的影响

Fig.17　The effect of crack depth on the mechanical properties of SPR joints

随着裂纹深度增加，板材的弯曲变形程度和塑性应变逐渐减小，如图 18b～图 18d 所示。尤其是 D4 接头，仅裂纹周边的板材发现了小范围的塑性应变，说明此时接头承受的载荷水平最低。以上结果表明，铆钉断裂不利于结构产生塑性变形，无法提供承载和吸能的作用。

4.2　铆钉裂纹位置的影响

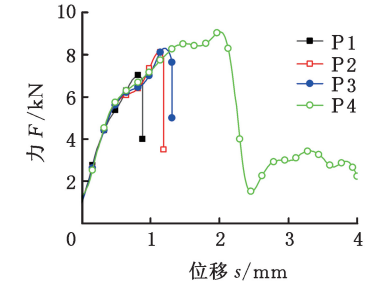
裂纹位置对 SPR 接头机械属性的影响见图 19。图 19a 和图 19c 所示为不同铆钉裂纹位置的 SPR 接头力-位移曲线。所有 SPR 接头的曲线在初期均呈现线性上升的趋势，且失效前的变化趋势基本一致。图 19a 中的外部裂纹位置靠下的 P4 接头表现出类似于无裂纹的 D1 接头的趋势，裂纹位置靠上的 P1～P3 接头均较早失效。失效位移随着外部裂纹位置的向下移动而逐渐增大。图 19c 中的内部裂纹对接头的影响较小，仅有 INR3 接头的曲线发生了快速下降，另外三个接头的曲线与无裂纹接头 D1 较为接近。但是相比于外部裂纹 P3，INR3 接头的失效位移更大。图 19b 和图 19d 所示为不同铆钉裂纹位置的 SPR 接头的峰值力和能量吸收情况。随着外部裂纹位置的向下移动，接头的峰值力和能量吸收逐渐增大，如图 19b 所示。当外部裂纹位置为 P4 时，接头的峰值力和能量吸收水平接近 D1 接头。图 19d 表明内部裂纹对接头的峰值力没有影响，但是由于失效形式不同，位于上端的 INR1/INR2 接头和最下端的 INR4 接头的能量吸收水平最



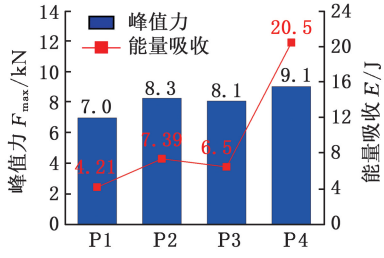
(a)D1 接头　(b)D2 接头　(c)D3 接头　(d)D4 接头

图 18　裂纹深度对 SPR 接头失效行为的影响

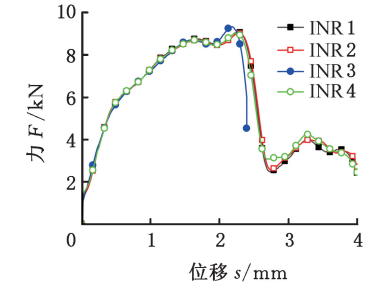
Fig.18　The effect of crack depth on the failure behaviour of SPR joints



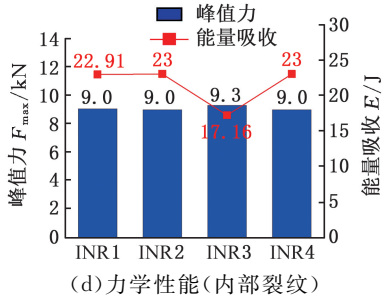
(a)力-位移曲线(外部裂纹)



(b)力学性能(外部裂纹)



(c)力-位移曲线(内部裂纹)



(d)力学性能(内部裂纹)

图 19　裂纹位置对 SPR 接头机械属性的影响

Fig.19　The effect of crack position on the mechanical properties of SPR joints

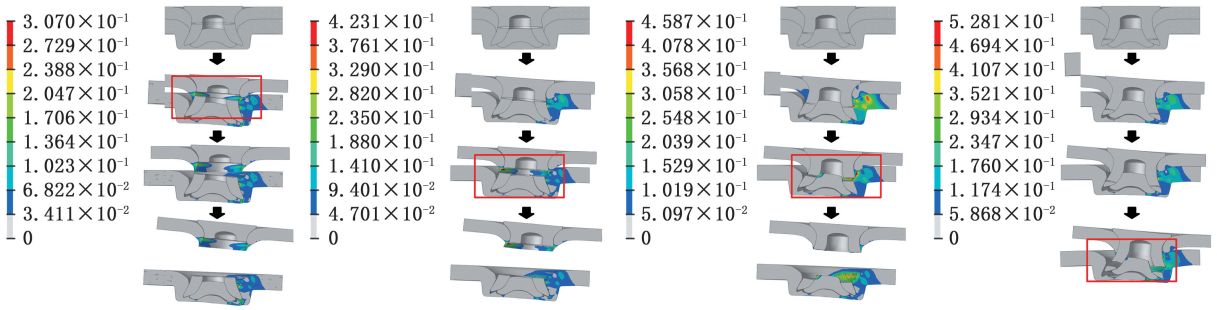
高，而且与 D1 接头基本相当。

图 20 所示为不同外部铆钉裂纹位置的 SPR 接头的失效行为。裂纹位置为 P1 和 P2 时，板材变形和下层板的塑性应变较为接近，而且基本未发现材料失效。裂纹位置为 P3 时，虽然失效时刻接近 P2，但是由于断裂后保留的铆钉较长，仍然对下层板造成了明显的材料失效。裂纹位置为 P4 时，虽然铆钉尖端断裂，但剩余的铆钉仍与下层板构成机械互锁，所以失效模式接近 D1 接头。图 21 所示为不同内部铆钉裂纹位置的 SPR 接头的失效行为。除了 INR3 接头发生铆钉断裂外，另外三个接头的失效形式与 D1 接头基本一致。INR3 接头的裂纹位于上层板和下层板搭接处，故此处更容易受到剪切载荷的作用而产生断裂失效。此外由于 INR3 接头在失效前仍然承受较大的载荷，故下层铝板的塑性变形接近另外三个接头。

4.3　铆钉裂纹数量的影响

图 22a 所示为不同铆钉裂纹数量的 SPR 接头的力-位移曲线。7 个 SPR 接头的曲线在初期均呈现线性上升的趋势，且失效前的变化趋势基本一致。失效位移最大的 2-3 接头包含裂纹 P2 和 P4；失效位移次之的 2-1 接头包含 P2 和 P3，3-2 接头包含 P2、P3 和 P4；剩余失效位移最小的接头均包含失效位置 P1。由 4.2 节的失效位移随着外部裂纹位置的向下移动而逐渐增加的结论可知，当铆钉存在多个裂纹时，其力学性能取决于最弱的裂纹，与数量无关。因此，当接头存在 P4 裂纹时，接头的失效时刻位移基本一致；当接头存在 P3 裂纹时，失效位移有所增大，失效时刻和位移基本一致。图 22b 中不同铆钉裂纹数量的 SPR 接头的峰值力和能量吸收结果进一步证明了上述结论。

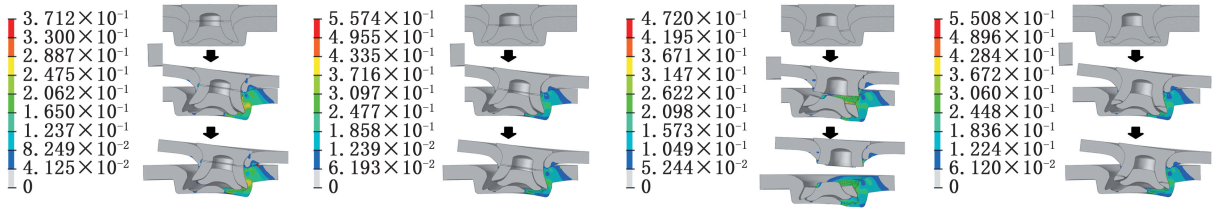
图 23 所示为不同铆钉裂纹数量的 SPR 接头



(a)裂纹位置 P1　(b)裂纹位置 P2　(c)裂纹位置 P3　(d)裂纹位置 P4

图 20　外部裂纹对 SPR 接头失效行为的影响

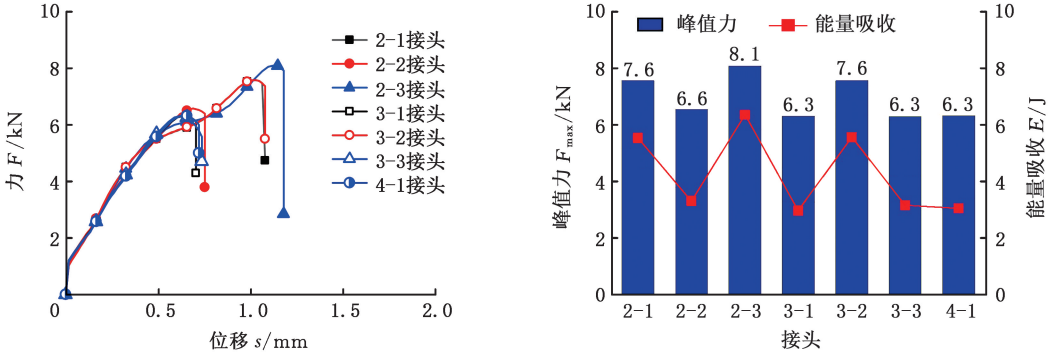
Fig.20　The effect of external crack on the failure behaviour of SPR joints



(a)INR1 接头　(b)INR2 接头　(c)INR3 接头　(d)INR4 接头

图 21　内部裂纹对 SPR 接头失效行为的影响

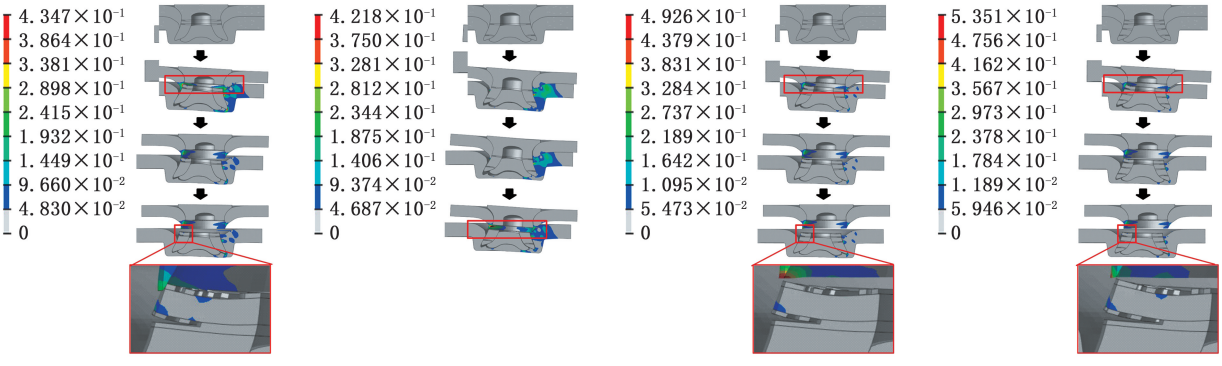
Fig.21　The effect of internal crack on the failure behaviour of SPR joints



(a)力-位移曲线　(b)力学性能

图 22　裂纹数量对 SPR 接头机械属性的影响

Fig.22　The effect of crack quantity on the mechanical properties of SPR joints



(a)2-2 接头　(b)2-3 接头　(c)3-1 接头　(d)4-1 接头

图 23　裂纹数量对 SPR 接头失效行为的影响

Fig.23　The effect of crack quantity on the failure behaviour of SPR joints

的失效行为。断裂的位置均为最弱的裂纹，与图 22a 中结论一致。除了 2-3 接头，其余接头中的下层板存在较少的塑性变形，P1 裂纹先失效，然后 P2 裂纹出现部分失效。

5　结论

1)本文使用 LS-DYNA 软件建立了 2D 轴对称仿真模型来模拟自冲铆接工艺过程,通过对比试验测试和仿真结果之间的截面形状发现仿真与试验结果吻合良好,铆钉均出现镦粗的变形,而且两个关键的成形质量参数 Δu 和 Δb 的相对误差在 8%以内。

2)使用 2D 的 SPR 工艺过程模拟仿真的结果生成 3D 仿真接头模型,并考虑铆接过程残余应力和应变的影响。使用 LS-OPT 软件对铆钉断裂参数进行了标定。试验与仿真的 SPR 接头的失效行为具有较高的一致性。仿真模型能够较为准确地模拟 SPR 接头的峰值载荷和能量吸收值,相对误差分别控制在−3.5%和 3.2%以内。

3)系统研究了铆钉的裂纹深度、位置和数量对钢-铝自冲铆接接头力学性能的影响。结果表明:接头的力学性能随着裂纹深度的增大而下降,且随着外部裂纹位置的向下移动而逐渐增强,但内部裂纹的影响不大;当铆钉存在多个裂纹时,接头力学性能取决于最弱的裂纹,与裂纹数量无关。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2023[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11):1-192.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Automotive Engineering Research Progress:2023[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11):1-192.

[2] 王博, 郝鹏, 田阔, 等. 航空航天结构轻量化设计与实验方法研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44(4):596-606.
WANG Bo, HAO Peng, TIAN Kuo, et al. Advances in Lightweight Design and Experimental Methods for Aerospace Structures[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(4):596-606.

[3] 张磊, 许帅康, 陈洁, 等. 列车车体轻量化设计研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(24):177-196.
ZHANG Lei, XU Shuaikang, CHEN Jie, et al. Research Progress in Lightweight Design of Train Body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(24):177-196.

[4] WANG Dengfeng, LI Shenhua. Material Selection Decision-making Method for Multi-material Lightweight Automotive Body Driven by Performance [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L:Journal of Materials:Design and Applications, 2022, 236(4):730-746.

[5] 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.
LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in Spot Joining Technologies of Lightweight Thin-walled Structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6):125-146.

[6] 张越, 卢岩, 彭锐涛, 等. 轻量化材料新型连接工艺与应用现状[J]. 机械工程学报, 2024, 60(4):259-283.
ZHANG Yue, LU Yan, PENG Ruitao, et al. New Connection Technology and Application Status of Lightweight Materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(4):259-283.

[7] LI Dezhi, CHRYSANTHOU A, PATEL I, et al. Self-piercing Riveting—a Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5):1777-1824.

[8] JIANG Hao, GAO Song, LI Guangyao, et al. Structural Design of Half Hollow Rivet for Electromagnetic Self-piercing Riveting Process of Dissimilar Materials[J]. Materials & Design, 2019, 183:108141.

[9] WANG Chao, DU Zhanpeng, CHENG Aiguo, et al. Numerical Investigation of Joinability and Forming Quality Improvement on Self-piercing Riveting Process with Varying Sheet Stack Combinations[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 201:112017.

[10] WANG Chao, DU Zhanpeng, CHENG Aiguo, 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.

[11] 温中令, 雷鸣, 潘华. 不同铆接速度下板材搭接顺序对钢/铝异种金属铆接接头性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2023, 44(3):9-17.
WEN Zhongling, LEI Ming, PAN Hua. Effect of Plate Lapping Sequence on the Performances of Steel/Aluminum Dissimilar Metal Riveted Joints under Different Riveting Speeds[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2023, 44(3):9-17.

[12] DU Zhanpeng, WEI Baolv, HE Zhicheng, et al. Experimental and Numerical Investigations of Aluminium Steel Self-piercing Riveted Joints under Quasi-static and Dynamic Loadings [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 169:108277.

[13] KARIM M A, JEONG T E, NOH W, et al. Joint Quality of Self-piercing Riveting (SPR) and Mechanical Behavior under the Frictional Effect of

Various Rivet Coatings[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58:466-477.

[14] ANG Huaqian. An Overview of Self-piercing Riveting Process with Focus on Joint Failures, Corrosion Issues and Optimisation Techniques[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1):1-25.

[15] ECKSTEIN J, ROOS E, ROLL K, et al. Experimental and Numerical Investigations to Extend the Process Limits in Self-pierce Riveting[C]// 10th Esaform Conference on Material Forming. Zaragoza, 2007:279-286.

[16] HOANG N H, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M, et al. Failure of Aluminium Self-piercing Rivets:an Experimental and Numerical Study[J]. Materials & Design, 2013, 49:323-335.

[17] MORI K, KATO T, ABE Y, et al. Plastic Joining of Ultra High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Self Piercing Rivet[J]. CIRP Annals, 2006, 55(1):283-286.

[18] 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, 49(4):138-145.
DING Zhiyong, LI Haiyang, GU Chengbo. Comparative Study on Self-piercing Riveting and Flow Drilled Screw Joining for Steel-aluminium and Aluminium-aluminium Joints[J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49(4):138-145.

[19] WANG Chao, YU Wanyuan, CHENG Aiguo, et al. Effect of Process Parameters on Joint Quality and Mechanical Properties of Local-thickened Self-piercing Riveted Steel and Die-casting Aluminum Joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(11):5945-5964.

[20] ABE Y, KATO T, MORI K. Joinability of Aluminium Alloy and Mild Steel Sheets by Self Piercing Rivet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1/2/3):417-421.

[21] RUSIA A, WEIHE S. Development of an End-to-end Simulation Process Chain for Prediction of Self-piercing Riveting Joint Geometry and Strength [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57:519-532.

[22] WANG Dengfeng, KONG Dewen, XIE Chong, et al. Study on the Effect of Rivet Die Parameters on Joint Quality of Self-piercing Riveting Employed 3D Modeling and MCDM Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(11):8227-8241.

[23] TOPILLA L, TOROS S. Stress-strain Distribution and Failure Mechanisms in Dual-phase Steels Investigated with Microstructure-based Modeling [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2022, 19(7):e468.

[24] 周佳, 梁宾, 万鑫铭, 等. 汽车用金属板材的材料动态响应与断裂性能研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20):339-349.
ZHOU Jia, LIANG Bin, WAN Xinming, et al. Research on Dynamic Response and Fracture Properties of Metal Materials for Vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20):339-349.

[25] ZHAO Huan, HAN Li, LIU Xianping, et al. Comparisons of Formation Process and Quality between Two-layer and Three-layer Self-piercing Riveted Joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(9):4745-4767.

[26] HOANG N H, PORCARO R, LANGSETH M, et al. Self-piercing Riveting Connections Using Aluminium Rivets[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(3/4):427-439.

（编辑 陈 勇）

作者简介：**成艾国**，男，1972 年生，教授、博士研究生导师。研究方向为车身结构设计和优化、材料成形 CAE 分析、汽车产品的生态和节能技术研究及应用等。发表论文 80 余篇。E-mail:cheng_aiguo@163.com。**于万元***（通信作者），女，1987 年生，讲师。研究方向为车身结构轻量化设计。发表论文 9 篇。E-mail:ywy196364@126.com。

本文引用格式：
成艾国，王超，于万元，等.铆钉裂纹对自冲铆接力学性能影响的仿真与试验研究[J]. 中国机械工程，2025，36(2)：197-208.
CHENG Aiguo, WANG Chao, YU Wanyuan, et al. Numerical and Experimental Study on Effects of Rivet Crack on Mechanics Properties of Self-piercing Riveted Joints[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2):197-208.