预钻孔自冲铆接钢/铝接头工艺和性能的仿真与参数化研究

王 超[1] 于万元[2] 解维杰[3*] 成艾国[1] 何智成[1]
1.湖南大学汽车整车先进设计制造全国重点实验室,长沙,410082
2.柳州职业技术大学汽车工程学院,柳州,545001
3.湖南湖大艾盛汽车技术开发有限公司,长沙,410205

摘要:为了系统研究工艺参数对预钻孔自冲铆接钢/铝接头的成形质量和力学性能的影响,提出了考虑铆接工艺过程和接头力学性能的仿真和参数化研究方法。建立了2D轴对称仿真模型来模拟铆接过程,并通过2D-3D一体化的转换方法建立了3D接头仿真模型来模拟接头的力学特性。通过对比试验和仿真的接头截面、失效模式、峰值载荷和能量吸收来验证仿真模型的准确性。基于2D轴对称模型模拟不同的工艺参数,并生成相应的3D接头模型来评估力学性能。基于贡献度和主效应分析研究工艺参数对预钻孔自冲铆接接头的影响,并建立了回归模型来预测接头质量。结果表明,较大的预钻孔直径会导致接头峰值力的降低,但对能量吸收的影响较小;铆钉长度与底切和力学性能正相关。建立的回归模型可用于接头成形质量和力学性能的预测,预测的绝对误差小于8.8%。

关键词:预钻孔自冲铆接;工艺参数;成形质量;力学性能;回归模型
中图分类号:U463.83
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.029 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Simulation and Parametric Study of Process-performance of PH-SPR Steel/Aluminum Joints

WANG Chao[1] YU Wanyuan[2] XIE Weijie[3*] CHENG Aiguo[1] HE Zhicheng[1]
1.State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha, 410082
2.College of Automotive Engineering, Liuzhou Polytechnic University, Liuzhou, Guangxi, 545001
3.Aisn Auto R&D Co., Ltd., Changsha, 410205

Abstract: In order to systematically study the influences of processing parameters on forming quality and mechanics properties of PH-SPR steel/aluminum joints, a simulation and parametric study method was proposed considering the riveting processes and mechanics properties. Firstly, a 2D axisymmetric numerical model was established to simulate the riveting processes, and a 3D numerical model was established through 2D-3D integrated conversion method to simulate the mechanics properties of the joints. The accuracy of numerical models was verified by comparing the cross-section, failure mode, peak force, and energy absorption of tests and simulations. Secondly, based on a 2D axisymmetric model, different processing parameters were simulated and 3D joint models were generated to evaluate the corresponding mechanics properties. Finally, based on contribution and main effect analyses, the influences of processing parameters on PH-SPR joints was studied, and regression models were established to predict joint quality. The results indicate that a larger pre-drilled hole diameter leads to a decrease in peak force of the joints, but has a minimal effect on energy absorption. The rivet length is positively correlated with both undercut and mechanics performance. The established regression model may be used for predicting the forming quality and mechanics properties of PH-SPR joints, with an absolute error of less than 8.8%.

Key words: pre-holed self-piercing riveted (PH-SPR); processing parameter; forming quality; mechanics performance; regression model

0 引言

在汽车工业中,轻量化设计已成为提高能源利用率和减少环境污染的重要途径[1-2]。高强度钢和铝合金因其优异的机械性能和较小的质量而广泛应用于轻质车身制造[3-4]。高强度钢和铝合金的结合可以充分利用两种材料各自的优点,在保证结构强度的同时减小结构质量,从而提高轻量化水平。通常采用自冲铆接(self-piercing rivet-

收稿日期:2025-02-18
基金项目:广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY1097)

ing，SPR）工艺取代传统的焊接工艺[5]来保证钢/铝混合结构的连接强度。

随着碰撞法规标准的升级，车身结构面临日益严格的安全要求，提高高强度钢的材料强度和厚度成为应对以上挑战的有效途径。然而，在连接较厚且抗拉强度偏高的材料时，传统的SPR工艺容易出现铆钉墩粗甚至无法刺穿等问题[6]。ABE等[7]指出传统SPR工艺仅适用于连接抗拉强度低于590 MPa的高强度钢。MORI等[8]通过优化模具的直径和深度，扩大了抗拉强度为980 MPa高强度钢的可连接范围。UHE等[9]开发了一种改进的铆钉几何形状，实现了高强度钢HCT780X和铝合金的可靠连接。van HALL等[10]通过将USIBOR1500钢与硬度更高的铆钉连接，可以获得更高的底切值，但铆钉尾部仍然会出现裂纹。

另一种提升接头质量的可行方案是对铆接区域进行热处理或者快速加热，通过获得局部软化区来降低硬度。例如，DURANDET等[11]提出了激光辅助自冲铆接工艺，激光加热可降低铆接区的钢板硬度，使得铆钉可以顺利刺穿钢板从而改善铆接质量。DENG等[12]提出了一种热辅助自冲铆接工艺，并改善了超高强度钢的铆接质量，且接头强度比传统接头增加了22.5%。上述研究为实现高强度材料的连接做出了重大贡献。然而，改进铆钉和模具的参数或引入新技术，会导致通用性降低、成本增加、工艺复杂化等问题。在传统SPR工艺的基础上，实现更厚的多层高强度钢板的连接仍然面临挑战。在连接高强度的板材组合时，可通过预钻孔来提高接头质量[13]。例如，ZHANG等[14-15]率先采用预钻孔自冲铆接工艺（pre-holed self-piercing riveting，PH-SPR）实现了碳纤维板和钛合金板的高质量连接，该工艺避免了断裂的纤维进入铆钉尾部下方的区域，从而提高了铆钉与钛合金板的互锁强度。CHENG等[16]继而通过PH-SPR工艺实现了高强度钢-铝和高强度钢-高强度钢-铝两种组合的连接，此外还发现较大的孔径可以增强PH-SPR接头的能量吸收。WANG等[17]研究了预钻孔层数对高强度钢-高强度钢-铝组合的影响，结果表明增加预钻孔层数可降低铆接过程所需的铆接力，并通过增加插入铝板的深度来提高接头的力学性能。WANG等[18]进一步研究了高强度钢板的厚度和预钻孔直径对PH-SPR接头的影响，发现PH-SPR接头的力学性能随着预钻孔直径的增大而下降，随着钢板厚度的增大而提高。

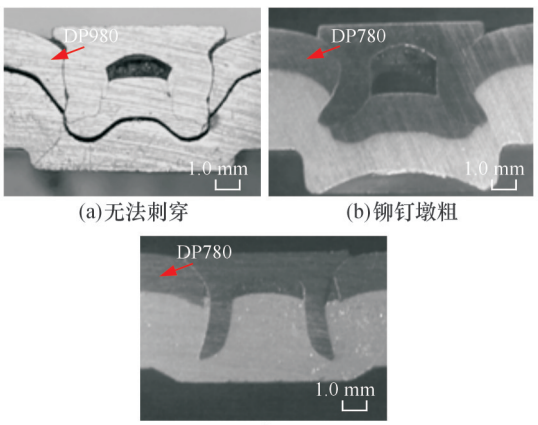
传统的试验方法往往需要投入大量的时间和资源，而有限元仿真可以在虚拟环境中进行多次迭代，显著降低研发成本和时间。成艾国等[19]建立了自冲铆接接头中的微裂纹有限元仿真模型，系统研究了铆钉的裂纹深度、位置和数量对钢-铝自冲铆接接头的力学性能的影响。于万元等[20]通过有限元仿真模型对比研究了传统SPR和PH-SPR在连接钢铝材料时的成形质量的差异，结果表明PH-SPR在连接不同材料组合时具备更高的通用性。RUSIA等[21]提出了一种精益且高效的端到端的有限元仿真方法，同时集成了铆接过程和接头强度分析。该方法可以准确预测新材料组合的成形质量和力学性能。DU等[22]建立了准静态载荷下的SPR接头的三维有限元仿真模型，研究发现增大铆钉长度会导致最小厚度的减小，以及底切和能量吸收的增大。WANG等[23]采用基于LS-DYNA软件的光滑粒子伽辽金算法研究了铆钉和模具参数对铝钢接头的影响。

以上研究结果表明，PH-SPR工艺在连接高强度钢方面表现出良好的成形效果和接头强度，尤其是对于较厚的高强度钢板和多层钢板[16-17]。然而，目前PH-SPR工艺参数的选择仍然依靠大量的试验和工程师的经验，缺乏对工艺参数的系统研究。为了解决以上问题，本文基于有限元仿真研究铆钉硬度、铆钉长度、模具直径、模具深度、预钻孔直径以及板材厚度对PH-SPR接头力学性能的影响，并建立了回归模型来预测接头的成形质量和力学性能。

1　PH-SPR工艺一体化研究流程

当高强度钢的屈服强度偏高或厚度较厚时，使用常规的铆钉进行铆接容易出现无法刺穿钢板或者铆钉墩粗等工艺缺陷，如图1a和图1b所示。此外，铆钉墩粗易产生微裂纹，导致接头在受到外部载荷作用时产生脆性断裂失效[16]。使用预钻孔可以有效避免上层钢板的影响，生成符合质量标准的接头，如图1c所示。

PH-SPR工艺与传统的SPR工艺非常相似，使用相同的设备。通过激光切割工艺在钢板的预定位置加工出预钻孔，在工程实践中，预钻孔操作可在零件冲压过程中完成，基本不会影响后续的连接效率。PH-SPR工艺流程如下[18]：首先将铆钉插入预钻孔中，并与冲头对齐；当冲头向下施加压力时，铆钉会直接刺入下层板；预钻孔避免了铆



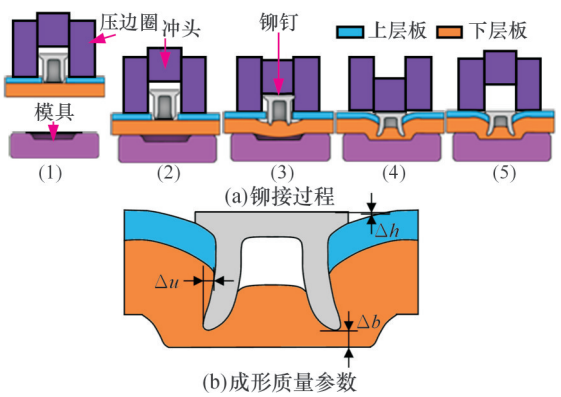
(a)无法刺穿　(b)铆钉墩粗　(c)正常展开

图1　工艺缺陷及PH-SPR接头剖面

Fig.1　Process defects and PH-SPR joint profile

钉刺穿上层板可能遇到的无法刺穿甚至铆钉断裂问题；随着铆钉腿在下层板中逐渐展开，下层板在铆钉的压力下发生塑性变形，最终在铆钉和下层板之间形成机械互锁，如图2a所示。

观察接头的中心剖面是评估SPR接头质量的重要方法。接头沿中心线切割，通过测量剖面上的底切（Δu）、底部厚度（Δb）和钉头高度（Δh）来定量评估接头的成形质量[20]，如图2b所示。底切为铆钉腿的尖端与下层板和铆钉接触区域的最大横向距离，通常要求$\Delta u>0.2$ mm。由于铆钉直接刺入到下层板，导致铆钉尖端处的铝板受到显著压缩。因此将铆钉尖端与下层板的底面之间的垂向距离定义为底部厚度，通常要求$\Delta b>0.2$ mm来避免下层板的局部断裂。钉头高度定义为钉头上表面与上层板的顶部之间的距离，通常要求$|\Delta h|<0.3$ mm来保证表面的平整度。



(a)铆接过程　(b)成形质量参数

图2　PH-SPR铆接工艺

Fig.2　PH-SPR process

与无预钻孔的SPR及其他改进工艺相比，PH-SPR工艺的优点如下：

1）仍然使用传统的SPR设备，提高了工艺的适用性，并可降低成本。预钻孔还可以实现当前改进工艺无法实现的多层钢板的连接，例如钢-钢-铝的组合[17]。

2）由于预钻孔可以避免铆钉刺穿上层板，因此上层板的强度（或硬度）基本不会影响SPR接头质量。此外，预钻孔可以降低铆接过程中铆钉中的应力集中并减小所需的铆接力，从而减小铆接过程所需的能耗[17, 19]。

3）该工艺允许根据下层板的材料特性选择铆钉的硬度[24]。

本文建立的PH-SPR接头工艺-性能的参数化研究流程如图3所示。

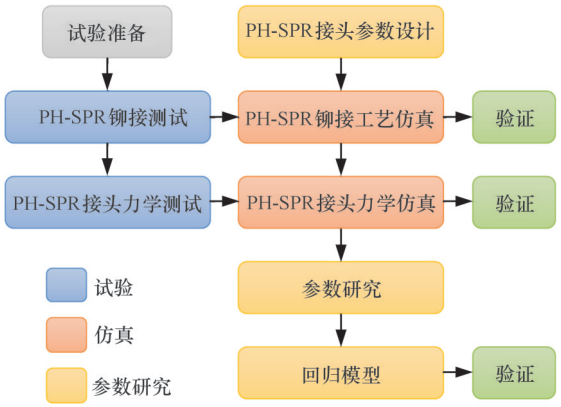


图3　PH-SPR接头工艺-性能一体化研究流程

Fig.3　Process-performance integrated study process of PH-SPR joint

分别通过压缩和拉伸试验获取铆钉和板材的力学参数和应力-应变曲线。经过多次铆接测试选择合适的铆钉和模具参数制作剪切接头，并完成接头的力学测试。以上数据作为仿真分析的基准参考值。

建立了2D轴对称模型来模拟PH-SPR铆接过程，并通过对比试验和仿真的接头截面验证仿真模型的准确性。通过2D-3D一体化转换方法建立了3D接头模型来模拟接头的力学特性，并通过对比失效模式、失效过程、峰值载荷和能量吸收值验证仿真模型的准确性。

基于2D轴对称模型模拟不同的铆钉硬度、铆钉长度、模具直径、模具深度、预钻孔直径以及板材厚度参数，并基于3D接头模型评估相应的力学性能。基于参数评估分析工艺参数对PH-SPR接头的影响，并建立回归模型来预测接头性能。

2　试验材料及方法

2.1　材料属性

本文选择高强度钢DP590和铝合金6063-T6制造PH-SPR接头。DP590是一种具有优异强度和成形性的双相钢，它广泛应用于关键结构部件，如A柱、B柱和前纵梁。虽然DP590钢使用传统

SPR工艺也可以实现铆接，但接头中的铆钉仍然会存在微裂纹[16]。6063-T6因其优异的加工特性也广泛应用于车身的碰撞和能量吸收结构。钢板和铝板的长度为120 mm，宽度为40 mm。钢板的厚度为1.2mm，铝板的厚度为3 mm。钢板预钻孔的直径为5.5 mm，使用激光切割精确开孔。半空心铆钉由一浦莱斯精密技术(深圳)有限公司提供，铆钉由经过锻造和热处理工序的高强度钢制成，硬度等级为H4。铆钉和板材的力学性能和应力-应变曲线分别如表1和图4所示。

表1　力学属性

Tab.1　Mechanics properties

材料	密度ρ/(kg·m^{-3})	弹性模量E/GPa	屈服应力σ_y/MPa	抗拉应力σ_m/MPa
铆钉	7.83×10^3	210	1340	
DP590	7.83×10^3	210	381	760
6063-T6	2.70×10^3	70	244	307

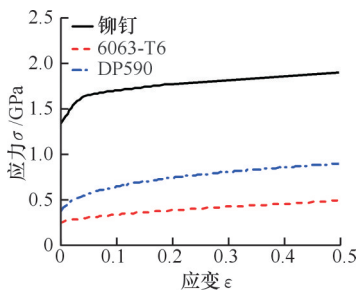


图4　应力-应变曲线

Fig.4　Stress-strain curves

2.2　接头制造

使用一浦莱斯精密技术(深圳)有限公司制造的SPR伺服系统来制造PH-SPR接头，其最大铆接力为80 kN，如图5所示。控制面板中的在线质量监测和管理系统定义了铆接参数。通过一系列初步测试，获得了满足质量要求的铆钉和模具的几何尺寸，分别如图6a和图6b所示。

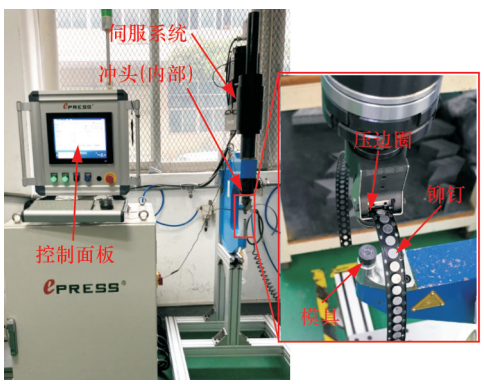


图5　铆接设备

Fig.5　Riveting equipment

2.3　接头力学测试

PH-SPR接头的几何尺寸如图7a所示。为

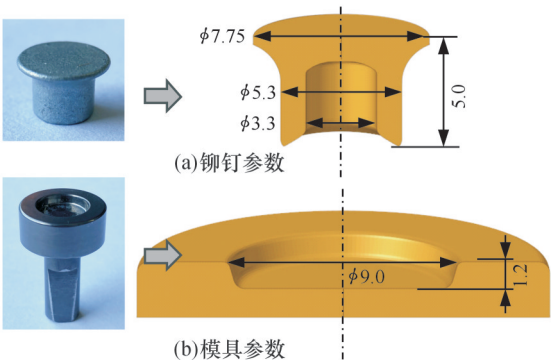
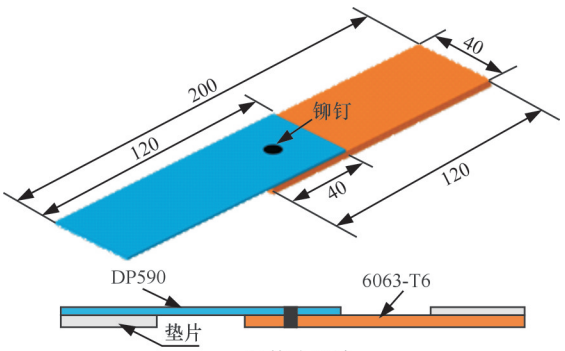


图6　铆钉和模具几何参数

Fig.6　Geometric parameters of rivet and die

消除在测试过程中因夹持不对称导致的误差，在接头两端分别粘贴等厚度的40 mm×40 mm的垫片。室温下，在WANCE ETM105D万能试验机上进行准静态剪切试验，如图7b所示。拉伸速率设置为3.0 mm/min，完成3次重复测试。通过试验机中的传感器记录拉伸过程中的力和位移数据。



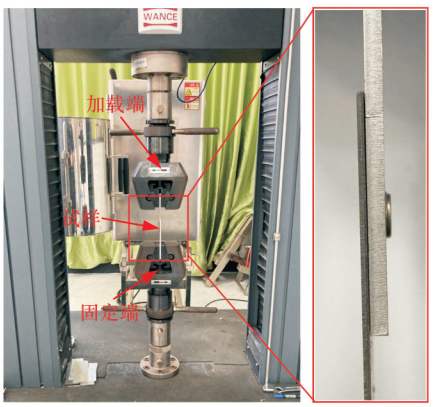


图7　PH-SPR接头设计与力学测试

Fig.7　Design and mechanical test of PH-SPR joints

3　PH-SPR工艺-性能仿真模型的建立与验证

3.1　PH-SPR工艺过程模拟及验证

使用LS-DYNA软件开发了模拟铆接过程的2D轴对称仿真模型。2D轴对称仿真模型如图8a

所示，包括冲头、压边圈、铆钉、上层板和下层板以及模具。网格尺寸定义为0.1 mm×0.1 mm。由于冲头、压边圈和模具在铆接过程中的变形相对较小，因此使用MAT20材料模型将其简化为刚体。对于其余发生大变形的部件，使用MAT24弹塑性材料模型来模拟其塑性变形特性。通过2D类型的surface to surface接触算法和自适应网格生成算法模拟部件之间的接触条件，避免网格畸变的影响。仿真模型参数的详细信息可参考文献[16-19]。将仿真结果与试验结果进行对比，验证模型的准确性。如图8b所示，仿真结果中铆钉和板材的变形与试验结果吻合良好，底切和底部厚度的相对误差分别为3.78%和4.34%。因此该模型可以用于预测不同工艺参数下的接头的成形过程。铆接过程完成后产生的残余应力和应变分别如图8c和图8d所示，残余应力和应变将作为3D接头仿真模型的输入条件。

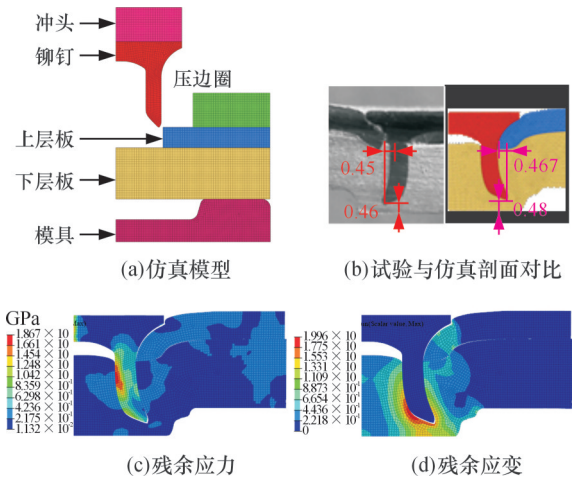


图8 2D轴对称仿真模型

Fig.8 2D axisymmetric numerical model

3.2 PH-SPR接头剪切仿真及验证

为了简化建模过程并降低计算复杂性，SPR接头常用的建模方法是2D-3D转换方法[11]。该方法通过将铆接过程仿真获得的2D网格模型围绕对称轴旋转360°来生成3D网格模型。从铆接过程仿真中获得的残余应力和应变需要用作剪切仿真模型的初始输入。本文开发的Tcl脚本程序可将残余应力和应变从2D网格转换为3D网格，然后使用*INITIAL_STRESS_SOLID和*INITIAL_STRAIN_SOLID关键字实现自动映射。构建的3D网格与剩余的上层板和下层板组装在一起，形成剪切仿真模型。剪切仿真模型如图9所示。模型中仅在铆接区域考虑材料失效，而其他区域仍采用弹塑性材料模型。本文采用Johnson-Cook失效模型(JC模型)来定义板材的损伤。DP590和6063-T6的JC模型参数如表2所示。不考虑材料的温度效应的前提下，JC模型的本构关系可以简化为

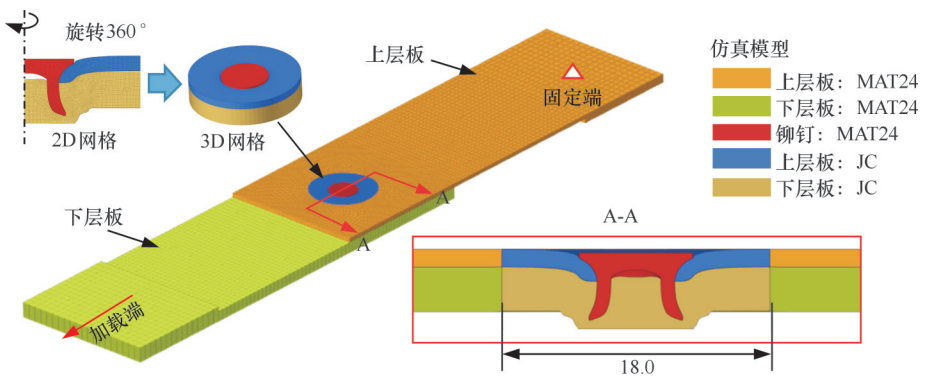


图9 PH-SPR接头仿真模型

Fig.9 PH-SPR joint simulation model

表2 Johnson-Cook模型参数[4,11]

Tab.2 Parameters of Johnson-Cook model[4,11]

材料	A/MPa	B/MPa	n	C	D_1	D_2	D_3	D_4
6063-T6	245	402	0.6286		−13.2	13.32	0.0035	
DP590	392	697	0.4	0.0046	0.7	0.5	5	−0.006

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

式中：A、B、n和C为模型的本构参数；σ为等效应力；ε为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}$为等效塑性应变率；$\dot{\varepsilon}_0$为参考应变率。

在不考虑材料温度效应的情况下，应变断裂公式表示为

$$\varepsilon_f=[d_1+d_2\exp(d_3\eta)]\left(1+d_4\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \tag{2}$$

式中：d_1～d_4为材料损伤参数；ε_f为断裂应变；η为应力三轴度。

图10a显示了试验结果和仿真结果之间的力-位移曲线的对比。可以观察到，从初始变形阶段到最终失效，试验和仿真的力-位移曲线具有较高的一致性。图10b显示了试验结果和仿真结果

之间的力学性能的对比。结果表明，开发的仿真模型可以准确预测PH-SPR接头的峰值载荷和能量吸收，相对误差分别控制在－2.3%和8.5%以内。图11a和图11b显示了试验结果和仿真结果之间上层板和下层板的失效行为的对比。试验和仿真结果中接头的变形行为表现出高度一致性，准确模拟了预钻孔的变形和接头按钮的断裂。图11c显示了接头的整体失效过程，试验和仿真结果中接头的变形模式基本相同。

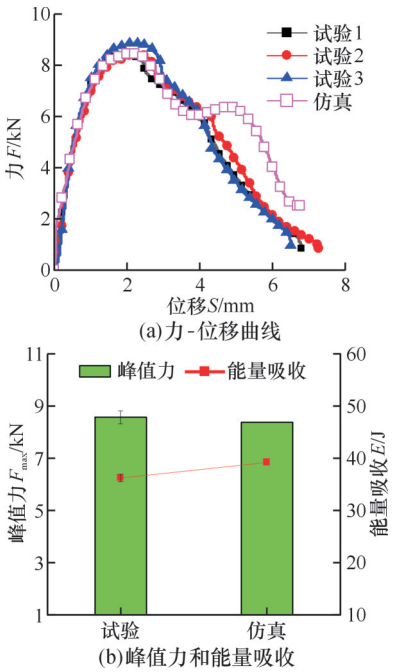


图10　力学性能对比

Fig.10　Comparision of mechanical properties

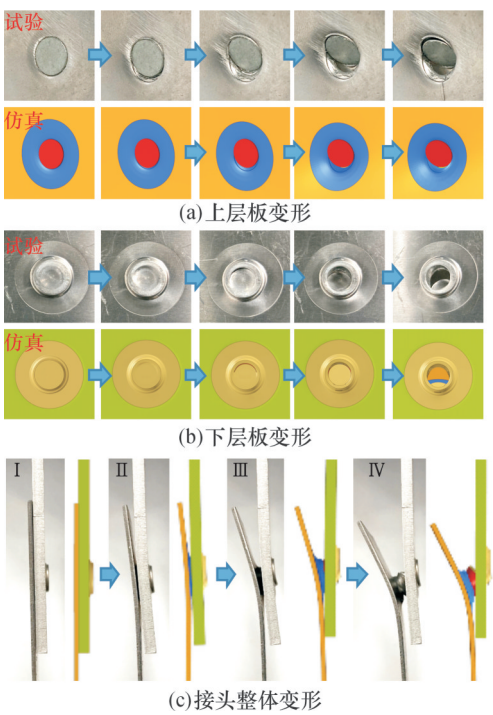


图11　失效模式对比

Fig.11　Comparision of failure mode

4　PH-SPR接头参数设计

由于第3节验证了仿真模型的准确性，因此可以基于仿真模型进行参数研究。对2D轴对称模型定义了铆钉硬度R_s、铆钉长度R_l、模具直径D_d、模具深度D_h、预钻孔直径H_d、上层板厚度T_t和下层板厚度T_b共7种工艺参数，如图12所示。铆钉的屈服强度随着铆钉硬度的增大而增大，因此选择屈服强度来评估铆钉硬度，并通过平移图4中的铆钉的应力-应变曲线来模拟不同硬度的铆钉[24]。尺寸变量均通过HyperMesh软件中的HyperMorph网格变形模块完成定义。表3中列出了上述工艺参数的设计范围。参数值在基准值的基础上浮动。其中，模具和铆钉参数的取值根据厂家提供的标准进行定义，例如实际生产的铆钉长度的间隔通常为0.5 mm。通过在isight软件中建立DOE流程来生成模型，该流程包含了模型生成和LS-DYNA软件求解两个模块。首先使用最优拉丁超立方采样方法生成了50个样本，模型生成模块根据输入的参数生成2D模型。此外，为了防止因网格变形导致的网格畸形问题，开发了网格重划分Tcl脚本，在网格变形后进行网格自动重划分。通过LS-DYNA软件求解，得到不同工艺参数铆接后的剖面形状、残余应力和应变，继而完成3D模型的自动组合和求解。

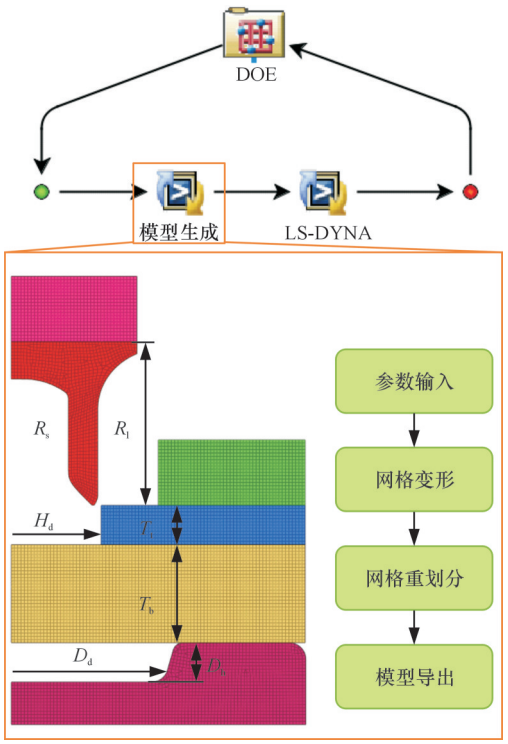


图12　参数设计

Fig.12　Parameter design

表3 参数取值范围

Tab.3 Parameter range

变量	基准值	离散取值范围
模具深度D_h/mm	1.2	1.0,1.2,1.4
模具直径D_d/mm	9.0	8.5,9.0,9.5
预钻孔直径H_d/mm	5.5	5.5,6.0,6.5
铆钉长度R_l/mm	5.0	4.5,5.0,5.5,6.0
铆钉硬度R_s/GPa	1.34	1.0,1.34,1.6
上层板厚度T_t/mm	1.2	1.0,1.2,1.4,1.6
下层板厚度T_b/mm	3.0	2.0,2.5,3.0

5 结果与讨论

5.1 参数的影响研究

通过归一化灵敏度可以直观分析每种工艺参数的贡献度。归一化灵敏度N_i计算方法如下：

$$N_i=\frac{S_i}{\sum_{i=1}^{n}|S_i|} \tag{3}$$

式中：S_i为第i个变量的灵敏度值。

采用主效应分析展示单一输入变量的变化对输出响应的影响。工艺参数的值需归一化处理：

$$x_i=\frac{x_{i0}-x_{\min 0}}{x_{\max 0}-x_{\min 0}} \tag{4}$$

式中：x_i、x_{i0}分别为采样点的归一化值和原始值；$x_{\min 0}$、$x_{\max 0}$分别为采样点的最小值和最大值。

5.1.1 工艺参数对成形质量参数的影响

图13为工艺参数对底切和底部厚度的贡献度和主效应图。由图13a可知，铆钉长度与底切之间成正相关，其他工艺参数均与底切成负相关。因此，改善PH-SPR接头底切的最有效方法是增加其铆钉长度。负相关的参数中，上层板厚度的贡献度的绝对值最高，这是因为更大的上层板厚度会导致铆钉刺入下层板的深度减小，从而引起底切的减小。较大的下层板厚度会导致铆钉与模具的距离增加，铆钉展开所需的阻力随之减小，从而导致了底切的减小[23]。屈服强度更高的铆钉在铆接过程中更难变形，因此导致了底切的减小。模具尺寸的增大会导致模具空腔体积增大，降低了铆钉体积与空腔体积比，会导致铆钉更难展开。图13c的主效应图表明，部分工艺参数存在二次效应。铆钉长度的主效应曲线的斜率随着铆钉长度的增大而增大，说明在铆钉长度较小时，增大铆钉长度对底切的贡献相对较小。对于下层板厚度，底切表现出先增大后减小的趋势，底切减小占据主导。底切与底部厚度表现出相反的趋势，如图13b所示。增大铆钉长度和屈服强度会减小底部厚度，而增大板材厚度和模具尺寸会增大底部厚度。图13d的主效应图表明，工艺参数对底部厚度的影响主要成线性相关，未体现出二次效应。

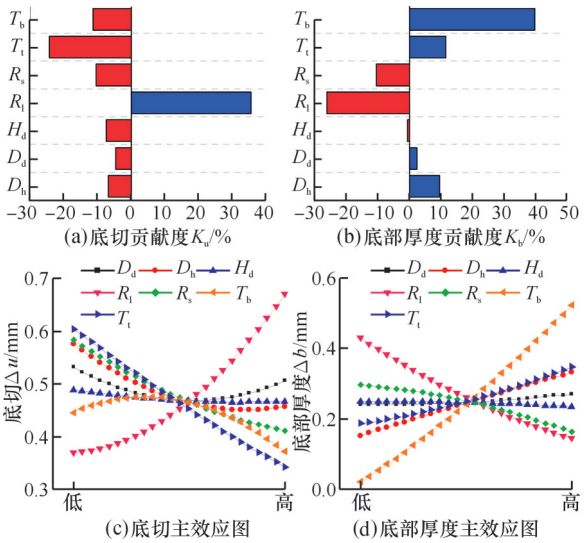


图13 工艺参数对底切和底部厚度的贡献度和主效应图

Fig.13 Contribution and main effect diagram of process parameters to undercut and bottom thickness

5.1.2 工艺参数对力学性能的影响

图14为工艺参数对峰值力和能量吸收的贡献度和主效应图。图14a和图14b表明，增大铆钉长度和下层板厚度可以同时改善接头峰值力和能量吸收。这是因为增大铆钉长度可以显著改善底切，增加机械互锁；下层板厚度的增大增强了接头刚度，减小了板材变形，从而承受了更大的剪切力。此外，增大上层板厚度可提高接头刚度并降低机械互锁，所以接头峰值力提高，但能量吸收表现出下降趋势。因此当上层板较厚时，需要考虑增大下层板厚度和铆钉长度来改善接头力学性

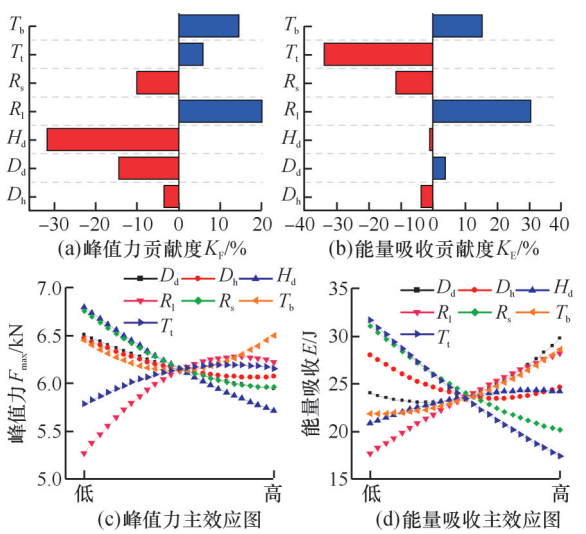


图14 工艺参数对峰值力和能量吸收的贡献度和主效应图

Fig.14 Contribution and main effect diagram of process parameters to peak force and energy absorption

能。增大预钻孔直径会降低接头峰值力，但对能量吸收影响较小。这是因为预钻孔降低了对铆钉头的束缚作用，增大了铆接孔处的变形。由于铆钉屈服强度的提高会导致底切的减小，因此接头的峰值力和能量吸收均降低。模具尺寸对接头力学性能主要表现出负相关影响，因此在满足成形的前提下，应尽量选择小的模具。图14c和图14d的主效应图表明，工艺参数对力学性能的影响存在二次效应。上层板厚度和铆钉长度对峰值力的贡献随着铆钉长度的增大而降低。峰值力随着下层板厚度增大表现出先减小后增大的趋势。工艺参数对能量吸收表现出的二次效应较小，基本成线性相关。

5.1.3　成形质量参数对力学性能的影响

图15显示了成形质量参数对PH-SPR接头力学性能的总体影响。结果表明，底部厚度的变化对接头峰值力和能量吸收小于底切的影响，这是因为底切是接头形成机械互锁的主要部分。此外，增大底切和底部厚度均会使PH-SPR接头的峰值力和能量吸收增大，但峰值力增大的速率随着底切的增大而逐渐降低。这是因为PH-SPR接头的连接强度取决于机械互锁强度以及板材的材料强度，当互锁强度超过了板材的材料强度时接头的连接强度仅由材料强度决定。

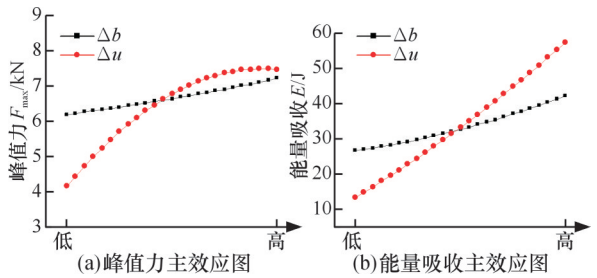


图15　成形质量对峰值力和能量吸收的主效应图

Fig.15　Main effect diagram of forming quality on peak force and energy absorption

5.1.4　讨论

铆钉长度对底切和力学性能的影响最为显著。铆钉长度的增大不仅能显著改善底切，还能增强接头的机械互锁，从而提高峰值力和能量吸收能力。虽然增大上层板厚度可以提高接头刚度，但对能量吸收的贡献却呈降低趋势。这表明在设计时需要权衡上层板的厚度，以保持良好的力学性能。下层板厚度与峰值力和能量吸收均表现出正相关的关系。增大下层板厚度可有效增强接头的刚度，减小板材的变形，增大承受的剪切力。模具尺寸与力学性能成负相关关系，需要在满足成形要求的前提下尽量选用小的模具尺寸，以避免对接头性能的负面影响。较大的预钻孔直径虽然会降低接头的峰值力，但对能量吸收的影响较小，因此在实际应用中可以适当增大孔径来降低对准的难度。

5.2　回归模型的建立及验证

响应面法（response surface methodology，RSM）是一种用于构建回归模型的统计方法，主要用于研究和优化复杂的系统响应。基于第4节中的50个样本点，使用三阶多项式模型构建响应面模型，并通过最小二乘法拟合模型，确定多项式模型的系数。三阶多项式模型可以捕捉复杂的非线性关系，其一般形式如下：

$$Y=a_0+\sum_{i=1}^{n}b_iX_i+\sum_{i=1}^{n}c_iX_i^2+\sum_{i\neq j}^{n}d_{ij}X_iX_j+\sum_{i=1}^{n}e_iX_i^3 \tag{5}$$

式中：Y为响应变量；a_0为常数；b_i、c_i、d_{ij}和e_i为模型的系数；X_i、X_j为输入变量。

为保证模型精度，通过R^2相关系数法作误差分析，计算表达式为

$$R^2=1-\frac{\sum_{k=1}^{K}(y_k-Y_k)^2}{\sum_{k=1}^{K}(y_k-\bar{y}_k)^2} \tag{6}$$

式中：K为检测样本点数量；y_k为第k个响应的仿真值；Y_k为第k个响应的近似模型预测值；$\bar{y}_k$为y_k的均值。

R^2是一个小于或等于1的正值，较大的R^2值意味着更高的拟合精度。

模具深度D_h、模具直径D_d、预钻孔直径H_d、铆钉长度R_l、铆钉屈服强度R_s、上层板厚度T_t和下层板厚度T_b分别由X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6和X_7表示。底切Δu、底部厚度Δb、峰值力F_{max}和能量吸收E的响应面回归模型分别如下所示：

$$\begin{aligned}\Delta u=&-6.261-0.619X_1-0.321X_2+2.535X_3+\\&1.377X_4+1.397X_5-0.568X_6-1.798X_7+0.499X_1^2+\\&0.108X_2^2-0.021X_3^2+0.118X_4^2+0.141X_5^2-2.249X_6^2-\\&0.244X_7^2-0.42X_1X_2+0.154X_1X_3+0.164X_1X_4+\\&0.515X_1X_5+0.914X_1X_6-0.259X_1X_7-0.123X_2X_3-\\&0.163X_2X_4-0.202X_2X_5+0.245X_2X_6+0.148X_2X_7-\\&0.21X_3X_4-0.299X_3X_5-0.161X_3X_6+0.105X_3X_7+\\&0.135X_4X_5-0.128X_4X_6+0.12X_4X_7-0.097X_5X_6+\\&0.174X_5X_7+0.352X_6X_7+0.695X_6^3\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\Delta b=&35.895+0.163X_1-3.444X_2-2.502X_3-\\&2.25X_4-1.263X_5-24.482X_6-2.971X_7+\\&0.521X_1^2+0.157X_2^2+0.155X_3^2+0.369X_4^2+\\&0.116X_5^2+19.108X_6^2+0.099X_7^2-0.285X_1X_2+\\&0.043X_1X_3+0.05X_1X_4+0.886X_1X_5+\\&0.175X_1X_6-0.16X_1X_7+0.144X_2X_3-\\&0.015X_2X_4-0.021X_2X_5+0.258X_2X_6-\\&0.04X_2X_7-0.062X_3X_4-0.236X_3X_5-\\&0.045X_3X_6-0.009X_3X_7+0.217X_4X_5-\\&0.29X_4X_6-0.504X_4X_7-0.005X_5X_6+\end{aligned}$$

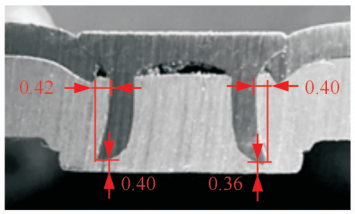
$$0.039X_5X_7+0.086X_6X_7-5.509X_6^3 \quad (8)$$

$$F_{max}=-308.346-5.89X_1+35.809X_2+16.212X_3+12.886X_4-12.574X_5+269.906X_6-16.504X_7-7.992X_1^2-2.03X_2^2-0.762X_3^2-1.847X_4^2-1.886X_5^2-219.322X_6^2-1.842X_7^2+1.822X_1X_2+0.42X_1X_3+0.197X_1X_4-1.993X_1X_5+3.966X_1X_6+1.113X_1X_7-0.951X_2X_3+0.171X_2X_4+1.458X_2X_5-0.972X_2X_6+0.848X_2X_7-0.407X_3X_4+1.189X_3X_5-0.828X_3X_6+0.408X_3X_7-1.238X_4X_5+1.366X_4X_6+2.799X_4X_7+3.862X_5X_6+0.082X_5X_7+1.04X_6X_7+57.478X_6^3 \quad (9)$$

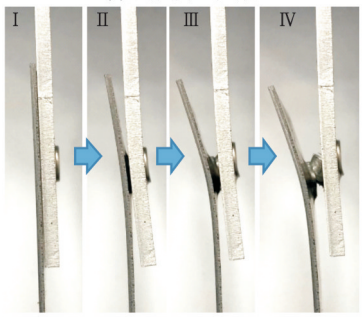
$$E=-268.846-127.591X_1-59.662X_2+78.599X_3+34.068X_4+251.163X_5+577.122X_6-74.574X_7-13.892X_1^2+1.7X_2^2-8.762X_3^2-9.074X_4^2+2.433X_5^2-514.278X_6^2-4.248X_7^2-6.561X_1X_2-3.349X_1X_3+29.327X_1X_4+43.131X_1X_5+25.168X_1X_6+0.129X_1X_7+8.559X_2X_3+0.4X_2X_4-16.474X_2X_5-2.572X_2X_6+3.63X_2X_7-1.826X_3X_4-19.876X_3X_5-13.054X_3X_6+2.44X_3X_7-13.31X_4X_5+10.993X_4X_6+13.278X_4X_7+11.118X_5X_6-1.214X_5X_7-4.357X_6X_7+146.565X_6^3 \quad (10)$$

此外底切 Δu、底部厚度 Δb、峰值力 F_{max} 和能量吸收 E 的响应面回归模型的 R^2 值分别为0.978、0.975、0.914和0.948，满足精度要求。

基于建立的回归模型，预测了模具深度 D_h=1.2 mm、模具直径 D_d=9 mm、预钻孔直径 H_d=6.0 mm、铆钉长度 R_l=5.0 mm、铆钉屈服强度 R_s=1.34 GPa、上层板厚度 T_t=1.2 mm和下层板厚度 T_b=3.0 mm对应接头的成形质量和力学性能，并进行了试验对比。当前参数下的试验数据如图16所示。回归模型的预测值与试验值的对比结果见表4。由表4可知，最大绝对误差为峰值力 F_{max} 的8.8%，最小绝对误差为底部厚度 Δb 的2.4%。整体上，回归模型的预测误差均小于10%，满足工程要求。



(a)成形质量参数



(b)接头失效过程

图16 接头剖面和失效过程

Fig.16 Cross-section profile and failure process of joint

表4 回归模型预测误差分析

Tab.4 Prediction error analysis of regression model

目标	试验值	预测值	误差/%
Δu/mm	0.41	0.428	4.4
Δb/mm	0.38mm	0.389	2.4
F_{max}/kN	8.4	7.66	−8.8
E/J	33.5	35.9	7.2

6 结论

(1)本文建立了2D轴对称仿真模型，预测PH-SPR接头的底切和底部厚度的相对误差分别为3.78%和4.34%。通过2D-3D一体化的转换方法建立了3D接头仿真模型，预测PH-SPR接头的峰值载荷和能量吸收的相对误差分别为−2.3%和8.5%以内。

(2)基于2D轴对称模型模拟不同的工艺参数，并生成3D接头模型评估相应的力学性能。基于贡献度和主效应分析研究工艺参数对预钻孔自冲铆接接头的影响。底部厚度的变化对接头峰值力和能量吸收的影响小于底切。铆钉长度与底切成正相关，其他工艺参数均与底切成负相关。增大铆钉长度和下层板厚度可以同时改善接头峰值力和能量吸收。

(3)使用三阶多项式模型构建了响应面模型，并通过最小二乘法拟合模型，确定多项式模型的系数。回归模型预测的最大绝对误差为峰值力 F_{max} 的8.8%，最小绝对误差为底部厚度 Δb 的2.4%，满足工程要求。

参考文献：

[1] 黄志超，胡兆骁，刘帅红，等. SPFC440钢/5052铝自冲铆接头与胶铆复合接头腐蚀性能对比[J]. 中国机械工程，2022，33(11)：1345-1352.
HUANG Zhichao，HU Zhaoxiao，LIU Shuaihong，et al. Comparison of Corrosion Properties of SPFC440 Steel / 5052 Aluminum Self-piercing Riveting Joints and Adhesive Bond-riveted Hybrid Joints[J]. China Mechanical Engineering，2022，33(11)：1345-1352.

[2] ZHUANG Weimin，CHEN Shen，LIU Yang. Influence of Joining Temperature on Damage of Warm Self-piercing Riveted Joints in Carbon Fiber Reinforced Polymer and Aluminum Alloy Sheets[J]. Journal of Manufacturing Processes，2023，89：77-91.

[3] 王超，成艾国，张承霖，等. 面向刮底安全的电池包防护结构轻量化设计[J]. 中国机械工程，2023，34(19)：2343-2352.
WANG Chao，CHENG Aiguo，ZHANG Chenglin，et al. Lightweight Design of Protective Structures of Battery Packs for Bottom-scraping Safety[J]. China Mechanical Engineering，2023，34(19)：2343-2352.

[4] 任宝凯，周亢，王刚. 超声振动辅助铝/钢电阻点焊接头形成机理研究[J]. 机械工程学报，2024，60(22)：139-152.
REN Baokai，ZHOU Kang，WANG Gang. Exploring the Formation Mechanism of Aluminum/Steel Resistance Spot Welding Joint Assisted by Ultrasonic Vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering，2024，60(22)：139-152.

[5] 黄志超，刘晓坤，夏令君，等. 自冲铆接、无铆钉铆接与电阻点焊强度对比试验研究[J]. 中国机械工程，2012，23(20)：2487-2491.
HUANG Zhichao，LIU Xiaokun，XIA Lingjun，et al. Joining Strength Comparison among Self-piercing Riveting，Clinching and Resistance Spot Welding[J]. China Mechanical Engineering，2012，23(20)：2487-2491.

[6] ANG H Q. 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)：2.

[7] ABE Y，KATO T，MORI K. Self-pierce Riveting of Three High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets[J]. International Journal of Material Forming，2008，1(1)：1271-1274.

[8] 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.

[9] UHE B，KUBALL C M，MERKLEIN M，et al. Improvement of a Rivet Geometry for the Self-piercing Riveting of High-strength Steel and Multi-material Joints[J]. Production Engineering，2020，14(4)：417-423.

[10] Van HALL S N，FINDLEY K O，CAMPBELL A M. Evaluating the Performance of Current Self-pierce Rivet Technology for the Joining of High Strength Steel and Aluminum Alloys[C]//Volume 2：Processing. American Society of Mechanical Engineers，2014：V002T02A075.

[11] DURANDET Y，DEAM R，BEER A，et al. Laser Assisted Self-pierce Riveting of AZ31 Magnesium Alloy Strips[J]. Materials & Design，2010，31：S13-S16.

[12] DENG Lin，LOU Ming，LI Yongbing，et al. Thermally Assisted Self-piercing Riveting of AA6061-T6 to Ultrahigh Strength Steel[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering，2019，141(10)：101006.

[13] SU Hailiang，DENG Kaibiao，YANG Dayong，et al. Performance and Failure Analysis of Perforated CFRP/Aluminum Alloy Bonding and Self-piercing Riveting Hybrid Joints[J]. Engineering Failure Analysis，2024，156：107803.

[14] ZHANG Xianlian，HE Xiaocong，XING Baoying，et al. Pre-holed Self-piercing Riveting of Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates and Commercially Pure Titanium Sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology，2020，279：116550.

[15] ZHANG Xianlian，ZHANG Qing，XING Baoying，et al. Fatigue and Fretting Behaviors of Self-piercing Riveting in Carbon-fiber-reinforced Polymer Laminates and Titanium Sheets with Pre-drilling Operation[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2025，34(16)：17420-17430.

[16] CHENG Aiguo，WANG Chao，SUN Youping，et al. Effects of Hole Sizes and Stack Thicknesses on Mechanical Properties and Failure Behavior of Pre-holed Self-piercing Riveted Steel-Aluminum Joints[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2025，34(11)：9681-9700.

[17] WANG Chao，YU Wanyuan，CHENG Aiguo，et al. Study on the Failure Mechanism and Mechanical Properties of Multi-layer Hole-drilled Self-piercing Riveted Three-layer Steel/Aluminum Hybrid Joints[J]. Engineering Failure Analysis，2024，164：108681.

[18] WANG Chao，YU Wanyuan，CHENG Aiguo，et al. Study on the Effects of Hole Diameter and Sheet Thickness on Quasi-static and Fatigue Behaviors of Pre-holed Self-piercing Riveted Steel-Aluminium Joints[J]. International Journal of Fatigue，2025，193：108761.

[19] 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.

[20] 于万元，王超，陈涛，等. 自冲铆接和预穿孔自冲铆接的钢/铝板成形质量的数值模拟研究[J]. 锻压技术，2025，50(4)：183-194.
YU Wanyuan，WANG Chao，CHEN Tao，et al. Numerical Simulation Study on Forming Quality for Steel/Aluminium Sheet by Self-piercing Riveting and Pre-punched Self-piercing Riveting[J]. Forging & Stamping Technology，2025，50(4)：183-194.

[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] 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.

[23] 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.

[24] WANG C，DU Z，CHENG A，et al. A Comparative Study on Self-piercing Riveting and Pre-holed Self-piercing Riveting of High-strength Steel and Aluminum Alloy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part L：Journal of Materials：Design and Applications，2024，239(7)：1-21.

（编辑　王旻玥）

作者简介：王　超，男，1989年生，博士研究生。主要研究方向为异种材料机械连接工艺、碰撞安全及轻量化。E-mail：wangchao_aisn@126.com。**解维杰***（通信作者），男，1993年生，工程师。研究方向为碰撞安全及轻量化。E-mail：18589823897@163.com。

本文引用格式：

王超，于万元，解维杰，等. 预钻孔自冲铆接钢/铝接头工艺和性能的仿真与参数化研究[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2362-2371.

WANG Chao，YU Wanyuan，XIE Weijie，et al. Simulation and Parametric Study of Process-performance of PH-SPR Steel/Aluminum Joints[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(9)：2362-2371.