

铝/钢薄板无铆连接接头成形过程及形貌控制

张山寅¹, 杨俊锋¹, 芦跃峰², 余超¹, 肖宏¹, 仇平¹

(1.燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2.中国重型机械研究院股份公司, 西安 710018)

摘要: **目的** 研究铝/钢薄板无铆连接过程中接头形貌的影响因素。**方法** 采用有限元模拟方法分析了铝/钢薄板在平底模具下接头形貌的成形过程。结合变形区域的金属流动情况, 解释了互锁结构的形成机理, 并分析了不同工艺参数对接头形貌的影响。**结果** 接头互锁结构主要是依靠铝板填充钢板的凹陷部位而形成的, 抑制钢板与模具接触一侧的金属流动有助于接头底部和侧壁的钢板拉薄, 进而形成内部凹陷, 促进互锁结构的形成。摩擦系数对接头形貌参数影响较大, 增大摩擦系数可显著提高接头的互锁量。**结论** 冲头半径、冲头圆角、凹模深度以及摩擦系数对颈厚值和互锁量均有显著影响。通过控制这些影响因素, 可以得到良好的接头。此外, 接头的失效形式以铝板颈厚较薄处的剪断失效为主, 因此对于采用铝上钢下的无铆连接, 保证颈厚值相对于互锁量更加重要。

关键词: 无铆连接; 成形控制; 应力分析; 互锁结构

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.006

中图分类号: TG376.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)05-0044-10

Forming Process and Morphology Control of Mechanical Clinch Joint of Steel/Aluminum Sheet

ZHANG Shan-yin¹, YANG Jun-feng¹, LU Yue-feng², YU Chao¹, XIAO Hong¹, QIU Ping¹

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China;

2. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

ABSTRACT: The work aims to study the affecting factors on morphology of joint of steel/aluminum sheet in mechanical clinch. The forming process of joint morphology of steel/aluminum sheet in flat bottom die was simulated by finite element method. The formation mechanism of interlocking structure was explained based on the metal flow in each region, and the effect of different process parameters on morphology of joint was analyzed. The interlocking structure of the joint was mainly formed by filling the concave part of the steel sheet inside the joint with aluminum sheet. Inhibiting the metal flow on the side of the steel sheet in contact with the die was conducive to thinning the steel sheet at the bottom and the side wall of the joint, thus forming the internal concave and promoting the formation of the interlocking structure. The friction coefficient had a great effect on the morphology parameters of joint, and increasing the friction coefficient could significantly improve the interlocking quantity of

收稿日期: 2022-09-02

Received: 2022-09-02

基金项目: 中央引导地方科技发展资金 (226Z1809G)

Fund: The Central Guidance on Local Science and Technology Development Fund (226Z1809G)

作者简介: 张山寅 (1999—), 男, 硕士生, 主要研究方向为异种金属无铆连接成形工艺。

Biography: ZHANG Shan-yin (1999-), Male, Postgraduate, Research focus: dissimilar metal riveting forming process.

通讯作者: 仇平 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属塑性加工新工艺及新技术。

Corresponding author: QIU Ping (1969-), Male, Doctor, Professor, Research focus: new metal plastic processing technologies.

引文格式: 张山寅, 杨俊锋, 芦跃峰, 等. 铝/钢薄板无铆连接接头成形过程及形貌控制[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 44-53.

ZHANG Shan-yin, YANG Jun-feng, LU Yue-feng, et al. Forming Process and Morphology Control of Mechanical Clinch Joint of Steel/Aluminum Sheet[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 44-53.

joint. The punch radius, punch fillet, die depth and friction coefficient all have a significant effect on the neck thickness and the interlocking quantity. By controlling these affecting factors, a good joint can be obtained. In addition, the failure mode of the joint is mainly the shear failure at the thinner neck of the aluminum sheet. Therefore, for the mechanical clinch with the aluminum sheet at top and the steel sheet at bottom, it is more important to ensure the neck thickness than the interlocking quantity.

KEY WORDS: mechanical clinch; forming control; stress analysis; interlocking structure

使用铝/钢混合车身是实现汽车轻量化的一个有效途径,无铆连接技术作为一种新型冷连接技术,克服了传统连接技术在铝/钢板材连接中的诸多缺陷,逐渐被应用到工业领域^[1-6]。庄蔚敏等^[7]通过建立 Al6061 与 DC04 连接的有限元模型,研究了模具模腔底部带有凹槽时零件的连接状态,总结出了在该模具条件下较为理想的模具参数。杨慧艳等^[8]利用有限元方法对分瓣模具下 Al5052-Al5052 之间的连接效果进行了研究,对分瓣模具连接接头进行了金属流动分析,并进行了接头强度计算。韩晓兰等^[9]用一对平模具对无铆连接接头进行压紧,用铆钉增加接头强度,通过拉伸强度试验和剪切强度试验,对压缩接头的质量进行了评价。Ali 等^[10]采用无铆连接方法对冷弯型钢桁架进行了研究,并采用基于有限元法的动态显式方法,分析了连接过程中几何参数和力学参数对混合连接的影响,此外,对纯拉伸试验进行了数值计算,获得了组件的机械强度。Lei 等^[11]在研究铝合金与铝合金的无铆连接接头过程中,在两板之间加入了一层泡沫铜层,发现铝合金-泡沫铜-铝合金夹芯接头的抗剪强度提高了 5%,但泡沫铜中间层对剥离强度影响不大,其抗疲劳性能优于铝合金-铝合金接头的。张杰等^[12]利用分瓣模具实现了以铝合金为基板、泡沫镍为中间层的连接,发现泡沫镍中间层对接头的失效形式没有影响,但会影响接头的成形性,且中间层厚度越大,接头越难成形。

目前,对于无铆连接技术的研究主要以模腔底部带有凹槽的模具和分瓣模具为主,大多数学者以轻合金为主要研究对象^[13-16]。模腔底部带有凹槽的模具加工难度较大,模腔内部表面质量难以保证。分瓣模具结构复杂,加工难度大。相比之下,平底模具^[17]具有加工成本低、模腔内部表面状态容易改变、装配工艺简单等诸多优点。平底模具无铆连接接头断面^[18-19]如图 1 所示,其中 T_1 、 T_2 为板材原始厚度, T_n 为颈厚值,是接头成形后靠近冲头一侧板材在接头颈部处的最小厚度值, T_u 为互锁量,指的是接头成形后颈部处两板的相互嵌入量。为了保证接头的强度和互锁能力,互锁量和颈厚值都应尽可能的大,但由于模具结构和金属变形能力的限制,两者往往不能兼顾^[20-23]。以往关于接头成形机理的研究较少,关于各种工艺参数对接头形貌的影响研究也缺乏全面分析,因此难以对工艺参数进行合理优化。有限元模拟可以高效地对金

属塑性成形工艺参数进行优化,并节约试验成本^[24-26]。文中通过有限元法模拟了铝/钢薄板无铆连接接头成形过程中应变和应力的变化情况,分析了接头颈厚值和互锁量的形成原因,研究了不同工艺参数对接头形貌的影响,通过合理的工艺参数进行无铆连接试验,得到的接头具有良好的连接性能。

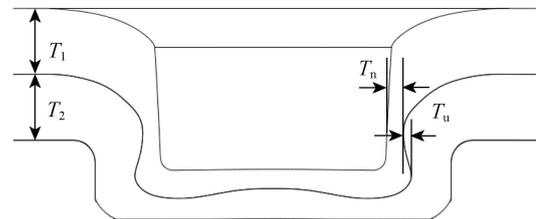


图 1 平底模具无铆连接接头断面

Fig.1 Cross section of mechanical clinch joint of flat bottom die

1 铝/钢无铆连接成形过程有限元模拟

1.1 有限元模型的建立

利用 ABAQUS 软件建立采用平底模具连接的铝/钢薄板无铆连接模型,模型结构和参数尺寸如图 2 所示,为方便脱模,冲头锥度为 1:10。铝板靠近冲头一侧,钢板靠近凹模一侧,基于接头的几何对称性和边界条件对称性建立轴对称模型并进行分析。由于参

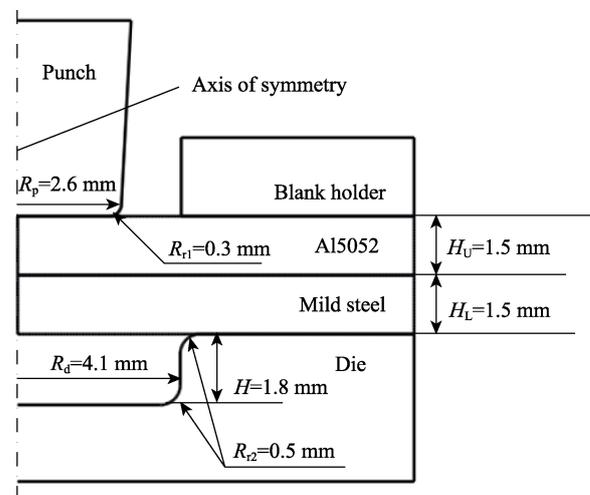


图 2 无铆连接几何模型结构和参数尺寸

Fig.2 Structure and dimension parameters of geometric model in mechanical clinch

与变形的主要是被连接件, 所以将冲头、压边圈和凹模设置为刚体。

采用 Inspekt100 table 增强型万能试验机分别测出 Al5052 和低碳钢的工程应力曲线, 并转化为材料的真实应力-应变曲线, 得到的材料参数如表 1 所示。在 ABAQUS 中将定义的材料属性赋予截面, 再将相应的截面赋予实体以完成材料模型的定义。

表 1 无铆连接材料参数
Tab.1 Material parameters of mechanical clinch

Material	Density/(kg·m ⁻³)	Yield strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
Al5052	2 720	137	68.9	0.32
Mild steel	7 850	180	210	0.25

在成形过程中, 冲头与上板、压边圈与上板、上板与下板、下板与凹模之间均发生接触, 切向作用设置为罚函数, 法向作用为硬接触。主要的边界条件有 3 个: 凹模限制 6 个自由度; 冲头行程直接控制接头的底厚值, 文中选择 2.5 mm/s 的速度边界条件; 对压边圈施加一个沿冲头移动方向的 0.001 mm 位移, 使其被连接件固定。设置种子尺寸为 0.05 mm, 单元类型为线性减缩积分单元中的 CAX4R, 共划分网格单元 12 003 个。

1.2 应变分析

通过上述有限元模型模拟得到等效应变如图 3

所示, 从图 3a 可以看出, 在成形初期, 铝板与冲头圆角接触的部位有较大变形。在钢板与凹模未接触之前, 铝板与冲头接触部位发生的变形主要为剪切变形, 如图 3b 所示, 这一阶段要求靠近冲头一侧板材有较好的塑性, 若将钢板放置在靠近冲头一侧, 钢板会在强剪切作用下发生断裂^[14]。

当钢板与凹模接触后, 铝板接头颈部在冲头作用下被拉薄, 冲头底部接触区金属只能沿径向流动, 开始形成互锁结构。此时, 等效应变最大的部位仍然发生在铝板与冲头圆角接触部位, 如图 3c 中 A 区域所示。A 处的变形对 B 处金属向凹模底部的流动形成限制, 进一步加载后, 在冲头压力的作用下, 凹模底部的空腔主要由 C 处金属的径向流动填充, 进而形成互锁结构。在互锁结构形成过程中, 钢板与凹模接触的边缘部分不断有新的金属在凹模底部沿径向向外流动, 这导致该区域的金属变形最大。互锁结构形成之后, 最大等效应变发生的部位转移至钢板与凹模接触的部位, 如图 3d 中 D 区域所示。

1.3 应力分析

钢板的变形抗力远大于铝板的变形抗力, 钢板的变形对接头的形貌起着更为关键的作用, 因此对成形过程中钢板应力变化进行重点分析。将钢侧接头划分为 3 个区域, 如图 4 所示, 其中 Q_1' 、 Q_2' 、 Q_3' 为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 的初始位置。

各区域的应力曲线如图 5 所示。从图 5a 可以看

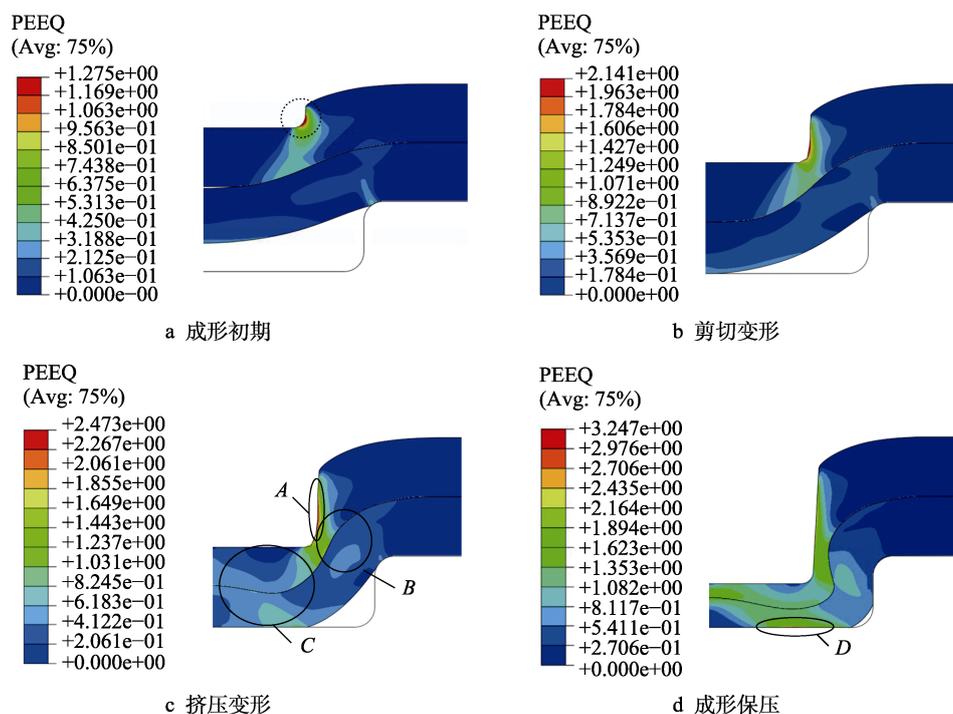


图 3 接头成形过程中的等效应变

Fig.3 Equivalent strain in joint forming process: a) early forming stage; b) shear deformation; c) extrusion deformation; d) forming pressure holding

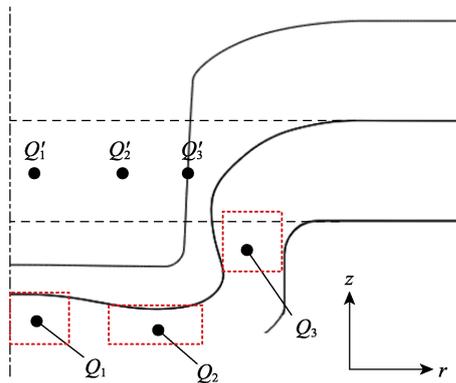


图 4 接头钢侧区域划分
Fig.4 Division of joint at steel sheet side

出, 在钢板接触凹模之前, Q_1 区域周向和径向受拉应力, 轴向应力基本为 0, 因为该阶段钢板主要在径向和周向发生拉伸变形。当变形进行到 1.55 s 左右时, Q_1 区域受到的轴向压应力迅速增大, 所受径向和周向拉应力瞬间减小, 因为此时钢板与凹模的接触使此区域受到短暂的挤压, 应力方向发生了改变。铝板与钢板在靠近冲头轴线部位出现了缝隙, 这导致 Q_1 区域所受各向压应力均有所减小。随着冲头继续移动, 1.66 s 之后 Q_1 区域受到三向压应力。

Q_2 区域的应力曲线如图 5b 所示。在成形初始阶段, 由于钢板要发生胀形变形, 径向和周向受拉应力, 轴向受很小的压应力。在钢板与凹模接触之后, 轴向压应力增大, 这是因为与 Q_2 区域接触的铝板一侧金属开始发生轴向流动而向钢板填充, 导致钢板一侧 Q_2 区域的轴向压应力一直增大。 Q_2 区域在钢板接触到凹模时径向拉应力减小, 随后又有所恢复, 这是因为钢板接触凹模底部后, Q_2 区域的金属不断地贴合在凹模底部并发生径向移动, 所以径向依然受拉应力作用。当 1.65 s 后, 径向拉应力逐渐减小, 因为此后 Q_2 区域金属径向流动的趋势减弱, 与之相邻靠近凹模边缘部分的金属流动会对其有一定的挤压作用。

从图 5c 可以看出, 在成形初始阶段 (钢板接触到凹模之前), Q_3 区域各向应力变化趋于平缓, 因为钢板一侧的主要变形发生在 Q_1 和 Q_2 区域, Q_3 区域只是发生了空间位置的变化和轻微的变形。随后钢板发生胀形变形, 所以该区域一直处于拉应力状态。当钢板与凹模接触时, 由于该区域受到来自铝板一侧金属的挤压作用, 径向开始受到压应力作用。此后该区域要继续发生胀形, 轴向和周向均受到拉应力作用。当变形时间为 1.95 s 时, 径向压应力减小到最小, 互锁结构尚未完全形成, 随着变形的进行, 铝板一侧金属还会继续填充到钢板一侧的凹陷处, 以辅助互锁结构的形成, 所以此后此区域受到压应力, 并且压应力逐渐增大。总体来说, 在变形阶段, 整个钢侧 Q_3 区域轴向和周向受拉、径向受压, 这导致该区域金属被拉薄, 形成凹陷, 铝侧金属通过径向流动进入钢板一侧

的凹陷部位, 形成接头的互锁结构, 实现两板之间的连接。这与应变分析结果一致, 进一步验证了互锁结构形成机理的准确性。

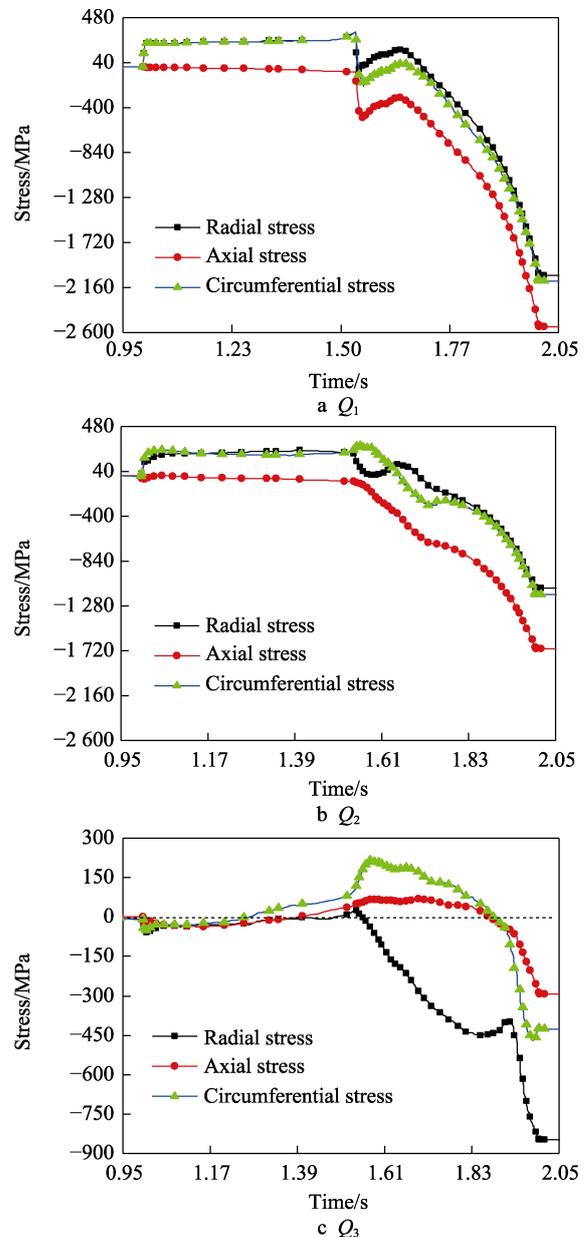


图 5 接头钢侧应力曲线
Fig.5 Stress curve of joint at steel sheet side

1.4 有限元分析结果验证

选取上述有限元模拟使用的工艺参数进行验证, 使用的试验装置如图 6 所示。

低碳钢和铝合金无铆连接数值模拟结果与试验结果对比如图 7 所示, 总体来说, 颈厚值和互锁量的结果比较理想。试验颈厚值为 0.375 mm, 模拟颈厚值为 0.386 mm, 相对误差为 2.9%; 试验互锁量为 0.227 mm, 模拟互锁量为 0.218 mm, 相对误差为 4.2%, 试验结果和数值模拟结果相对误差不超过 5%, 验证了有限元模拟的准确性。

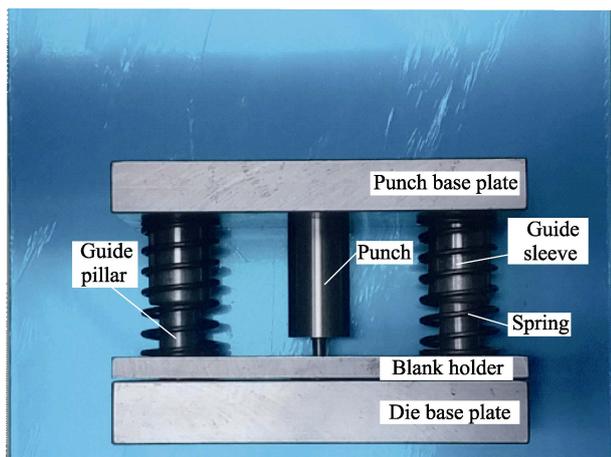


图6 试验装置
Fig.6 Experimental device

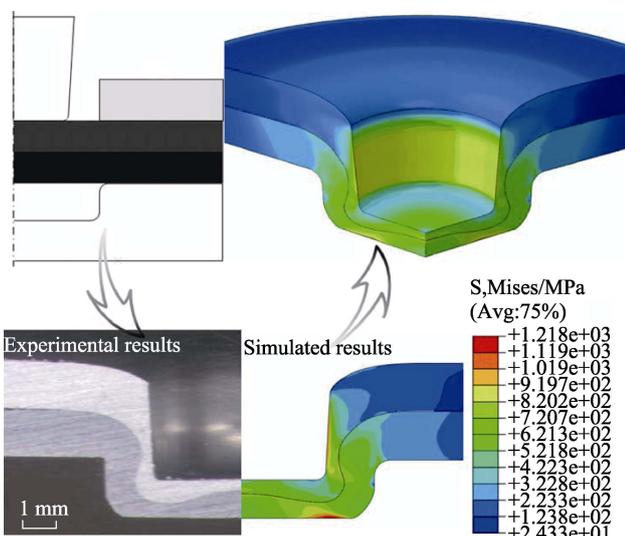
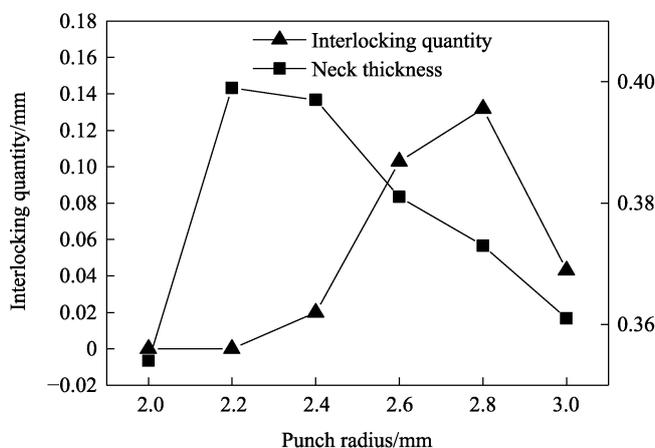


图7 无铆连接数值模拟结果与试验结果对比
Fig.7 Comparison between numerical simulation and experiment of mechanical clinch



a 冲头半径对互锁量和颈厚值的影响

2 工艺参数对铝/钢无铆连接接头形貌的影响

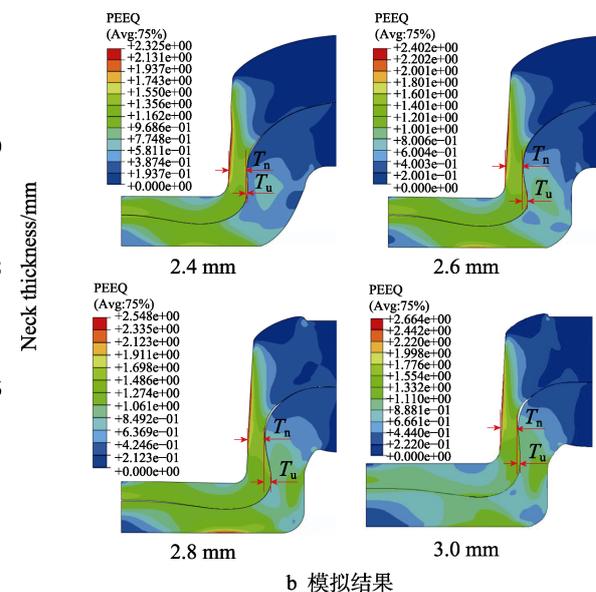
通过分析可知,影响金属流动的因素都会对接头形貌产生影响,为此,选取冲头半径、冲头圆角半径、凹模深度和摩擦因数等参数,分析它们对接头形貌的影响。

2.1 冲头半径

保持模型中其他参数不变,冲头半径对互锁量和颈厚值的影响如图 8a 所示。当冲头半径为 2.4、2.6、2.8、3.0 mm 时,模拟结果如图 8b 所示。可以看出,当冲头半径在 2.2 mm 以下时,由于模具间隙过大,无法形成互锁结构。当冲头半径增大到 2.4 mm 时,互锁结构开始形成。互锁结构形成后,互锁量随冲头半径的增大而有变大的趋势,但当冲头半径增大到 2.8 mm 时,虽然互锁量较 2.6 mm 时有所增大,但颈厚值开始减小。当冲头半径继续增大到 3 mm,由于模具间隙太小,进入模具间隙内的铝金属相对减少,互锁量也随之减小。

2.2 冲头圆角半径

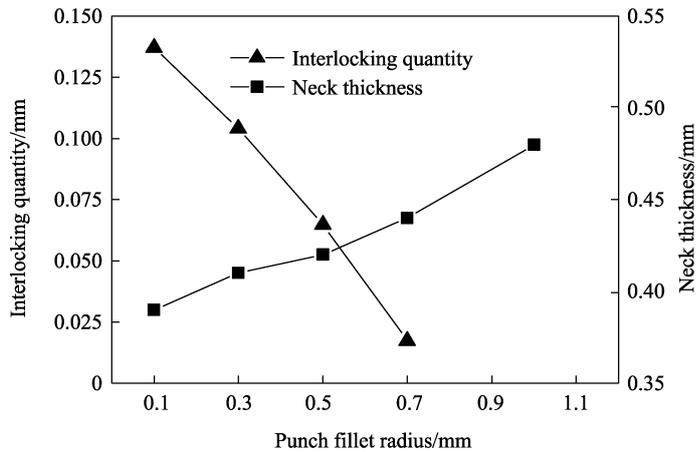
冲头圆角半径与其他模具参数不同,直观来看,它对互锁量的影响较大,但对颈厚值的影响很小。为了研究冲头圆角半径对互锁量和颈厚值的影响,分别选取冲头圆角半径为 0.1、0.3、0.5、0.7、1 mm 进行数值模拟,得到结果如图 9a 所示。当冲头圆角半径为 0.1、0.3、0.5、0.7 mm 时,模拟结果如图 9b 所示。可以看出,随着冲头圆角半径的增大,接头互锁量快速减小,当冲头圆角半径从 0.1 mm 增大到 0.7 mm 时,互锁量减小为原来的 1/8,当冲头圆角半径增大到 1 mm 时无法形成互锁结构。颈厚值随冲头圆角半径



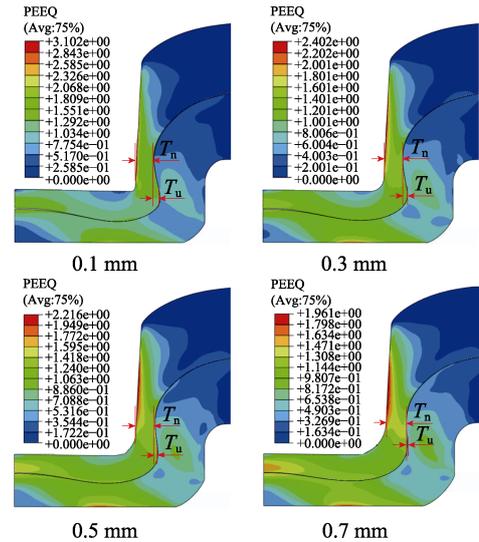
b 模拟结果

图8 冲头半径对接头形貌的影响

Fig.8 Effect of punch radius on morphology of joint: a) effect of punch radius on interlocking quantity and neck thickness; b) simulation results



a 冲头圆角半径对互锁量和颈厚值的影响



b 模拟结果

图 9 冲头圆角半径对接头形貌的影响

Fig.9 Effect of punch fillet radius on morphology of joint: a) effect of punch fillet radius on interlocking quantity and neck thickness; b) simulation results

的增大持续增大, 总体来说, 增加幅度并不大, 当冲头圆角半径从 0.1 mm 增大到 1 mm 时, 颈厚值增加了 23%。

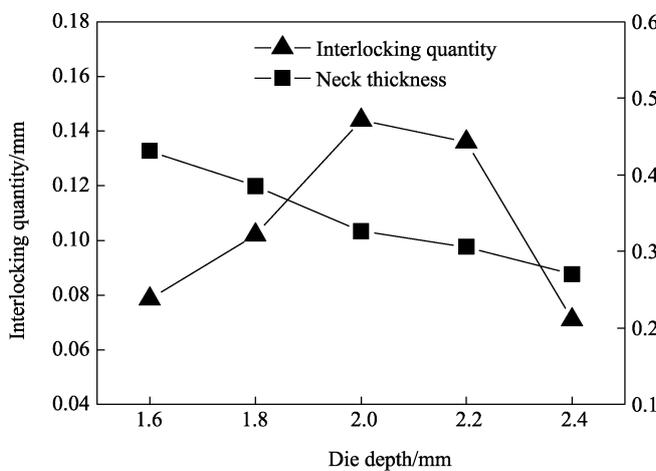
2.3 凹模深度

凹模深度不仅决定着接头的高度, 对互锁量和颈厚值也有重要影响。为了研究凹模深度对接头形貌的影响, 在冲头半径和凹模半径一定的情况下, 分别选择凹模深度为 1.6、1.8、2.0、2.2、2.4 mm 进行数值模拟, 得到结果如图 10a 所示。当凹模深度为 1.6、1.8、2.0、2.4 mm 时, 模拟结果如图 10b 所示。可以看出, 随着凹模深度的增大, 接头互锁量先增大后减

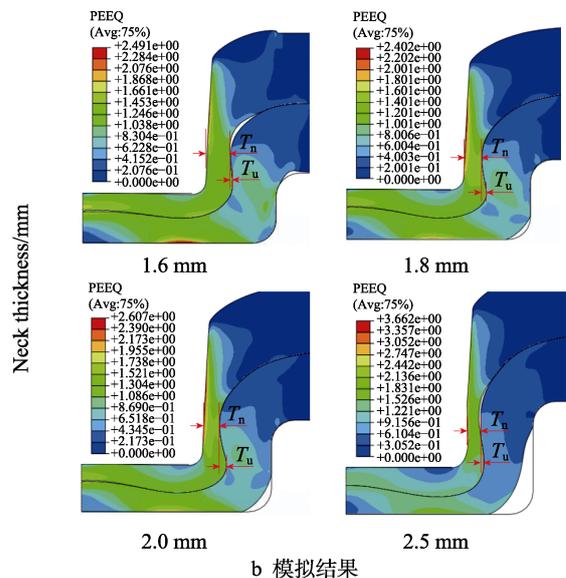
小, 而颈厚值随凹模深度的增大而逐渐减小。当凹模深度较小时, 由于模腔体积较小, 钢侧金属填满模腔后铝侧金属出现反向流动的情况, 无法形成互锁结构。随着凹模深度的增大, 接头成形性逐渐提高, 当凹模深度为 2 mm 时达到理想的接头形貌。但当凹模深度继续增大, 由于模腔体积过大, 金属变形主要以拉深变形为主, 参与变形的金属无法对其进行有效填充, 铝板颈部因受到很大的拉力而变薄, 故颈厚值变小。若凹模深度继续增大, 则无法形成有效的互锁结构。

2.4 摩擦因数

当钢板与凹模之间的摩擦因数 μ_{D-L} 不同时, 接头



a 凹模深度对互锁量和颈厚值的影响



b 模拟结果

图 10 凹模深度对接头形貌的影响

Fig.10 Effect of die depth on morphology of joint: a) effect of die depth on interlocking quantity and neck thickness; b) simulation results

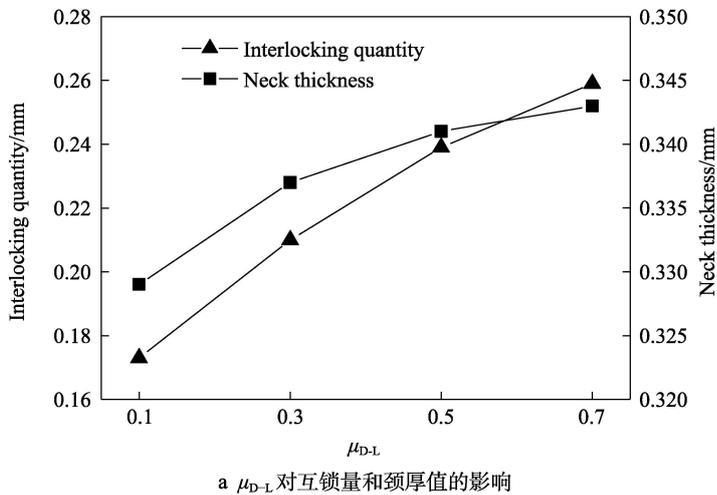
互锁量和颈厚值的测量结果如图 11a 所示。当 μ_{D-L} 为 0.1、0.3、0.5、0.7 时，模拟结果如图 11b 所示。可以看出，随着 μ_{D-L} 的增大，接头的互锁量逐渐增大，当 μ_{D-L} 从 0.1 增大到 0.7 时，接头互锁量增加了 0.1 mm 左右，虽然增加的绝对值不是很大，但互锁量增加了 75%。这表明在成形过程中，增大 μ_{D-L} 对增大互锁量、提高接头质量起着至关重要的作用。

从颈厚值的变化情况可以看出，颈厚值随 μ_{D-L} 的增大呈增大趋势，但相对增量较小，当 μ_{D-L} 从 0.1 增大到 0.7 时，颈厚值增大了 0.022 mm，对于绝对值为 0.34 mm 的初始颈厚值来说不到 10%，所以可以认为 μ_{D-L} 对颈厚值的影响很小，甚至可以忽略。

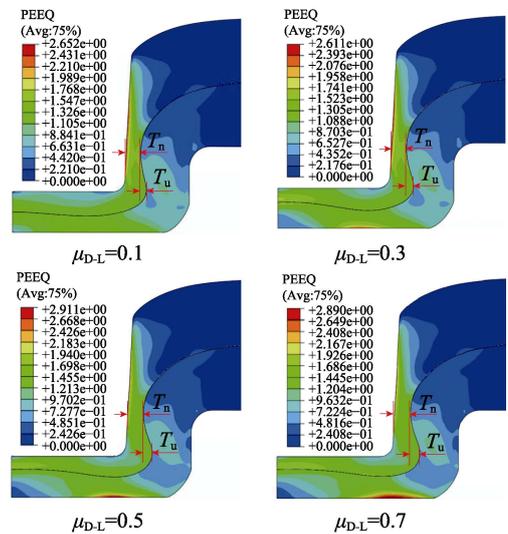
互锁量和颈厚值随两板之间摩擦因数 μ_{U-L} 的变

化曲线如图 12a 所示。当 μ_{U-L} 为 0.1、0.3、0.5、0.7 时，模拟结果如图 12b 所示。可以看到，随着 μ_{U-L} 的增大接头互锁量逐渐增大，但增加的幅度较小，颈厚值则呈减小趋势，当 μ_{U-L} 从 0.1 增加到 0.7 时，互锁量增加了 37%，颈厚值减小了 5%，可以认为 μ_{U-L} 对互锁量有一定影响，但对颈厚值的影响微乎其微。

互锁量和颈厚值随冲头和铝板之间摩擦因数 μ_{P-U} 的变化曲线如图 13a 所示。当 μ_{P-U} 为 0.1、0.3、0.5、0.7 时，模拟结果如图 13b 所示。随着 μ_{P-U} 的增大接头互锁量先增大后减小，颈厚值则呈增大趋势，当 μ_{P-U} 从 0.1 增加到 0.7 时，颈厚值增加了 29%。为了更好地控制接头的互锁量，应当将 μ_{P-U} 控制在 0.4 左右，如果需要提高接头的横向剪切强度， μ_{P-U} 应该取较大值。



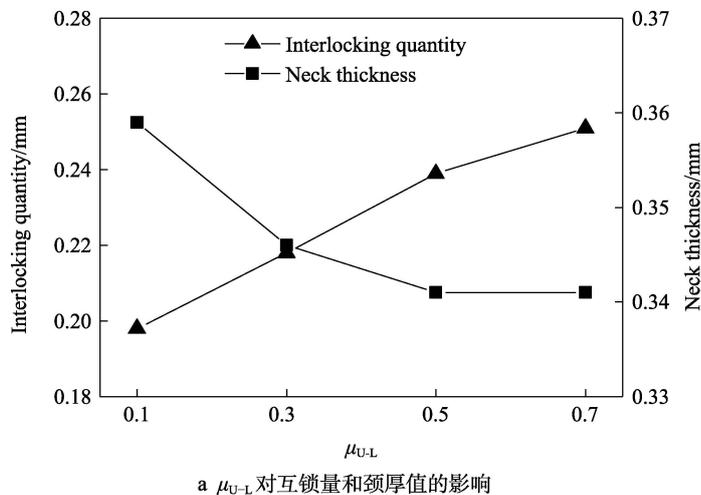
a μ_{D-L} 对互锁量和颈厚值的影响



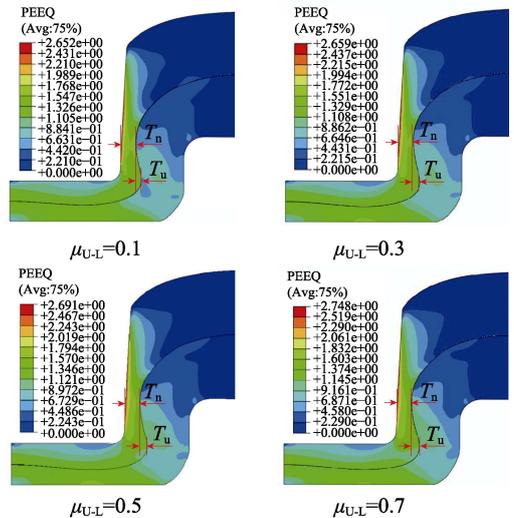
b 模拟结果

图 11 μ_{D-L} 对接头形貌的影响

Fig.11 Effect of μ_{D-L} on morphology of joint: a) effect of μ_{D-L} on interlocking quantity and neck thickness; b) simulation results



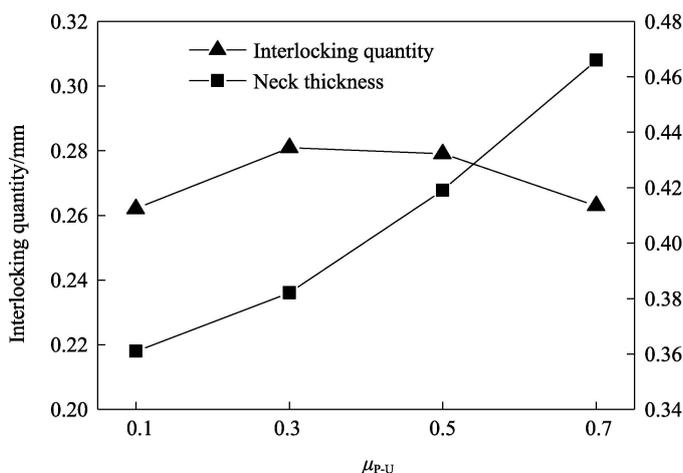
a μ_{U-L} 对互锁量和颈厚值的影响



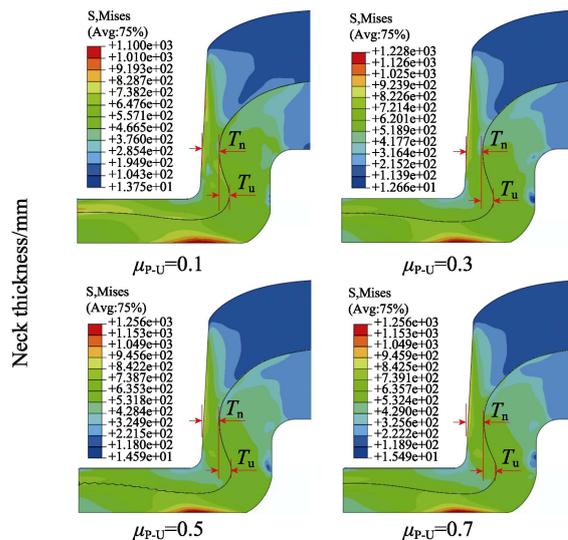
b 模拟结果

图 12 μ_{U-L} 对接头形貌的影响

Fig.12 Effect of μ_{U-L} on morphology of joint: a) effect of μ_{U-L} on interlocking quantity and neck thickness; b) simulation results



a μ_{p-U} 对互锁量和颈厚值的影响



b 模拟结果

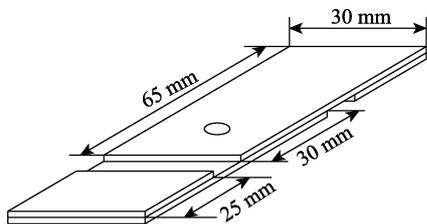
图 13 μ_{p-U} 对接头形貌的影响

Fig.13 Effect of μ_{p-U} on morphology of joint: a) effect of μ_{p-U} on interlocking quantity and neck thickness; b) simulation results

3 铝/钢无铆连接接头拉剪试验

有限元模拟结果表明,成形过程的众多参数均会对最终的接头形貌产生影响。首先需确定合适的冲头半径、凹模直径和深度,其次在此基础上对其他参数进行控制,最后得到最佳的接头形貌。为此本文在有限元模拟的基础上,确定试验的工艺参数如下:冲头半径为 2.6 mm,凹模直径为 4.1 mm,冲头圆角半径为 0.3 mm,凹模深度为 2 mm。用 80 目砂纸打磨钢板和铝板以提高其成形过程中的摩擦因数。在接头剪切失效分析过程中应保证接头两端受到的载荷尽可能处在同一直线上,避免由于形成弯矩而影响试验结果,连接接头剪切试件拉剪示意图如图 14a 所示,剪断后的接头形貌如图 14b 所示。为了保证试验数据可

靠,制备 3 组拉剪试件。拉剪试验得到的载荷-位移曲线如图 15 所示。可以看出,3 组接头的极限剪切载荷为 1.0~1.2 kN。从接头剪切失效后的接头形貌可以看出,试件全部为 Al5052 在颈部区域断裂,失效形式为剪切断裂失效。这是因为文中采用的铝板强度和刚度远低于钢板的强度和刚度,因此相对于脱铆失效,更容易在铝板颈厚薄弱处发生剪断失效。



a 拉剪示意图



b 拉剪试样接头形貌

图 14 接头剪切强度分析试件

Fig.14 Sample of joint shear strength analysis: a) diagram of shearing; b) morphology of tensile and shear sample joints

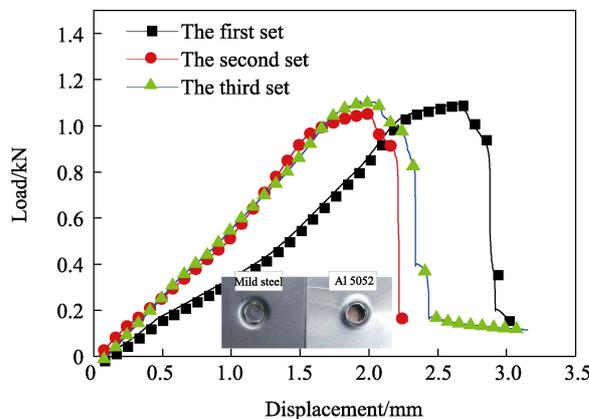


图 15 接头拉剪试验载荷-位移曲线

Fig.15 Load-displacement curves of joint tensile and shear tests

4 结论

将铝/钢薄板无铆连接的接头互锁量和颈厚值作为评价接头质量的形貌参数,分析了接头成形过程及不同工艺参数对接头形貌的影响,得到结论如下。

1) 铝/钢接头互锁结构的形成机理如下:铝侧金属受冲头和钢板在轴向方向的约束作用,只能发生径向流动挤压钢侧金属,使钢侧金属发生凹陷并填充凹陷部位,进而使得钢侧接头发生胀形变形,最终形成

了互锁结构。

2) 随着冲头半径的增大, 颈厚值和互锁量均先增大后减小; 冲头圆角半径越大, 颈厚值越大而互锁量越小; 随着凹模深度的增大, 颈厚值逐渐减小, 互锁量先增大后减小; 提高钢板与铝板、钢板与凹模之间的摩擦因数, 有利于互锁结构的形成。

3) 对于铝/钢薄板无铆连接, 接头的失效形式以铝板颈厚较薄处的剪断失效为主, 因此对于采用铝上钢下的无铆连接, 保证颈厚值相对于互锁量更加重要。

参考文献:

- [1] 杨海, 单丰武, 李慎国, 等. 汽车用铝合金不同连接技术对比研究[J]. 汽车工艺与材料, 2020(2): 18-21.
YANG Hai, SHAN Feng-wu, LI Shen-guo, et al. Comparative Research on Different Aluminum Alloy Joining Technologies for Automobile[J]. Automobile Technology & Material, 2020(2): 18-21.
- [2] 陈文娟, 尚永孝, 马瑾. 浅谈铝合金车身连接技术[J]. 汽车实用技术, 2019(11): 192-194.
CHEN Wen-juan, SHANG Yong-xiao, MA Jin. Brief Analysis of Aluminum Alloy Body Connection Technology[J]. Automobile Applied Technology, 2019(11): 192-194.
- [3] 崔颖, 周林柱, 于琪明. 钢铝混合车身连接技术及发展趋势[J]. 汽车工艺师, 2018(9): 56-61.
CUI Ying, ZHOU Lin-zhu, YU Qi-ming. Joining Technology and Development Trend of Steel Aluminum Hybrid Body[J]. Auto Manufacturing Engineer, 2018(9): 56-61.
- [4] 唐宽强. TOX 连接技术在板件连接中的应用[J]. 新技术新工艺, 2013(2): 1-3.
TANG Kuan-qiang. Application of TOX Joining Technology in the Sheet Metal Industry[J]. New Technology & New Process, 2013(2): 1-3.
- [5] 郑晖, 赵曦雅. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用[J]. 锻压技术, 2016, 41(2): 1-6.
ZHENG Hui, ZHAO Xi-ya. Lightweight Automobile and Application of Aluminum Alloys in Modern Automobile Production[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(2): 1-6.
- [6] 黄志超. 板料连接技术进展[J]. 锻压技术, 2006, 31(4): 119-122.
HUANG Zhi-chao. Developments of Sheet Joining[J]. Forging & Stamping Technology, 2006, 31(4): 119-122.
- [7] 庄蔚敏, 张凯希, 刘学成, 等. 无铆钉铆接接头力学性能优化研究[J]. 汽车技术, 2015(12): 40-43.
ZHUANG Wei-min, ZHANG Kai-xi, LIU Xue-cheng, et al. Research on Mechanical Property Optimization of Clinching Joint[J]. Automobile Technology, 2015(12): 40-43.
- [8] 杨慧艳, 何晓聪, 周森. 压印接头强度的有限元模型及理论计算方法[J]. 吉林大学学报, 2015, 45(3): 864-871.
YANG Hui-yan, HE Xiao-cong, ZHOU Sen. Simulation and Calculation Methods for Clinched Joint Strength[J]. Journal of Jilin University, 2015, 45(3): 864-871.
- [9] 韩晓兰, 赵升吨, 陈超, 等. 轻质板材平底无铆连接成形模具的优化[J]. 锻压技术, 2017, 42(1): 92-97.
HAN Xiao-lan, ZHAO Sheng-dun, CHEN Chao, et al. Optimization on Flat-Connecting Die without Rivet for Lightweight Material[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(1): 92-97.
- [10] ALI B, BENABDERRAHMANE B. Finite Element Simulation of the Hybrid Clinch Joining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1): 439-449.
- [11] LEI Lei, HE Xiao-cong, XING Bao-ying, et al. Effect of Foam Copper Interlayer on the Mechanical Properties and Fretting Wear of Sandwich Clinched Joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 274: 116285.
- [12] 张杰, 何晓聪, 雷蕾, 等. 泡沫镍三明治结构压印接头力学性能及其断口分析[J]. 有色金属工程, 2019, 9(1): 31-36.
ZHANG Jie, HE Xiao-cong, LEI Lei, et al. Mechanical Properties and Fracture Analysis of Clinching Sandwich Structure Joint with Nickel Foam[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(1): 31-36.
- [13] 雷蕾, 何晓聪, 高爱凤, 等. 基于试验与数值模拟对比的钛合金压印接头研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(3): 125-130.
LEI Lei, HE Xiao-cong, GAO Ai-feng, et al. Study on Clinching Joint of Titanium Alloy Based on Comparison of Test and Numerical Simulation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(3): 125-130.
- [14] LAMBIASE F, DI I A. Joining Aluminum with Titanium Alloy Sheets by Mechanical Clinching[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 457-465.
- [15] 陈超, 赵升吨, 韩晓兰, 等. 轻质合金无铆塑性连接方式及其关键技术的探讨[J]. 锻压技术, 2016, 41(1): 1-6.
CHEN Chao, ZHAO Sheng-dun, HAN Xiao-lan, et al. Discussion on Mechanical Clinching Type and Its Key Technology for Light-Weight Alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(1): 1-6.
- [16] LEE C J, KIM J Y, LEE S K, et al. Design of Mechanical Clinching Tools for Joining of Aluminium Alloy Sheets[J]. Materials & Design, 2010, 31(4): 1854-1861.
- [17] ABE Y, MORI K, KATO T. Joining of High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Mechanical Clinching with Dies for Control of Metal Flow[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 884-889.
- [18] GERSTMANN T, AWISZUS B. Recent Developments in Flat-Clinching[J]. Computational Materials Science, 2014, 81: 39-44.
- [19] 张文城. 冲压连接的成形过程及其结合强度的分析

- [D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 6-10.
ZHANG Wen-cheng. Study on the Clinching Process and Connection Strength of Clinched Joint[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 6-10.
- [20] HE Xiao-cong, ZHANG Yue, XING Bao-ying, et al. Mechanical Properties of Extensible Die Clinched Joints in Titanium Sheet Materials[J]. Materials & Design, 2015, 71: 26-35.
- [21] MUCHA J. The Analysis of Lock Forming Mechanism in the Clinching Joint[J]. Materials & Design, 2011, 32(10): 4943-4954.
- [22] MUCHA J, WITKOWSKI W. The Clinching Joints Strength Analysis in the Aspects of Changes in the Forming Technology and Load Conditions[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 82: 55-66.
- [23] NEUGEBAUER R, TODTERMUSCHKE M, MAUERMAN R, et al. Overview on the State of Development and the Application Potential of Dieless Mechanical Joining Processes[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, 8(4): 51-60.
- [24] 孙孟乾, 孙建亮, 韩辉, 等. 大型铝合金筒节轧制过程圆度控制及影响因素分析[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(2): 108-115.
- SUN Meng-qian, SUN Jian-liang, HAN Hui, et al. Study on Roundness Control and Influence Factors of Large 6061 Aluminum Alloy Cylinder in Rolling Process[J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(2): 108-115.
- [25] 杨程, 姚杰, 牛艳, 等. 无铆连接模具参数对异种金属板料接头成形的影响[J]. 力学季刊, 2020, 41(3): 543-553.
- YANG Cheng, YAO Jie, NIU Yan, et al. Effect of Mold Parameters for No-Rivet Connection on Forming of Dissimilar Sheet Metal Joints[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2020, 41(3): 543-553.
- [26] 马运五, 楼铭, 李永兵. 铝合金高强钢自冲铆接工艺仿真研究[J]. 汽车工艺与材料, 2017(8): 11-15.
- MA Yun-wu, LOU Ming, LI Yong-bing. Simulation Study on Self-Piercing Riveting Process of Aluminum Alloy High Strength Steel[J]. Automobile Technology & Material, 2017(8): 11-15.

责任编辑: 蒋红晨