

模具参数对分瓣模式无铆连接工艺影响

刘 莹, 王志勇, 邢鲁超

(山东航空学院 机电工程学院, 山东 滨州 256600)

摘要: 为了研究分瓣模式无铆连接过程中模具参数对接头性能的协同影响, 利用有限元分析软件 Abaqus 建立了 Al5052 铝合金的分瓣模式无铆连接过程的有限元模型, 并对连接过程进行了数值模拟分析, 得到了接头成形过程中材料的等效力场、凹模运动速度等信息, 分别分析了凹模深度、凹模半径和滑动模预紧力对接头几何参数的影响, 最后对这3个因素对接头几何参数的协同影响进行了综合分析。结果表明, 滑动模预紧力的加入改变了凹模半径和凹模深度双因素对接头互锁值的影响规律, 施加一定的滑动模预紧力能够改善接头的机械互锁, 提高接头的力学性能。研究得到的模具参数对接头成形的影响规律, 为铝合金分瓣模式无铆连接工艺的研究应用奠定了基础。

关键词: Al5052 铝合金; 分瓣模式无铆连接; 滑动模; 预紧力; 互锁值

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.019

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0143-09

Influence of die parameters on clinching process with extensible dies

Liu Ying, Wang Zhiyong, Xing Luchao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256600, China)

Abstract: In order to study the synergistic effect of die parameters on joint performance during the clinching process with extensible dies, a finite element model of clinching process with extensible dies for Al5052 aluminum alloy was established by finite element software Abaqus, and the connection process was numerically simulated and analyzed to obtain the information of equivalent stress field, movement speed of sliding die and so on during the joint forming process. Then, the influences of die depth, die radius and preload of sliding die on the geometric parameters of joint were studied. Finally, the synergistic influence of these three factors on the geometric parameters of joint was comprehensively analyzed. The results show that the addition of the preload of sliding die changes the original influence of die radius and die depth on the interlock value of joint, and applying a certain preload of sliding die can improve the mechanical interlock of joint and the mechanical properties of joint. Thus, the influence of die parameters on the joint forming lays a foundation for the research and application of the clinching process with extensible dies for aluminum alloy.

Key words: Al5052 aluminum alloy; clinching with extensible die; sliding die; preload; interlock value

在保证汽车强度和安全的条件下, 尽可能地降低汽车整备质量, 是实现汽车节能减排的途径之一。随着汽车电动化和智能化的发展, 汽车轻量化对提高新能源汽车续航里程具有积极作用^[1-2]。为了提高汽车的运载能力、延长续航里程、降低制造成本, 同时满足严格的节能减排法规, 目前, 高强钢、铝

合金、镁合金、复合材料等强度高又符合轻量化的材料在载运工具轻量化薄壁结构的制造中应用广泛^[3-4]。由于异种材料的物理化学特性差异大, 传统电阻点焊等装配工艺不再适用于多材料车身。车身多种材料混合使用给汽车制造工艺带来了新的挑战^[5-6]。机械连接工艺除了经济、节能、环保等突出优点外, 还具有优良的力学性能和疲劳性能, 已成为铝合金板和其他轻质材料连接的最重要方法之一, 加速了汽车轻量化的进程^[7-8]。

无铆连接技术利用板材发生塑性变形将两个或多个板材连接起来, 连接过程不发生化学反应, 接头疲劳强度高, 板材无热变形和扭曲, 铆接后金属板表面的镀层或漆层不容易受损伤^[9]。传统无铆连接工艺中的固定模具限制了接头处的材料

收稿日期: 2023-07-27; 修订日期: 2023-10-28

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2020KE051, ZR-2021QE204); 山东省重点研发计划项目 (2019GGX105004); 滨州学院科研基金 (BZXYLG2015); 滨州学院双服务项目 (BZXYSFW-201912)

作者简介: 刘 莹 (2000-), 女, 硕士研究生

E-mail: 1806701706@qq.com

通信作者: 王志勇 (1985-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: wzhy8510@126.com

向四周流动,而采用分瓣模具能够为材料的流动提供空间,改善接头互锁量^[10]。在相同的成形条件下,与固定模具相比,利用分瓣模具不仅有助于材料流动和两板材间机械联锁的形成,同时也能提高接头的力学性能^[11]。Han X L 等^[12]利用有限元方法研究了冲头圆角、滑动模位移量和凹模深度对接头的影响,利用实验验证了分瓣模式无铆连接有限元模型的有效性;Lambiase F 等^[13]利用有限元方法研究了分瓣模式无铆连接过程中材料的流动。目前,关于分瓣模结构参数对接头性能影响的研究较少,且前期的研究主要集中于单个因素对接头性能的影响,对多参数协同对接头性能影响的研究较少。

为了研究凹模参数对接头性能的协同影响,本文利用有限元方法建立了分瓣模式无铆连接工艺的有限元模型,探索凹模深度、凹模半径和滑动模预紧力对接头性能的协同影响。

1 工作原理与建模

无铆连接工艺过程分为 4 个阶段,即局部塑性变形、拉伸、径向材料流动和互锁成形^[8],如图 1 所示。在机械铆接的初始阶段,冲头下压上层板,上板和下板同时发生局部塑性变形,随着冲头继续向下运动,板材发生轴向塑性变形。当下层板材底部接触凹模上表面时,板材发生径向流动,滑动模受到材料的挤压产生径向移动,使材料流在径向方向容易流动,而带有分瓣模的模具中的固定凹模限制了材料轴向的流动。随着冲头继续向下移动,滑动模继续沿固定凹模的径向方向移动,直至达到极限位置。在此过程中,上板和下板之间产生机械互锁结构,形成铆接接头。在退模阶段,冲头停止下压,经过保压后返回初始位置,同时滑动模也在橡胶圈的作用下移动到初始位置。

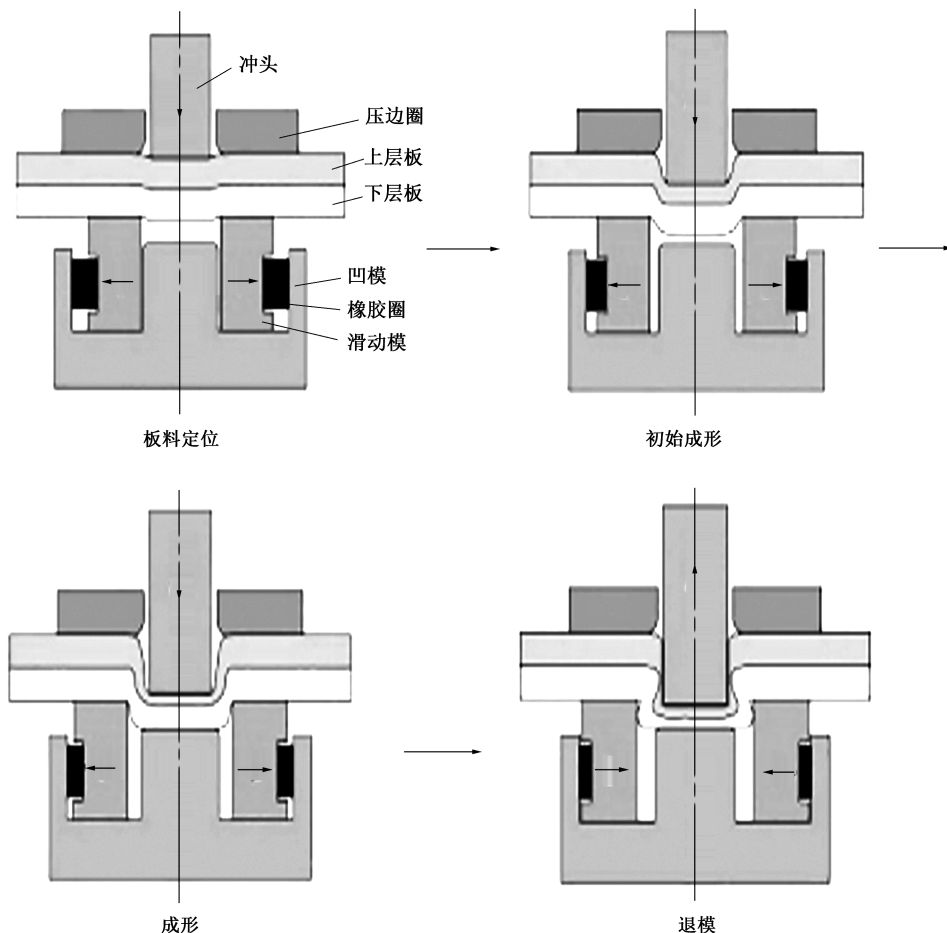


图 1 分瓣模式无铆连接工艺原理图

Fig. 1 Principle diagrams of clinching process with extensible dies

随着计算机软件技术的发展,有限元模拟方法在连接工艺上的应用越来越广泛。通过对无铆连接

过程进行有限元仿真^[14],可以准确地获得不同模具参数下的连接接头形状以直接分析接头质量。本文

利用有限元分析方法开展了不同模具参数下无铆连接过程的有限元数值模拟及分析。

由于无铆连接模具关于中心轴对称，因此，采用二维轴对称模型对无铆连接工艺进行分析，利用 Abaqus 软件建立了分瓣模式无铆连接工艺的有限元模型，分瓣模式无铆连接的模具主要由冲头、压边圈、凹模、分瓣模和橡胶圈组成，其中，凹模中的

分瓣模一般由 3~4 个滑动模组成。无铆连接有限元模型及主要结构参数如图 2 所示，其中， R 为凹模半径、 H 为凹模深度、 F 为滑动模预紧力（橡胶圈对滑动模的压力）、 t_1 和 t_2 分别为上层板和下层板的厚度。模具主要参数取值见表 1。根据 3 种凹模半径 R 、3 种凹模深度 H 和 3 种滑动模预紧力 F 的变化进行无铆连接的数值模拟研究。

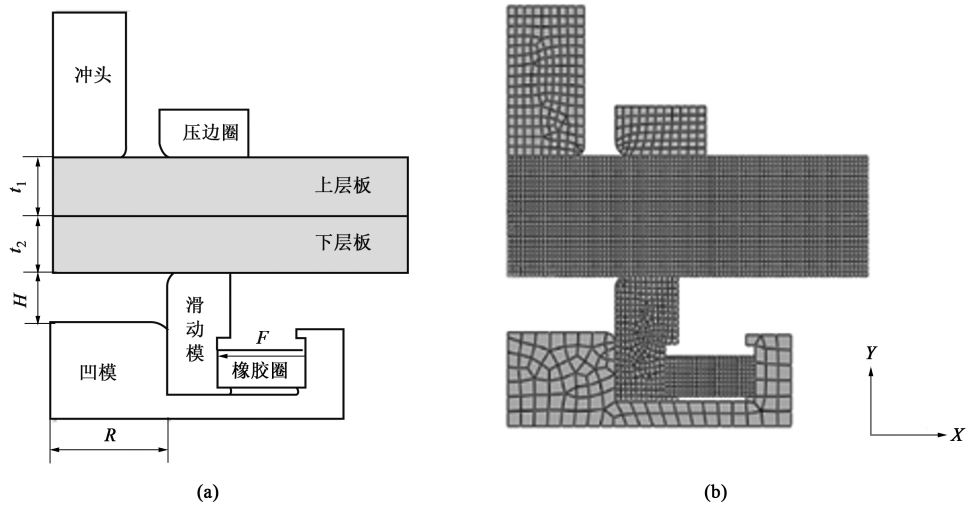


图 2 分瓣模式无铆连接工艺结构参数 (a) 及有限元模型 (b)

Fig. 2 Structure parameters (a) and finite element model (b) of clinching process with extensible dies

表 1 凹模的主要结构尺寸参数

Table 1 Main structural dimension parameters of die	
名称	规格
凹模半径 R/mm	2.2、2.4、2.6
凹模深度 H/mm	1.02、1.12、1.22
滑动模预紧力 F/N	0、5、10

在有限元建模过程中，建立冲头、凹模、滑动模等几何模型，并设置模具各部分的材料属性，其中两个板材选择 Al5052 铝合金材料，板材厚度均为 1.2 mm，Al5052 铝合金的力学性能见表 2。冲头、凹模、压边圈和滑动模均采用 Q235 钢材料，橡胶圈材料选择 Mooney-Rivlin 的超弹性模型，将各部件进行装配并进行网格划分及边界条件设置，其中，设置滑动模与凹模及橡胶圈之间的摩擦因数为 0.3，其余表面的摩擦因数为 0.15。由于冲头、凹模、压边圈以及滑动模在分析过程中不会发生变形，故设置为刚体。对滑动模沿 Y 轴方向移动及 XY 平面内的旋转自由度进行约束，冲头的最大下压量设定为 3.02 mm。

基于 Han X L 等^[12]的实验结果对本文所建立的有限元仿真模型进行了验证，其在伺服压力机上对

表 2 Al5052 铝合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Al5052 aluminum alloy						
参数	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	泊松比
数值	2.7	70.3	235.2	189.7	18	0.34

分瓣模式无铆连接工艺进行了实验，有限元模型中采用的材料及模具参数与其相同，有限元仿真与实验所形成的接头截面对比如图 3 所示。可知，仿真结果与实验结果吻合情况较好。

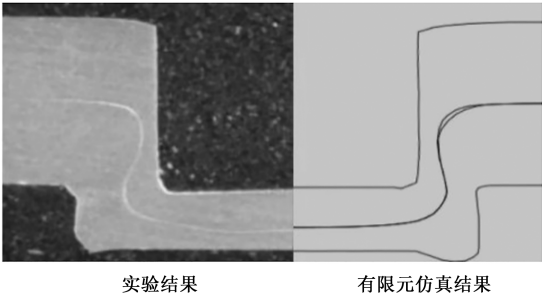


图 3 有限元仿真与实验所形成的接头截面对比

Fig. 3 Comparison of joint cross-sections formed by finite element simulation and experiment

2 结果及讨论

2.1 工艺过程模拟

利用 Abaqus 对铝合金板材的分瓣模式无铆连接工艺进行有限元分析, 得到了连接过程中滑动模移动和板材等效应力场的变化情况, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 定位阶段 (图 4a), 上板在冲头圆角处、下板在滑动模圆角接触处的等效应力逐渐增大。变形阶段 (图 4b), 板材被冲头挤压向下流

动, 下板与模具圆角接触处发生局部变形。随着下层板作用于滑动模上的侧向分力逐渐增大, 滑动模被向外侧推动。成形阶段 (图 4c), 当下板底部接触凹模后, 两板材之间的材料会沿着径向流动, 在材料的推动下, 滑动模向外侧移动速度增大。冲头在保压后退模, 完成整个连接过程, 如图 4d 所示。图 5 为分瓣模式无铆连接过程中滑动模位移与冲头位移之间的关系, 滑动模向外侧移动的同时也为材料沿着径向流动提供了空间, 这有利于促进机械互锁的形成。

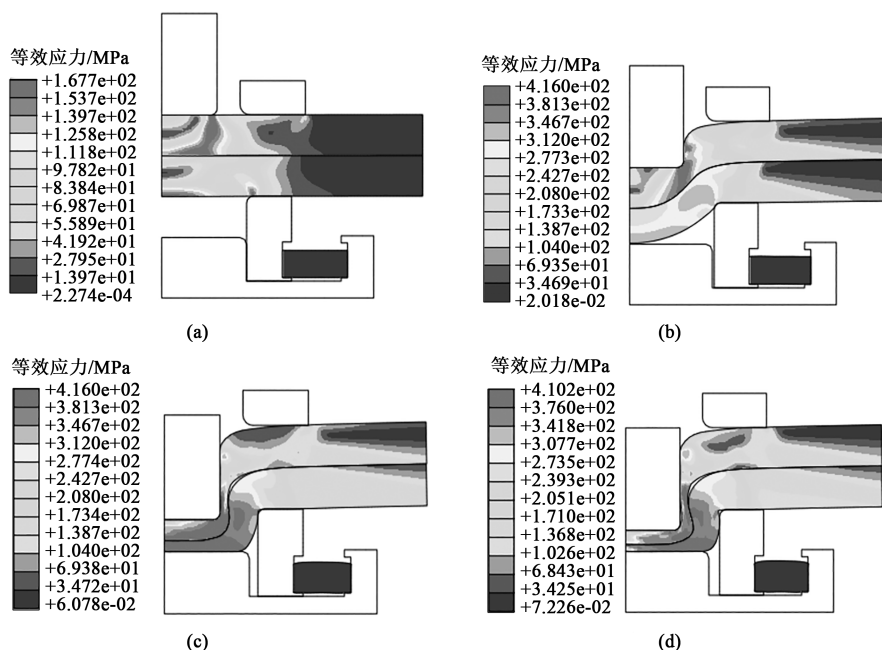


图 4 分瓣模式无铆连接过程的等效应力场

(a) 定位阶段 (b) 变形阶段 (c) 成形阶段 (d) 保压阶段

Fig. 4 Equivalent stress fields during clinching process with extensible dies

(a) Positioning stage (b) Deforming stage (c) Forming stage (d) Pressure-holding stage

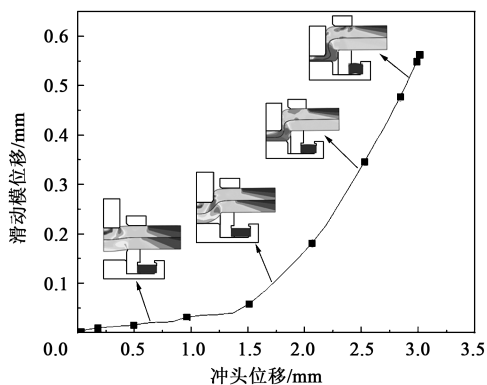


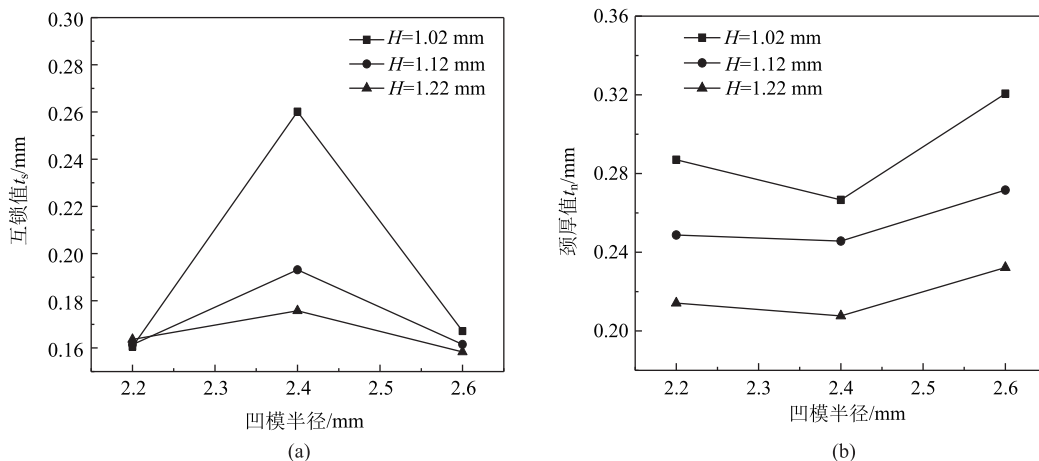
图 5 分瓣模式无铆连接过程中滑动模位移随冲头位移的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of sliding die displacement with punch displacement during clinching process with extensible die

2.2 凹模半径和凹模深度对接头的影响

为了分析不同凹模深度 H 和凹模半径 R 对接头几何参数的影响, 保持滑动模预紧力为 0 N, 凹模深度 H 分别为 1.02、1.12 和 1.22 mm, 得到了不同凹模深度时接头互锁值和颈厚值随凹模半径的变化情况, 如图 6 所示。

由图 6 可知: 在同一凹模深度时, 随着凹模半径从 2.2 mm 增加至 2.6 mm, 互锁值 t_s 呈现先增大后减小的趋势, 在凹模半径为 2.4 mm 时互锁值 t_s 达到最大值; 而颈厚值 t_n 则随着凹模半径的增大呈现先减小后增大的趋势, 在凹模半径为 2.4 mm 时颈厚值 t_n 最小, 且在不同凹模深度下呈现出相同的变化趋势。在不同凹模深度时, 凹模半径为 2.2 和

图6 凹模半径对接头互锁值 t_s (a) 和颈厚值 t_n (b) 的影响曲线Fig. 6 Effect curves of die radius on joint interlock value t_s (a) and neck thickness value t_n (b)

2.6 mm 时凹模深度对接头互锁值的影响很小, 而在凹模半径为 2.4 mm 时凹模深度对接头互锁值的影响很大, 此时凹模深度越小, 互锁值越大, 颈厚值越大。

图 7 为滑动模预紧力为 0 N、凹模深度为 1.02 mm 时, 不同凹模半径条件下所形成的接头几何形貌。图 8 为滑动模预紧力为 0 N, 不同凹模半径和凹模深度时滑动模位移随冲头位移的变化曲线。

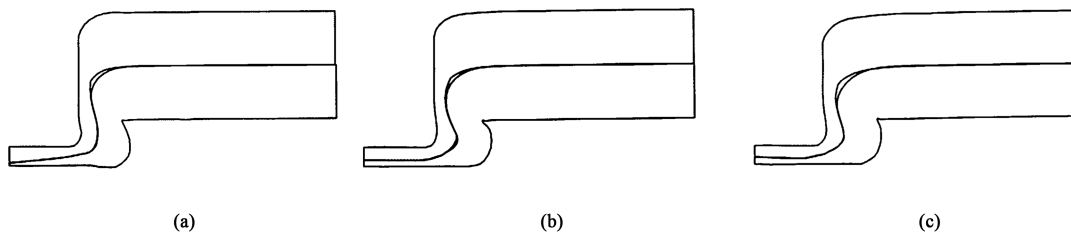


图7 凹模半径对接头几何形貌的影响

(a) $R=2.2$ mm (b) $R=2.4$ mm (c) $R=2.6$ mm

Fig. 7 Effects of die radius on joint geometry morphologies

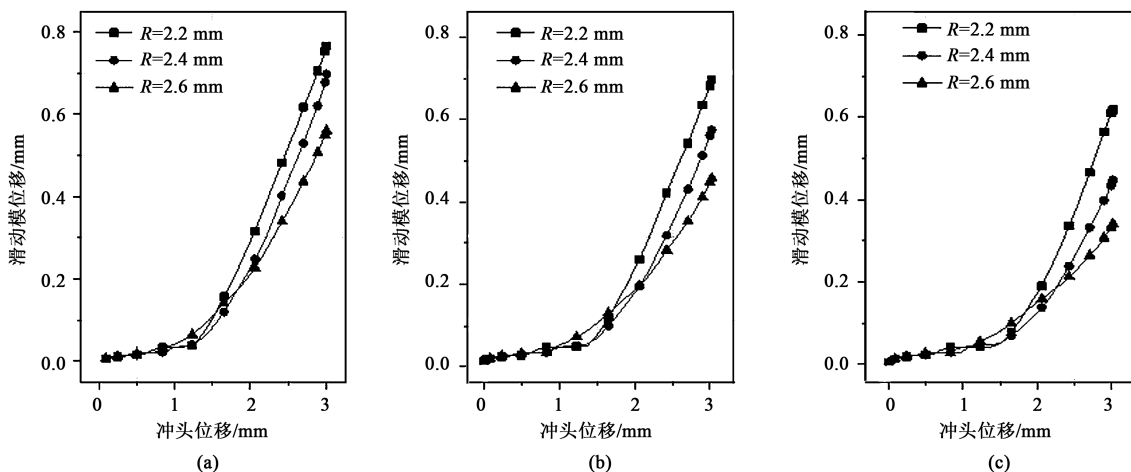


图8 不同凹模半径和凹模深度时滑动模位移随冲头位移的变化曲线

(a) $H=1.02$ mm (b) $H=1.12$ mm (c) $H=1.22$ mm

Fig. 8 Variation curves of sliding die displacement with punch displacement at different die radii and die depths

由图 8 可知, 冲头位移小于 1 mm 时, 凹模半径变化对滑动模位移几乎无影响, 滑动模位移随冲

头移动缓慢增加, 在冲头到达某一位移时滑动模的移动速度突然增大, 这一位移的数值随着凹模深度

的增大而增大,如凹模深度分别为 1.02、1.12 和 1.22 mm、冲头位移分别为 1.3、1.4 和 1.5 mm 时滑动模的移动速度显著提高。凹模半径从 2.2 mm 增大至 2.6 mm 时,滑动模的总位移量逐渐减小,在相同条件下,凹模半径越小,滑动模的总位移量越大;凹模深度越小,滑动模的总位移量越大。

将图 6 和图 7 结合可知,在凹模深度最小 ($H=1.02$ mm) 和中等的凹模半径 ($R=2.4$ mm) 时,能获得最大的接头互锁值,此时滑动模的位移量为 0.68 mm,可知接头互锁值与滑动模位移量并非完全正相关,即滑动模的移动量最大时接头的互锁量不一定最大。由图 8 可知,虽然在凹模深度最小 ($H=1.02$ mm) 和凹模半径最小 ($R=2.2$ mm) 时,滑动模位移量最大,但是互锁值较小,这与接头底部上、下层板材的流动情况有关,接头底部下层板沿径向的流动较多,且接头底部下层板的厚度较小,此时有一部分上层板的材料填充了这个区域,导致上层板沿着径

向流动的材料减少,从而使互锁值减小。而在凹模半径中等 ($R=2.4$ mm) 时,接头底部上、下层板材的厚度均匀,接头底部材料沿径向的流动促进了接头互锁值的增加。在凹模半径为 2.6 mm 时,由于凹模半径的增加,材料沿着径向的流动量减小,滑动模位移量减小,互锁值较小,且上、下层板间产生较大间隙。

总结发现,滑动模的移动能够为接头处材料的径向流动提供空间,但是接头互锁值与滑动模位移量并非完全正相关。最小凹模深度和中等的凹模半径组合是能够获得最大接头互锁值的前提。

2.3 滑动模预紧力对接头性能的影响

为了分析滑动模预紧力对接头成形的影响,对凹模半径为 2.6 mm、凹模深度分别为 1.02、1.12 和 1.22 mm 和滑动模预紧力分别为 0、5 和 10 N 时的分瓣模式无铆连接工艺进行数值模拟,得到了不同凹模深度下互锁值和颈厚值随滑动模预紧力的变化情况,如图 9 所示。

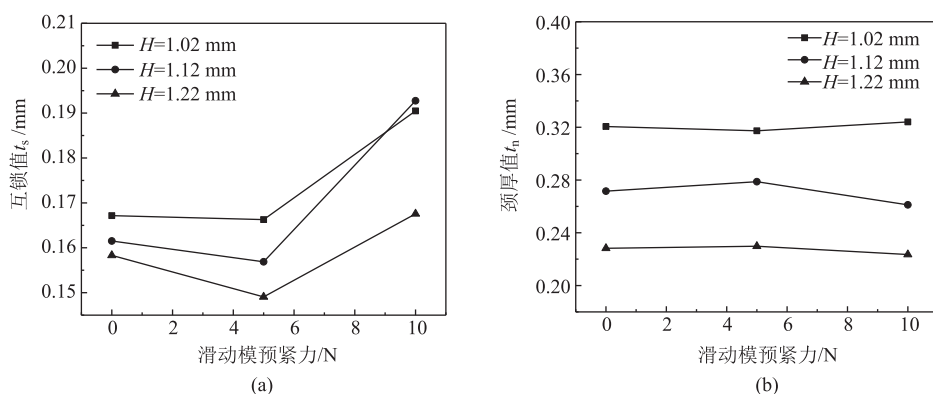


图 9 滑动模预紧力对接头互锁值 t_s (a) 和颈厚值 t_n (b) 的影响

Fig. 9 Effects of sliding die preload on joint interlock value t_s (a) and neck thickness value t_n (b)

由图 9 可以看出,在相同的凹模深度下,总体上随着滑动模预紧力的增加,互锁值 t_s 先减小后增大,在预紧力为 0~5 N 时,遵循凹模深度越小互锁值越大的规律。预紧力为 10 N 时,接头互锁值得到较大提高,而且与前期规律不同的是:凹模深度为 1.12 mm 时接头的互锁值超过了凹模深度为 1.02 mm 时接头的

互锁值。在相同的凹模深度下,接头的颈厚值 t_n 随预紧力的变化较小,即滑动模预紧力对接头颈厚值 t_n 的影响较小。

图 10 为凹模半径为 2.6 mm、凹模深度为 1.12 mm 时,不同滑动模预紧力下的接头几何形貌。

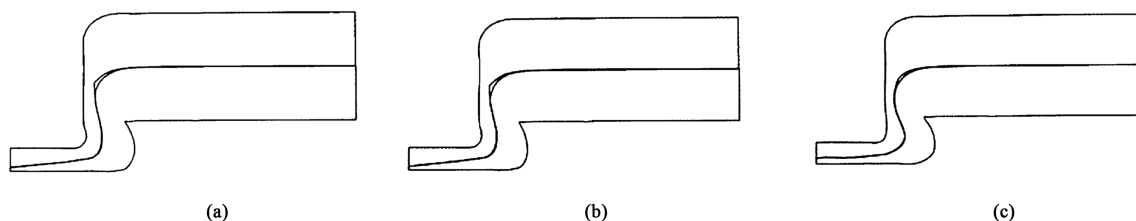


图 10 滑动模预紧力对接头几何形貌的影响

(a) $F=0$ N (b) $F=5$ N (c) $F=10$ N

Fig. 10 Effects of sliding die preload on joint geometry morphologies

由图 10 可知, 滑动模预紧力为 0 和 5 N 时, 上、下两层板之间出现较明显的间隙, 接头互锁值较小, 而且接头底部上、下层板厚度不均匀, 上层板较厚, 下层板较薄。预紧力为 10 N 时, 接头底部上、下两层板的厚度均匀, 两板材之间的间隙很小。

图 11 为凹模深度为 1.12 mm、凹模半径为 2.2 mm 的情况下, 不同滑动模预紧力下滑动模位移随冲头位移的变化曲线。

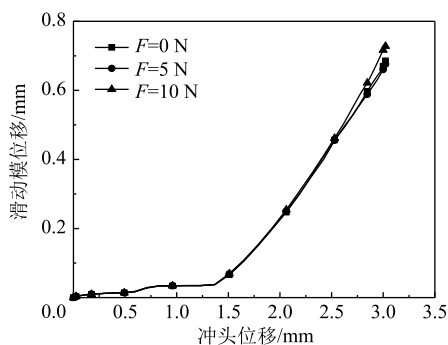


图 11 不同滑动模预紧力下滑动模位移随冲头位移变化曲线

Fig. 11 Variation curves of sliding die displacement with punch displacement under different sliding die preloads

由图 11 可知, 冲头位移达到 2.5 mm 前, 滑动模预紧力大小对滑动模位移几乎无影响。当冲头位

移达到 2.5 mm 后, 滑动模预紧力大小对滑动模位移有明显影响。预紧力为 10 N 时, 滑动模位移量最大, 预紧力为 0 和 5 N 时, 滑动模位移量则相对较小, 两者的滑动模移动情况相近。

由图 9 和图 11 可以看出, 预紧力 0 和 5 N 时滑动模最终位移量比预紧力为 10 N 时的滑动模最终位移量小, 预紧力越大, 接头互锁值越大。产生上述问题的原因主要为: 下层板材料受到来自滑动模径向的约束力很小, 导致接头底部下层板材料容易沿着径向流动, 而接头底部中心处上层板的材料则沿着轴向填充至下层板处, 导致上层板材料沿着径向流动较少, 从而使接头互锁值偏小。因此, 滑动模的预紧力不能过小, 适当的预紧力能够促进上、下层板材料的均匀流动, 提高接头的互锁值。

2.4 凹模半径、凹模深度、滑动模预紧力 3 因素对接头性能的协同影响

为了明确凹模半径、凹模深度、滑动模预紧力 3 因素对接头性能的协同影响, 分析了 3 种因素对接头几何性能的影响, 图 12 和图 13 分别为不同滑动模预紧力和凹模深度下接头互锁值和颈厚值随凹模半径的变化曲线。

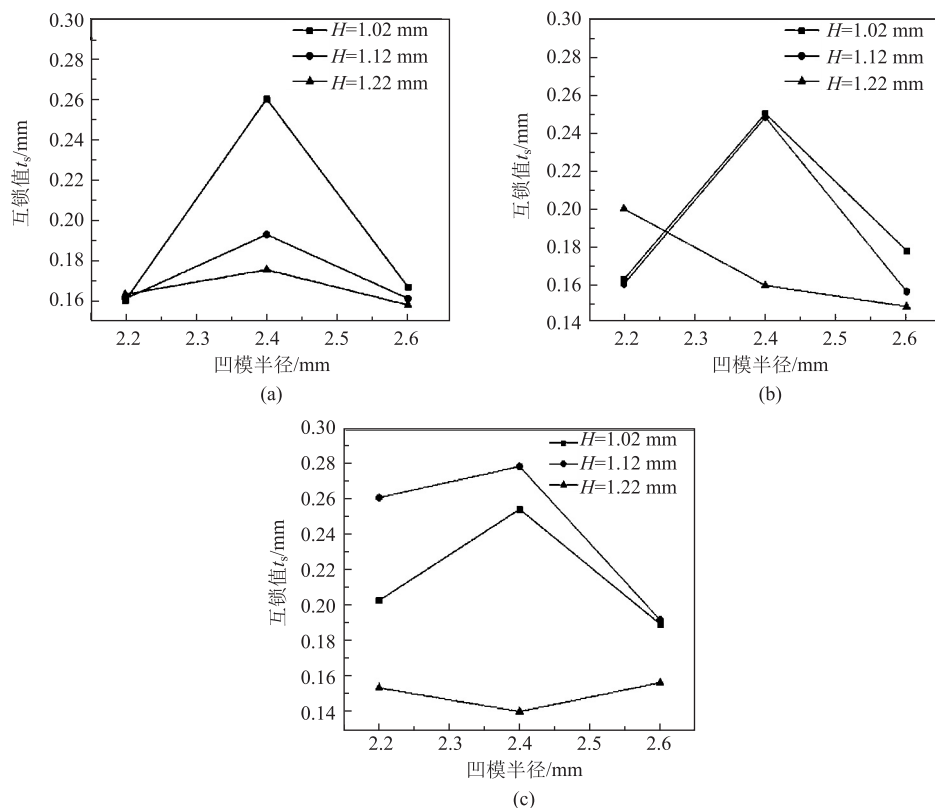


图 12 接头互锁值随凹模半径的变化曲线

(a) $F=0\text{ N}$ (b) $F=5\text{ N}$ (c) $F=10\text{ N}$

Fig. 12 Variation curves of interlocking value of joint with die radius

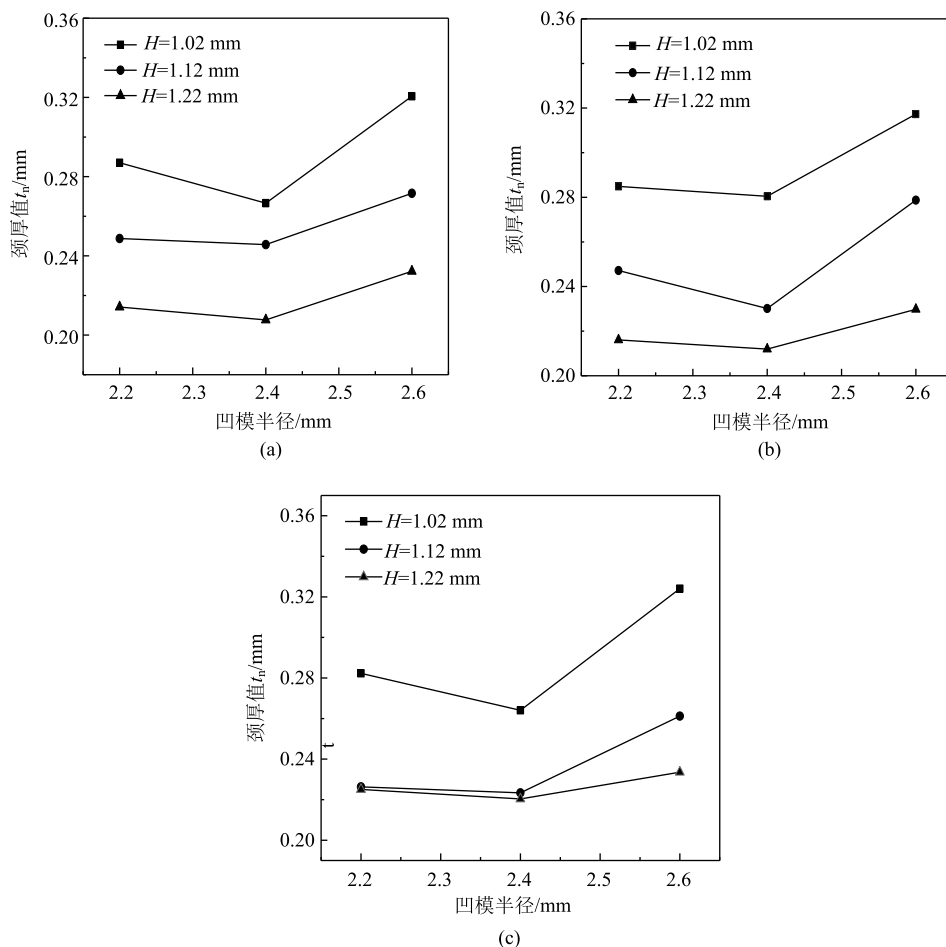


图 13 接头颈厚值随凹模半径的变化曲线

(a) $F=0\text{ N}$ (b) $F=5\text{ N}$ (c) $F=10\text{ N}$

Fig. 13 Variation curves of neck thickness value of joint with die radius

由图 12a 可以看出, 滑动模预紧力为 0 N 时, 凹模深度最小和中等凹模半径能够获得最大的接头互锁值。随着滑动模预紧力增大至 5 N (图 12b), 凹模深度为 1.12 mm 时的接头互锁值增大至与凹模深度为 1.02 mm 时的接头互锁值接近。如图 12c 所示, 随着滑动模预紧力进一步增大至 10 N, 凹模深度为 1.12 mm 时的接头互锁值超过了凹模深度为 1.02 mm 时的接头互锁值, 而且超过了滑动模预紧力为 0 和 5 N 时的最大接头互锁值, 说明适当增大滑动模预紧力能够改善接头的互锁值, 并且滑动模预紧力这一因素的加入影响了凹模半径和凹模深度对接头互锁值的影响规律。

从图 13 可以看出, 凹模深度越小, 接头颈厚值越大, 滑动模预紧力和凹模半径对接头颈厚值的影响不大。

分析整理数据可得, 滑动模预紧力为 10 N、凹模深度为 1.12 mm、凹模半径为 2.4 mm 时, 接头的

互锁值最大, 为 0.28 mm, 颈厚值为 0.23 mm, 接头截面如图 14 所示, 上、下两板之间缝隙较小, 结合情况较好, 接头质量较高。

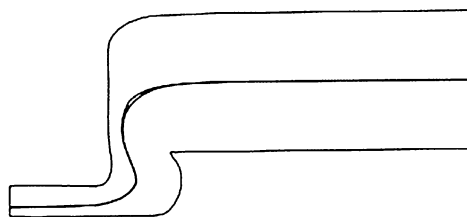


图 14 最佳接头形貌

Fig. 14 Optimal joint morphology

3 结论

(1) 滑动模的移动能够为接头处材料的径向流动提供空间, 但是接头互锁值与滑动模位移并非完全正相关。

(2) 施加一定的滑动模预紧力能够改善接头的互锁值, 滑动模预紧力这一因素的加入影响了凹模半径和凹模深度双因素对接头互锁值的影响规律。通过调节滑动模预紧力能够改善接头的机械互锁, 适当的滑动模预紧力能够促进接头底部上、下层板料的均匀流动, 使接头底部上、下层板材料流动均匀, 从而提高接头的互锁值。

(3) 通过数值模拟分析得到了 Al5052 铝合金板材分瓣模式无铆连接的最佳模具参数: 滑动模预紧力为 10 N、凹模深度为 1.12 mm、凹模半径为 2.4 mm。

参考文献:

- [1] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2014, (1): 1-16.
Fan Z J, Gui L J, Su R Y. Research and development of automotive lightweight technology [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, (1): 1-16.
- [2] 李红, 刘旭升, 张宜生. 新能源汽车异种材料连接技术的挑战、趋势和进展 [J]. 材料导报, 2019, 33 (23): 3853-3861, 3881.
Li H, Liu X S, Zhang Y S. Current research and challenges in innovative technology of joining dissimilar materials for electric vehicles [J]. Materials Reports, 2019, 33 (23): 3853-3861, 3881.
- [3] 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 Y B, Ma Y W, Lou M, et al. Advances in spot joining technologies of lightweight thin-walled structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (6): 125-146.
- [4] Rosenthal S, Maaß F, Kamaliev M, et al. Lightweight in automotive components by forming technology [J]. Automotive Innovation, 2020, 3 (3): 195-209.
- [5] Buffa G, Fratini L, La Commare U, et al. Joining by forming technologies: Current solutions and future trends [J]. International Journal of Material Forming, 2022, 15 (3): 27-16.
- [6] Wu J L, Chen C, Ouyang Y W, et al. Recent development of the novel riveting processes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117 (2): 19-47.
- [7] 王志勇, 韩善灵, 卢翔. 汽车车身轻量化材料无铆冲压连接技术的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (17): 5-10, 4.
Wang Z Y, Han S L, Lu X. Research progress of clinching technology for lightweight automobile body materials [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (17): 5-10, 4.
- [8] 李奇涵, 徐传伟, 高嵩, 等. 异质薄板无铆连接数值模拟及工艺参数影响规律 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (10): 113-121.
Li Q H, Xu C W, Gao S, et al. Numerical simulation of clinching for dissimilar thin-sheets and influence law of process parameters [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (10): 113-121.
- [9] 冯玉涛, 胡志强, 刘铁, 等. 无铆钉铆接技术原理及优劣势分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 169-175.
Feng Y T, Hu Z Q, Liu T, et al. Principle of clinching technology and advantages and disadvantages analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 169-175.
- [10] Peng H, Chen C, Zhang H Y, et al. Recent development of improved clinching process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110 (11-12): 3169-3199.
- [11] Ren X Q, Chen C, Peng H, et al. Investigation on mechanical behavior of clinched joints produced with dissimilar dies [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2023, 237 (1-2): 31-42.
- [12] Han X L, Zhao S D, Liu C, et al. Optimization of geometrical design of clinching tools in clinching process with extensible dies [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231 (21): 3889-3897.
- [13] Lambiasi F, Di Ilio A. Finite element analysis of material flow in mechanical clinching with extensible dies [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22 (6): 1629-1636.
- [14] Qin D L, Chen C, Ouyang Y W, et al. Finite element methods used in clinching process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116 (9-10): 2737-2776.

