



436L 铁素体不锈钢换热板片的成形过程及分析

王国涛, 王桂权, 刘仲礼, 王明佳
(烟台大学核装备与核工程学院, 烟台 264005)

摘要:针对 436L 铁素体不锈钢换热板片冲压成形的开裂问题,通过 Dynaform 数值模拟分析和冲压成形试验,对两种典型波纹结构换热板片的成形特征进行研究,分析其成形过程中的成形极限和减薄率的演变规律,研究板片厚度和波纹参数(波纹法向节距)对裂纹位置及开裂程度的影响,探讨波纹法向节距对减薄率的影响。结果表明,436L 铁素体不锈钢换热板片的开裂和减薄同时受板厚及波纹参数的影响。对于浅波纹换热板片(波纹深度 2 mm),易开裂处为波纹的波峰圆角顶部,板厚增加对开裂倾向和减薄率影响显著,每增加 0.1 mm 板材厚度,波峰圆角处最大减薄率可降低约 2.6%,此时,能够安全成形的最大减薄率为 18.9%,最小成形板厚为 0.6 mm。而对于深波纹换热板片(波纹深度 2.6 mm),易开裂处为波纹的波峰圆角两侧和波峰圆角顶部,此时,板厚增加对开裂倾向和减薄率影响较小,每增加 0.1 mm 板材厚度,波峰圆角处最大减薄率仅降低约 1.4%,需通过增大波纹法向节距满足成形质量要求。

关键词:板式换热器; 换热板片; 436L 铁素体不锈钢; 数值模拟; 减薄率

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00237 **中图分类号:** TG386

Forming Process and Analysis of 436L Ferritic Stainless Steel Heat Exchanger Plate

Wang Guotao, Wang Guiquan, Liu Zhongli, Wang Mingjia
(College of Nuclear Equipment and Nuclear Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: In order to resolve the cracking problem of 436L ferritic stainless steel heat exchanger plates during stamping forming, the forming characteristics of two typical corrugated structure heat exchange plate were studied through Dynaform numerical simulation analysis and stamping forming experiments, the evolution of forming limit and thinning rate during the forming process was analyzed, and the influence of plate thickness and corrugation parameters (corrugation pitch) on crack location and degree of cracking was studied. Additionally, the impact of corrugation pitch on thinning rate was also discussed. The results indicate that the cracking and thinning of 436L ferritic stainless steel heat exchanger plates are both affected by plate thickness and corrugation parameters. For shallow corrugated heat exchanger plates (corrugation depth of 2 mm), the vulnerable area for cracking is the top of the corrugation's rounded corner. Increasing the plate thickness significantly affects the tendency for cracking and thinning rate, with a decrease of approximately 2.6% in the maximum thinning rate at the rounded corner for every 0.1 mm increase in plate thickness. At this point, the maximum safe thinning rate for forming is 18.9%, and the minimum forming plate thickness is 0.6 mm. For deep corrugated heat exchanger plates (corrugation depth of 2.6 mm), the vulnerable areas for cracking are the sides of the corrugation's rounded corner and the top of the rounded corner. Increasing the plate thickness has a smaller impact on the tendency for cracking and thinning rate, with only a decrease of approximately 1.4% in the maximum thinning rate at the rounded corner for every 0.1 mm increase in plate thickness. To ensure that the quality requirements for forming are met, it is necessary to increase the normal pitch of the corrugation.

Key Words: Plate Heat Exchanger; Heat Exchanger Plate; 436L Ferritic Stainless Steel; Numerical Simulation; Thinning Rate

以换热板片为主要换热元件的板式换热器^[1-4],具备高换热效率、结构紧凑、低压降以及易实现自动化等优点,因此,在石油、化工、冶金和暖通等领域得到广泛应用^[5-6]。奥氏体不锈钢 304/304L 和 316/316L 因其优异的塑性成形性、耐腐蚀性和耐锈性

成为换热板片的主导材料^[7-9]。然而奥氏体不锈钢存在导热系数小、热膨胀系数大和强度低的缺点^[10],限制了板式换热器在高压和大温差工况下的应用。此外,18Cr-8Ni 系不锈钢的成本高且价格波动大,限制了板式换热器在节能和环保领域的进一

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME211)

作者简介: 王国涛(1999—),男,硕士, E-mail: wgytyu@163.com; 收稿日期: 2023-11-24

通信作者: 王桂权(1985—),男,博士,讲师, E-mail: wgqly525@163.com

步推广^[11]。

铁素体不锈钢具有与奥氏体不锈钢同等的耐蚀和耐锈性,且成本低廉,强度高,导热性能好,热膨胀系数低,是优异的换热板片制造材料^[12-13]。板式换热器所用换热板片为波纹薄板,其厚度一般为0.5~0.7 mm。然而以Cr为主要合金元素的铁素体不锈钢冷成形性能差^[14],在冲压成形为换热板片时易开裂,从而限制了其在板式换热器中的应用。研究者对铁素体不锈钢的成形缺陷和变形规律进行了大量的研究。杜伟等^[15]发现铁素体不锈钢的平均塑性应变比较低,薄板成形时易变薄和开裂。Shin等^[16]通过晶体塑性有限元模拟方法论证了晶粒簇的存在会降低铁素体不锈钢 r (塑性应变比)值,从而引发表面起皱现象。Yazawa等^[17]对Cr11、Cr18进行了冷轧及退火试验,发现其 r 值与 $\langle 111 \rangle // ND$ (法向)织构强度具有显著的正相关性, $\langle 111 \rangle // ND$ 织构强度的提高会导致铁素体不锈钢的成形性下降。王军伟等^[18]对436L不锈钢覆盖件进行了冲压缺陷和成形应力分析,研究发现,增加凸模圆角过渡半径,可以消除起皱和颈缩缺陷。张源等^[19]基于Dynaform研究了深冲时铁素体不锈钢的变形和减薄规律,但未涉及波纹的起伏成形。掌握铁素体不锈钢的成形特点是其进行冲压成形应用的前提和基础,因此,有必要进一步研究铁素体不锈钢在成形为不同波纹形貌换热板片的变形规律,以促进其在板式换热器中的应用。

为此,本文针对两种常用波纹形貌换热板片,采用数值模拟和试验相结合的方法,研究了436L铁素体不锈钢换热板片的成形特点及规律,分析不同板型下板片的成形结果,探讨板片的厚度对成形质量的影响规律,为板式换热器换热板片的结构设计提供有益的参考依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料与力学性能参数

换热板片冲压试验所用材料来自太原钢铁集团所产商用冷轧板材,其牌号为JIS G4305 436L铁素体不锈钢,具体化学成分见表1。该批次板材采用电弧炉、AOD(氩氧脱碳)和炉外精炼工艺生产钢水,并连铸成铸坯。铸坯经热轧、1 020 °C退火和冷轧工艺后成形为0.7、0.6、0.5 mm厚度板材。冷轧板材经过 $\geq 1\ 050$ °C的固溶处理。

根据GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验-第1部分:室温试验方法》,采用Z400型电子材料试验机(量程:400 kN)在与板料轧制方向成特定角度的方向上进行单向拉伸试验,通过处理后得到的真实应力—真实应变曲线如图1所示,板材的力学性能见表2。与304奥氏体不锈钢相比,436L钢弹性模量较高,可以使用更薄的板材而不易产生振动,且薄波纹板更有利于传热。然而,436L钢的屈服强度和屈强比高于304钢,而其薄板塑性变形能力较弱。此外,436L钢的 n (硬化指数)值远低于304钢,因此,其均匀变形能力相对较差。经过等轴退火处理后,436L钢板材在各方向上的力学性能基本趋于一致,平面内各向异性程度较小。

1.2 换热板片结构特征

试验所用板式换热器板片如图2所示,其结构可分为两端对称的导流区和中间换热区两部分,换热区的波纹形貌密集,材料流动受阻程度大,是冲压成形开裂的主要区域。因此,为降低模型复杂度并提高数值模拟效率,试验将主要针对工程常用规格的MR6(浅波纹)和MR10(深波纹)板型的换热区进行研究。换热区尺寸和人字形波纹的结构和参数分别如图3和表3所示。

1.3 建立有限元模型

采用Dynaform软件建立如图4所示的有限元模

表1 436L铁素体不锈钢的化学成分(质量分数)

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	N
标准	≤ 0.025	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	16.0~19.0	0.75~1.25	8(C+N)~0.8	≤ 0.025
实测	0.009	0.25	0.33	0.012	0.001	17.2	1.13	0.08	0.004

表2 436L钢板材力学性能参数

弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	硬化指数	强度系数	各向异性指数	各向异性指数	各向异性指数
E	R_{cl}	R_m	n	K	r_0	r_{45}	r_{90}
200	267	524	0.215	726	1.786	1.689	1.853

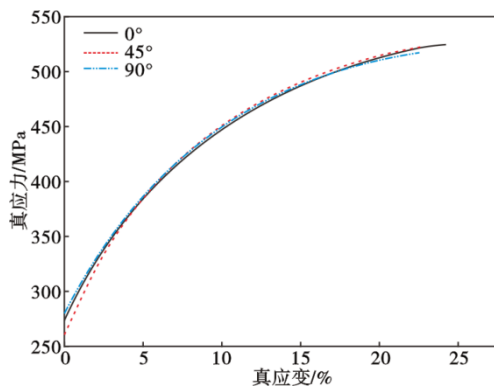


图 1 436L 钢板塑性变形阶段真实应力-应变曲线
Fig. 1 True stress-strain curve in the plastic deformation stage of 436L steel plate

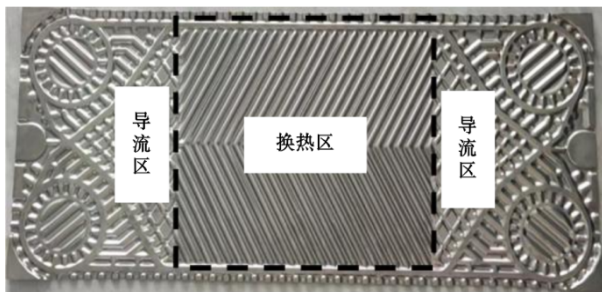


图 2 板式换热器换热板片
Fig. 2 Heat exchange plate of plate-type heat exchanger

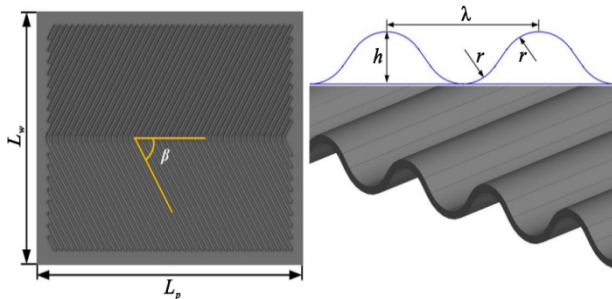


图 3 换热板片模型和波纹结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of heat exchanger plate model and corrugated structure

型。换热板片冲压成形模拟采取单动拉延方式，一次拉延的冲压工序。采用 Belytschko-Tsay (BT) 薄壳单元对板料模型离散化，网格单元尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ ，厚度方向上采用 5 个积分点。模具采用

Tool Mesh 自适应网格划分方式，网格最大单元尺寸为 5 mm ，最小单元尺寸为 0.5 mm 。试验和数值模拟时的冲压速度为 $1\ 800\text{ mm/s}$ ，压边力为 $1\ 500\text{ kN}$ ，摩擦系数为 0.1 ，模具间隙为 $1.1t$ (t 为板料厚度)。

Barlat 材料模型适用于在平面应力状态下的各向异性的多晶体弹塑性材料的数值模拟分析，既考虑了材料的厚向异性对屈服面的影响，也分析了板料的各向异性对冲压成形结果的影响，可以更准确地预测和评估冲压工艺过程中的材料变形情况。因此，本模型 436L 不锈钢薄板采用了 3 参数 Barlat 模型，其材料模型设置所需数据如图 1 和表 2 所示。

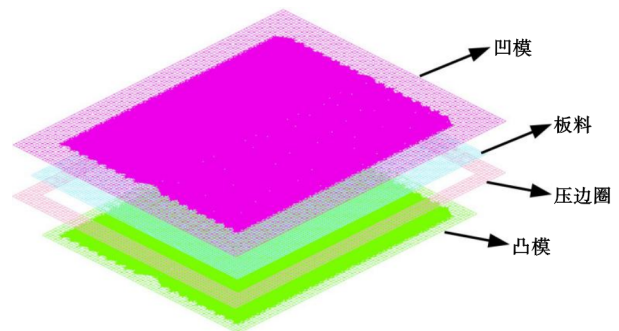


图 4 换热板片冲压成形有限元模型
Fig. 4 Finite element model of heat exchanger plate stamping forming

2 试验结果与讨论

2.1 MR6 浅波纹换热板片的成形过程及分析

2.1.1 数值计算结果及分析

为了平衡换热器承压能力和制造成本，通常换热板片的制造厚度为 $0.5\sim 0.7\text{ mm}$ 。通过数值模型计算该厚度下 MR6 浅波纹换热板片的冲压成形过程，得出换热板片的成形极限如图 5 所示，其中曲线图纵坐标代表主应变，横坐标代表次应变，下同。可见，板厚为 0.5 mm 时，成形极限图中存在少许区域处于开裂红线以上，且存在较多的开裂风险区域（黄线以上）。板厚增加至 0.6 mm 时，成形极限超过开裂红线的区域消失，开裂风险区域减少，但严

表 3 MR6 和 MR10 板型的换热板片结构参数

Table 3 Structural parameters of heat exchange plates for MR6 and MR10 plate-type

板型	板片长度/mm L_p	板片宽度/mm L_w	波纹夹角($^\circ$) β	波纹法向节距/mm λ	波纹深度/mm h	波纹圆角半径/mm r	板片厚度/mm t
MR6	430	250	30	6.25	2	1.5	0.5/0.6/0.7
MR10	450	370	60	8.62	2.6	2.2	0.5/0.6/0.7

重减薄区域增加。而当板厚为 0.7 mm 时,板片中未发现任何开裂区域,且开裂风险和严重减薄区域明显减少。

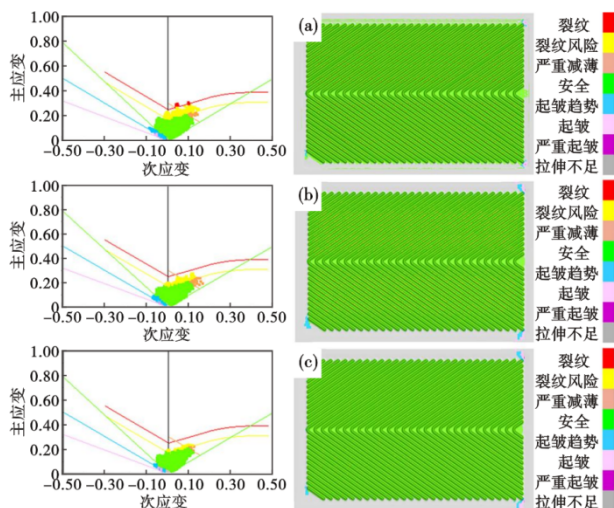


图 5 不同板厚的 MR6 浅波纹换热板片成形极限图:(a) 0.5 mm, (b) 0.6 mm, (c) 0.7 mm

Fig. 5 Forming limit diagrams of MR6 shallow corrugated heat exchanger plate with different thicknesses : (a) 0.5 mm, (b) 0.6 mm, (c) 0.7 mm

根据图 5 可知,浅波纹换热板片中开裂及开裂风险区域主要集中在波纹的波峰圆角区域。不同板厚下单元波纹的减薄率计算结果如图 6 所示。同时,为了定量地分析板厚对板片变形程度的影响,选取波纹法向截面上的 20 个点(S1 ~ S20)作为测量点,其具体减薄率数值列于图 7 中。可见,对于 MR6 板型,板片波峰圆角顶部减薄程度最为严重,其减薄率明显高于波纹侧直壁区,这可能是由于 MR6 板型的波纹圆角过小,板材成形过程中材料的流动受阻,产生应力集中。这种波纹形貌不利于塑性较差的铁素体不锈钢薄板的冲压成形。板材厚度增加可明显降低波峰圆角处的减薄率,每增加 0.1 mm 板厚,波峰圆角处最大减薄率可降低约 2.6%。尽管随着板厚增加其板材的应力强度降低是可预测的,但数值计算结果指出了 436L 钢薄板成形为 MR6 浅波纹换热板片的最小安全壁厚为 0.6 mm。

2. 1. 2 冲压成形试验结果分析

为进一步验证 436L 钢薄板在制造 MR6 浅波纹换热板片时的最小安全壁厚,采用 2 万 t 油压机进行板片冲压试验。冲压工艺参数见 1.3 节所述。浅波纹换热板片换热区成形结果如图 8 所示。可见,

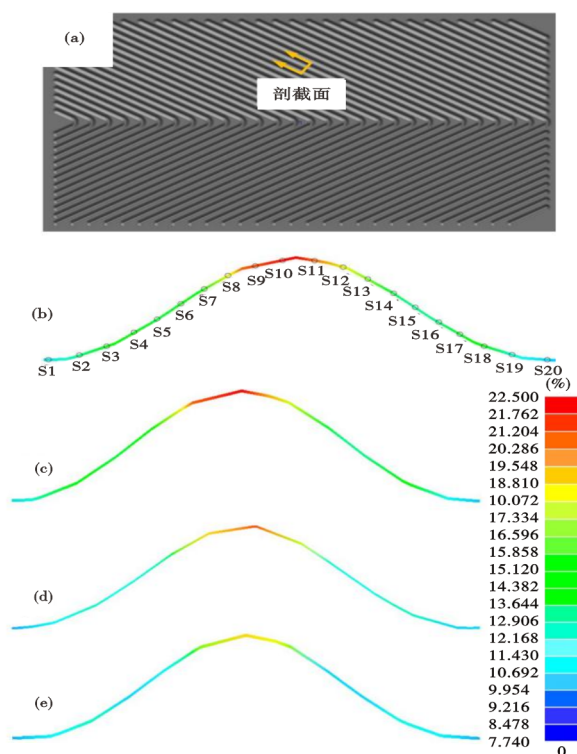


图 6 不同板厚的 MR6 浅波纹截面减薄率分布示意图:(a) 剖截面, (b) 测试点位置, (c) 0.5 mm, (d) 0.6 mm, (e) 0.7 mm

Fig. 6 Schematic distribution of thinning rate of MR6 shallow corrugated section with different plate thicknesses : (a) cross-section position, (b) detection point location, (c) 0.5 mm, (d) 0.6 mm, (e) 0.7 mm

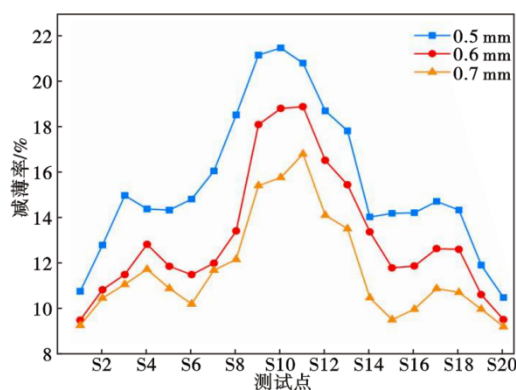


图 7 不同板厚的 MR6 浅波纹截面测试点的减薄率
Fig. 7 The thinning rate of test points with different thicknesses of MR6 shallow corrugated sections

0.5 mm 厚的板片波峰圆角顶部发生开裂,裂纹缝隙较小且部分波峰处出现开裂迹象,该条件下所计算的最大减薄率为 21.5%。0.6 mm 厚的板片波峰处未发现开裂,但表面粗糙且凹凸不平,存在较多的黑色凹坑。这说明板片已濒临开裂,存在开裂风险,该条件下所计算的最大减薄率为 18.9%。0.7

mm 厚的板片表面光滑且有光泽,未发现开裂及表面粗糙情况,成形质量最佳。试验结果与数值模拟结果吻合,这说明在采用 436L 钢板材成形为 MR6 浅波纹换热板片时,可采用的最小壁厚为 0.6 mm,最大减薄率约为 18.9%。在采用 436L 钢设计板式换热器时应据此核算其板材承压能力。

2.2 MR10 深波纹换热板片的成形过程及分析

2.2.1 数值计算结果及分析

相比于 MR6 浅波纹换热板片,MR10 深波纹换热板片在冲压成形时的缺陷就尤为明显。深波纹换热板片的成形极限情况如图 9 所示。可以看出,三种壁厚的板片都存在较多的开裂风险区域。板厚为 0.5 mm 时,成形极限超出开裂红线的部分较多且分散程度大,严重减薄程度也较高。板厚为 0.6 mm 时,成形极限超出开裂红线的部分略微减少,其严重减薄程度也相应减弱。而当板厚增加至 0.7 mm 时,开裂红线以上的区域显著减少且比较集中,其严重减薄程度最低。

由图 9 可见,与浅波纹换热板片成形特征类似,深波纹换热板片中开裂及潜在风险区域主要分布于波纹的波峰圆角区域。图 10 和图 11 详细展示了单元波纹截面上的减薄率计算结果和测量点数值。结果显示,对于 MR10 板型,板片波峰圆角区域的减薄率显然高于波纹两侧直壁区。在 0.5 mm 和 0.6 mm 的板厚下,波峰圆角两侧区域减薄最为严重,而在 0.7 mm 板厚时,波峰圆角顶部的减薄相较于圆角两侧更加显著。这种差异是源于在深波

纹换热板片成形过程中,由于波纹截面高度的急剧变化,较薄的板片在波峰圆角两侧部位材料流动不均,导致变形不稳定和易于减薄。相比之下,较厚的板片在成形深度方面表现更佳,尽管波峰圆角顶部的变形更为充分,但也伴随着更为严重的减薄现象。据减薄率数值计算结果,每增加 0.1 mm 板厚,波峰圆角处的最大减薄率仅降低约 1.4%,表明增加板料厚度对降低其成形过程中的减薄率效果并不明显。可见,深波纹形貌对于铁素体不锈钢的塑性成形更为不利,仅通过增加 436L 钢薄板的壁厚无法充分满足 MR10 深波纹换热板片的质量要求。

2.2.2 冲压成形试验结果分析

采用与 MR6 浅波纹换热板片相同的成形工艺来验证 436L 钢薄板在制造 MR10 深波纹换热板片时的成形特征。图 12 所示为深波纹换热板片换热区成形结果。可见,三种壁厚的板片产品都发生了开裂,且波纹表面呈现粗糙状态。0.5 mm 厚的板片在波峰圆角两侧部位发生开裂,伴随较大的裂纹间隙和错位,该条件下所计算的最大减薄率达到 24.9%;0.6 mm 厚的板片波峰圆角区域裂纹长度减少,且间隙明显变窄,计算最大减薄率为 23.9%;在 0.7 mm 厚的板片中,波峰圆角顶部出现细小且间隙较窄的“齿状”裂纹,此时计算的最大减薄率降至 22.5%。试验结果与数值模拟结果相一致。因此,采用 436L 钢板材成形 MR10 深波纹换热板时,提高壁厚可以影响裂纹位置,但并不能有效控制减薄和

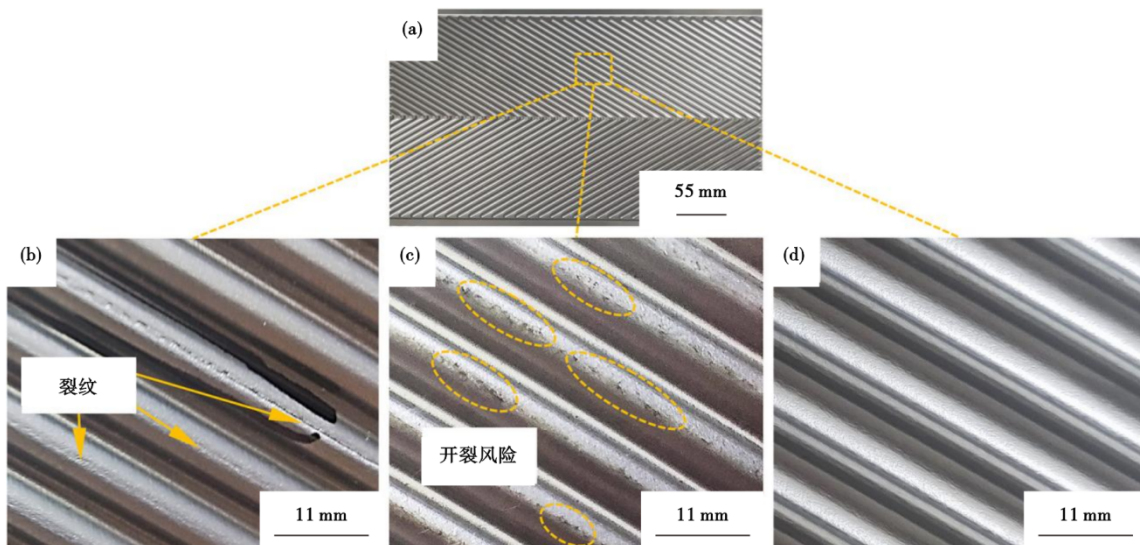


图 8 MR6 浅波纹换热板片冲压成形结果:(a) 板片实物,(b) 0.5 mm,(c) 0.6 mm,(d) 0.7 mm

Fig. 8 MR6 shallow corrugated heat exchanger plate stamping forming result : (a) plate object, (b) 0.5 mm, (c) 0.6 mm, (d) 0.7 mm

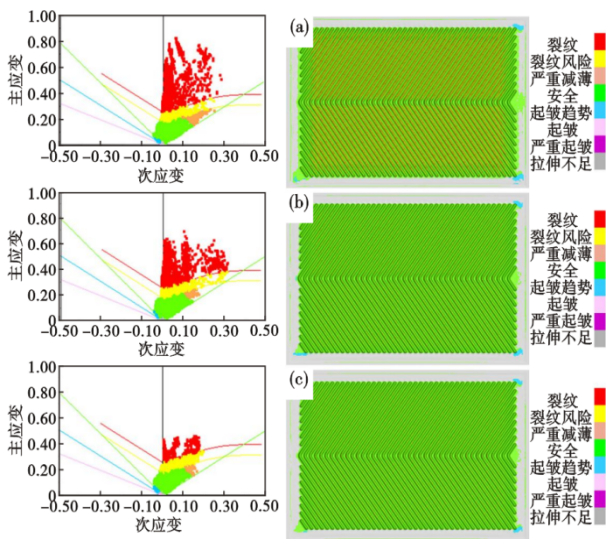


图9 不同板厚的MR10深波纹换热板片成形极限图:(a) 0.5 mm, (b) 0.6 mm, (c) 0.7 mm
 Fig. 9 Forming limit diagrams of MR10 deep corrugated heat exchanger plate with different thicknesses : (a) 0.5 mm, (b) 0.6 mm, (c) 0.7 mm

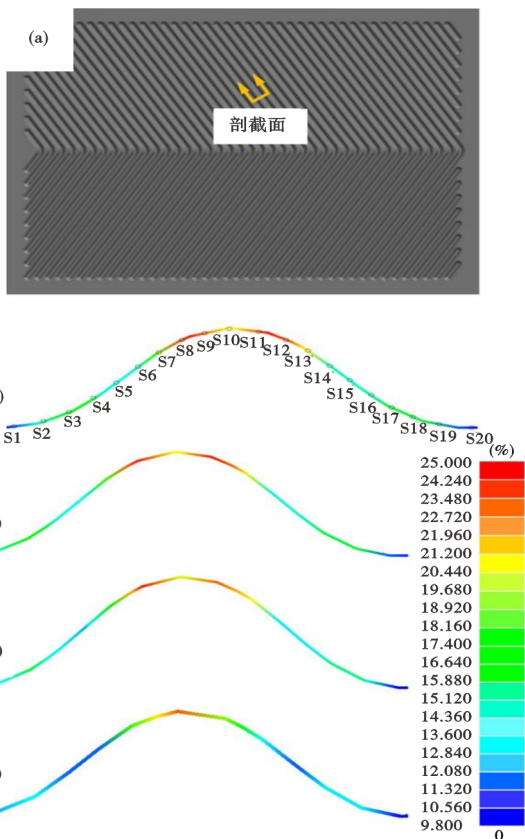


图10 不同板厚的MR10深波纹截面减薄率分布示意图:
 (a) 剖面, (b) 测试点位置, (c) 0.5 mm, (d) 0.6 mm, (e) 0.7 mm

Fig. 10 Schematic distribution of thinning rate of MR10 deep corrugated section with different plate thicknesses : (a) cross-section position, (b) detection point location, (c) 0.5 mm, (d) 0.6 mm, (e) 0.7 mm

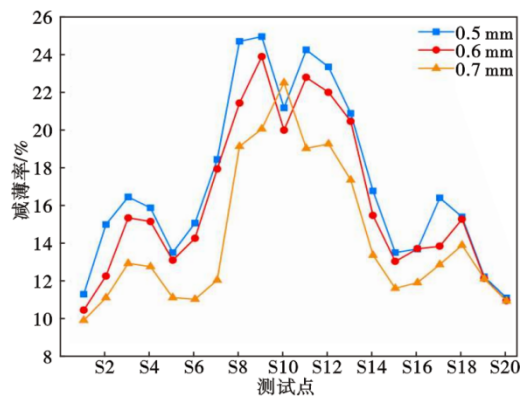


图11 不同板厚的MR10深波纹截面测试点的减薄率
 Fig. 11 The thinning rate of test points with different thicknesses of MR10 deep corrugated sections.

避免开裂。在采用436L钢设计板式换热器时不能单纯依据壁厚核算其板材承压能力,而应结合其他结构参数综合评估。

2.2.3 波纹法向节距对MR10深波纹换热板片成形过程的影响

解决MR10深波纹换热板片的严重减薄和开裂问题,对推动436L钢板材在板式换热器上的大规模应用具有重要工程意义。结合数值模拟来优化波纹参数,通过改进波纹法向节距参数,设置四组不同的波纹法向节距值分别为9.0、9.5、10.0、10.5 mm进行数值模拟,并保持其他结构和工艺参数不变。基于上述材料和有限元模型来探索板厚为0.6 mm,波纹深度为2.6 mm的深波纹换热板片所能满足成形要求的波纹法向节距值。

波纹法向节距优化后的深波纹换热板片成形极限图和减薄率云图如图13所示。由图13可见,当波纹法向节距分别为9 mm和9.5 mm时,板片发生了开裂,此时计算的最大减薄率分别达到了27.882%和21.348%。然而,当波纹法向节距增加到10 mm时,板片在成形后没有出现开裂的情况,仅个别波纹交汇处的波峰圆角部位存在开裂的风险,整体处于安全状态,计算最大减薄率为17.895%;当波纹法向节距达到10.5 mm时,板片成形后未出现任何缺陷,表现出最佳的成形质量,减薄率云图呈现出更好的均匀性,计算所得最大减薄率为15.095%。结合图14结果表明,增大波纹法向节距可以有效降低深波纹换热板片成形过程中的最大减薄率,避免开裂和减薄严重的情况发生。可见,采用436L钢板材成形为0.6 mm厚的MR10深波纹板时,可采用的最小波纹法向节距为10 mm,最大减薄率为

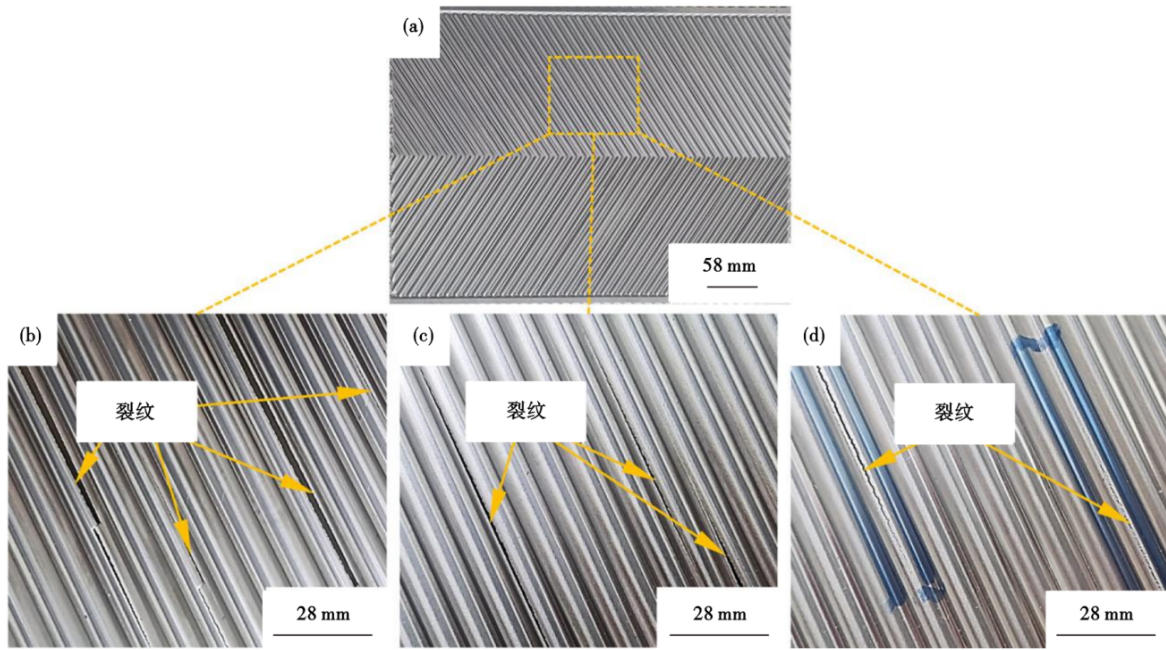


图 12 MR10深波纹换热板片冲压成形结果:(a) 板片实物, (b) 0.5 mm, (c) 0.6 mm, (d) 0.7 mm

Fig. 12 MR10 deep corrugated heat exchanger plate stamping forming result : (a) plate object, (b) 0.5 mm, (c) 0.6 mm, (d) 0.7 mm

17.9%。在采用436L钢设计板式换热器时可依据此参数组合评估其板材成形质量。

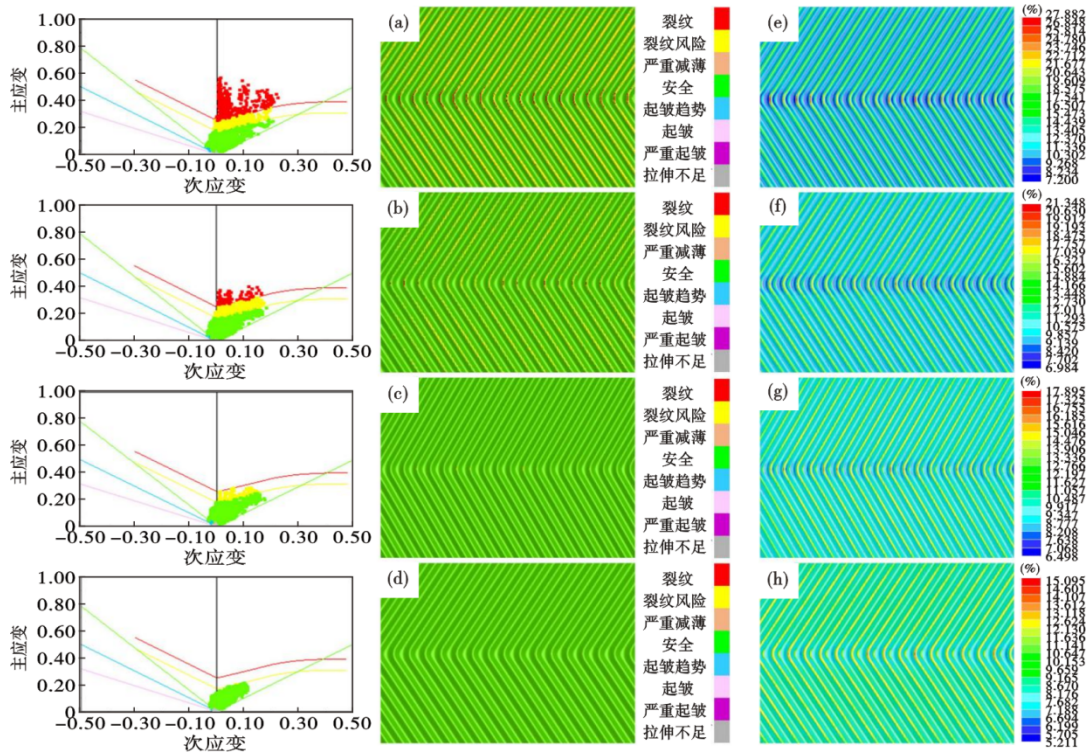


图 13 不同波纹法向节距的MR10深波纹换热板片成形极限图和减薄率图:(a) $\lambda = 9.0$ mm, (b) $\lambda = 9.5$ mm, (c) $\lambda = 10.0$ mm, (d) $\lambda = 10.5$ mm, (e) $\lambda = 9.0$ mm, (f) $\lambda = 9.5$ mm, (g) $\lambda = 10.0$ mm, (h) $\lambda = 10.5$ mm

Fig. 13 Diagram of forming limit and thinning rate of MR10 deep corrugated heat exchanger plate with different corrugation normal pitch : (a) $\lambda = 9.0$ mm, (b) $\lambda = 9.5$ mm, (c) $\lambda = 10.0$ mm, (d) $\lambda = 10.5$ mm, (e) $\lambda = 9.0$ mm, (f) $\lambda = 9.5$ mm, (g) $\lambda = 10.0$ mm, (h) $\lambda = 10.5$ mm

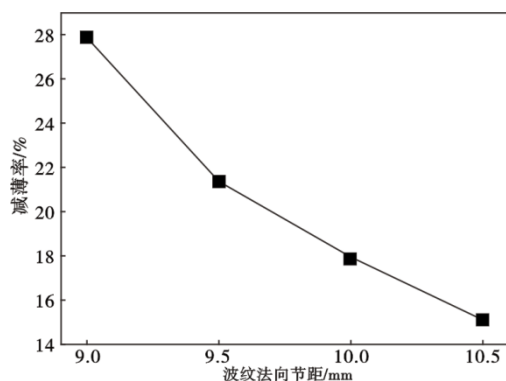


图14 波纹法向节距对MR10深波纹换热板片成形减薄率的影响

Fig. 14 Influence of corrugation normal pitch on MR10 deep corrugated heat exchanger plate forming thinning rate

3 结论

通过数值模拟和试验的方法,研究了436L铁素体不锈钢波纹换热板片的成形特点,分析了该材料在不同波纹形貌下的成形极限和减薄率,并分析了受板材厚度及波纹形貌的影响。结果表明:

(1)436L铁素体不锈钢换热板片的成形极限和减薄率同时受板厚和波纹参数(波纹法向节距)的影响。对本文所涉及两种不同深度的波纹形貌,波峰圆角处减薄率最大,波纹两侧直壁区减薄率较低。增加板厚可显著降低浅波纹换热板片的减薄率从而避免开裂,而对深波纹换热板片的减薄率影响较小。

(2)对浅波纹MR6板型(波纹深度2.0 mm,法向节距6.25 mm),436L钢板材厚度每增加0.1 mm,波峰圆角处最大减薄率可降低2.6%。其成形最小安全板厚为0.6 mm,最大减薄率为18.9%时。设计换热器时应考虑减薄后的承压能力。

(3)对深波纹MR10板型(波纹深度2.6 mm,波纹法向节距8.62 mm),436L钢板材厚度每增加0.1 mm,波峰圆角处最大减薄率仅降低1.4%。常规0.5~0.6 mm板厚下,该型板片在波峰圆角处都存在严重的开裂缺陷。增大波纹法向节距可显著提高MR10板型的成形质量。板厚为0.6 mm时,将波纹法向节距增大至10 mm,可有效降低波峰圆角处的减薄率,避免板材出现开裂缺陷。

参考文献

- [1] 赵伟. 基于有限元技术的换热器板片结构与工艺参数对成型质量影响的分析[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
- [2] Choi S W, Park S H, Jeong H S, et al. Improvement of formability for fabricating thin continuously corrugated structures in sheet metal forming process [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(8): 2397-2403.
- [3] Mazzucco A, Voskuilen T G, Waters E L, et al. Heat exchanger selection and design analyses for metal hydride heat pump systems [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(7): 4198-4213.
- [4] 杨刚, 冯翰翔, 汪向磊, 等. 板式换热器的研究进展[J]. 化学工程与装备, 2019(5): 240-241+74.
- [5] 苏厚德, 徐建新, 张玉福, 等. 波纹板结构参数对传热及力学特性的数值研究[J]. 化工机械, 2022, 49(3): 423-431.
- [6] Gillham M W H. A new composite material for plate heat exchangers [J]. Materials & Design, 1988, 9(4): 192-194.
- [7] 史伟, 俄馨, 王顺花, 等. 板式换热器用304L不锈钢冷冲压波纹板片的耐腐蚀性能试验[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(2): 57-60.
- [8] Ravi Kumar B, Mahato B, Bandyopadhyay N R, et al. Comparison of rolling texture in low and medium stacking fault energy austenitic stainless steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 394(1-2): 296-301.
- [9] Kumar B R, Singh A K, Das S, et al. Cold rolling texture in AISI 304 stainless steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 364(1-2): 132-139.
- [10] 李宇梁, 周光辉. 我国不锈钢产业发展浅析[J]. 冶金管理, 2020(2): 47-51.
- [11] 杜文静, 赵浚哲, 张立新, 等. 换热器结构发展综述及展望[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 76-83.
- [12] 康喜范. 铁素体不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 10-13.
- [13] Luo H, Su H Z, Li B S, et al. Electrochemical and passive behaviour of tin alloyed ferritic stainless steel in concrete environment [J]. Applied Surface Science, 2018, 439: 232-239.
- [14] 刘洪涛. 1Cr17铁素体不锈钢的成形性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [15] 杜伟, 江来珠, 余海峰, 等. 铁素体不锈钢的冲压性[J]. 宝钢技术, 2012(6): 66-76.
- [16] Shin H J, An J K, Park S H, et al. The effect of texture on ridging of ferritic stainless steel [J]. Acta Materialia, 2003, 51(16): 4693-4706.
- [17] Yazawa Y, Muraki M, Kato Y, et al. Effect of chromium content on relationship between R-value and {111} recrystallization texture in ferritic steel [J]. ISIJ International, 2003, 43(10): 1647-1651.
- [18] 王军伟, 靳塞特, 蒋妍彦, 等. 436L不锈钢冲压起皱和颈缩缺陷分析[J]. 铸造技术, 2020, 41(4): 381-383.
- [19] 张源, 李静媛, 方智, 等. 基于Dynaform模拟冲压工艺对17%Cr超纯铁素体不锈钢表面起皱的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(8): 156-161.