

压缩机壳体拉深凸耳和缺料的影响因素及控制

胡开广¹, 杨 业², 黄 旭¹, 武巧玲², 郑学斌¹, 郑春海²

(1. 首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100043; 2. 首钢股份公司迁安钢铁公司, 河北 唐山 064400)

摘要: 针对压缩机壳体用酸洗板 SPHC 低碳铝镇静钢在冲压过程中的拉深凸耳及其导致的缺料问题, 首先, 根据仿真建模和拉深凸耳的产生原因, 分析了压边力、摩擦因数、坯料形状、模具间隙、板料厚度和各向异性因素对凸耳的影响, 结果显示, 坯料形状和各向异性是造成压缩机壳体拉深凸耳的主要因素。然后, 通过变换不同的 r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 值, 发现当 $dr_{\max} < 0.45$ 时, 可有效改善压缩机壳体由于拉深凸耳所导致的最终成形边缺料问题, 且 dr_{\max} 越大, 缺料问题越明显。最后, 通过轧制工艺优化改善了钢卷边部与中部的均匀性, 使拉深凸耳得到了有效控制, 并针对拉深缺料问题提出了两种坯料优化方案, 并给出了两种方案的缺料尺寸与补料尺寸的关系。该研究可为解决压缩机壳体拉深凸耳和缺料问题提供有效的参考依据。

关键词: 酸洗板; 压缩机壳体; 拉深凸耳; 缺料; 各向异性; 坯料形状

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.010

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 06-0069-07

Influence factors and control of deep drawing lug for compressor shell

Hu Kaiguang¹, Yang Ye², Huang Xu¹, Wu Qiaoling², Zheng Xuebin¹, Zheng Chunhai²

(1. Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China;

2. Shougang Corporation Qian'an Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 064400, China)

Abstract: Aiming at the problems of deep drawing lug and resulting material shortage in the stamping process of SPHC low carbon aluminum killed steel for pickling plate used in compressor shell, firstly, based on the simulation modeling and the cause of deep drawing lug, the influences of factors such as blank holding force, friction coefficient, blank shape, die clearance, sheet thickness and anisotropy on the lug were researched. The results show that the blank shape and anisotropy are the main factors causing the deep drawing lug of compressor shell. Then, by changing different r_0 , r_{45} and r_{90} values, it is found that when dr_{\max} is less than 0.45, the material shortage problem in the final formed edge caused by the deep drawing lug of compressor shell is effectively improved, and the larger the dr_{\max} value is, the more obvious the material shortage problem is. Finally, through the rolling process optimization, the uniformity of the edge and center of steel coil was improved, so that the deep drawing lug was effectively controlled, and two blank optimization schemes were proposed to solve the problem of material shortage in the deep drawing, and the relations between material shortage size and supplement size in two schemes were given. This study can provide an effective reference for solving the problems of deep drawing lug and material shortage of compressor shell.

Key words: pickling plate; compressor shell; deep drawing lug; material shortage; anisotropy; blank shape

热轧酸洗板卷是国内市场新兴的产品, 其表面质量和使用要求介于热轧板和冷轧板之间, 性价比较高。市场需求主要集中在汽车、家电、机械制造及各种形状的冲压件等, 其中, 酸洗产品低碳铝系列占总量的 60%。低碳铝酸洗板的拉深凸耳缺料问题已成为家电和汽车用钢的常见缺陷, 已经严重阻碍了热轧酸洗板的发展脚步。虽然, 筒形件拉深成形一直是行业内研究的热点, 但缺陷依旧频发, 又

因为酸洗板表面质量较冷轧板差, 其生产设备以及工艺水平往往参差不齐, 上述冲压缺陷问题很难有效并系统地解决。相关文献显示^[1-10], 酸洗板拉深缺陷不仅与材料的表面质量和力学性能有关, 同时, 还与模具的间隙、冲压工艺参数、坯料形状尺寸等因素有关。

材料性能方面的主要原因为: 带钢边部及上、下表面轧制温度较低, 这些部位的带钢处于未再结晶区, 当进行轧制时铁素体形核及精轧储存了大量形变能, 导致后续冷却过程中晶粒长大, 而中心部位温度较高, 带钢处于完全再结晶区, 轧制冷却后组织细小均匀, 从而形成表层到中心、边部到中心

收稿日期: 2022-08-05; 修订日期: 2022-11-13

作者简介: 胡开广 (1989-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 564471005@qq.com

部的组织不均^[11], 导致成形性能差。因此, 在板料横向和轧向存在较大的性能差异, 会造成后续拉深走料不均匀, 引起凸耳和下一工序缺料的问题。因此, 本文针对酸洗板 SPHC 低碳铝镇静钢的拉深凸耳及其导致缺料问题展开研究, 尤其是酸洗板拉深工艺及其特性研究, 以解决客户认证及使用过程中的拉深缺陷问题。

1 筒形件拉深工艺建模与分析

在筒形件拉深过程中出现的凸耳, 一般有 4 个或 6 个, 甚至 8 个^[12-13], 其产生的原因为坯料各向异性的差异, 在圆周分布面上波峰与波谷的分布与厚向异性系数 r 值的变化相关: 在 r 值较低的方向上, 坯料厚度增大, 筒壁的高度较低; 在 r 值较高的方向上, 坯料厚度变化较小, 筒壁的高度较高。凸耳常在修边工序切除, 这不仅增加了工序, 还降低了材料利用率, 因此应避免凸耳缺陷的发生。

1.1 筒形件拉深成形建模

基于 Autoform 对筒形件拉深成形进行建模, 仿真模型由凸模、压边圈和凹模组成。凸模直径为 $\Phi 38$ mm, 圆角半径为 $R5$ mm。坯料形状为圆形, 建模后导入到 Autoform 中, 并输入表 1 中给出的酸洗板 SPHC 低碳铝镇静钢的材料性能参数, 其中, r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 分别为与轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 的厚向异性系数值。模拟结果如图 1 所示。

表 1 酸洗 SPHC 钢的材料性能参数

Table 1 Material property parameters of pickling SPHC steel

试样与轧制 方向夹角	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	硬化指数 n	厚向异性 系数 r 值
0°	242	342	0.20	0.95
45°	245	350	0.20	1.02
90°	240	348	0.20	0.85

1.2 拉深实验与仿真分析对比

使用板材综合成形实验机的成形性能检测系统, 如图 2 所示, 分别对直径 D 为 $\Phi 80$ 、 $\Phi 85$ 和 $\Phi 90$ mm 的料片进行仿真分析与实验验证, 结果显示仿真形貌与实验结果相一致, 如图 3 所示。图 4 和图 5 分别为凸耳值与压边力和模具间隙的关系曲线, 其中, 凸耳值为凸耳波峰与波谷的高度差, t 为材料厚度。由图 4 与图 5 可知: 在未拉深开裂前, 随着压边力的增大, 凸耳值呈下降趋势, 降

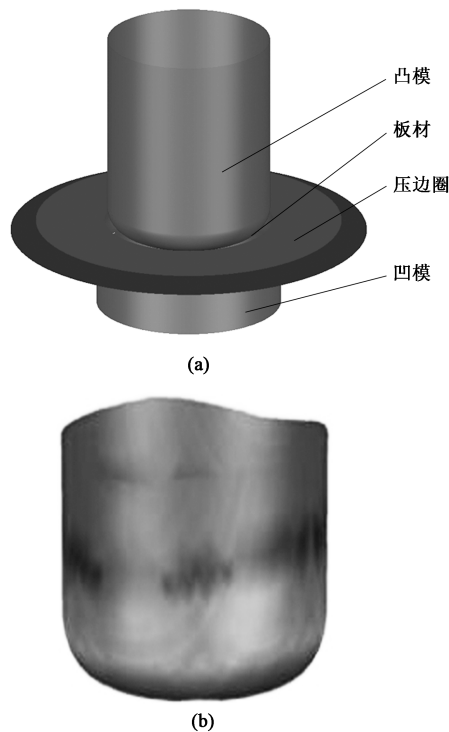


图 1 筒形件拉深成形建模 (a) 及模拟结果 (b)

Fig. 1 Modeling (a) and simulation result (b) for deep drawing of cylindrical part



图 2 板材综合成形实验机

Fig. 2 Sheet metal comprehensive forming machine

幅较小且实验值与仿真值相差较小; 随着模具间隙的增大, 凸耳值呈上升趋势, 升幅较小且实验值与仿真值相差较小。因此, 此仿真方法可作为研究筒形件拉深成形工艺的依据。

1.3 压缩机壳体拉深工艺分析

压缩机下壳体采用 1 次拉深成形, 厚度为 2.8 mm, 通过建模并导入 Autoform 仿真软件中, 如图 6 所示。基于以上仿真模型, 对导致拉深凸耳形成的压边力、摩擦因数、坯料厚度、模具间隙、坯料形状和各向异性 6 种影响因素进行了仿真计算。本文中坯料形状按图 7 所示形式分布, 编号为 1、2、3 和 4, 椭圆形状逐渐增强。结果显示, 压边力、

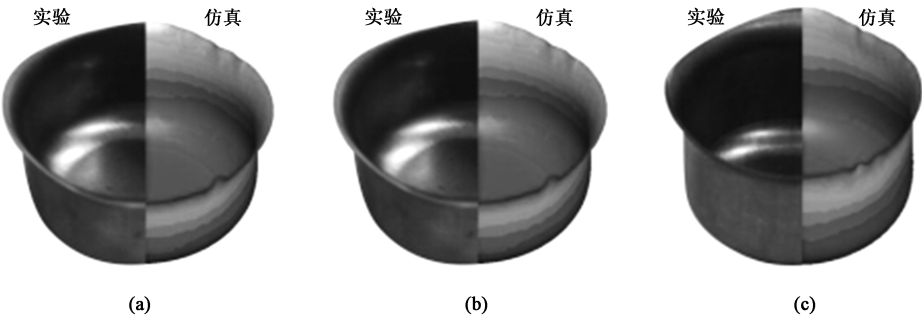


图 3 仿真与实验结果对比
(a) $D=\Phi 80\text{ mm}$ (b) $D=\Phi 85\text{ mm}$ (c) $D=\Phi 90\text{ mm}$
Fig. 3 Comparison between simulation and experiment results

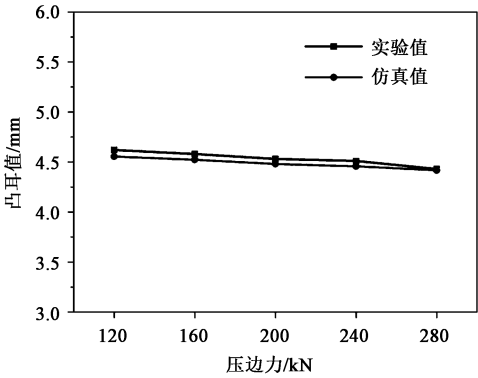


图 4 凸耳值与压边力关系曲线
Fig. 4 Relationship curves of lug values and blank holder forces

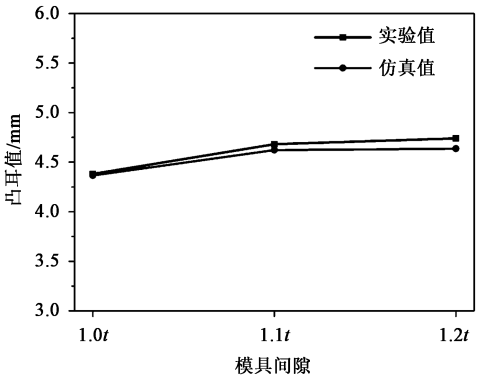


图 5 凸耳值与模具间隙关系曲线
Fig. 5 Relationship curves of lug values and die clearances

摩擦因数、坯料厚度、模具间隙对凸耳值的影响较小，坯料形状和各向异性的影响较大，如图 8 所示。

2 拉深凸耳评价方式

拉深凸耳的评价方式一般取各向异性系数 Δr ，如式 (1) 所示，其值越大越易发生凸耳缺陷，反



图 6 压缩机下壳体模型
Fig. 6 Model of compressor lower shell

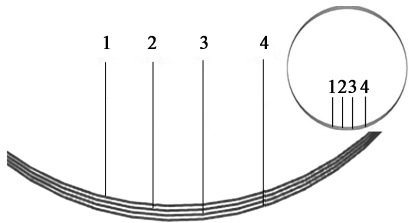


图 7 坯料形状
Fig. 7 Shapes of billet

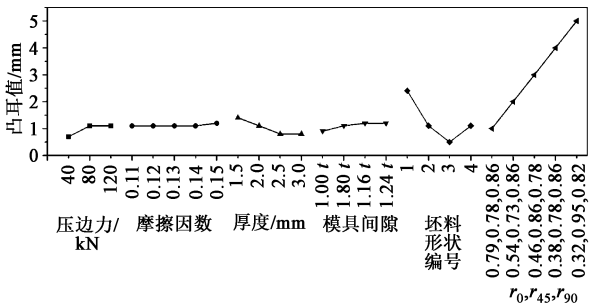


图 8 凸耳值的影响因素分析
Fig. 8 Analysis of influence factors to lug values

之越不易发生凸耳。

$$\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2 \quad (1)$$

通过大量的实验与仿真分析,得出当各个方向的 r 值存在差异时仍有可能出现 Δr 为 0 的情况,但仍会出现凸耳,例如:当 $r_0 = 0.5$ 、 $r_{45} = 0.7$ 、 $r_{90} = 0.9$ 时,则 $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2 = 0$,但仿真结果依然存在凸耳现象。定义 dr_{\max} 为 r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 这 3 者两两差值的最大绝对值,此物理量表示板材在各个方向波动的最大幅度,如式 (2) 所示。

$$dr_{\max} = \max(|r_0 - r_{45}|, |r_0 - r_{90}|, |r_{45} - r_{90}|) \quad (2)$$

东北大学的轧制技术及连轧自动化国家重点实验室裴新华等^[14]对热轧酸洗板拉深凸耳的形成因素进行了研究,对比了各向异性系数 Δr 与 dr_{\max} 对拉深凸耳的评估精确度,如图 9 所示,进而指出凸耳是由于 r 值在各个方向上的差异造成的,而 dr_{\max} 比 Δr 更能有效地体现各向异性和凸耳之间的关系。

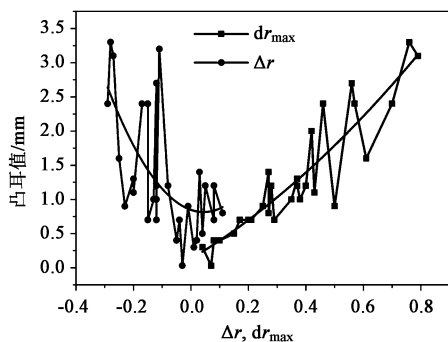


图 9 Δr 、 dr_{\max} 与凸耳值的关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between Δr , dr_{\max} and lug values

3 拉深缺料工艺分析

压缩机下壳体是由圆形坯料经过 1 次拉深后,最终成形为带有法兰的筒身零件,经第 2 工序修边后切去多余金属,进入下步翻边收口工序。由于拉深凸耳会造成部分区域切边余量不足,如图 10 所示,从而导致零件最终成形边缺料,后序无法装配。

由于板料横向和轧向存在性能差异,且板宽方向性能也存在不同,因此,在 Autoform 仿真软件中以 3 个方向的 r 值为变量,以 dr_{\max} 为参考指标,其他力学性能参数不变,将表 1 中的材料力学性能参数制作成材料仿真卡片并导入软件中,进行仿真计算。

计算结果显示:当 $dr_{\max} \leq 0.45$ 时,压缩机下壳体第 1 工序的法兰部分满足修边要求,如图 10b 所示;当 $dr_{\max} > 0.45$ 时,即在板料横向、纵向以及 45°

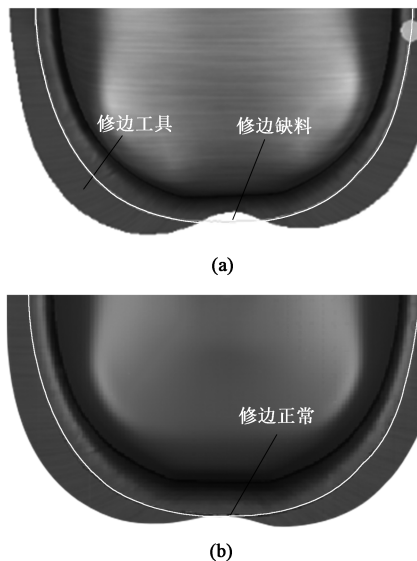


图 10 修边工序的法兰部分

(a) $dr_{\max} > 0.45$ (b) $dr_{\max} \leq 0.45$

Fig. 10 Flange part in trimming process

方向的 r 值存在较大差异,由于在缺料位置的 r 值较小,导致拉深过程中板料厚度方向变化较小,流入量较大,此处出现凸耳波谷,经过修边工序后该位置余料不足造成缺料现象,如图 10a 所示。

由于材料各向异性的差异,对 dr_{\max} 进行了不同参数下缺料尺寸的仿真分析,如图 11 所示,结果显示,随着 dr_{\max} 的增大,缺料尺寸呈增大趋势。

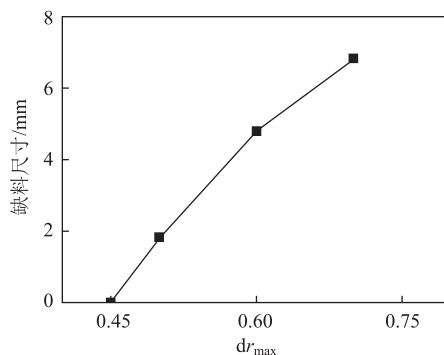
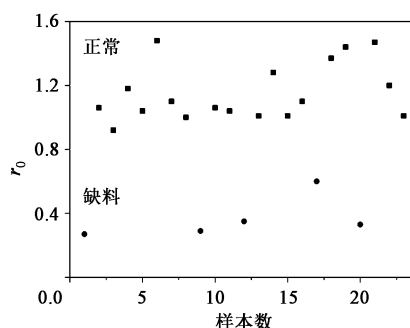


图 11 dr_{\max} 与缺料尺寸的关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between dr_{\max} and size of material shortage

4 轧制工艺优化

由于材料在优化前卷料边部的横向与纵向性能存在差异,一般卷料板宽方向的中部性能优于边部,卷料边部的头、中、尾性能也存在性能差异,造成整卷材料性能一致性较差,即检测位置 r 值波动较大,导致 dr_{\max} 较大。图 12 为卷料的 r_0 值分布图。

图12 材料优化前 r_0 值分布Fig. 12 Distribution of r_0 value before material optimization

由图12可知, r_0 值主要集中在1.2附近, 卷料边部的 r_0 值较低, 接近于0.3, 与卷料板宽中部的 r_0 值1.2相差0.9, 由此造成筒形件拉深凸耳现象。

缩小 dr_{\max} 值的直接途径为提高卷料宽度上的组织均匀性。针对低碳铝镇静钢组织均匀性提出了以下技术方案。

4.1 轧制温度控制

提高终轧温度, 由此避免进入两相区轧制造成混

晶。使用板卷箱来提升精轧入口温度, 以及改善温度均匀性、提高产品组织性能一致性。另外, 投入边部加热器, 以实现边部补温, 避免边部温度过低而落入两相区。

4.2 温度均匀性控制

在终轧温度控制方式上, 采用板卷箱工艺配合使用动态机架间水控制模式, 并对动态机架间水控制逻辑进行优化, 减小后部机架反馈控制流量, 以改善后部机架表层过冷造成的表层混晶问题。对工作辊冷却水喷嘴进行边部小流量、中心大阶梯流量控制, 以改善边部过冷。

4.3 轧制变形控制

减薄中间坯, 将酸洗板 SPHC 的中间坯厚度由38~44 mm 减薄为32~38 mm, 并采取小凸度控制, 目标凸度为30 μm , 需提升同板差控制水平。

通过以上措施使板料厚度方向、卷料宽度方向的混晶问题得到了有效改善, 优化前后的晶粒尺寸见图13。如图14、图15所示, 卷料边部的硬化指数 n 值较优化前提高约21%, r 值较优化前整体均匀性明显提升。

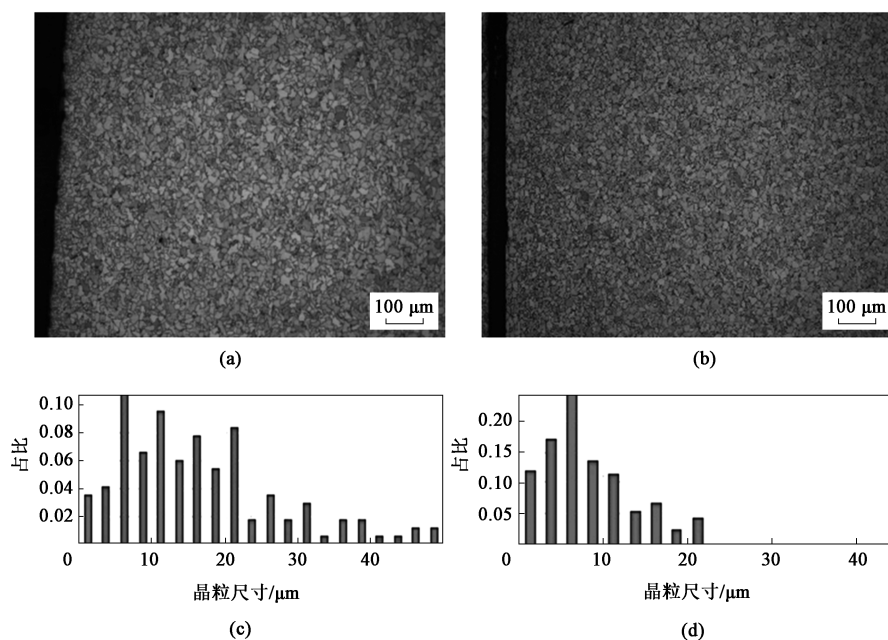


图13 酸洗板的微观组织和晶粒尺寸分布

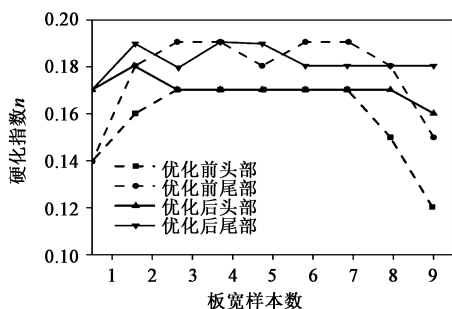
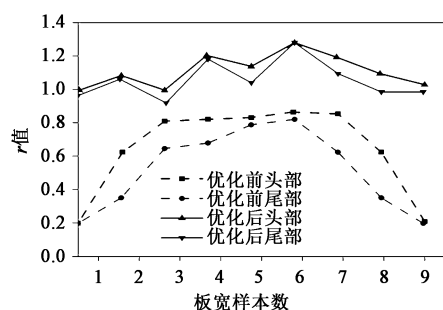
(a) 优化前的金相组织 (b) 优化后的金相组织 (c) 优化前的晶粒尺寸分布 (d) 优化后的晶粒尺寸分布

Fig. 13 Microstructures and grain size distribution of pickling plate

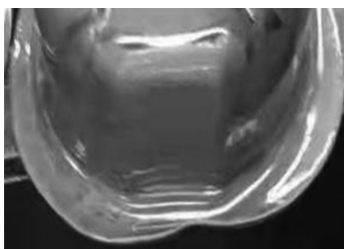
(a) Metallographic structure before optimization (b) Metallographic structure after optimization
(c) Grain size distribution before optimization (d) Grain size distribution after optimization

优化后, 在卷料边部、中部和尾部等区域采集样本参数, 3个方向的 r 值如表2所示。可以得出, 优化后 dr_{\max} 值均控制在0.45以下, 通过

冲压实验验证得到, 在此范围内冲压均未出现由于拉深凸耳致使后序局部缺料的问题, 如图16、图17所示。

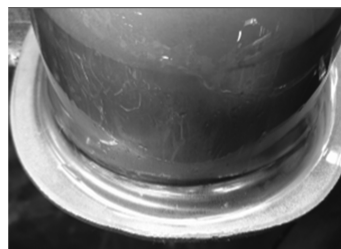
图 14 优化前后卷料头部和尾部的硬化指数 n 值Fig. 14 Hardening index n values of head and tail for coil material before and after optimization图 15 优化前后卷料头部和尾部的 r 值Fig. 15 r values of head and tail for coil material before and after optimization表 2 材料优化后三向 r 值Table 2 r values in three directions after material optimization

编号	r_0	r_{45}	r_{90}	dr_{\max}
1	0.86	1.06	0.92	0.20
2	1.18	1.04	1.08	0.10
3	1.09	0.99	0.98	0.10
4	0.98	1.05	1.03	0.07
5	0.95	1.00	1.28	0.33
6	1.01	1.09	0.89	0.20
7	1.12	1.21	0.92	0.29

图 16 $dr_{\max} > 0.45$ 时的由拉深凸耳导致的缺料情况Fig. 16 Material shortage caused by deep drawing lug when $dr_{\max} > 0.45$

5 坯料改进方案

由于坯料的形状对拉深成形质量的结果存在较大影响,在拉深工艺中控制坯料形状可以改善由于

图 17 $dr_{\max} < 0.45$ 时卷料边部均匀Fig. 17 Edge uniform of coil stock when $dr_{\max} < 0.45$

金属流动不均匀导致的切边余量不足的问题,从而提高拉深成形性,消除缺料现象。由于坯料片的 r_{90} 值存在差异,原坯料片为圆形,在切边不足的部分增大料片尺寸,可以补足切边余量。以下给出两种坯料优化方案:方案 1 为面积不变原则,方案 2 为宽度不变原则,如图 18 所示。

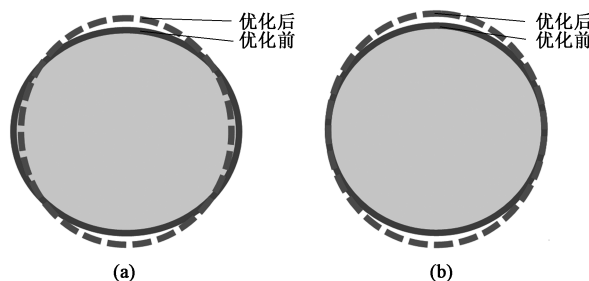


图 18 两种坯料优化方案

(a) 方案 1: 面积不变 (b) 方案 2: 宽度不变

Fig. 18 Two kinds of blank optimization schemes

(a) Scheme 1 of area invariant (b) Scheme 2 of width invariant

针对两种坯料优化方案,对切边余量不足导致的缺料尺寸与坯料优化后需要的补料尺寸进行了仿真计算,最后得出两种优化方案中缺料尺寸与补料尺寸的关系,如图 19 和图 20 所示。两种优化方案在确保压缩机壳体成形良好的情况下,需进行不同程度的压边力调整,以保证在切边工序中切边余量

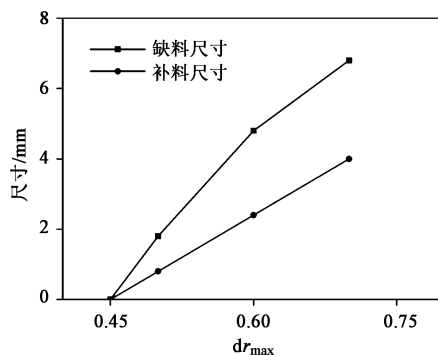


图 19 坯料优化方案 1 中缺料尺寸与补料尺寸的关系

Fig. 19 Relation between material shortage size and supplement size in blank optimization scheme 1

满足成形要求。以上优化方案可解决在实际生产中, 由于冲压时金属流动不均匀导致的拉深凸耳, 以及最终导致的修边后局部缺料的问题。

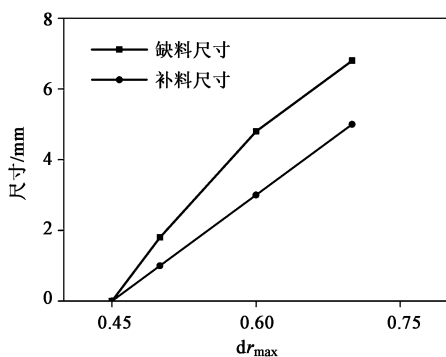


图20 坯料优化方案2中缺料尺寸与补料尺寸的关系

Fig. 20 Relation between material shortage size and supplement size in blank optimization scheme 2

6 结论

(1) 对造成拉深凸耳的压边力、摩擦因数、坯料厚度、模具间隙、坯料形状和各向异性6种影响因素进行了研究, 结果显示, 坯料形状和各向异性是影响拉深凸耳的主要因素。

(2) 对比了各向异性系数 Δr 与 dr_{max} 对拉深凸耳的评估精确度, 在压缩机壳体拉深成形工艺中, dr_{max} 比 Δr 更能有效表明各向异性 and 凸耳之间的关系。

(3) 通过仿真建模与拉深凸耳工艺研究, 得出 $dr_{max} < 0.45$ 时, 拉深缺料缺陷可以得到有效改善, 且 dr_{max} 值越大, 缺料问题越明显。

(4) 通过控制轧制温度、温度均匀性和轧制变形等措施, 提高了卷料的组织均匀性, 将 dr_{max} 控制在成形工艺合理要求的范围内。

(5) 针对拉深缺料的原材料提出两种坯料优化方案, 并得出两种方案的缺料尺寸与补料尺寸的关系。

参考文献:

- [1] 林艳丽, 何祝斌, 袁杭, 等. 金属板材拉深制耳形状与各向异性系数的解析关系模型 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (6): 19-25.
Lin Y L, He Z B, Yuan H, et al. Analytical relationship model of ear profile and anisotropy coefficient of sheet metal deep drawing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (6): 19-25.
- [2] 胡开广, 李涛, 郭子峰, 等. 酸洗材料对轮辐成形质量的影响 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 140-146.
Hu K G, Li T, Guo Z F, et al. Influence of pickling material on forming quality of spoke [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 140-146.
- [3] 朱春华, 叶建华, 朱聪玲, 等. 基于 SolidWorks 凸耳功能的研究与开发 [J]. 机械设计与制造, 2010, 231 (5): 80-81.

Zhu C H, Ye J H, Zhu C L, et al. Research and development of lug function based on solidworks [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, 231 (5): 80-81.

- [4] 陈延星. 热轧酸洗板成形极限的数值模拟研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
Chen Y X. Numerical Simulation of Forming Limit of Hot-rolled Pickling Plate [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.
- [5] 沈翔. 塑性应变比对板料拉深成形影响的研究 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
Shen X. Study on Influence of Plastic Strain Ratio on Sheet Deep Drawing [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018.
- [6] 王金亮, 温慧华, 何文武, 等. 扩孔变形模式对筒形件成形的影响规律 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 1-7, 22.
Wang J L, When H H, He W W, et al. Influence laws of reaming deformation modes on forming of cylindrical parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 1-7, 22.
- [7] 李娟, 王辉, 严大伟. 金属板料塑性应变比的影响因素分析 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (3): 229-234.
Li J, Wang H, Yan D W. Analysis of factors affecting the plastic strain ratio of sheet metal [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (3): 229-234.
- [8] 单云, 吴斌. 高强度钢深拉深成形性能研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (9): 109-111.
Shan Y, Wu B. Study on formability of deep drawing for high-strength steel [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (9): 109-111.
- [9] 郑学斌, 郭子峰, 韩龙帅, 等. 热轧酸洗 SAPH440 翻边开裂原因分析及优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 46-51.
Zheng X B, Guo Z F, Han L S, et al. Analysis and optimization of flanging cracking of hot rolling pickling SAPH440 [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 46-51.
- [10] 梁文, 刘培灿, 何龙义, 等. 深冲用 SPHC 钢开裂原因分析及改进措施 [J]. 轧钢, 2020, 37 (2): 41-45.
Liang W, Liu P C, He L Y, et al. Crack analysis and improvement measures of SPHC steel for deep drawing [J]. Steel Rolling, 2020, 37 (2): 41-45.
- [11] 王林, 于洋, 王畅, 等. 边部组织及切边工艺对低碳 SPHC 冷轧边裂的影响 [J]. 中国冶金, 2014, 24 (9): 15-21.
Wang L, Yu Y, Wang C, et al. Effect of microstructure and shearing parameter on the edge crack defect in the SPHC steel with lower carbon content during cold rolling process [J]. China Metallurgy, 2014, 24 (9): 15-21.
- [12] 董学涛, 金世铨, 王亚东, 等. SPHE 压缩机壳体冲压制耳缺陷分析 [J]. 金属世界, 2021, 215 (3): 45-48.
Dong X T, Jin S Q, Wang Y D, et al. Defect analysis of SPHE compressor shell punch lug [J]. Metal World, 2021, 215 (3): 45-48.
- [13] 王连轩, 操志博, 贾彩霞, 等. 冷轧板塑性应变比对凸耳率影响规律的研究 [J]. 河北冶金, 2017, 256 (4): 10-13.
Wang L X, Cao Z B, Jia C X, et al. Effect of plastic strain ratio on lug ratio of cold rolled sheet [J]. Hebei Metallurgy, 2017, 256 (4): 10-13.
- [14] 裴新华, 龚志辉. 热轧酸洗板深拉深成形凸耳形成因素研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (3): 88-91.
Pei X H, Gong Z H. Research on earing forming factor of hot rolled pickling plate in deep drawing [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (3): 88-91.