DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.04.020

436L 不锈钢冲压起皱和颈缩缺陷分析

王军伟[1,2],靳塞特[1],蒋妍彦[2],李　辉[2]

(1. 酒钢集团宏兴股份公司 钢铁研究院,甘肃 嘉峪关 735100; 2. 山东大学 材料学院,山东 济南 250061)

摘　要:针对 436L 不锈钢覆盖件冲压起皱和颈缩缺陷,进行了冲压成形应力分析、金相组织和材料力学性能分析。结果表明,436L 板材 40°方向的 r 值较低导致起皱,凸模圆角过渡半径偏小导致颈缩。经过材料性能改进和模具优化,将 436L 板材 45°方向 r 值提高至 1.02 以上,将凸模圆角过渡半径增加至 20 mm,同时消除了起皱和颈缩缺陷。

关键词:436L 不锈钢;冲压;起皱;颈缩;r 值

中图分类号:TG386　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)04-0381-03

Analysis of Stamping Wrinkling and Necking Defects of 436L Stainless Steel

WANG Junwei[1,2], JIN Saite[1], JIANG Yanyan[2], LI Hui[2]

(1. Iron and Steel Research Institute, Gansu Jiu Iron and Steel Group Hongxing Co., Ltd., Jiayuguan 735100, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: According to the stamping wrinkling and necking defects of 436L stainless steel covering parts, the stamping forming stress analysis, microstructure and mechanical properties analysis were carried out. The results show that the low r value in the 40° direction of the 436L plate will leads to stamping wrinkling, and the small transition radius of the round corner of the punch leads to necking defects. After material performance improvement and mold optimization, the 45° direction r-value of 436L plate is increased to 1.02 and above, and the transition radius of the round corner of the mould is increased to 20 mm. Meanwhile, wrinkling and necking defects are eliminated.

Key words: 436L stainless steel; stamping forming; wrinkling, necking; r-value

冲压成形生产效率高、成本低且可用于复杂成形,常用于生产排气系统的覆盖件,但该方法对板材的成形性能要求高。436L 是超纯铁素体不锈钢,在汽车排气系统的中端和冷端广泛应用[1],如消音器外壳和尾管。本文针对某公司 436L 冷轧薄板在冲压生产覆盖件时出现的起皱和颈缩缺陷进行分析,并提出了改进方案。

1　起皱和颈缩缺陷形态

436L 不锈钢覆盖件采用 1.2 mm 厚板材冲压成型,其外形结构如图 1 所示。对比分析了覆盖件的主要缺陷,在底部斜面的圆角过渡台阶处对称出现起皱现象,见图 1(a)中圆圈标记;同时,在圆角过渡区伴随有颈缩现象,如图 1(b)中箭头所指。底部其他位置分布有拉伸筋,无上述缺陷发生,拉伸筋如图 1(a)箭头所示。

收稿日期:2020-03-39

作者简介:王军伟(1986-),陕西兴平人,硕士,工程师.主要从事不锈钢板带产品开发方面的工作.

电话:18209477809,E-mail:wangjunwei2@jiugang.com

2　缺陷形成原因

当冲压成形过程实施时,在成形初期凸模先接触覆盖件底部,这时底部斜面处于自由表面状态。凸模继续向下运动,直到底部斜面最终成形。底部与凸模接触后,由于冲压过程继续进行,此时板材仍承受双向拉应力,并存在多处拉伸筋,使拉应力增大,避免起皱发生。底部斜面在冲压的最后阶段成形,在冲压过程一直是自由表面。

首先对起皱部位进行受力分析,简化薄板受力为平面应力状态,由于起皱部位在底部斜面靠近圆角位置,按锥形零件侧壁受力进行分析。冲压过程自由表面仅受径向拉应力 σ_ρ 和周向压应力 σ_θ[2],如图 2 所示。从起皱形态判断,沿着皱褶长度方向受拉应力 σ_ρ,宽度方向可近似看作圆周方向,受应力 σ_θ,宽度方向受挤压应力从而产生起皱。对于板材而言,起皱与单轴拉伸条件下宽向应变和厚向应变的比值 r 值有关[3],r 值代表了周向压缩应变能力。若 r 值较小,宽向应变能力不足即可出现起皱,而宽向存在压应力则会加剧起皱,这是冲压起皱的根本原因。分析起皱方向和板材轧制方向,发现两者之间的夹角为 40°左右,这说明 436L 板料 40°方向的 r 值不满足冲

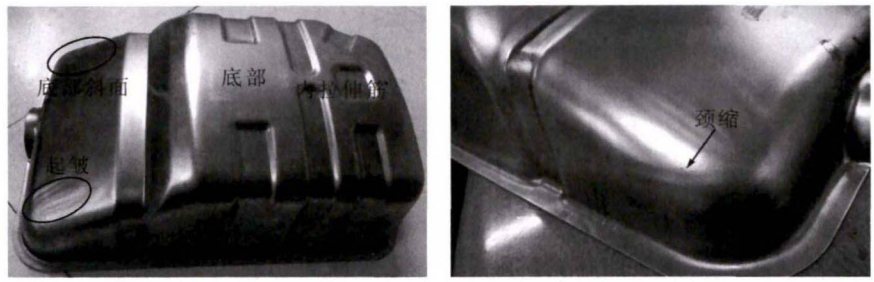


图 1 覆盖件起皱和塑性失稳缺陷
Fig.1 Wrinkling and plastic instability defects in stamped covering parts

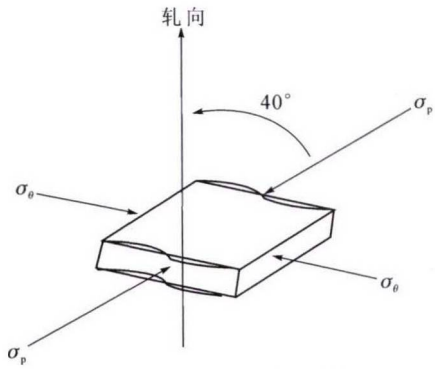
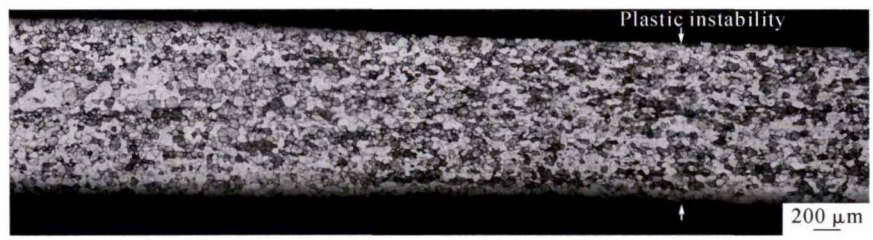


图 2 起皱位置的受力分析
Fig.2 Stress analysis of wrinkling location

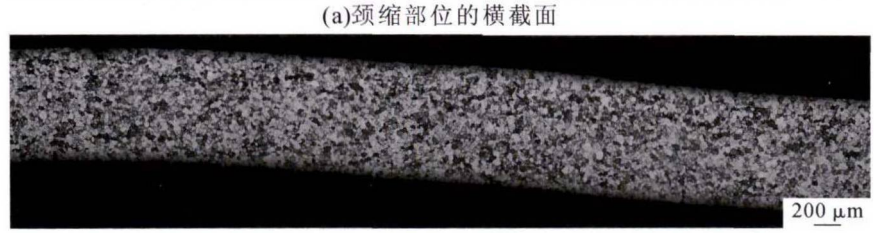
压成形的要求,如图 2 所示。与底部斜面不同的是,圆角过渡区受弯曲和拉伸应力,这两种应力均产生伸长应变。出现颈缩,说明拉应力接近材料的抗拉强度。

图 3 为颈缩和起皱部位的横断面金相组织。可以看到,颈缩处厚度存在明显减薄,组织受拉应力显现被拉长的形态,见图 3(a)和图 3(a1),测量了该位置的厚度,最薄仅为 1.00 mm。为原始厚度的 50%。而起皱部位宏观上仅显示出轻微的弯曲变形,没有明显的厚度变化,见图 3 (b)。测量了其厚度为 1.18 mm,这接近原始板材的厚度,起皱部位由于同时受拉应力和压应力,这是厚度基本没有减薄的原因。起皱部位组织为尺寸均匀的等轴晶粒,大小在 6 级左右,如图 3(b1)所示。

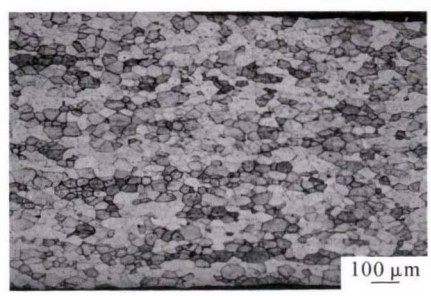
结合冲压原理和金相分析,推断压边力设定偏大或者凸模圆弧过渡半径 R 设计偏小导致材料的流动补充不足,这样使圆角台阶存在较大的拉应力,厚度减薄,这是出现颈缩的模具原因[4]。而减小压边力和增加圆弧过渡半径 R 则又可能导致起皱发生[5]。



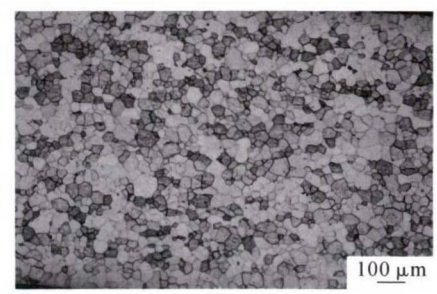
(a)颈缩部位的横截面



(b)起皱部位的横截面



(a1)颈缩部位局部的横截面



(b1) 起皱部位局部的横截面

图 3 436L 薄板冲压缺陷部位横截面组织
Fig.3 Cross sectional microstructure of the stamping defects of 436L sheet plate

因此，仅优化模具设计只能改善颈缩或起皱其中一个问题，对解决其他缺陷不利。

3　冲压起皱和颈缩缺陷改善

依据国家标准 GB/T 228.1-2010 和 GB/T 5072-2016 检测了 436L 薄板 0°、45°和 90°拉伸性能和 r 值，如表 1 所示。可以看到，436L 各方向的屈服强度（$R_{p0.2}$）、抗拉强度（R_m）强度、屈强比（$R_{p0.2}/R_m$）和断后延伸率（A80 mm）指标基本一致。而 r 值差异却较大，且 45°方向 r 值最小，这确认了覆盖件在 40°方向出现起皱的主要原因是材料的原因。

表1 436L薄板各方向的拉伸性能和r值

Tab.1 Tensile properties and r-value of different directions of 436L sheet plate

方向	$R_{p0.2}$°/MPa	R_m°/MPa	$R_{p0.2}/R_m$	A80 mm°(%)	r
0°	281	432	0.65	35.0	1.25
45°	284	441	0.64	34.0	0.85
90°	273	435	0.63	36.5	1.95

为了从原材料方面改善起皱问题，确认 r 值和起皱之间的关系，对 436L 板材 r 值进行了一系列优化，其 45°方向 r 值（$r_{45°}$）的值在 0.85~1.12，其他力学性能指标接近。测量了该冲压件的凸模圆角过渡半径 R 为 15 mm，考虑到颈缩缺陷，同时利用圆角过渡半径为 20 mm 模具进行对比试验。$r_{45°}$ 和起皱的对应关系如表 2 所示。可以看到，R 在 15 mm 时 $r_{45°}$ 在 0.95 以上可以消除起皱，此时仍然存在颈缩；R 在 20 mm 时，没有出现颈缩缺陷，但 $r_{45°}$ 在 1.02 以上才能避免起皱。这是因为，圆角过渡半径越小，材料流入越困难，相当于增加了底部斜面的胀形，减轻了起皱，但圆角过渡区容易出现颈缩甚至拉裂。圆角过渡半径越大，材料流入越容易，减小了拉伸应力，但起皱也越严重。

表2 $r_{45°}$和起皱的关系

Tab. 2 The relationship between r45° and wrinkling defects

$r_{45°}$	0.85	0.95	1.02	1.12
R=15 mm	起皱	未起皱	未起皱	未起皱
R=20 mm	起皱	起皱	未起皱	未起皱

按照试验结果，为避免冲压起皱，可将 r 值确定为 436L 板材验收指标，各方向的 r 值最小应达到 1.02。提高 r 值有很多方法，包括降低间隙原子 C 和 N 含量、提高铸坯等轴晶率、降低热轧轧制温度、提高冷轧压下率等[6]。为避免颈缩，将圆弧过渡半径从 15 mm 优化为 20 mm。通过材料和模具优化，同时增加圆角过渡和 r 值，最终解决该问题。

4　结论

（1）针对 436L 覆盖件起皱和颈缩缺陷，进行了冲压成形应力分析和金相组织分析，沿着起皱长度方向受拉应力，沿宽度方向受压应力导致起皱，圆角过渡处受双向拉应力和弯曲应力导致颈缩。

（2）分析 436L 不锈钢板材 r 值，其在 45°方向的 r 较低，宽向应变能力不足导致挤压起皱，通过将 436L 板材 45°方向 r 值由原来的 0.85 改进至 1.02 以上，可以消除覆盖件起皱缺陷。

（3）为减小圆角过渡处的颈缩缺陷，增加凸模圆角过渡半径至 20 mm，这样使材料流入更加容易，可以减小拉应力，解决颈缩问题。

参考文献：

[1] 毕洪运，潘国强，李鑫. 宝钢汽车排气系统用铁素体不锈钢产品研发[J]. 宝钢技术，2011(2): 6-11.

[2] 肖景容，姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[3] 李颖，李超. 铝合金板材力学性能和冲压成形研究[J].铸造技术，2018, 39(12): 2850-2853.

[4] 杨丽娟. 基于有限元技术汽车覆盖件的拉深成形仿真分析[J]. 铸造技术，2013，34(6): 753-755.

[5] 金共志，陈炜，彭卫华，等. 汽车后地板上横梁冲压工艺优化[J]. 锻压技术，2019, 44(2): 31-36.

[6] 康喜范. 铁素体不锈钢[M]. 北京：冶金工业出版社，2012.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628