

不锈钢地铁车辆侧墙内板成形模拟研究

郑勇福 王俊元 王嘉鹤 王 博 宋卫光 张 洋 张雪峰

(中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 以某型号地铁车辆不锈钢车体侧墙内板为例, 利用 Autoform 有限元软件, 分析了润滑方式、拉延筋、压边力和模具间隙等对不锈钢侧墙内板拉延成形的影响规律。结果表明: 聚氟乙烯薄膜作为润滑介质垫在不锈钢板与凸凹模、压料板之间, 能够显著改善侧墙内板的成形性, 改善拉裂缺陷。通过正交试验得到匹配参数的优化组合, 可进一步对拉延不足和拉裂缺陷协调控制。优化组合的参数设置为: 拉延筋系数 0.35、压边力 300 kN 和单边模具间隙 1.20 mm。基于该模拟优化参数进行了模具设计和成形试验, 得到了合格的试验件, 验证了模拟仿真结果的准确性和控制措施的有效性。

关键词 不锈钢地铁车辆; 侧墙内板; 聚氟乙烯薄膜; 模具间隙; 拉延筋; 压边力

中图分类号 U270.6⁺4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.02.020

Simulation Research of Stainless Steel Metro Vehicle Inner Plate Formation

ZHENG Yongfu, WANG Junyuan, WANG Jiahe, WANG Bo, SONG Weiguang, ZHANG Yang, ZHANG Xuefeng

Abstract Taking the inner plate of certain type of metro vehicle stainless steel vehicle body, using Autoform finite element software, the pattern of how process factors such as lubrication mode, draw bead, blank holder force and die clearance influence the stainless steel inner plate formation is investigated. The results show that the formability can be significantly improved by arranging the PVF film between die and stainless steel plate. The optimal combination of parameters can be obtained by the orthogonal experiment, which could further control and coordinate insufficient drawing and cracks. The optimal setting parameters are the force factor of draw bead being 0.35, the pressure plate force being 300 kN, and the single-side die clearance being 1.20 mm. Based on the simulated optimal parameters, die design and formation test are conducted, and qualified sample is obtained, which verifies the accuracy of simulation results and effectiveness of controlling methods.

Key words stainless steel metro vehicle; inner plate; PVF

film; die clearance; draw bead; blank holder force

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

SUS301L 系列不锈钢板具有优良的耐腐蚀性、延展性、抗疲劳能力以及全生命周期成本低等特点, 已经广泛应用于国内外地铁车辆车体钢结构中^[1]。本文的研究对象是某型号地铁车辆不锈钢车体侧墙内板, 该部件使用在侧墙内部, 对侧墙板进行刚性补强, 以提高无涂装不锈钢车体侧墙的平面度。侧墙内板使用的材料为厚 0.8 mm 的 SUS301L-DLT 不锈钢板。该零件板薄、拉延深度大且长宽比较大, 拉延成形后局部材料易于流动部位过度减薄甚至开裂, 难于流动的部位易拉延不足^[2]。材料的过度减薄降低了侧墙内板的抗冲击性能, 甚至拉裂报废; 拉延不足致使回弹量加大, 对轮廓精度的稳定性产生不利影响。

因此, 在不锈钢侧墙内板成形工艺分析过程中和模具设计前, 有必要通过模拟仿真方法对零件成形中出现的拉裂风险和拉延不足等问题开展研究, 分析结构形状尺寸和工艺参数对其成形性的影响, 得出产生缺陷的原因和解决方案, 获得最佳成形参数, 从而优化模具结构。

1 不锈钢地铁车辆侧墙内板制定成形方案

不锈钢地铁车辆侧墙内板零件是带凸缘拉延胀形复合成形件, 其三维模型如图 1 所示。该零件内部包含 3 个大凹坑, 凸缘半径为 15 mm。实际拉延成形中, 凹坑位置材料流动剧烈, 易于过度减薄甚至开裂。如图 2 所示, 该零件长宽比近 2.5:1, 拉延成形时材料流动极不均匀, 因此易出现成形缺陷。

针对该零件的结构特点及工艺性能, 制定了拉延、修边、压周边台阶和手工整形等 4 工序的工艺方案。本文对该零件拉延成形工序进行了数值模拟分析, 解决了拉裂风险和拉延不足产生的缺陷问题。研

究中使用的软件为通用有限元分析软件 Autoform。

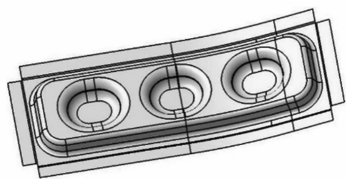


图1 不锈钢地铁车辆侧墙内板三维模型

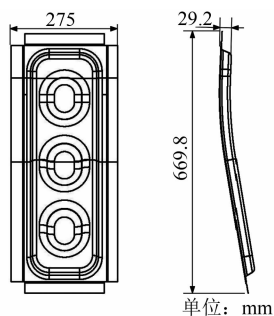


图2 内板零件几何尺寸

2 车辆侧墙内板有限元仿真模型

有限元前处理是一个关联性的系统工程,在保证符合基本理论原则的情况下,许多要素要依据实际生产经验,并结合模拟结果不断进行优化设置。

将图3所示的实际产品模型导入 Autoform 中,冲压中心选取重力中心,冲压方向选取平均法向;本着使零件各部分流料尽量均匀一致的原则,绕坐标轴进一步旋转微调冲压方向至需要的角度。

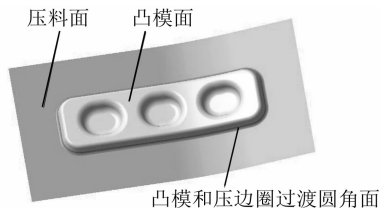


图3 内板拉伸模面构成

矩形毛坯料尺寸的设定要保证拉伸结束后收料边线距离拉伸筋外围 5 mm 以上,故设置坯料尺寸为 782 mm×415 mm。选取零件上表面,沿其凸缘曲率方向进行延伸,并连同凸缘一同作为工艺补充压料面。在 Catia 中创建模面,模面边缘较料片线外延 20 mm,最终模面如图3所示。在 Autoform 过程控制器工具体项中通过拾取模面完成上模、下模以及压边圈的创建,并设定各工具体的相对位置,如图4所示。

本文所研究的模型采用四边形网格;由于侧墙内板零件有小圆角存在,故模型网格设置 0.05 mm

的容错公差和 10 mm 的最大边长。针对模型网格,设定了较高的精度值:半径穿透值为 0.22 mm,最大单元角度为 22.5°,最大细化级别为 6。

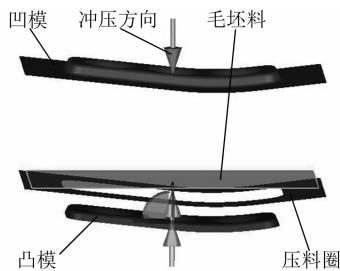


图4 内板拉伸成形有限元模型

SUS301L-DLT 板材力学性能测试数据为:抗拉强度 σ_b 为 50 MPa,屈服强度 σ_s 为 450 MPa,延伸率 ψ 为 44%,硬化指数 n 为 0.372,各项异性平均系数 r_m 为 0.95。硬化曲线采用 Swift/Hockett-sherby 模型,屈服曲线采用 Hill 模型,成形极限曲线采用表格输入模式。将测得的试验数据导入 Autoform 中,生成.mtb 格式的材料模型文件用于后续模拟。

3 车辆侧墙内板零件成形缺陷分析及控制

3.1 调整润滑方案改善成形

在拉伸成形中,一般采用润滑剂来降低零件和模具间的摩擦因数,用以改善板材的成形阻力。Autoform 软件默认状态下采用 0.15 的摩擦因数,在摩擦因数为 0.15 的情况下,对数次调整拉伸筋系数和压边力进行了模拟,发现拉裂和拉伸不足缺陷难以同时控制。在摩擦因数为 0.15、模具单边间隙为 1.05 mm 的条件下,若干不同拉伸筋系数和不同压边力组合下的零件成形极限图如图5所示。

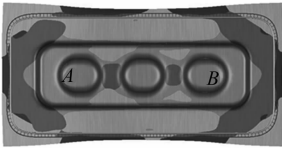
图5中出现的拉伸不足和拉裂缺陷(A点和B点处),很难同时去协调控制,这是由于拉伸时材料流动不均匀导致的。其原因有两点:一是零件长宽比过大,平面局部和内部凹坑局部变形差异明显;二是 0.15 的摩擦因数对于该零件的成形而言数值过大,极大地抑制了材料流动的均匀性。

为避免工件拉裂缺陷,在不变更侧墙内板结构的前提下,只有从改善摩擦因数入手。因此本文考虑改变润滑方式,引入聚氟乙烯薄膜作为润滑介质垫置于不锈钢板料与模具凸凹模、压料板之间,来降低拉伸成形时的摩擦因数^[3-6]。据文献介绍,聚氟乙烯薄膜作为润滑介质时可使其摩擦因数只有原来的 1/5。此外,聚氟乙烯薄膜所具备的润滑介质的优点还免去了拉伸后的零件清洗

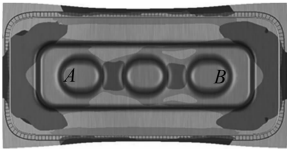
工序。



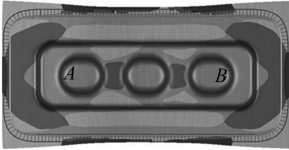
a) 拉伸筋系数为 0.15，压边力为 700 kN



b) 拉伸筋系数为 0.25，压边力为 500 kN



c) 拉伸筋系数为 0.35，压边力为 300 kN



d) 拉伸筋系数为 0.45，压边力为 100 kN

成形性能

图例： 撕裂 过度减薄 有撕裂风险 安全 拉伸不充分 压缩 增厚

图 5 不同拉伸筋系数和压边力组合下零件的成形极限图

图 6 为在拉伸筋系数为 0.35、压边力为 300 kN、模具间隙为 1.05 mm 的条件下,应用聚氟乙烯薄膜润滑成形的极限图。

从图 6 中可以看出,在应用聚氟乙烯薄膜进行拉伸的情况下,零件成形后拉裂缺陷消除,且拉伸不足现象也得到显著改善。因此,可以初步得出结论,应用聚氟乙烯薄膜进行拉伸生产,可以改善润滑条件,促进流料的均匀性,对该零件的成形性能产生有利影响。



成形性能

图例： 撕裂 过度减薄 有撕裂风险 安全 拉伸不充分 压缩 增厚

图 6 应用聚氟乙烯薄膜润滑后的零件成形极限图

3.2 正交试验协调控制缺陷

摩擦问题解决后,该零件的成形性还要受到拉伸筋系数 A 、压边力 B 及模具间隙 C 等因素的交互制约^[7],因此需要从整体上考虑零件的成形性,寻求这些模具和工艺参数的良好配合。正交试验是研究多因素、多水平,效率高且经济的一种试验设计方法。本文采用正交试验法,以期获得适合的模具和工艺参数组合,从而实现对侧墙内板成形的良好控制^[8]。

本文根据已有的模拟研究成果,选取聚氟乙烯薄膜作为润滑介质。考虑到零件结构复杂、板薄、模具制造精度等因素,适当加大模具间隙,以进行大间隙拉伸成形。针对零件内部剧烈变形的矩形区域,选取是否出现破裂风险以及拉伸不足的程度为评判参数。3 因素 4 水平的正交试验分配情况如表 1 所示。正交试验表 $L_{16}(3^4)$ 如表 2 所示。

表 1 正交试验各影响因素的水平分布

水平	A	B/kN	C/mm
1	0.25	200	1.05
2	0.30	300	1.10
3	0.35	400	1.15
4	0.40	500	1.20

表 2 正交试验表

序列	A	B/kN	C/mm
1	0.25(A_1)	200(B_1)	1.05(C_1)
2	0.25(A_1)	300(B_2)	1.10(C_2)
3	0.25(A_1)	400(B_3)	1.15(C_3)
4	0.25(A_1)	500(B_4)	1.20(C_4)
5	0.30(A_2)	200(B_1)	1.10(C_2)
6	0.30(A_2)	300(B_2)	1.05(C_1)
7	0.30(A_2)	400(B_3)	1.20(C_4)
8	0.30(A_2)	500(B_4)	1.15(C_3)
9	0.35(A_3)	200(B_1)	1.15(C_3)
10	0.35(A_3)	300(B_2)	1.20(C_4)
11	0.35(A_3)	400(B_3)	1.05(C_1)
12	0.35(A_3)	500(B_4)	1.10(C_2)
13	0.40(A_4)	200(B_1)	1.20(C_4)
14	0.40(A_4)	300(B_2)	1.15(C_3)
15	0.40(A_4)	400(B_3)	1.10(C_2)
16	0.40(A_4)	500(B_4)	1.05(C_1)

基于表 2 进行工件拉伸成形仿真,其结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,第 10 组参数组合下的模拟结果中,工件成形后无破裂风险,拉伸不足情况也较为轻微。因此,第 10 组的参数组合满足要求,即在聚氟乙烯薄膜包裹毛坯板的条件下,拉伸筋系数为 0.35,压边力为 300 kN,单边模具间隙为 1.20 mm。该参数组合下,拉伸结束后的零件成形极限图如图 7 a)所示,拉伸到距板底 3 mm 时的成形极限图如图 7 b)所示。

表 3 正交试验结果

序 列	影响因素			是否出现 拉伸不足的	
	A	B	C	破裂风险	出现程度
1	A ₁	B ₁	C ₁	否	严重
2	A ₁	B ₂	C ₂	否	严重
3	A ₁	B ₃	C ₃	否	严重
4	A ₁	B ₄	C ₄	否	严重
5	A ₂	B ₁	C ₂	否	较重
6	A ₂	B ₂	C ₁	否	较重
7	A ₂	B ₃	C ₄	否	较重
8	A ₂	B ₄	C ₃	否	较重
9	A ₃	B ₁	C ₃	否	较重
10	A ₃	B ₂	C ₄	否	轻微
11	A ₃	B ₃	C ₁	是	轻微
12	A ₃	B ₄	C ₂	是	轻微
13	A ₄	B ₁	C ₄	是	轻微
14	A ₄	B ₂	C ₃	是	轻微
15	A ₄	B ₃	C ₂	是	轻微
16	A ₄	B ₄	C ₁	是	轻微

从图 7 a)中可以看出,模面中部剧烈变形的矩形区域并未出现破裂风险;拉伸不足区域和受压区域不是很多,大部分处于安全状态。Autoform 软件中,在拉伸结束后的成形极限图里,对于拉伸结束后的一切缺陷均采用压平状态显示。因此,在拉伸结束后的成形极限图中,起皱情况并不能有效显现。本文采取拉伸到距板底 3 mm 时的成形极限图来评估起皱,如果有起皱情况出现,则在图中将会显示起皱波纹。从图 7 b)中拉伸到距板底前 3 mm 的成形极限图中可以看出,板料面并未有波纹产生,全部呈平滑状态,因此可以预测优化组合参数设置为 A₃-B₂-C₄ 的条件下,该零件并未产生起皱缺陷。

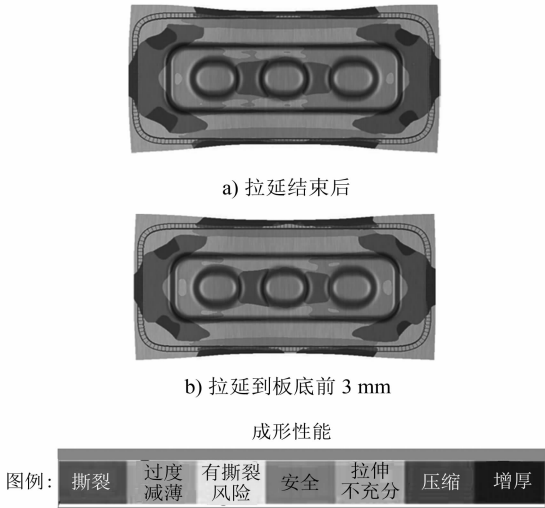


图 7 优化组合 A3B2C4 参数设置下的零件成形极限图

4 试验验证

根据模拟优化结果参数设计制造了拉伸模具,并进行了成形试验。模具和润滑方式如图 8 所示。拉伸后的试验件如图 9 所示。由图 9 可以看出,在工件有效区域范围内,并未出现拉裂和起皱缺陷。表明本文提出的使用聚氟乙烯薄膜作为润滑介质进行侧墙内板拉伸成形措施的有效性,以及由正交试验所得到优化组合参数设置的合理性。

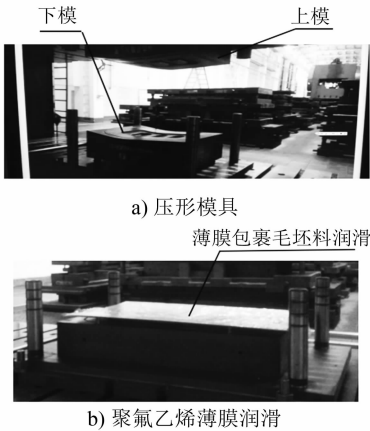


图 8 零件成形试验

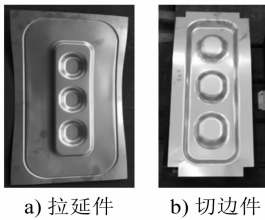


图 9 零件成形试验

台凹槽内。即使在 20‰的坡道上排水管与最低点的高差仅 6 mm,即 ΔH 为 0.22 mm。这意味着理论上只要有超过 0.22 mm 的水进入平台,就可以保证排水管有水排出,基本不会出现平台积水的现象。同时,由于局部下沉使得入水口处的水深迅速增加,初步计算只要有 1.8 mm 的降水就可保证入口处有 10 mm 的水深,平台排水能力大大提高。而深圳地铁 1 号线机组平台采用了两侧各设两支 $\phi 45$ mm 的排水管,主要是为了保证立管的排水能力。

5 结语

综上所述,在嵌入式空调机组封闭平台结构的雨水排放设计中应遵循以下原则:

1) 一般情况下,设计雨量按 200 mm/h 计算可以满足国内大部分地区的使用要求。

2) 空调机组安装接口应通过合理的角度、坡度及密封结构的设计尽可能避免其它部位的雨水进入平台,以及尽可能减少平台水量。

3) 排水口的位置应考虑坡道运行及机组冷凝排水的配置,在机组平台两侧前后部位各设 1 支排水管或采用下沉式排水口,保证入水口处的水深高度,提高排水管中流速,使得进入平台的雨水迅速

(上接第 81 页)

5 结论

针对 0.8 mm 厚 SUS301L-DLT 不锈钢材料的侧墙内板在拉延过程中易于出现破裂缺陷和拉延不足的现象,以及多个参数间存在交互制约的问题,采取的措施如下:

1) 在拉延成形过程中加强润滑。在不锈钢板与凸凹模、压边圈间布置聚氟乙烯薄膜进行润滑,能显著改善润滑条件,增加拉延过程中板材流料的均匀性,极大地协调改善了拉裂和拉延不足缺陷。另外,使用聚氟乙烯薄膜进行润滑省去了其他润滑方法导致的零件表面的除油清理工序,使得零件表面干净无污染。

2) 通过拉延成形模拟仿真和正交试验方法,得到了优化组合 $A_3-B_2-C_4$ 的参数设置,进一步协调控制了侧墙内板的成形质量。具体参数设置为拉延筋系数为 0.35,压边力为 300 kN,单边模具间隙为 1.20 mm。

3) 通过优化组合的工艺参数设计制造了模具,

排出。

同时,排水管的设计过程中既要考虑排水能力,也要便于加工、安装及清污。理论上建筑排水管在重力流条件下需要有不小于 20‰的安装坡度,考虑列车在坡道上运行的影响,理想情况下至少应设置 40‰的坡度,以保证在任何位置均可排水通畅。影响排水管设计的因素较多,但至少应保证在任何位置不得有横向管道高于入水口,以避免掺入空气时在上部形成空气柱而影响排水。

综上所述,列车在运行条件下其空调机组平台的雨水排放问题极其复杂,为此后续还需要做大量的研究工作,才能安全、可靠、经济地解决排水问题。

参考文献

- [1] 王增长. 建筑给排水工程[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 中国气象局. 暴雨年鉴 2009[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [3] 李长军, 朱秀红, 周秀军. 基于 3 种函数的县级城市暴雨强度公式比较研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2019(10): 560.
- [4] 香港天文台. 香港气象要素之月平均值(1980—2010)[EB/OL]. (2019-12-31)[2020-07-15]. <http://www.hk0.gov.hk/sc/cis/normal/1981—2010/normal.s.htm>.

(收稿日期: 2020-09-05)

使用聚氟乙烯薄膜润滑压出了合格试验件,验证了模拟仿真结果的有效性。

参考文献

- [1] 姚明哲, 杨志勇, 马秋红, 等. 不锈钢轨道车辆的特点[J]. 装备制造, 2015(3): 10.
- [2] 贾吉林, 张昌明. 304 不锈钢拉深成形模具设计[J]. 热加工工艺, 2012(13): 209.
- [3] 梁明勇, 吕琳, 刘君仪. 采用高分子薄膜润滑的防撞梁成形分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014(11): 37.
- [4] 刘君仪, 邓明. 高分子薄膜润滑在板料拉深中的应用研究与发展趋势[J]. 模具工业, 2014(1): 1.
- [5] 聂兰启, 王文舫. 黑色金属薄板拉伸时采用塑料薄膜润滑机理探讨[J]. 模具制造, 2008(10): 35.
- [6] 邓明, 朱祥, 刘君仪, 等. 板料成形的高分子薄膜润滑浅析[J]. 锻压技术, 2015(7): 103.
- [7] 柯桂颜, 路平, 石婧, 等. 拉延筋、压边力对冲压件成形性能的影响研究[J]. 锻压技术, 2016(5): 39.
- [8] 张海波, 孙力伟. 基于正交试验的车顶盖板冲压工艺参数模拟研究[J]. 锻压技术, 2017(4): 79.

(收稿日期: 2020-09-05)