

板料成形

电池包纵梁辊冲成形仿真分析与实验验证

陈文跃¹, 邹天下¹, 李大永¹, 彭颖红¹, 肖华^{2,3}, 石磊^{2,3}, 朱明⁴, 王全伟⁴

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240; 2. 宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900;
3. 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室(宝钢), 上海 201900;
4. 山东新合源热传输科技有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 提出某 QP1180 超高强钢制的电池包纵梁辊冲成形方案, 以解决该超高强钢梁类零件台阶结构特征的成形问题。为了成形此类具有典型变高度特征的电池包纵梁, 考虑到辊冲成形独特的运动方式, 避免在零件成形过程中出现模具与板料碰撞的缺陷, 提出了具有新型结构的辊冲模具, 通过数值仿真的方法, 对零件在辊冲成形过程中的应力分布情况以及机架的工作载荷进行了分析, 判断了工艺方案的可行性; 进而基于仿真结果对模具进行优化迭代, 确定了最终模具的补偿参数, 将仿真结果的角度偏差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内; 最后, 开展辊冲成形的实验与试样制备, 试制零件的尺寸偏差在 ± 1 mm 以内。

关键词: 电池包纵梁; 超高强钢; 辊冲成形; 尺寸精度; 变高度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.006

中图分类号: TG335

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 04-0048-06

Simulation analysis and experiment verification on chain-die forming for longitudinal beams of battery pack

Chen Wen Yue¹, Zou Tian Xia¹, Li Dayong¹, Peng Yinghong¹, Xiao Hua^{2,3}, Shi Lei^{2,3}, Zhu Ming⁴, Wang Quanwei⁴

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;
3. State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels (BaoSteel), Shanghai 201900, China;
4. Shandong Xinyuan Technology Co., Ltd., Tai'an 271000, China)

Abstract: A chain-die forming scheme for the longitudinal beam of battery pack made of QP1180 ultra-high strength steel was proposed to solve the forming problem of ultra-high strength steel beam parts with step structure characteristics. In order to form this kind of longitudinal beam for battery pack with typical variable height characteristics, a new structure of chain-die forming die was proposed, considering the unique motion mode of chain-die forming and avoiding the defects of collision between die and sheet during the forming process of part. Then, through numerical simulation method, the stress distribution condition of part and the working load of frame in the chain-die forming process were analyzed to determine the feasibility of the process scheme. The optimization iteration of die was carried out to determine the compensation parameters of the final die based on the simulation results to control the angular deviation of the simulation results within $\pm 1^\circ$. Finally, experiments and specimen preparation for chain-die forming were carried out, and the dimensional deviation of the trial parts was within ± 1 mm.

Key words: longitudinal beam of battery pack; ultra-high strength steel; chain-die forming; dimensional accuracy; variable height

当前, 随着电动汽车续航的上升, 电池模组的

数量不断增加, 电池外壳作为承载和保护电池模组的重要部件, 对其抵抗弹性挠曲和永久变形的能力有着较高的要求。新能源车电池包结构通常采取横纵梁结构设计, 不仅可以减薄底板厚度, 还可以有效地传递所受载荷, 增强电池包的整体刚度。

目前, 电池包底板常用的材料以铝为主, 因其密度小而常被用作轻量化材料, 并且因为压铸性能

收稿日期: 2023-09-09; 修订日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1860110)

作者简介: 陈文跃 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: Samuel1165694560@sjtu.edu.cn

通信作者: 李大永 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: dyli@sjtu.edu.cn

良好, 目前大都通过铸造、挤压成形。但是因为铝材的价格较为昂贵, 导致生产成本较高, 并且铝材在挤压过程中的能耗较大, 不符合双碳战略。相较于铝材, 超高强钢的比强度^[1]和能量吸收能力更高, 综合成本更低, 因此, 本文提出了以超高强钢制作的横纵梁结构代替铝制电池包底板, 在提升电池包结构刚度的同时, 进一步降低生产成本。

辊冲成形是一种适用于高强钢梁类零件的渐进成形技术^[2], 其原理是成形模具等距离离散开来, 通过链节安装在机组上, 随着机组链节的转动, 带动模具块按照设定的轨迹运动, 实现板材渐进成形。Li Y G 等^[3]通过有限元仿真验证发现, 相较于辊压成形, 辊冲成形可降低纵向冗余应变。针对辊冲成形中常见的缺陷, Liu Y 等^[4]通过对模具块在成形和脱模过程建模, 提出了新的模具设计准则, 用以解决局部特征在成形过程中的偏移问题。Liang Z Y 等^[5]提出多界面补偿策略, 用以解决辊冲成形时的回弹和纵向翘曲问题。为了解决成形过程中的起皱问题, Liang Z Y 等^[6]利用小挠度弹性板微分平衡方程来预测法兰起皱, 并提出了“M”形模具以消除法兰起皱现象。而 Liu Y 等^[7]则是将能量法与有限元仿真结合起来, 建立了侧壁起皱的预测模型, 并提出了两道次辊冲成形, 用以抑制侧壁起皱。目前, 辊冲成形已经逐渐应用于一些长直类的等截面和变截面零件。对于等截面零件, Qian Z 等^[8]为了提高辊冲成形精度, 针对帽型梁提出了4道次辊冲成形工艺, 建立了对应的有限元模型, 并且基于仿真结果提出了对应的尺寸优化方法。Li Y G 等^[9]最先通过有限元仿真, 验证了辊冲成形工艺制造变截面和变深度零件的可行性。Lu K J 等^[10]则是在此基础上, 从纵向和垂直两个角度分析了板料在变截面处的流动情况, 进一步验证了辊冲成形工艺应用于变截面零件成形的可行性。刘洋等^[11]采用两道次辊冲成形工艺完成了超高强钢座椅横梁的制备, 并且将零件的尺寸误差控制在 ± 0.5 mm。大连理工大学和上海交通大学团队^[12]设计了超长变截面房车拖车大梁零件, 并开展了辊冲成形试制, 首次完成了长度约为6 m的梁类零件的制造。

本文针对某QP1180超高强钢制的电池包纵梁, 提出了辊冲成形方案, 通过对辊冲成形过程的仿真, 分析板料在辊冲成形过程中的应力分布情况, 验证辊冲成形工艺方案的可行性, 并基于仿真结果对模具进行优化迭代, 最后开展辊冲成形的实验与试样制备。

1 变高度纵梁的辊冲成形仿真分析

1.1 有限元模型

本文建立的横纵梁的三维模型如图1所示, 该零件的长度为864 mm, 有两个可变高度特征用于焊接横梁, 分布间距为432 mm, 上下高度差为15 mm, 法兰角和腹角均为90°, 并且纵向的法兰要求较高的平整度以便与底板和横梁焊接。

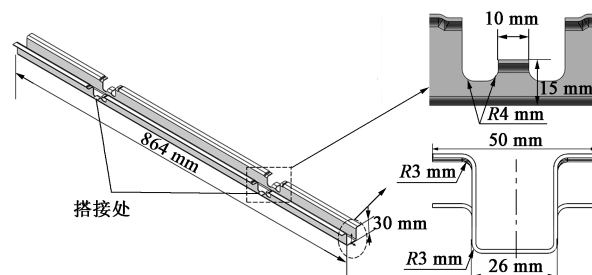


图1 纵梁的三维模型

Fig. 1 3D model of longitudinal beam

零件采用的材料是厚度为1.2 mm的QP1180高强钢, 该材料的抗拉强度高(抗拉强度为1403 MPa), 可塑性好, 适用于变高度特征的零件的冷成形。考虑到零件具有变高度的特征, 在成形过程中可能会出现干涉现象, 所以模具设计如图2所示。对凹模和凸模均进行避空处理, 有效防止脱模过程中出现法兰与模具的干涉现象。

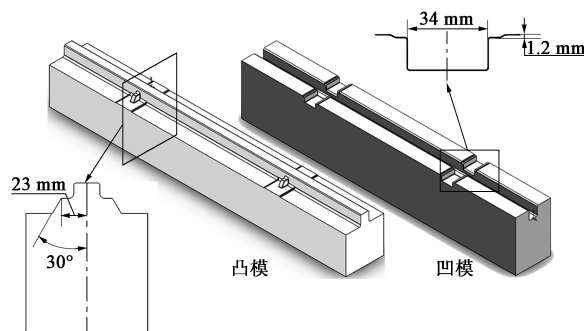


图2 纵梁的模具设计

Fig. 2 Die design of longitudinal beam

板料的单元类型为C3D8R(三维实体8节点线性减缩积分单元), 厚度方向采用5层网格, 考虑到板料的变形情况, 在大变形区域采取局部细化, 在小变形区域采取疏密过渡的网格划分方法, 最终板料划分为89050个单元, 如图3a所示。板料和模具块之间的摩擦采用库伦摩擦模型, 摩擦因数设定为0.1。

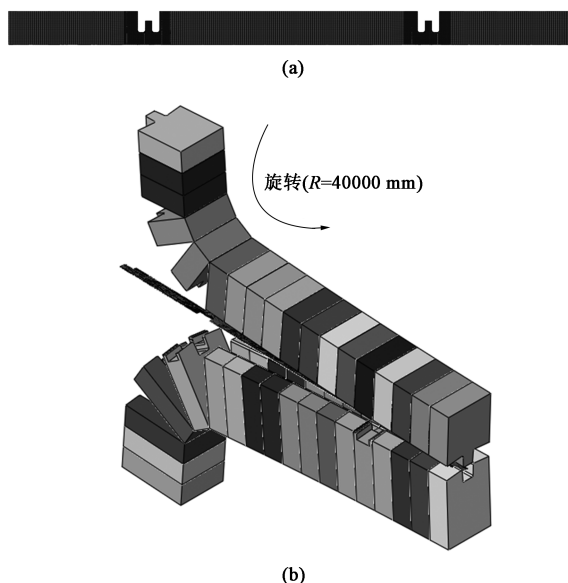


图3 板料网格模型 (a) 和辊冲成形有限元模型 (b)

Fig. 3 Mesh model of sheet (a) and finite element model for chain-die forming (b)

由于该零件的结构对称, 本文采用1/2几何模型建立辊冲成形有限元模型, 如图3b所示。所有的模具均设为刚体, 分别绕虚拟的模具装配中心旋转(装配虚拟圆弧半径 R 为40000 mm), 板料最初为静止状态, 会逐渐随着模具的转动进行成形与脱模。仿真中, 模具的单元类型为R3D4(4节点三维双线性刚体四边形单元), 并且在圆角变形处细化网格。

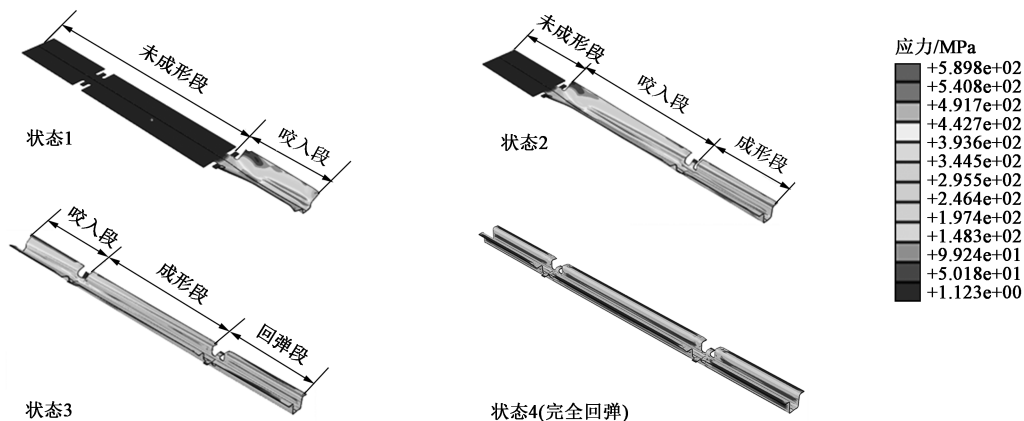


图4 纵梁不同阶段板料变形状态与成形应力云图

Fig. 4 Deformation states of sheet at different stages and formation stress nephogram for longitudinal beam

2.2 成形载荷分析

通过对仿真中每块模具的反作用力进行提取, 并且线性叠加起来, 可以预测辊冲机架在成形过程中的工作载荷。如图6所示, 当坯料随着模具开始向前移动, 机架的工作载荷也会随之上升, 并且工

1.2 材料模型

本文仿真中选取QP1180高强钢, 由于超高强钢具有明显的包辛格效应, 所以本次仿真采用包含3项背应力的非线性随动硬化模型Chaboche模型来描述QP1180超高强钢的包辛格效应, 材料模型中的参数如表1所示^[13], 其中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 γ_1 、 γ_2 和 γ_3 为随动硬化参数, Q 和 b 为材料参数。

表1 QP1180 超高强钢 Chaboche 混合硬化模型拟合参数

Table 1 Fitting parameters of Chaboche combined hardening model for QP1180 ultra-high strength steel

参数	C_1 / MPa	γ_1	C_2 / MPa	γ_2	C_3 / MPa	γ_3	Q / MPa	b
数值	3490.2	10.4	64580.5	137	159.6	8199.8	228.3	10518.8

2 仿真结果分析

2.1 应力分析

通过对有限元仿真中的应力分布进行分析, 可以判断成形过程中是否存在缺陷。从图4可以看出, 零件整体应力分布较为均匀。对成形后零件的腹板角和法兰角提取残余应力, 如图5所示, 残余应力整体分布较为均匀, 在变高度处会有些许增长, 因此, 零件上出现起皱、破裂和扭曲等缺陷的可能性较低, 并且在变高度和台阶处均无应力集中, 表明在成形过程中未出现干涉现象, 整体成形良好。

作载荷会在第1对模具达到最低点时达到最大, 随后开始逐渐减小, 并且随着板料全部脱离模具块而归零。从图6可以看出, 辊冲设备的工程载荷最高可达951 kN, 远低于目前设备的加工吨位, 通过辊冲成形工艺可以完成该零件的加工。

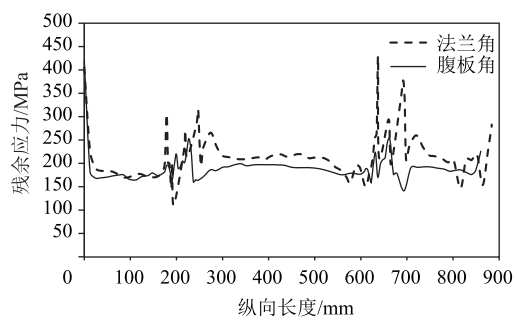


图 5 腹板角和法兰角纵向残余应力变化曲线
Fig. 5 Change curves of longitudinal residual stresses in web angle and flange angle

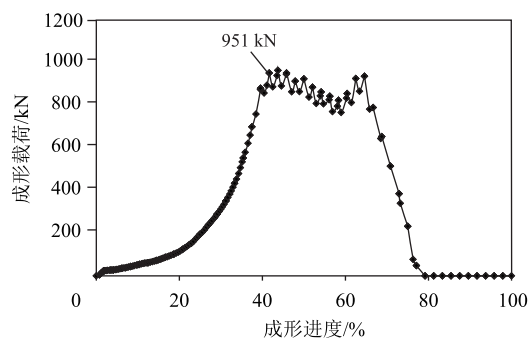


图 6 辊冲成形的成形载荷曲线
Fig. 6 Forming load curve for chain-die forming

2.3 截面形状分析

将有限元仿真的结果和目标零件导入至三维分析软件 Geomagic Qualify 中进行最佳拟合，并且对重要的位置进行截面对比，提取了 6 处典型截面 (S1~S6)，如图 7 所示，测量零件的腹板角和法兰角的角度与半径，测量数据如表 2 所示，其中，差值为仿真值与目标零件数据之差。从表 2 可以看出，零件腹板角和法兰角的偏差均较大，甚至出现了 30°左右的偏差。纵向弯曲方面，对零件的截面进行纵向高度测量，如图 8 所示，零件腹板的纵向高度误差为 $\pm 1\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$ ，纵向弯曲现象明显。

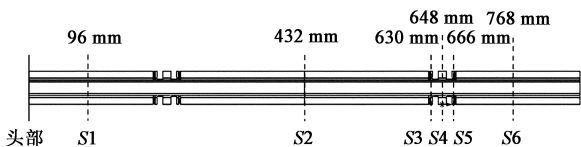


图 7 目标零件的截面位置
Fig. 7 Cross-section positions of target part

3 辊冲成形模具优化

3.1 模面修改

基于第 2 章得到的数据，分别对模具的腹板半

表 2 仿真结果与目标零件的截面尺寸对比
Table 2 Comparison of cross-sectional dimensions between simulation results and target part

截面	腹板角/(°)		法兰角/(°)		腹板角半径/mm		法兰角半径/mm	
	仿真值	差值	仿真值	差值	仿真值	差值	仿真值	差值
S1	94.69	4.69	91.84	1.83	4.26	1.26	13.41	10.41
S2	96.26	6.26	90.54	0.54	4.61	1.61	12.02	9.02
S3	93.18	3.18	83.99	-6.01	6.20	3.20	10.56	7.56
S4	118.91	28.91	121.20	31.20	5.02	2.02	3.79	0.79
S5	93.53	3.53	88.15	-1.85	5.36	2.36	11.78	8.78
S6	95.45	5.45	91.08	1.08	4.65	1.65	13.17	10.17

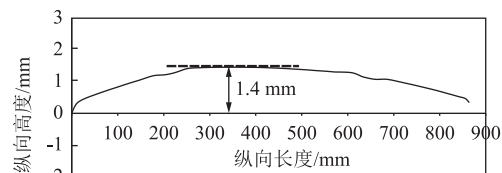


图 8 仿真结果与目标零件的纵向截面曲线
Fig. 8 Longitudinal cross-section curve between simulation results and target part

径 r_1 、腹板角 β_1 、侧壁半径 r_2 和法兰角 β_2 进行补偿，参数定义如图 9 所示，其中 R_1 为腹板角 β_1 的圆角半径， R_2 为法兰角 β_2 的圆角半径，补偿数据如表 3 所示。

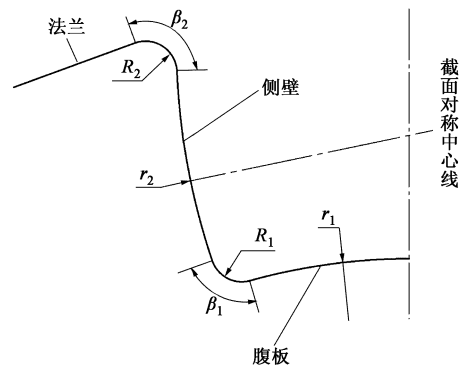


图 9 模具型面补偿参数定义
Fig. 9 Definition of compensation parameters for die profile

表 3 模具型面补偿参数
Table 3 Compensation parameters of die profile

参数	腹板半径 r_1/mm	腹板角 $\beta_1/$ (°)	侧壁半径 r_2/mm	法兰角 $\beta_2/$ (°)
数值	56.7	96.5	261.3	85.5

3.2 优化结果分析

基于补偿后的模具，重新进行仿真。仿真结

果如表 4 所示，零件的腹板角和法兰角的偏差基本保持在 $\pm 1^\circ$ 以内。纵向高度如图 10 所示，纵向截面的误差小于 $1\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$ ，零件的整体精度均符合要求。

表 4 优化后仿真结果与目标零件的截面尺寸对比 ($^\circ$)

Table 4 Comparison of cross-sectional dimensions between simulation results and target part after optimization ($^\circ$)

截面	腹板角		法兰角	
	优化仿真值	差值	优化仿真值	差值
S1	90.61	0.61	90.15	0.15
S2	89.81	-0.19	90.52	0.52
S3	89.09	-0.91	89.47	-0.53
S4	89.49	-0.51	90.43	0.43
S5	89.18	-0.82	89.99	-0.01
S6	89.57	-0.43	89.87	-0.13

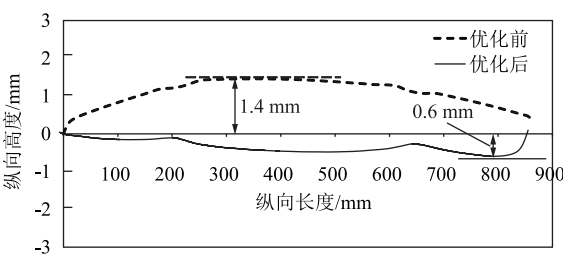


图 10 优化后仿真结果与目标零件的纵向截面曲线

Fig. 10 Longitudinal cross-section curves between simulation results and target part after optimization

4 实验验证

本次实验验证选用的辊冲成形实验机如图 11a 所示，纵梁成形的实验结果如图 11b 所示，可以看出，零件未出现起皱、破裂和扭曲等缺陷。

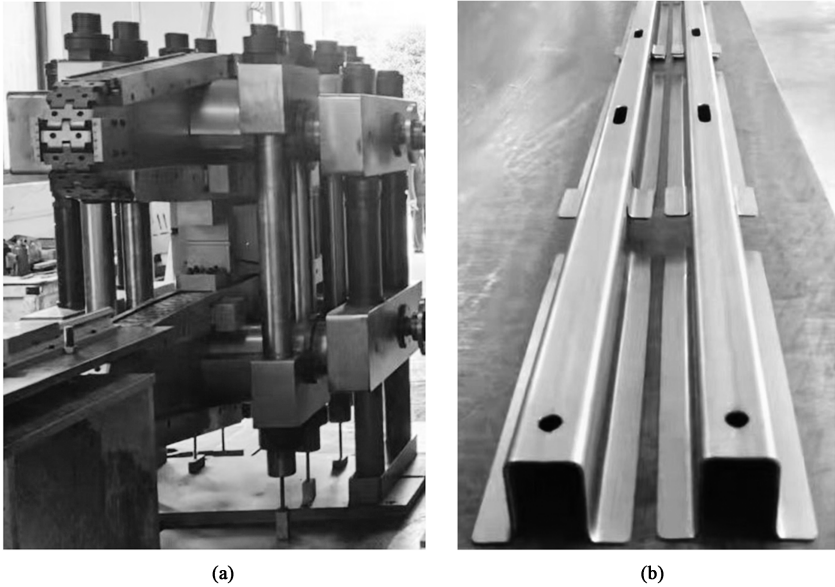


图 11 辊冲成形实验机 (a) 和成形零件形状 (b)

Fig. 11 Chain-die forming test machine (a) and shape of formed part (b)

通过 RaySCAN 711 扫描仪对零件进行采点，获得零件精确的纵梁几何形状。将扫描仪获得的散点图导入到 Geomagic Qualify 中，并提取如图 7 所示 6 个位置的腹板角与法兰角，将实验结果与仿真结果进行对比，如表 5 所示。由表 5 可见，建立的有限元模型对回弹角度具有较高的预测能力，实验所得的零件角度偏差也控制在 $\pm 1^\circ$ 内。而在纵向截面上，实验结果与仿真结果的对比如图 12 所示，纵向弯曲的误差小于 $1\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$ ，满足精度要求。对于搭接处，截取目标零件和成形零件的截面进行对比，如图 13 所示，一致性良好。

表 5 实验零件与仿真结果的截面尺寸对比 ($^\circ$)

Table 5 Comparison of cross-sectional dimensions in experiment parts and simulation results ($^\circ$)

截面	腹板角		法兰角	
	实验值	差值	实验值	差值
S1	90.75	0.75	90.72	0.72
S2	89.16	-0.84	90.90	0.90
S3	89.35	-0.65	89.54	-0.46
S4	90.82	0.82	90.13	0.13
S5	89.12	-0.88	89.21	-0.79
S6	89.55	-0.45	90.82	0.82

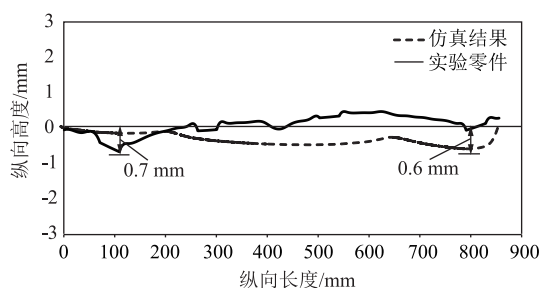


图12 实验零件与目标零件的纵向截面曲线

Fig. 12 Longitudinal cross-section curves between test part and target part

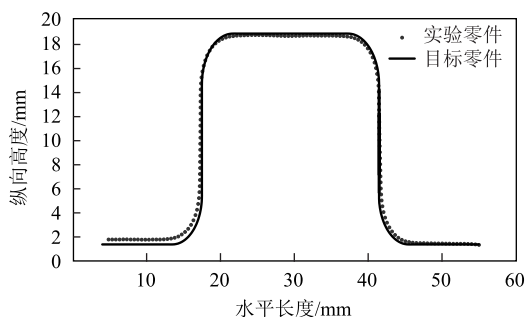


图13 搭接处截面对比

Fig. 13 Comparison of cross-sections at overlap

5 结论

(1) 提出了电池包纵梁的辊冲成形工艺方案, 并且通过有限元仿真验证了本文建立的辊冲成形工艺方案应用于变高度零件成形的可行性。从应力、成形载荷方面对辊冲成形的可行性进行了仿真验证, 从仿真结果可以看出, 零件整体的残余应力分布较为均匀, 机组可以以较低的成形载荷实现超高强钢的冷成形。

(2) 相较于原本的冲压、辊压等其他成形工艺, 对于电池包纵梁的成形, 辊冲成形更为有效, 并且在连续成形过程中, 零件未出现起皱、扭曲等缺陷, 成形尺寸的角度误差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内, 零件腹板的纵向误差小于 $1 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$, 满足零件精度要求。

参考文献:

[1] 张骥超, 连昌伟, 韩非. 第三代超高强钢 QP1180 硬化与失效行为研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (8): 117-125.
Zhang J C, Lian C W, Han F. Study on hardening and failure behavior of the 3rd generation ultra-high strength steel QP1180

[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (8): 117-125.

[2] Ding S C, Daniel W J T, Yuan J, et al. Making roll forming flexible-introduction to Chain forming [A]. International Joint Symposium on Innovative Tube & Pipe Manufacturing and Forming [C]. Osaka, 2011.

[3] Li Y G, Sun Y, Xiao H, et al. A numerical study on chain-die forming of the AHSS U-channel and contrast with roll forming [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 135: 279-293.

[4] Liu Y, Lu K J, Liang Z Y, et al. Forming of metal channels with local features by chain-die forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 304: 117558.

[5] Liang Z Y, Zou T X, Dai W, et al. Compensate for longitudinally discrepant springback and bow in chain-die forming processes by multiple sections optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121 (9-10): 6407-6430.

[6] Liang Z Y, Liu Y, Zou T X, et al. Analysis and suppression of flange wrinkling in AHSS chain-die forming channels with a curved axis [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 71: 70-84.

[7] Liu Y, Lu K J, Liang Z Y, et al. A theoretical model for predicting sidewall wrinkling in chain-die forming of channels with variable widths [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 180: 109915.

[8] Qian Z, Wang C, An K, et al. Investigation of the forming load in the chain-die forming process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 70-82.

[9] Li Y G, Sun Y, Huang H L, et al. Finite element simulation of chain-die forming U profiles with variable cross-section [J]. Materials Science Forum, 2017, 898: 1177-1182.

[10] Lu K J, Liang Z Y, Zou T X, et al. On feasibility of roll-stamp forming variable-sectional metal channels [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125 (1-2): 319-340.

[11] 刘洋, 邹天下, 梁振业, 等. 电动汽车座椅横梁辊冲成形仿真与试验研究 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 51-57.
Liu Y, Zou T X, Liang Z Y, et al. Simulation and experimental research on chain-die forming of EV seat beam [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 51-57.

[12] 靳春宁, 高妍, 高世哲, 等. 基于辊冲一体式纵梁的轻量化拖挂式房车底盘 [J]. 汽车工程, 2023, 45 (5): 865-872.
Jin C N, Gao Y, Gao S Z, et al. Lightweight trailer chassis based on roll punching integrated longitudinal beam [J]. Automotive Engineering, 2023, 45 (5): 865-872.

[13] Sun Y, Li Y G, Daniel W J T, et al. Longitudinal strain development in chain-die forming AHSS products; Analytical modelling, finite element analysis and experimental verification [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 243: 322-334.