

大型一体化压铸电池托盘的结构设计与优化

陈振宇¹ 万里^{1,2} 汪学阳³ 卢樱棋¹ 廖仲杰¹ 安肇勇¹ 林韵¹

[1. 广东鸿图科技股份有限公司, 肇庆 526108; 2. 广东鸿图汽车零部件有限公司, 广州 510700; 3. 广东鸿图(南通)模具有限公司, 南通 226300]

摘要 基于铝合金压铸一体化成形技术, 论述了新能源汽车的大型一体化电池托盘铸件的结构设计及优化。结合型材拼焊的电池托盘的结构特点及技术要求, 提出了大型一体化压铸电池托盘的结构设计要点及工艺条件。通过关键截面剖析方式对功能区域进行结构设计, 并以优化案例说明在工艺要求及性能要求下的大型一体化压铸电池托盘的结构优化过程。通过分析和验证发现, 优化后的大型一体化压铸电池托盘满足工艺、性能等要求, 并在轻量化方面有一定的提升。

关键词 一体化压铸; 电池托盘; 结构设计

中图分类号 TG249.2 文献标志码 A DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240404

Structural Design and Optimization of Large-scale Integrated Die-casting Battery Trays

CHEN Zhenyu¹, WAN Li^{1,2}, WANG Xueyang³, LU Yingqi¹, LIAO Zhongjie¹, AN Zhaoyong¹, LIN Yun¹

[1. Guangdong Hongtu Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526108; 2. Guangdong Hongtu Automotive Parts Co., Ltd., Guangzhou 510700; 3. Guangdong Hongtu (Nantong) Mold Co., Ltd., Nantong 226300]

Abstract: The structural design and optimization of large-scale integrated battery tray castings for new energy vehicles were discussed based on die-casting integrated forming technology of aluminum alloy. Combined with the structural characteristics and technical requirements of battery trays with profile welding, key points and process conditions for large-scale integrated die-casting battery trays were proposed. Structural design of functional areas was carried out through key cross-sectional analysis, and the structural optimization process of large-scale integrated die-casting battery trays under process and performance requirements were illustrated based on optimization cases. Through analysis and verification, the optimized large-scale integrated die-casting battery tray meets the requirements of process and performance, which has a certain improvement in lightweight.

Key Words: Large-scale Integrated Die-casting, Battery Tray, Structural Design

在“双碳”趋势和新能源汽车快速发展的背景下, 一体化压铸技术已成功应用于新能源汽车制造^[1], 在零件性能、生产效率、制造成本等方面引领汽车行业的制造变革^[2]。基于汽车行业的轻量化发展趋势, 铝、镁合金等成为取代钢质材料的理想选材^[3], 同时一体化压铸技术的开发及应用亦有助于轻量化的实现^[4]。目前该技术已应用到前舱及后地板, 具有成形精度高、生产效率高和材料利用率高等特点。在这一背景下, 大型一体化压铸电池托盘的设计及应用成为轻量化技术的前沿探索。

目前传统大型电池托盘多采用型材焊接或摩擦搅拌焊连接等方式组合而成^[5], 存在结构复杂、质量高、密

封性差及成本高等问题。而大型一体化压铸成形技术可实现复杂结构的整体成形, 实现减少零部件的数量和装配工序, 并具有优异的密封性能, 因此非常适用于制造结构复杂、精度及密封要求高的电池托盘。

本研究结合大型一体化压铸成形技术, 通过对特定型号的新能源汽车的电池托盘的结构进行设计及优化, 推动大型一体化压铸电池托盘的应用。

1 一体化压铸电池托盘的结构设计

1.1 产品技术要求

图1为电池托盘原型材方案模型。分析可知, 电池

收稿日期: 2024-10-08; 修订日期: 2024-11-07

基金项目: 国家工信部高质量发展项目资助项目(2340STCZB1927)

第一作者简介: 陈振宇, 男, 1981年出生, 助理工程师, E-mail: zhenyu.cheng@ght-china.com

通信作者: 万里, 男, 1970年出生, 教授级高工, E-mail: wanli@ght-china.com

引用格式: 陈振宇, 万里, 汪学阳, 等. 大型一体化压铸电池托盘的结构设计与优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 656-661.

CHEN Z Y, WAN L, WANG X Y, et al. Structural design and optimization of large-scale integrated die-casting battery trays[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 656-661.

托盘主要由左右边框、前后边框、中间横梁及底板组成(构成零件为22个),整体质量约为66.7 kg。左右边框与前后边框通过4个角位连接铸件焊接(焊接除特别说明外,主要采用TIG氩弧焊工艺),形成四周框架。底板则由冷却底板型材及中间底板型材通过摩擦搅拌焊双面焊接拼接组成,其中冷却水道部分由冷却底板型材与进出水口铸件及转向铸件焊接组成。四周框架与底板通过摩擦搅拌焊焊接组成电池托盘主体,再将中间横梁焊接在主体中间,最终组成了整个电池冷却系统。可与车体螺栓连接,可与盖子及密封胶条的螺栓连接的电池托盘,其轮廓尺寸为2 002 mm×1 570 mm×161 mm。

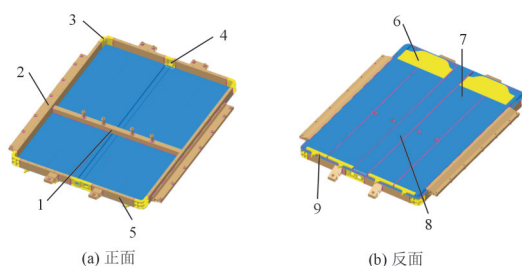


图1 电池托盘型材方案模型图

Fig.1 Model diagram for profile scheme of battery trays

1. 中间安装横梁(左右,2个) 2. 边框 3. 角位连接铸件(4个)
4. 线路安装部件铸件(2个) 5. 边框(前后,2个) 6. 冷却转向铸件(2个) 7. 冷却底板型材(4个) 8. 中间底板型材 9. 冷却进出口(4个)

国家质检中心对电池包有多项标准要求^[6],涵盖了碰撞安全、耐久、实用强度、振动等方面,大多数的检测项目都是由电池托盘负责对应的,因此电池托盘对车体刚度的贡献最高,其结构是考虑的重点。

1.2 一体化电池托盘的结构设计要点

1.2.1 产品设计流程

大型一体化压铸电池托盘设计及优化流程见图2。首先确定输入条件,包含工艺条件、功能条件及性能条件,然后构建满足功能及工艺要求的截面形状结构,最后整合为初版的主体模型。根据初版模型进行工艺及性能方面的深入分析,对不满足项进行局部修改优化,最终得到可满足工艺及性能要求的模型。

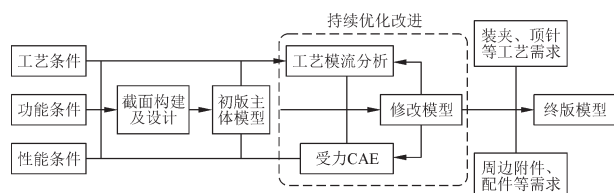


图2 大型一体化压铸电池托盘设计及优化流程图

Fig.2 Flowchart of design and optimization of large-scale integrated die-casting battery trays

1.2.2 大型一体化压铸的工艺条件

高强度压铸铝合金具有密度低、强度高、耐腐蚀性及热传导性好等特点,适合用于电池托盘的制造。同时铝合金具有良好的加工性能,可以满足一体化高压压铸成形工艺要求^[7]。根据产品的箱体结构,主体分型采用上下分型方式(动定模的定义需根据内部深腔的结构进行评估确认),并根据前后两侧外部线路管道连接部位的需求,对前后两侧的局部位置进行抽芯结构定义,其主体分型及抽芯的具体位置见图3。根据产品长宽尺寸(2 002 mm×1 570 mm)计算出投影面积约为 $3.14 \times 10^6 \text{ mm}^2$,属于超大型压铸件,选用锁模力为120 000 kN的压铸机可满足其铸造要求。

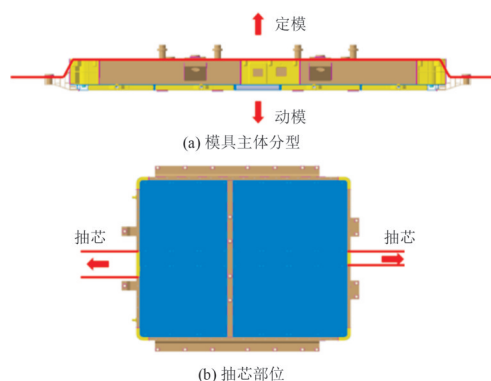


图3 模具主体分型及抽芯部位图

Fig.3 Die parting and diagram of slider section

1.3 截面造型设计

型材方案改为一体化压铸需要结合功能及工艺要求对关键截面造型进行必要的设计及修改。左右侧框分布在电池两侧,具有连接车体的螺栓过孔及连接盖子密封螺柱的功能。在性能要求中,Y轴向挤压对侧框的结构强度有重要要求,因此左右侧框是车体侧碰撞时保护电池的关键区域。

根据出模要求,设计定义见图4,其中模型截面框架见图4a,并在对应出模的方向设计补强竖向筋条(见图4b)。受限于铸造工艺,一体化电池托盘侧框截面无法做出框体结构,其结构一般以U形结构为主。对比型材方案结构,强度有一定的不足,因此需要通过局部截面进行增厚加强,并结合后期CAE分析进行优化。

一体化组合冷却系统的要求是与电池托盘壳体进行隔离,与密封盖板进行密封,以及需要存在进出通道,具体截面设计见图5。冷却液与电池被电池托盘壳体隔离,电池热量通过铝合金壳体传递到冷却液,由于铝合金具备较好的导热性能[导热系数为 $101 \sim 126 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]^[7],可实现较精确的电池温度控制。电池托盘与密封盖板通过摩擦搅拌焊实现有效的密封连接,

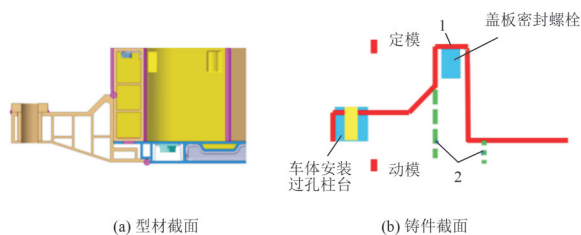


图 4 侧框截面图

Fig.4 Cross-section diagram of side frame

1. 截面框架 2. 竖向筋条

形成冷却液流动的封闭区域。同时采用压装管件工艺(其在汽车的歧管、转接口、油底壳及冷却液泵等铝合金铸件均有成熟的应用,是铸件与外部管件连接的最优方式),形成冷却液的进出通道。

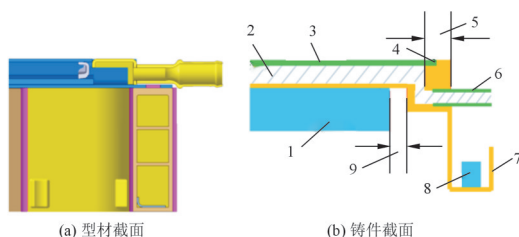


图 5 冷却液进出口截面图

Fig.5 Cross-section diagram of cooling inlet and outlet

1. 电池 2. 冷却液区域 3. 密封盖板 4. 摩擦搅拌焊区 5. 安装密封距离 6. 压装管件 7. 翻边 8. 盖板密封螺栓 9. 安规距离

内部中间横梁部位需要与车体进行吊装孔连接以加强电池托盘承载能力,因其受力因素又影响电池托盘与盖子密封效果,因此与盖子实现有效密封的结构是设计难点。

对中间横梁的吊装孔部位进行截面设计,见图 6。型材焊接方案需要多个位置进行焊接密封,对焊接要求高。连接杆方案需要铸件壳体与连接杆进行螺接,内部装配橡胶 O 型圈进行密封。但是两种方案均有可能在高频受力情况下出现疲劳松动,从而造成密封不良。因此一体化成形是吊装孔部位的最优选择。

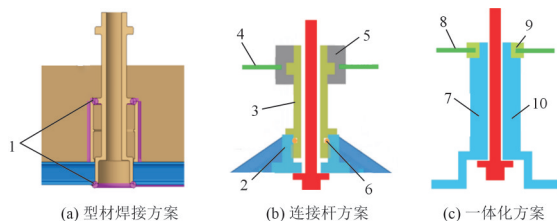


图 6 吊装孔截面图

Fig.6 Cross-section diagram of lifting hole

1. 焊接 2、7. 铸件壳体 3. 连接杆 4、8. 盖板 5、9. 橡胶 6. 橡胶 O 型圈 10. 一体化结构

1.4 初版设计模型

结合截面要求,设计出初版模型见图 7。根据轻量化要求,产品整体壁厚为 3 mm,同时在四周增加一些

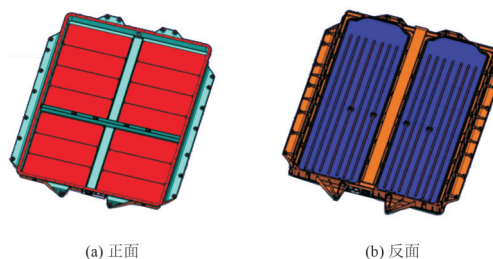


图 7 初版主体模型图

Fig.7 Model diagram of initial model

直筋条连接到对应的螺栓过孔柱台。

2 压铸工艺设计及铸件结构优化

依据初版数字模型及 120 000 kN 压铸机的参数,定义了铸造压力 ≤ 32 MPa 及单侧进浇的浇注方式。按照压铸机要求,压铸冲头直径为 0.3 m,冲头高速速度为 5 m/s,基于铸件平均壁厚选择内浇口速度为 38~46 m/s^[7],选取内浇口速度中值为 42 m/s,浇口面积等于浇口长度(约按长方形产品的长边 2 m)与浇口部位厚度的乘积。根据流量相等公式:冲头高速速度 $\times$ 冲头面积=内浇口速度 $\times$ 浇口面积,计算出浇口部位壁厚为 4.2 mm。由于产品两侧与浇口接触的部位平均壁厚为 3 mm,因此浇口的填充对模具的冲击大、易冲蚀,且影响铸件后部填充,极易出现内部缺陷,需要调整产品两侧壁厚,具体调整区域见图 8。

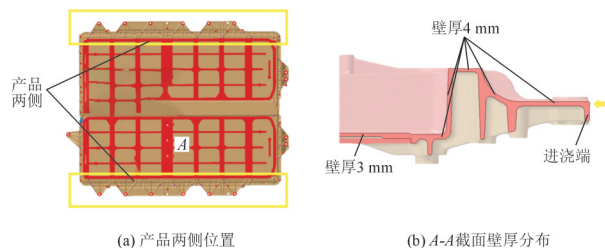


图 8 两侧壁厚修改

Fig.8 Modification of wall thickness on both sides

在模流验证中发现中间过料的薄壁区域对铝液填充过料形成较大阻碍。图 9 为填充过程压力分布模拟图。由图 9a 可以看出,填充铝液前端一致及平整,是平缓填充过程;压力瓶颈填充图显示方框中的颜色加深即压力值显著升高,因此框中部位存在压力瓶颈;图 9c 的圈中部位显示填充铝液前端出现湍流的现象;图 9d 显示当受到压力瓶颈影响时,铝液在后端的填充过程出现局部散乱,特征是铸造薄壁结构中材料流动性不足^[7]。同时受限于中间瓶颈部位为薄平板结构(因安装线路板及最低点控制需求,不能增加筋条),因此只能更改产品中间压力瓶颈部位的壁厚(见图 10),加大铝液填充通过的过料截面,以提高填充末端成形品质。

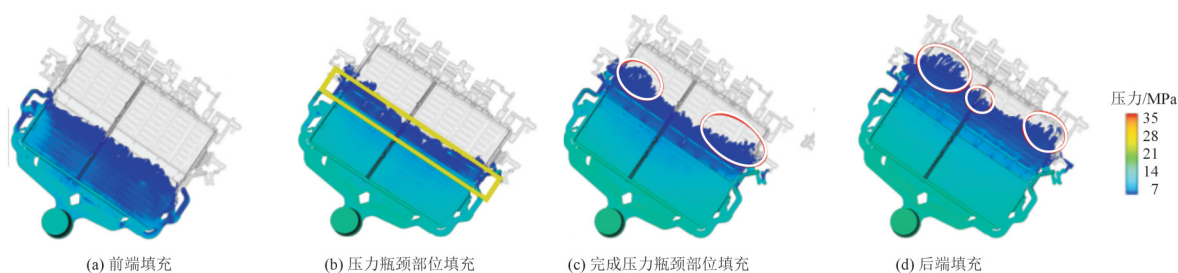


图9 填充模拟压力分布图

Fig.9 Pressure distribution of filling simulation

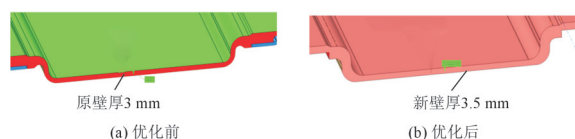


图10 压力瓶颈部位的壁厚调整示意图

Fig.10 Schematic diagram of wall thickness adjustment for pressure bottleneck area

3 结构CAE分析及优化

3.1 电池安装螺栓部位在强度性能要求下的结构优化

通过静力学分析电池托盘结构强度,对结构薄弱处进行优化^[8-10]。电池托盘的车体连接部位采用6个自由度的固定约束,加载电池反力及对电池加速度激励值为X、Y、Z 3个方向加速度,并分别取值17g、8g、14g (g 为重力加速度)。采用的压铸铝合金屈服强度为150 MPa,抗拉强度为220 MPa,伸长率为3%。通过

CAE模拟分析后发现电池安装螺栓部位在Y-8g工况下存在较大的应力集中,应力值为163.937 MPa,高于材料的屈服强度,改善前的CAE结果见图11。

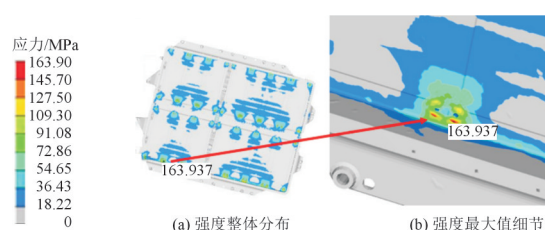


图11 优化前强度分析结果图

Fig.11 Strength analysis result before optimization

通过对螺栓柱台间采用框体筋结构,提升该部位的刚度,通过引入两条斜筋作为受力路径,把应力引向车体安装的螺栓过孔柱台。修改后再次进行CAE模拟分析验证,发现最大应力部位在斜筋与框体筋之间的结合部,其最大应力值为143.76 MPa,未超过材料屈服强度,满足设计要求。优化过程及结果见图12。

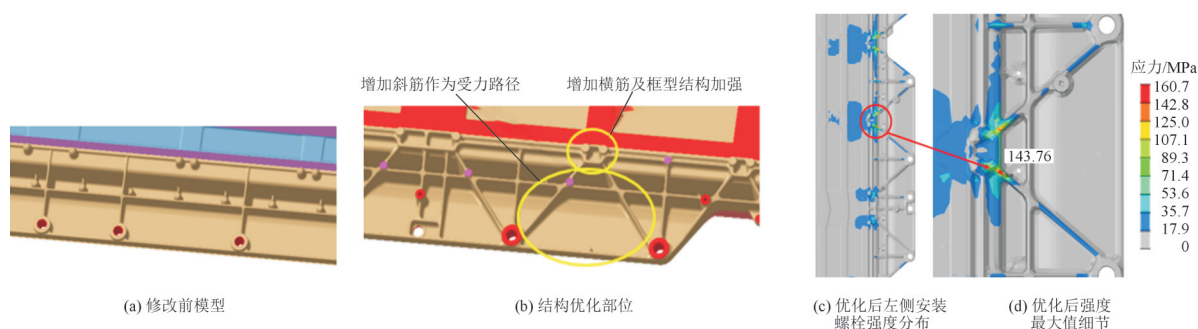


图12 电池安装螺栓部位优化过程及结果图

Fig.12 Optimization process and result of bolt position for battery installation

3.2 中间凹凸部在固有频率要求下的结构优化

由于电动汽车的激振频率小于30 Hz,电池托盘的模态分析结果需要大于30 Hz才不会发生共振^[8-11]。图13为优化前的前4阶固有频率图。可以看出,初版模型的一阶固有频率为28.92 Hz,振动方向为Z向,其变形最大位置在电池托盘后部框体与横梁形成的框体的中心区域。通过观察,前4阶固有频率的变形最大值均在中心部位,说明中间部位没有竖筋情况下强度偏弱,因

此需要对其结构增强。

电池托盘体边框及中间横筋部位的刚度较高,而中心部位由于无法增加横竖筋条,属于相对薄弱区域。为了加强中心部分刚度,设计了中间凹凸结构,即大幅加大U型两侧竖筋壁厚,壁厚由3 mm改为6 mm(受限于产品功能结构,如增加凹凸高度效果更好),同时中间凹陷部位壁厚也同时增加。优化方案及结果见图14。其中一阶模态结果为32.14 Hz,超过电动汽车的激

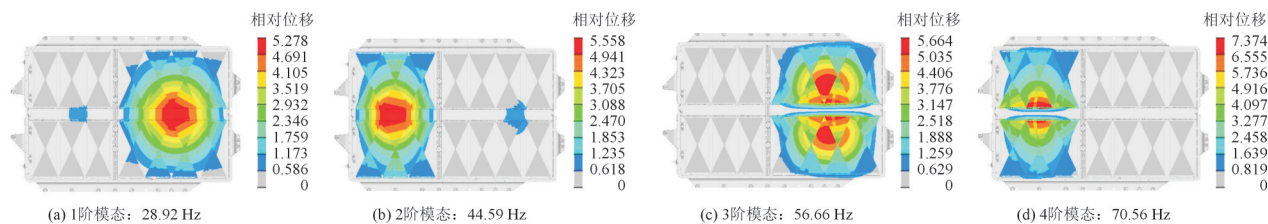


图 13 优化前的前 4 阶固有频率分布图

Fig.13 Distribution diagram of the first four natural frequencies before optimization

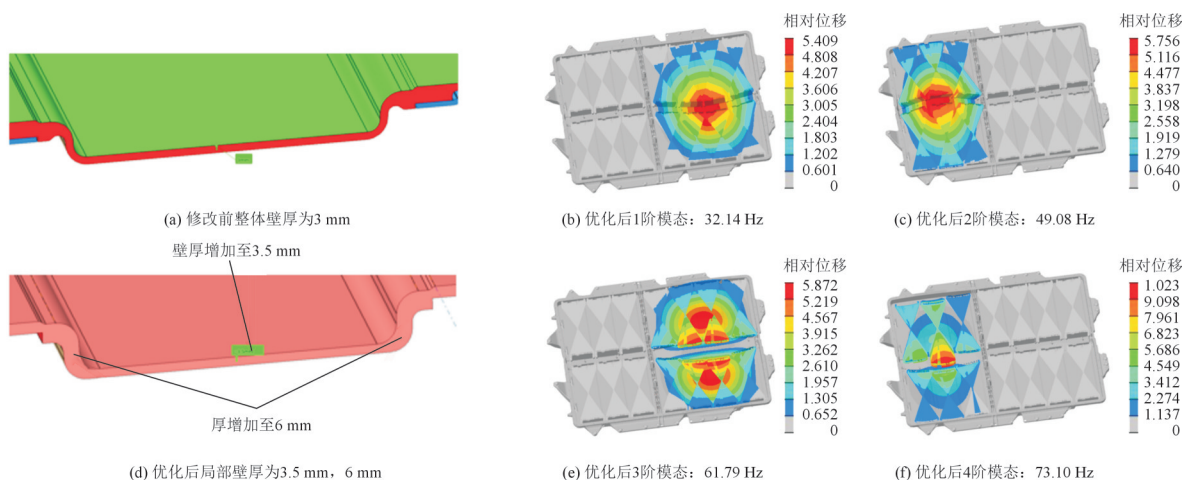


图 14 优化过程及模拟结果图

Fig.14 Optimization process and simulation result

振频率(30 Hz)。从模拟结果看出,固有频率得到提升,并满足设计目标要求。

3.3 侧壁部位在 Y 向挤压工况要求下的结构优化

Y 向挤压是模拟整车遇到侧碰撞时,验证电池托盘强度及保护能力。过程是把半径为 75 mm 的半圆柱体挤压板在 Y 方向以 2 mm/s 的速度挤压自由状态的电

池托盘,电池托盘受到另一侧刚性墙体阻挡。其主要指标为柱压壁障力大于 100 kN 及侵入量,关于对应的结构及模拟均有研究^[12-17]。图 15 为优化前 Y 向挤压结果图。可以看出,在侵入 75 mm 时最大反力仅为 75 kN,在侵入 85 mm 后边框已经丧失承载能力,壁障与模组发生碰撞。因此优化前的侧壁单凭 3 根横筋及一条竖筋无法满足 Y 向挤压作用。

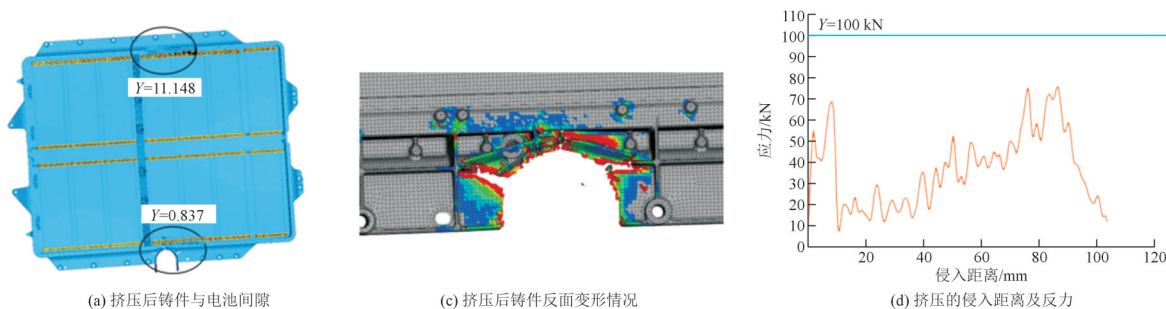


图 15 优化前 Y 向挤压结果

Fig.15 Extrusion results along Y-direction before optimization

根据结果及对应结构,对侧壁部位设定了通过允许失效方式进行吸能溃缩的变形区域,通过提升刚度来抵抗挤压的重点补强区域。为更好引导应力传递到中间横梁部位,在上、下面均增加两条直筋,在反面的两个螺栓柱台部位采用长框型筋条布局提升该区域的刚度,并采用两条斜筋对重点补强区进行补强并防止变形区出现较大裂纹。同时通过改变横梁及筋条的厚

度,增加碰撞能量吸收。优化位置见图 16。

优化后 Y 向挤压结果见图 17。可以看出,侧壁部位的变形区域得到一定加强,壁障反力仍低于要求的 100 kN,但是未出现明显开裂。在重点补强区域,挤压板侵入 83 mm 时,壁障反力达到最大,为 148 kN,随后随着补强区域裂开,反力开始下降,已达到设计目标。

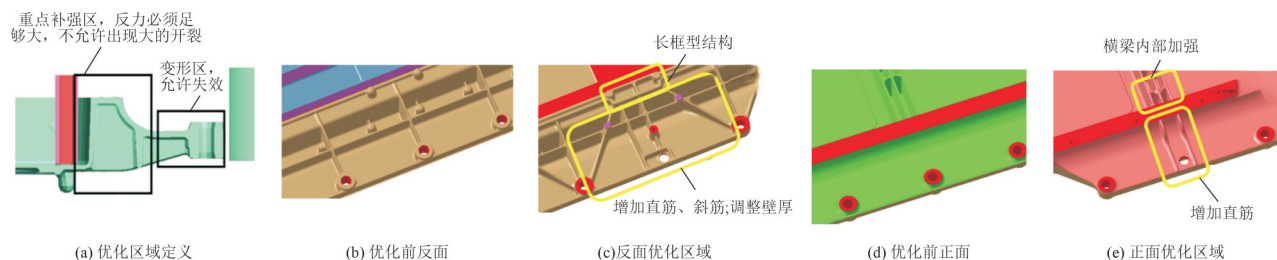


图 16 具体优化位置图

Fig.16 Schematic diagram of optimization position

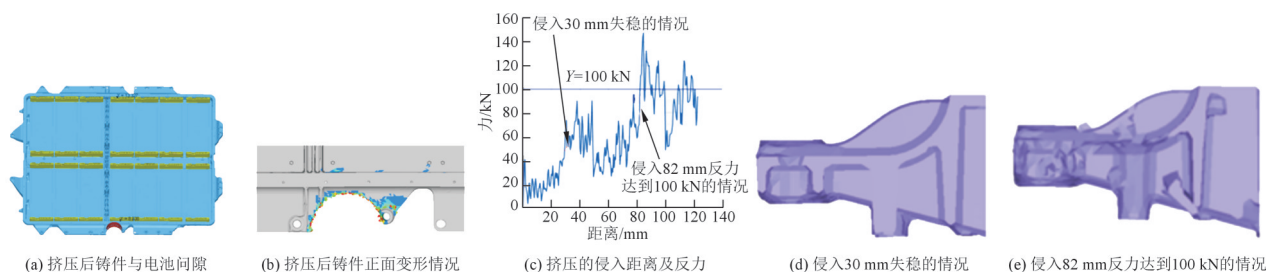


图 17 优化后 Y 向挤压结果图

Fig.17 Extrusion result along Y-direction after optimization

4 试验验证

为了验证优化设计后的电池壳体的性能,研究开展了相关试制。在 120 000 kN 压铸机上,铸造压力为 (30 ± 2) MPa 等条件下做出样件(见图 18),经检测内部品质满足客户要求。样件发客户完成 DVP&R(样车性能试验验证)并通过。优化设计后的电池托盘均满足工艺、性能、安全要求,同时在轻量化方面有一定的提升。具体表现为:壳体密封性好,质量轻(56.7 kg,比型材方案降低了 15%),生产工序减少,生产成本降低。

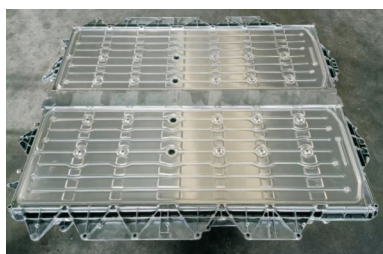


图 18 试样展示图

Fig.18 Display of specimens

5 结 语

结合功能条件、性能要求及工艺条件对大型一体化压铸电池托盘进行结构设计及优化。从产品功能需求出发,通过截面造型设计构造初版数字模型,在工艺检验及结构 CAE 分析后对产品进行结构优化。优化后模型满足要求,并已试生产试验验证,可在实车应用。

参 考 文 献

- [1] 房秉毅,张英伟,李祺岩,等.数据要素推动新质生产力发展的机制与路径[J].中国科技产业,2024(9):38-42.
- [2] 但昭学,林韵,万里,等.一体化压铸成形技术的现状及发展[J].特种铸造及有色合金,2024,44(8):1 023-1 031.
- [3] 赵振强.新能源汽车动力电池包轻量化设计分析[J].汽车周刊,2024(11):69-71.
- [4] 王庆奎.基于价值链视角的汽车公司成本优化研究[J].中国商界,2024(9):126-127.
- [5] 段广坡.铝合金电池包壳体结构设计[J].铝加工,2022(5):18-21.
- [6] GB38031-2020.电动汽车用动力蓄电池安全要求[S].
- [7] 吴春苗.压铸技术手册[M].广州:广东科技出版社,2007.
- [8] 周枫.电动汽车铝制动力电池壳体密封设计研究[J].汽车与配件,2024(5):67-70.
- [9] 钱利勤,伊亚辉,杨彦博,等.车载电池包壳体力学性能分析与轻量化设计[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(S1):260-267.
- [10] 孙海明.纯电动汽车铝合金电池箱结构优化设计[J].电源技术,2020,44(6):891-895.
- [11] HARTMANN M, ROSCHITZ M, KHALIL Z. Enhanced battery pack for electric vehicle: Noise reduction and increased stiffness[J]. Materials Science Forum, 2013, 765: 818-822.
- [12] 万长东,孙营,鲁春艳,等.动力电池铸铝箱体力学分析与优化[J].机械设计与制造,2024(8):212-216,222.
- [13] 熊玥,潘勇军,刘冰河.基于正交试验设计的电动汽车电池包壳体轻量化[A]//第22届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集[C].辽宁大连,2021.
- [14] 兰凤荣,刘金,陈吉清,等.电动汽车电池包箱体及内部结构碰撞变形与响应分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(2):1-8.
- [15] 袁林,赵清海,张洪信,等.考虑碰撞工况的电动汽车电池箱多目标拓扑优化设计[J].制造业自动化,2019,41(5):124-129.
- [16] 金鑫,李斌,王东辉,等.铝合金电池包下壳体的设计与分析[J].装备制造,2022(4):14-17,21.
- [17] 邹涛.三元锂离子电池挤压工况下的失效分析[D].长沙:湖南大学,2022.

(编辑:彭瑾)