

低成本复材轻量化电池盒研制报告 (删节版)



队 长：张鑫

队 员：贾利勇 张彤 顾思道 陈华清

参赛时间：2019 年 5 月 6 日上午 10 点

参赛地点：北京中国国际博览中心（静安庄馆），A225(5 号馆)

摘要

由于国家能源战略和环保政策的要求，汽车行业向轻量化方向转移。其中新能源汽车电池包作为关键的动力系统部件，对轻量化的贡献尤为明显，重量可以占到整车重量的 15%–20%。碳纤维复合材料有高强度、高模量以及耐腐蚀的特性，且相对于铝合金有较大的轻量化优势，将扮演非常重要的材料替换角色，同时也对结构设计、工艺设计提出来高标准下的高要求。

以“朗博万”杯第三届 SAMPE 复合材料工业制品 DIY 设计制作竞赛为契机，广东众森实业发展有限公司、上海邦麟复合材料科技有限公司、航空工业第一飞机设计研究院及西北工业大学的工程师组成团队，通过互联网协作的方式，完成了低成本井字形加筋轻量化电池盒的设计、制造和试验验证工作。

在对外载工况和传力路径的分析的基础上，进行了结构拓扑优化、外形设计，并对设计铺层进行了各工况下的静强度、稳定性和螺栓破坏校核，通过井字形加筋结构实现了轻量化目标。

结构设计完成之后，权衡成本与工艺性后进行了材料选择。制定工艺方案、设计工艺流程时候着重考虑了生产效率，并进行了样件试制和成本分析以确保项目的可行性和经济性。

本方案电池盒总重量 4.78Kg, 经试验测试在侧向挤压 100kN 下变形 10.33mm, 在底部静压 1200N 下最大变形 0.56mm。通过选用快速固化预浸料，优化量产模具设计能够实现 10–15min 快速固化。同时，通过各环节的成本控制能将单套量产成本控制在 1000 元以内。

目录

摘要	2
目录	3
1 项目背景	5
2 团队介绍	5
2.1 研制单位简介	5
2.2 人员构成及分工	错误！未定义书签。
3 设计目标	6
3.1 几何外形	6
3.2 载荷与变形条件	6
3.3 总重	6
4 设计理念	6
4.1 结构效率——高	6
4.2 生产节拍——快	7
4.3 量产成本——低	7
5 结构设计与强度校核	7
5.1 外载及传力路径分析	7
5.2 结构拓扑优化	7
5.3 结构设计	8
5.4 强度校核	12
5.4.1 底部静压工况校核	14
5.4.2 侧向挤压工况校核	错误！未定义书签。
5.4.3 螺栓破坏校核	错误！未定义书签。
5.4.4 三维实体单元静强度分析	错误！未定义书签。
6 工艺与试制	12
6.1 材料选择	13
6.2 工艺方案	15
6.2.1 尺寸及重量	错误！未定义书签。
6.2.1 制造工艺	错误！未定义书签。
6.2.2 工艺流程及方法	错误！未定义书签。
6.2.3 样件试制	错误！未定义书签。
6.2.4 量产工艺	15
7 试验验证	17
7.1 现场测试条件	17
7.1.1 电池盒悬挂式底部静力试验	17
7.1.2 电池盒体侧向挤压测试	17
7.2 试验结果	18
7.2.1 底部静力试验结果	18
7.2.2 侧向挤压试验结果	19
8 成本分析	20
8.1 材料成本	错误！未定义书签。

8.1.1 辅助材料.....	错误！未定义书签。
8.1.2 电池盒箱体	错误！未定义书签。
8.2 模具费用	错误！未定义书签。
8.3 工序及人工成本	错误！未定义书签。
8.4 水电	错误！未定义书签。
8.5 单套电池盒箱体综合成本	20
9 总结 错误！未定义书签。	

1 项目背景

由于国家能源战略和环保政策的要求，汽车工业向轻量化方向转移，尤其是新能源汽车得到大力推广，对车身轻量化的要求逐步提高。现有的轻量化汽车零部件包括车身骨架，尾门，底盘等。

其中新能源汽车电池包作为关键的动力系统部件，对轻量化的贡献尤为明显，重量可以占到整车重量的 15%-20%。现有大部分电池包外壳采用铝合金挤出型材焊接的方式进行加工制造，重量为 60-70 公斤，仍对电动汽车的续航里程有很大的影响。国家对新能源汽车的续航里程以及电池包能量密度提出了针对性要求，促使汽车生产厂家对电池包的材料、结构设计有更高的研发投入。

电池包作为关键的结构件、安全件，有详细的法规要求，包括侧向挤压，密封性以及耐火要求。碳纤维复合材料有高强度、高模量以及耐腐蚀的特性，且相对于铝合金有较大的轻量化优势，将扮演非常重要的材料替换角色，同时也对结构设计、工艺设计提出来高标准下的高要求。

2 团队介绍

2.1 研制单位简介

本项目由广东众森实业发展有限公司提供材料、模具、设备并进行试制生产，由上海邦麟复合材料科技有限公司、航空工业第一飞机设计研究院及西北工业大学提供技术支持。

广东众森实业发展有限公司是专业致力于玻纤制品、碳纤维制品等新型复合材料制品的研发、生产、销售为一体的高新技术企业。产品广泛应用于新能源汽车主机厂、特种车辆厂，并服务于各航天航空、军事、轻工等领域。公司产品主要涉及：

- (1) 新能源汽车轻量化及功能复合材料；
- (2) 卡车、物流车结构件及车厢板；
- (3) 动车、云轨内外饰及功能复合材料；
- (4) 医疗器械；
- (5) 航空复材结构件。

公司专注于新能源电池复合材料领域，所拥有的复合材料新能源电池壳体等制品已经通过多个 PACK 厂的体系认证，并在批量供货。

另外，公司已通过 ISO9001 及 IATF16949:2016（含产品设计）体系认证。

3 设计目标

3.1 几何外形

1. 外尺寸: 400mm×400mm×200mm。
2. 内尺寸: 330mm×330mm×150mm。
3. 翻边: 30mm。

注意: 变形后仍不可以超出内包络线(不可挤压模组)。

3.2 载荷与变形条件

一、悬挂式底部静力试验

1. 静力与变形: 等速位移 2mm/min, 加载到 1200N, 记录变形量, 底部最大变形不得超过 2mm;
2. 孔边应力与损伤: 拆卸螺栓后连接孔处不得有目视可见损伤。

二、电池盒体侧向挤压测试

静力与变形: 等速位移 2mm/min, 加载至 100kN, 同时测量变形, 保载 3 秒后卸载, 变形不超过 20mm。

注意: 1. 失稳问题 2. 孔边损伤。

3.3 总重

电池盒总重量(含螺钉)不得超过 9kg。

4 设计理念

4.1 结构效率——高

在本项目中, 电池盒应满足底面静力工况及侧向挤压工况。通过针对两种工况的传力分析, 为提高结构效率, 确定采用加筋结构。在底面静力工况下, 通过侧面竖直加强筋承担拉伸载荷; 在侧向挤压工况下, 由侧面竖直加强筋承担弯矩, 并传到上盖及底部的井字形加筋结构上, 井字形加筋最终承担压缩载荷。

为配合模具设计及工艺方案, 在模具上设计凹凸来实现加筋。通过加筋区域的局部加厚, 形成多组 Z 形梁结构。

经过初步设计后, 通过结构拓扑寻找主传力路径并确定各区域厚度。在详细设计阶段, 通过有限元建模、静强度分析和稳定性分析确定加强筋的宽度和高度。经过分区分级设计, 确定各区域的铺层及厚度, 最大程度实现轻量化, 有效提高结构效率。

4.2 生产节拍——快

为适应量产化需求，材料选用快速固化阻燃碳纤维预浸布和快速固化阻燃玻璃纤维预浸布。

同时箱体的量产设备选用热压机，并采用热进冷出模式。对所用的模具作自发热和自冷处理。由于模具本身自重和体积较大，靠传统热传导和热对流需要较多的传热时间。经过对模具的设计，在符合实际设计需求的情况下，对局部厚部位以及热传递缓慢区域设计加热流道，促进升温。相应的，对于冷却速度慢的问题，通过合理设计冷却水流道经模温机控制模具冷却速度。整个部件的固化周期可缩减至 10-15min。

4.3 量产成本——低

量产方案采用了非热压罐工艺，在加快生产节拍的同时，能够有效降低能耗。设备固定投资低，占用的厂房面积也远远小于热压罐。

另外，在低应力区使用低成本的玻璃纤维预浸料，也使成本显著降低。

5 结构设计与强度校核

5.1 外载及传力路径分析

在底面静力工况下，通过侧面竖直加强筋承担拉伸载荷；在侧向挤压工况下，由侧面竖直加强筋承担弯矩，并传到上盖及底部的井字形加筋结构上，井字形加筋最终承担压缩载荷。为配合模具设计及工艺方案，在模具上设计凹凸来实现加筋。通过加筋区域的局部加厚，形成多组 Z 形梁结构。

5.2 结构拓扑优化

采用拓扑优化方法寻找主传力路径并确定及各区域厚度。拓扑优化模型采用的是各向同性材料三维实体单元模型，最终计算结果如下图所示，底面及四周靠近加载点位置附近结构厚度大，四周边缘位置结构厚度小。

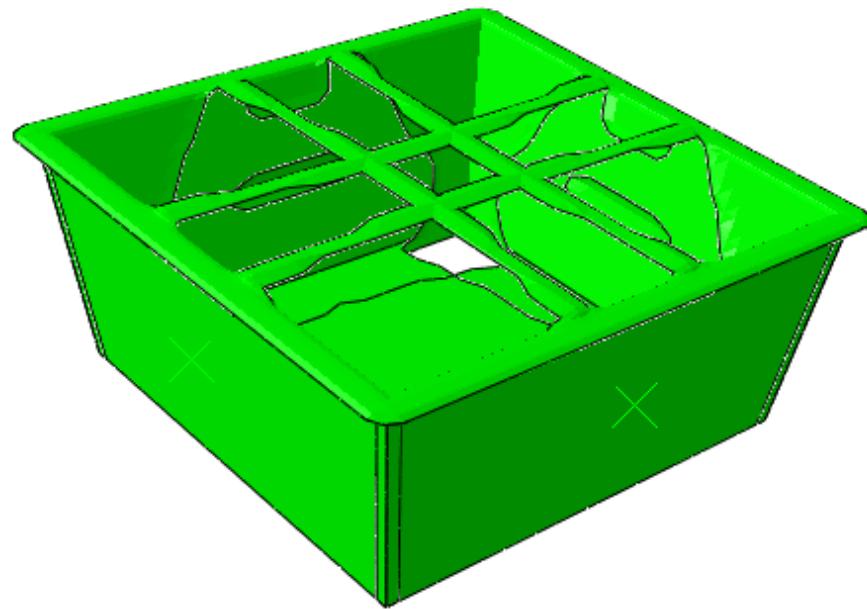
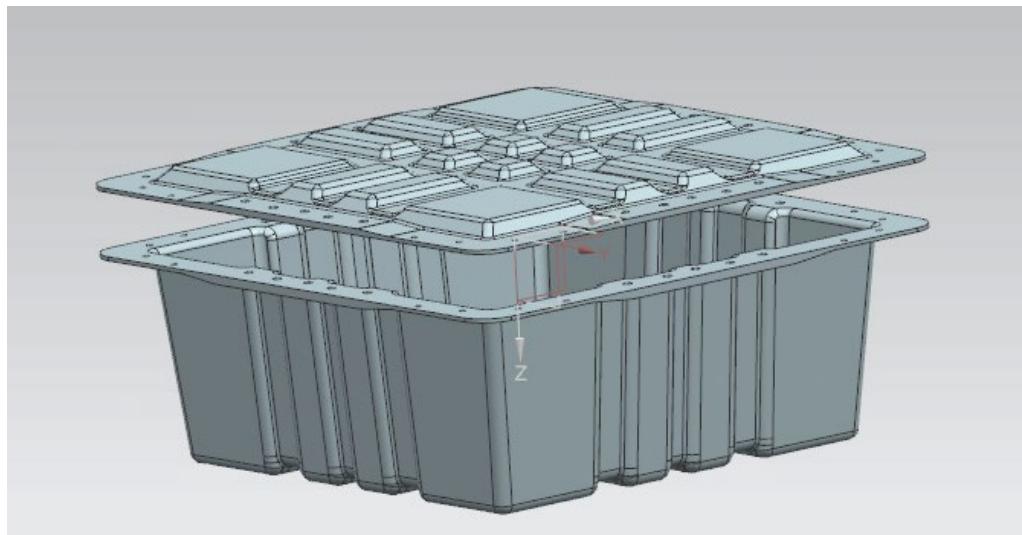


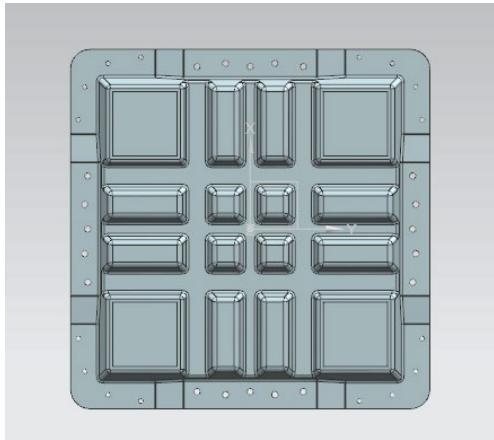
图 5.2-1 拓扑优化结果

5.3 结构设计

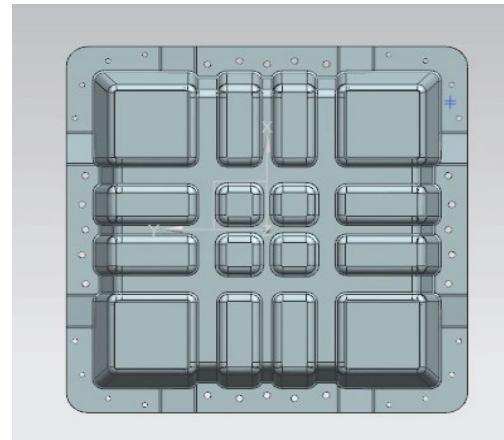
基于拓扑优化结果，进行了结构方案设计。为了提高结构刚度，整个电池箱体及盖子均设计为整体凹凸加筋结构，筋条呈井字形排布，如下图所示。



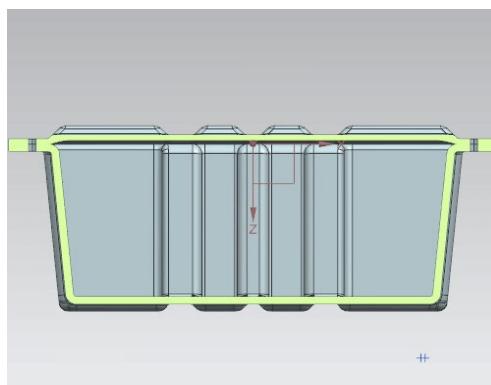
5.3-1 整体视图



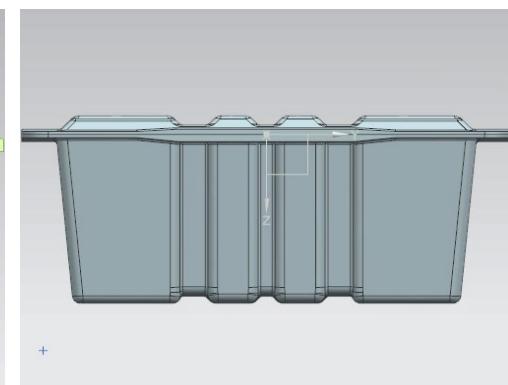
5. 3-2 俯视图



5. 3-3 底部视图



5. 3-4 左视图



5. 3-5 截面

下面参考文献^[1]进行材料三维刚度等效。根据 Chou 等^[2]的三维刚度等效理论, 对于包含任意铺层角度的子层压板, 其等效后的材料为单对称材料, 其等效刚度矩阵为:

$$[\bar{C}_{ij}^*] = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11}^* & \bar{C}_{12}^* & \bar{C}_{13}^* & 0 & 0 & \bar{C}_{16}^* \\ \bar{C}_{21}^* & \bar{C}_{22}^* & 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{26}^* \\ \bar{C}_{31}^* & \bar{C}_{32}^* & 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{36}^* \\ 0 & 0 & \bar{C}_{44}^* & \bar{C}_{45}^* & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & \bar{C}_{55}^* & 0 & \bar{C}_{66}^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: “*” 表示子层压板的等效值; 上划线“—”表示在全局坐标系下的数值。

子层压板的等效应力—应变关系为:

$$[\bar{\sigma}^*] = [C_{ij}^*] [\bar{\epsilon}^*] \quad (2)$$

其中:

$$[\bar{\sigma}^*] = [\bar{\sigma}_1^*, \bar{\sigma}_2^*, \bar{\sigma}_3^*, \bar{\sigma}_4^*, \bar{\sigma}_5^*, \bar{\sigma}_6^*]^T \quad (3)$$

$$[\bar{\epsilon}^*] = [\bar{\epsilon}_1^*, \bar{\epsilon}_2^*, \bar{\epsilon}_3^*, \bar{\epsilon}_4^*, \bar{\epsilon}_5^*, \bar{\epsilon}_6^*]^T \quad (4)$$

子层压板的等效刚度系数 \bar{C}_{ij}^* 表示如下：

$$\bar{C}_{ij}^* = \sum_{k=1}^n V^k \left[\bar{C}_{ij}^k - \frac{\bar{C}_{i3}^k \bar{C}_{3j}^k}{\bar{C}_{33}^k} + \frac{\bar{C}_{i3}^k \sum_{l=1}^n \frac{V^l \bar{C}_{3j}^k}{\bar{C}_{33}^k}}{\bar{C}_{33}^k \sum_{l=1}^n \frac{V^l}{\bar{C}_{33}^k}} \right] \quad (i, j = 1, 2, 3, 6) \quad (5)$$

$$\bar{C}_{ij}^* = \bar{C}_{ji}^* = 0 \quad (i = 1, 2, 3, 6; j = 4, 5) \quad (6)$$

$$\bar{C}_{ij}^* = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{V^k}{\Delta k} \bar{C}_{ij}^k}{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{V^k V^l}{\Delta k \Delta l} (\bar{C}_{44}^k \bar{C}_{55}^l - \bar{C}_{45}^k \bar{C}_{54}^l)} \quad (i, j = 4, 5) \quad (7)$$

$$\Delta k = \bar{C}_{44}^k \bar{C}_{55}^k - \bar{C}_{45}^k \bar{C}_{54}^k \quad (8)$$

其中： \bar{C}_{ij}^k 表示子层压板中第 k 个铺层在整体坐标系下的刚度系数，可由单层板材料坐标系下的刚度矩阵以及坐标转换得到^[3]； n 为子层压板所包含的铺层数； V^k 是第 k 个铺层的厚度与子层压板总厚度的比值。

单向材料的基本力学性能如下：

表 5.3-1 碳纤维单向板力学性能

E_1 /MPa	E_2 /MPa	ν_{12}	G_{12} /MPa	G_{13} /MPa	G_{23} /MPa
131000	8180	0.3	5320	5320	3476

表 5.3-2 玻璃纤维单向板力学性能

E_1 /MPa	E_2 /MPa	ν_{12}	G_{12} /MPa	G_{13} /MPa	G_{23} /MPa
22800	22800	0.143	3800	3800	3000

因试验现场随机选择两个面进行加载，因此结构铺层中 0° 与 90° 铺层数一致， 45° 层数量与 -45° 层数量一致，故碳纤维基本铺层顺序为 $[0/45/-45/90]ns$ ，内外表层各铺一层玻璃纤维布，依据公式 (1) – (8) 该铺层顺序等效后的工程常数如下：

表 5.3-3 层压板等效力学性能

E_1 /MPa	E_2 /MPa	ν_{12}	G_{12} /MPa	G_{13} /MPa	G_{23} /MPa
50771	50771	0.3	19538	4560	4560

后期,为了降低制造成本,减少了碳纤维复合材料用量,增加了玻璃纤维复合材料的用量。其中加厚区厚度为 7mm 处, 碳纤维层 4mm, 玻璃纤维层 3mm。依据公式 (1) – (8) 此时的等效弹性常数如下:

表 5.3-4 层压板等效力学性能

E_1 /MPa	E_2 /MPa	ν_{12}	G_{12} /MPa	G_{13} /MPa	G_{23} /MPa
38969	38969	0.26	12793	4200	3728

同时为了减少结构重量,按照优化结果,对箱体及盖子中间承力区域进行局部加厚(紫色区域),四周区域厚度减薄(绿色区域)。

仅表层铺放玻璃布的方案(以下简称方案 1)结构设计总重量约 5.6kg(不含螺栓),低成本方案结构(以下简称方案 2)总重量约 6.1kg(不含螺栓)。

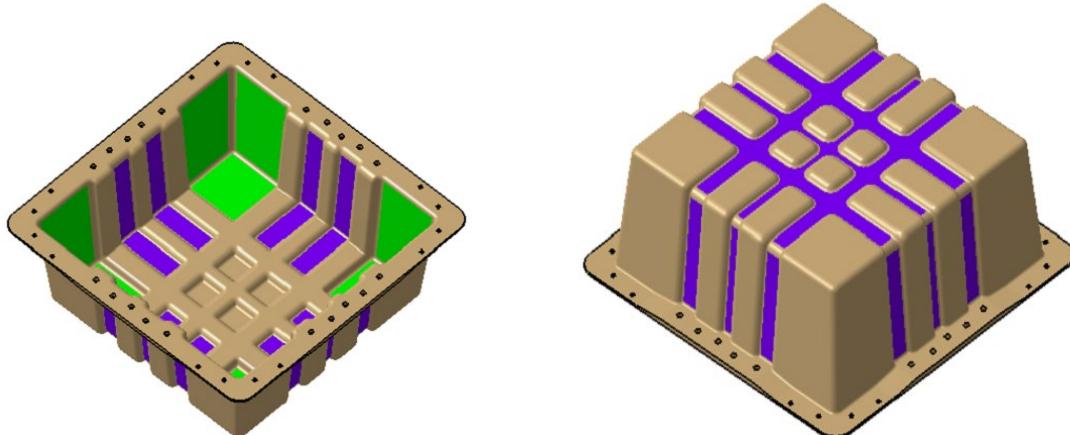


图 5.3-5 箱体结构形式

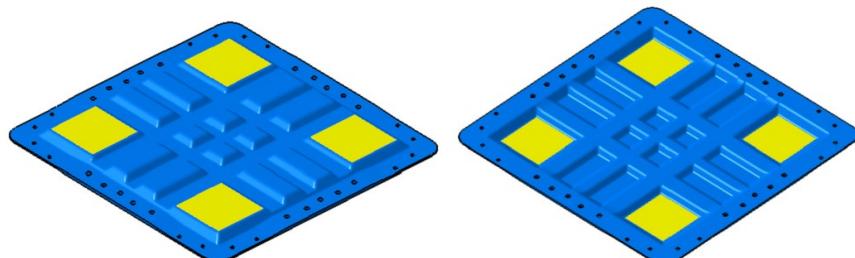


图 5.3-6 盖子结构形式

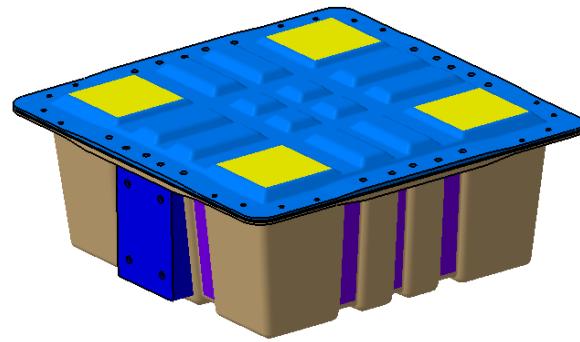


图 5.3-7 结构装配图

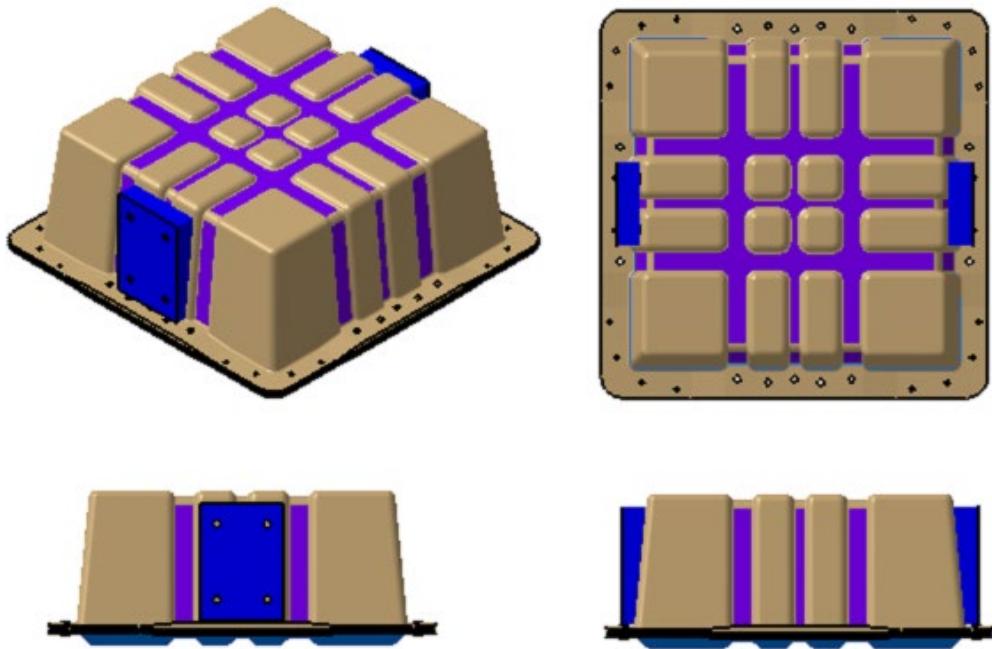


图 5.3-8 装配结构三视图

5.4 强度校核

5.4.1 底部静压工况校核

底部静力强度校核模型采用壳单元建模，对四个固定螺栓孔进行固支，顶部施加1200N 载荷，有限元模型如下图所示。

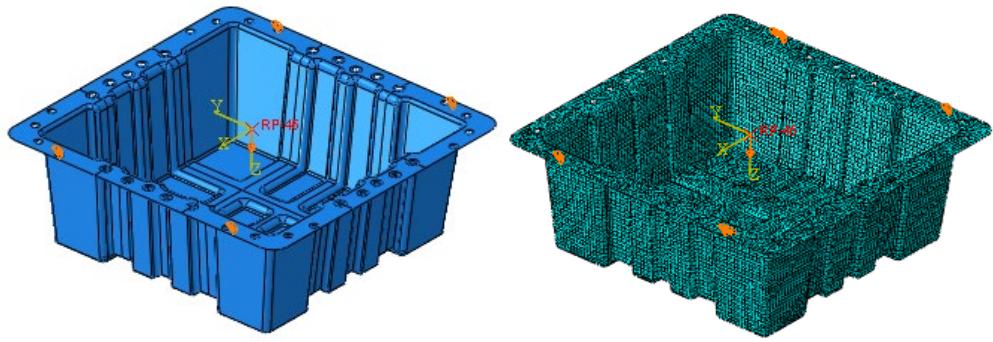


图 5.4.1-1 底部静力强度校核模型

方案 1 加载后的最大变形约 0.53mm, 满足底部静力试验变形要求。

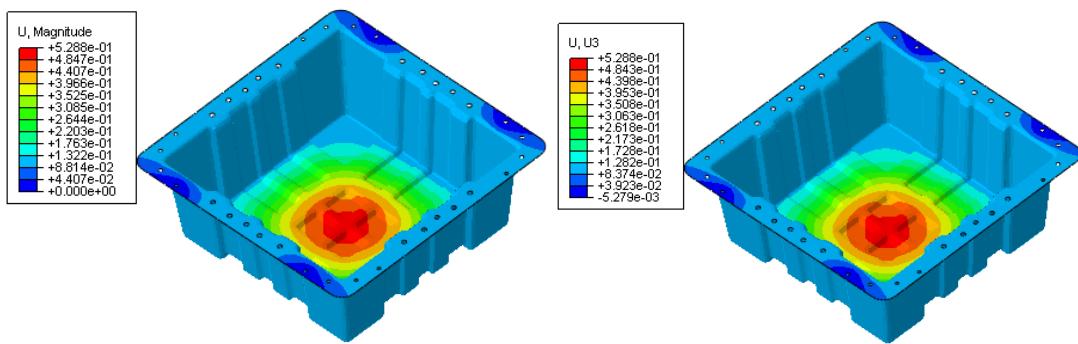


图 5.4.1-2 底部静力试验变形

低成本方案（方案 2），最大变形 0.96mm，满足底部静力试验变形要求。

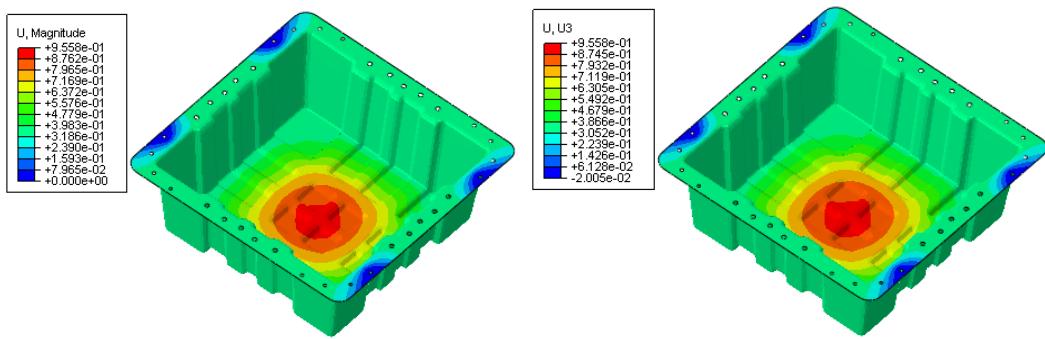


图 5.4.1-3 低成本方案底部静力试验变形

6 工艺与试制

6.1 材料选择

为满足量产需求，所选材料需满足快速成型的基本条件（5min/150 摄氏度），为降低成本，将玻璃纤维预浸料和碳纤维预浸料混合使用。

表 6.1-1 阻燃低发烟玻璃纤维预浸料

性能	单位	玻纤预浸料 1	玻纤预浸料 2	检测标准
预浸料面密度	g/m2	3100+/-20	620+/-20	HB 7736.2-2004
纤维类型	-	E-Glass	E-Glass	-
编织方式	-	平纹/斜纹	平纹/斜纹	-
纤维布重量	g/m2	218+/-15	400+/-15	HB 7736.3-2004
树脂含量	%	37+/-3	37+/-3	HB 7736.5-2004
挥发分	%	<0.5	<0.5	HB 7736.4-2004
树脂流动度	%	>10	>10	HB 7736.6-2004
粘性	%	T0,T1,T2	T0,T1,T2	HB 7736.8-2004
幅宽	Cm	100	100	-
固化条件	-	5min@150℃	5min@150℃	-

表 6.1-2 阻燃低发烟碳纤维预浸料

性能	单位	碳纤预浸料 1	碳纤预浸料 2	检测标准
预浸料面密度	g/m2	230+/-20	310+/-20	HB 7736.2-2004
纤维类型	-	CF-UD	CF-Prepreg	-
编织方式	-	单向	斜纹	-
纤维布重量	g/m2	150+/-15	200	HB 7736.3-2004
树脂含量	%	37+/-3	37+/-3	HB 7736.5-2004
挥发分	%	<0.5	<0.5	HB 7736.4-2004
树脂流动度	%	>10	>10	HB 7736.6-2004
粘性	%	T0,T1,T2	T0,T1,T2	HB 7736.8-2004
幅宽	Cm	100	100	-
固化条件	-	5min@150℃	5min@150℃	-

另外，所需辅助材料如下：

表 6.1-3 辅助材料

产品	复合材料电池盒
裁纱、贴料工序	
玻纤预浸布	见 4.3.1

碳纤预浸布	见 4.3.2
真空袋	高温真空袋
透气毡 (宝纤棉)	r:200g/m2
真空胶泥	耐温 150 摄氏度
隔离膜	耐温 150 摄氏度
标签	耐高温标签
成型	
离型剂	/
CNC	
砂纸	/
包装	
OPP 印刷胶带	/
无尘布	
其他包装材料	

6.2 工艺方案

6.2.4 量产工艺

(一) 箱体

工艺：模压成型

设备：冷热式热压成型机

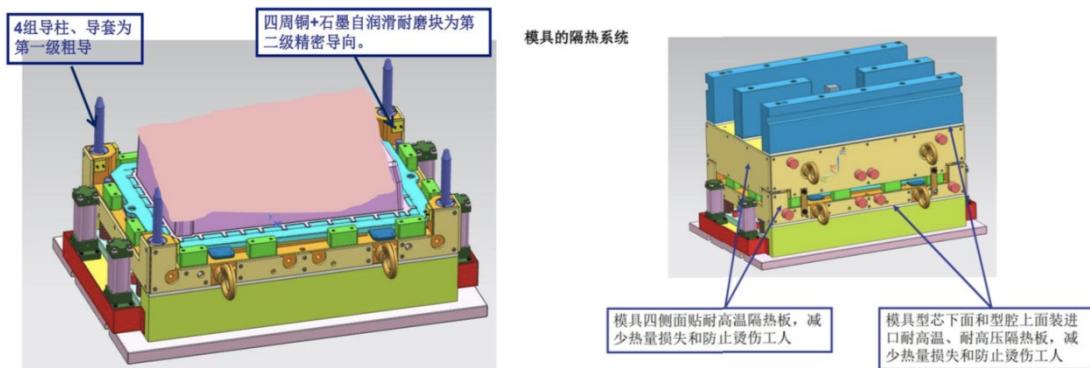


图 6.2.4-1 量产模具-箱体



图 6.2.4-2 量产设备

（二）上盖

工艺：模压成型

设备：冷热式热压成型机

（三）下料与铺放

通过编程设计层数，经自动下料机得到所需经裁剪的原料，减少手工裁剪误差和浪费。



图 6.2.4-3 自动下料机（左）、裁切好的预浸料（右）

（四）生产效率评估及量产可行性

（1）样品模具采用传统模具设计及成型方法，生产效率低，不是一大批量生产。样品箱体采用单面模热压罐成型，每天生产仅 1 套。不符合量产化要求。

（2）量产模具采用 PCM 模具两进两出油加热，油路内部循环设计，加热速度快。并采用顶针设计，无需人工脱模，减少人为脱模变形及损伤。成型周期（热固化周期）可达 10min/模。符合一定的量产化需求。

(3) 量产化方案采用多套预成型模具制作预成型体，在设计 4 套预成型模具的情况下可以与量产成型工序紧密配合，避免原有的间歇式操作工序导致的大量成型时间，提升单位时间产能和生产效率，进一步减少成本。

7 试验验证

7.1 现场测试条件

7.1.1 电池盒悬挂式底部静力试验

(一) 按实际工况装卡

仿照电池盒实际使用工况装卡(请参赛队自带扳手)，仿照电池总重量均匀施压。电池盒体按照图 2 与试验卡具进行连接，对电池盒底部施加载荷，测试底面的最大变形量。

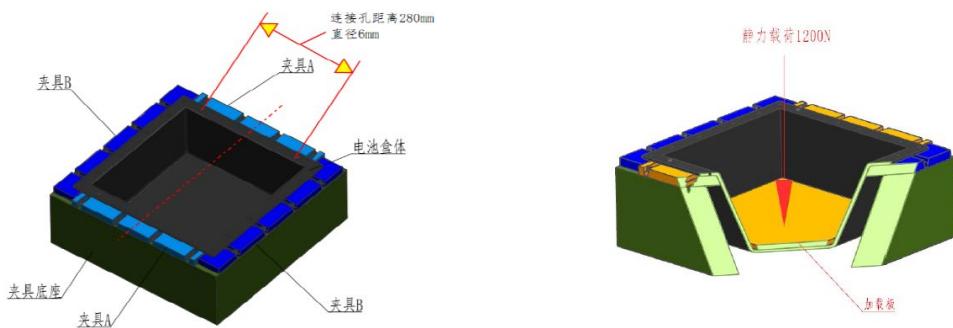


图 7.1.1-1 悬挂式底部静力载荷示意图（橘黄色加载区域为 320*320mm）

(二) 底部承载测试参数

等速位移，速度 5mm/min，加载到 20N 保持 5 秒钟。变形清零，等速位移 2mm/min，加载到 1200N，记录变形量，底部最大变形不得超过 2mm，拆卸螺栓后连接孔处不得有目视可见损伤，否则为不通过。未通过此项测试的作品不再参加盒体侧向挤压测试。

7.1.2 电池盒体侧向挤压测试

(一) 连接方式

参赛队需将电池盒盖板与盒体进行连接安装（为测试方便请将螺栓反向连接，所有孔都必须加螺栓），将整个电池盒体按下列条件进行挤压测试（如图 3 所示）。

(二) 位移变形

位移变形的包络尺寸为 330mm×330mm，保证不接触到电池。侧向承载测试参数：

等速位移,速度 5mm/min,加载至 50N 保持 5 秒钟。变形清零,然后以等速位移 2mm/min,加载至 100kN,同时测量变形,保载 3 秒后卸载,若变形超过 20mm,即判定产品不满足要求。(友情提示:如作品设计的脱模角度较大,则需参赛队自备与角度相仿的垫片或卡具,卡具参考下图、以方便施加载荷为面接触)。

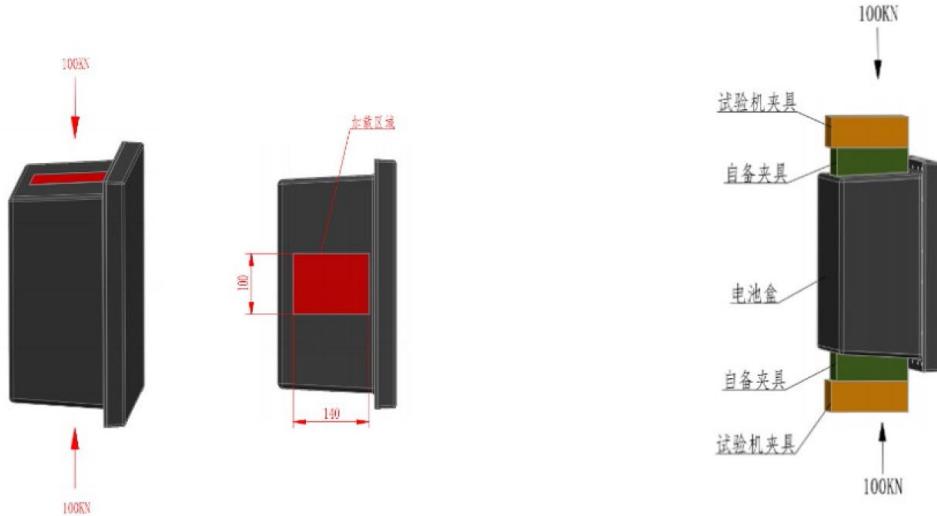


图 7.1.2-1 挤压测试加载示意图 (红色为加载区域为 100*140mm)

7.2 试验结果

7.2.1 底部静力试验结果

于 4 月 29 日对方案 1 的样件进行试验,底部静压 1200N 下,最大位移 0.4mm。第一次试验后在方案 2 的基础上将箱体和箱盖都减少了铺层进行了试验,得到方案 3 样件。

如图 7.2.1-1 所示,方案 3 样件在底部静压工况下最大压缩力为 1,211.00 (N),底部最大变形量为 0.56 (mm)。变形小于设计要求 (2mm),经试验本电池盒满足要求。

电池盒悬挂式底部静力测试 试验记录单

试验信息:

曲线编号	团队编号	作品编号	试验时间	操作员	审核	
井字形加筋电池盒	广东众森实业	D007	2019/5/6 11:49:43	力试	0	
试验程序		1等速位移, 速度5mm/min, 加载到20N。 2保持5S, 变形清零。 3等速位移2mm/min加载到1200N。 4记录变形量。 5保持3秒。 6等速位移, 速度5mm/min, 移动到初始位移零点。 7最大变形不得超过2mm, 拆卸螺栓后连接孔处不得有目视可见损伤, 否则为不通过。				
底部最大变形量: 0.56(mm)		最大压缩力: 1,211.00(N)				
损伤情况:						

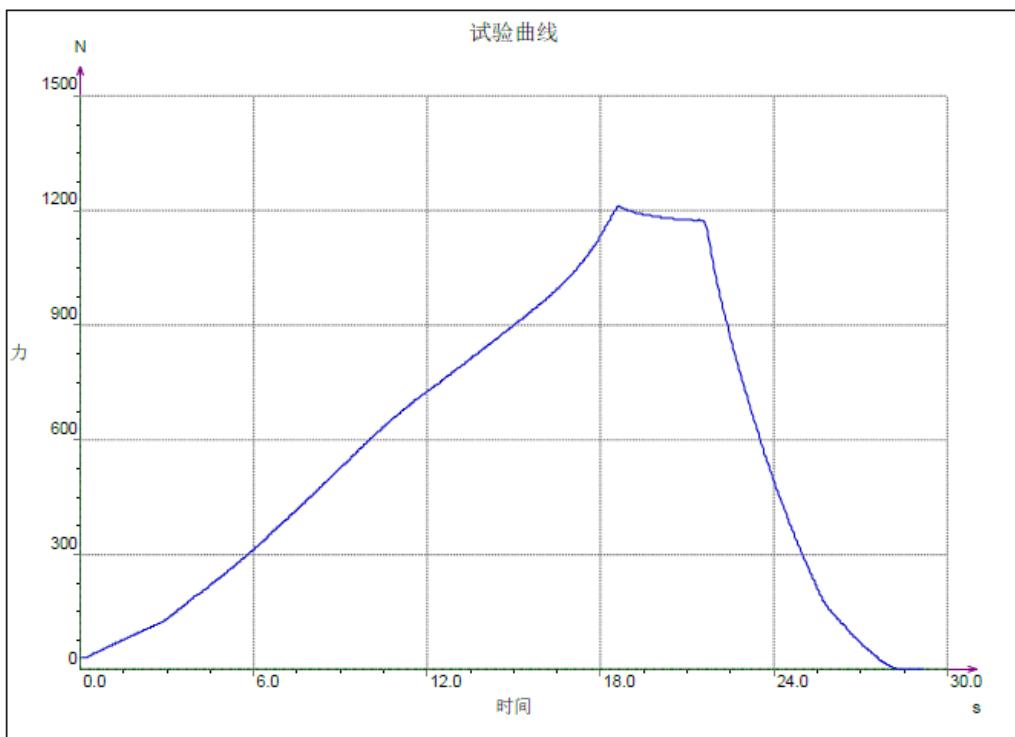


图 7.2.1-1 底部静力测试结果

7.2.2 侧向挤压试验结果

于 4 月 29 日对方案 1 的样件进行试验, 侧面挤压 100kN 下, 最大位移 8.07mm。第一次试验后在方案 1 的基础上将箱体和箱盖都减少了铺层进行了试验, 得到方案 3 样件。

如图 7.2.1-1 所示, 方案 3 在侧向挤压工况下最大压缩力 100,002.00(N), 侧向最大变形 10.33 (mm)。变形小于设计要求 (20mm), 经试验本电池盒满足要求。

电池盒体侧向挤压测试 试验记录单

试验信息:

曲线编号	团队编号	作品编号	试验时间	操作员	审核
开字形加筋电池盒	广东众森	C010	2019/5/6 16:55:02	力试	0

试验程序	1等速位移, 速度5mm/min, 加载到50N。 2保持5S, 变形清零。 3等速位移2mm/min加载到100kN。 4记录变形量。 5保持3秒。 6等速位移, 速度5mm/min, 移动到初始位移零点。 7最大变形不得超过20mm, 否则为不通过。
------	---

侧向最大变形: 10.33(mm)	最大压缩力: 100,002.00(N)
-------------------	----------------------

损伤情况:

试验曲线:

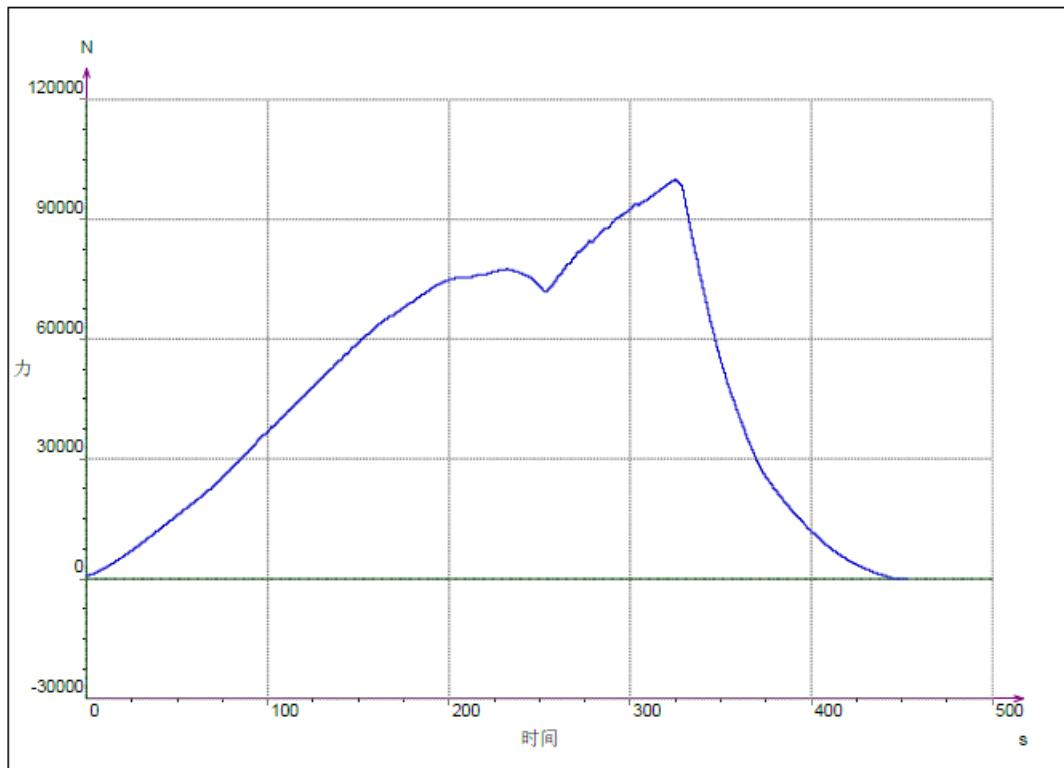


图 7.2.2-1 侧向挤压测试结果

8 成本分析

8.5 单套电池盒箱体综合成本

表 8.5-1 复合材料电池盒综合成本 (不含模具)

方案	类型	综合成本/元
方案一	样品	1462.38
	量产	1195.42
方案二	样品	1265.28
	量产	997.42