

DP590 钢/玻璃纤维复合层板模压工艺优化

张 波¹, 施进科^{1,2}, 沈 智², 金 康¹, 郭平安¹, 王小刚¹

(1. 中机精密成形产业技术研究院(安徽)股份有限公司, 安徽 芜湖 241000;

2. 南昌工程学院 机械工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要: 为扩展纤维金属层板(FMLs)在汽车领域的应用, 对 DP590 钢/玻璃纤维复合层板的模压成形工艺进行了研究。通过正交试验和单因素试验相结合的方法, 对模具温度、模压压力、模压时间和预热时间等关键工艺参数进行了优化。研究结果表明: 模具温度和模压压力是影响复合层板力学性能的两个主要因素, 影响机制源于其对异种材料之间结合性能的影响。确定了最优的工艺参数组合为: 模具温度为 155 °C、模压压力为 3 MPa、模压时间为 550 s 以及预热时间为 20 s。在最优工艺参数下生产的新能源汽车电池包上盖的平均抗拉强度与抗弯强度分别达到 533 与 847 MPa, 均满足使用要求。提出的冲压加模压复合生产工艺能够拓展纤维复合层板在汽车领域的应用场景。

关键词: DP590 钢; 纤维复合层板; 模压成形工艺; 正交试验; 电池包上盖

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.008

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940(2025)02-0053-06

Optimization on molding process for DP590 steel/glass fiber composite laminate

Zhang Bo¹, Shi Jinke^{1,2}, Shen Zhi², Jin Kang¹, Guo Ping'an¹, Wang Xiaogang¹

(1. China Machinery Industry Technology Research Institute of Precision Forming, Wuhu 241000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: To expand the application of fiber metal laminates (FMLs) in the automotive field, the molding process of DP590 steel/glass fiber composite laminates was studied. Then, the key process parameters such as mold temperature, molding pressure, molding time and preheating time were optimized by combining orthogonal experiment and single-factor experiment. The research results indicate that the mold temperature and molding pressure are the two main factors affecting the mechanical properties of the composite laminates, and their influencing mechanism stems from their impact on the bonding performance between dissimilar materials. The optimal combination of process parameters is determined as the mold temperature of 155 °C, the molding pressure of 3 MPa, the molding time of 550 s and the preheating time of 20 s. The new energy vehicle battery pack cover produced under the optimal process parameters has an average tensile strength and bending strength of 533 and 847 MPa, respectively, both of which meet the requirements for use. The proposed stamping and molding composite production process can expand the application scenarios of fiber composite laminates in the automotive field.

Key words: DP590 steel; fiber composite laminates; molding process; orthogonal experiment; battery pack cover

纤维金属层板(Fiber Metal Laminates, FMLs)是一种将金属板材与纤维复合材料交替铺层后, 在一定的温度和压力下固化而成的层间混合材料。作为一种复合材料, 融合了两种材料的优点, 不仅具

有金属材料良好的抗冲击性能, 而且具备纤维增强复合材料的高比强度、优异的抗疲劳和耐蚀性能^[1-2], 自 20 世纪 80 年代诞生以来, 已成为航空航天领域中最有发展潜力的材料之一^[3-4]。早期 FMLs 如 ARALL(芳纶纤维增强铝合金层板)、GLARE(玻璃纤维增强铝合金层板)、CARALL(碳纤维增强铝合金层板)均为铝合金与纤维材料的组合^[5-6]。近年来, 越来越多的金属种类被应用于纤维增强复合层板中, 如不锈钢^[7]和镁铝合金^[8]等。

FMLs 成形方法包括传统的热压罐技术、喷丸成

收稿日期: 2024-05-06; 修订日期: 2024-08-08

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(20242BAB25271);
江西省教育厅科技项目(GJJ201903)

作者简介: 张 波(1975-), 男, 学士, 工程师

E-mail: zhangbo@cimpf.com

通信作者: 沈 智(1980-), 男, 博士, 副教授

E-mail: nickshen009@163.com

形以及近些年出现的充液成形与热冲压等技术^[9-13],但这些方法在成形效率、缺陷控制等方面的不足限制了 FMLs 在汽车行业中的应用。本文提出将钢板冲压与纤维预浸料模压固化结合的 FMLs 成形方法,通过试验获得其最佳成形工艺参数,并应用于某自主品牌新能源汽车电池包上盖的生产中,为 FMLs 模压工艺在汽车领域的应用提供了参考依据。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

1.1.1 钢板

针对汽车工程领域的应用,材料选取通常优先考虑安全性后考虑轻量化,同时要保证高效率生产^[14]。DP 系列高强钢在汽车领域的应用目前占到了 70%。通过对拉伸性能分析对比得出 DP590 钢与玻璃纤维产生失效的时间接近,并且 DP590 钢具有较优的抗冲击性能,能够弥补玻璃纤维材料在弯曲强度上的缺陷。本文采用 DP590 钢为研究对象,其化学成分如表 1 所示。

表 1 DP590 钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of DP590 steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.10	0.5	1.1	0.025	0.025	余量

1.1.2 玻璃纤维预浸料

玻璃纤维预浸料是采用不同含量的环氧树脂和连续玻璃纤维增强材料构成的,其中环氧树脂含量对

其性能具有显著影响^[15],一方面在环氧树脂中加入的硅烷固化剂能有效提升预浸料与金属层板的结合性能,另一方面树脂含量的增加会造成层板厚度增加,其力学性能会受到影响。本文试验研究采用由江苏恒神有限公司定制的 EV101-UL(B)-45%-EWR400-400gsm 玻璃纤维预浸料,详细参数列于表 2,采用玻璃纤维与环氧树脂中加入硅烷固化剂共同制备,纤维的方向为 0°与 90°正交铺设,具有较好的粘结性能。加入阻燃材料以及固化成分后的厚度增加会造成性能略有下降。

表 2 EV101-UL(B)-45%-EWR400-400gsm 玻璃纤维
预浸料的基本性能

Table 2 Basic properties of EV101-UL(B)-45%-
EWR400-400gsm glass fiber prepreps

参数	抗拉/抗弯强度/MPa	剪切强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
数值	462/516	58	1.85

1.2 试验过程

在纤维金属层板成形过程中,金属板材与预浸料由于热膨胀系数与弹性模量的差异,两者之间容易产生分层缺陷,为避免此类缺陷,本文提出将钢板冲压成形后再将两者铺层进行模压固化的生产工艺,如图 1 所示。适宜的压力和温度条件,有利于树脂的浸润并提升金属与预浸料之间的结合性能,为了探究最优固化工序,本文首先以模具温度、模压压力、预热时间以及模压时间为试验参数,并利用正交试验来确定较适宜的参数范围,然后针对影响较大的参数进行密集单因素试验,最终得到最优制备工艺参数与性能影响机理。

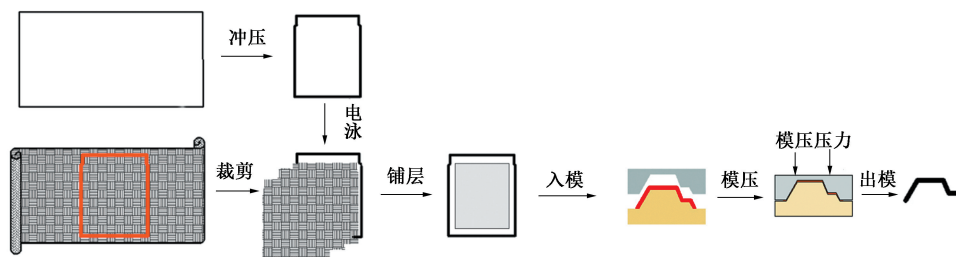


图 1 模压工艺过程

Fig. 1 Molding process

1.3 试验设计

在模压成形工艺中,玻璃纤维预浸料的固化通常经历 3 个主要阶段:(1)树脂熔融阶段,树脂被加热至熔融状态,以便与纤维和钢板表面充分浸润;(2)凝胶阶段,在树脂已浸润纤维和钢板后,树脂

开始逐渐凝胶化的过程;(3)固化阶段,即树脂逐渐形成网络结构并最终硬化,使整个复合材料达到所需的强度和形状稳定性。通常情况下,树脂的粘度在熔融状态下会先变小后变大,这与其分子结构和流动性的变化有关。通过对这 3 个阶段的精细控

制和优化，可以实现玻璃纤维预浸料的高效固化，从而获得优质的复合材料制品。因此，在模压工艺试验研究中，选取模具温度 A 、预热时间 B 、模压时间 C 和模压压力 D 这 4 个关键参数作为研究对象，表 3 为正交试验因素设计表。其中，模具温度根据升温曲线选取为 140~170 ℃，预热时间根据预浸料提供的结晶时间（约为 40 s）选取为 0~90 s，模压时间按预浸料固化时间（600 s）进行扩大选取为 300~900 s，模压压力采用硫化机设备选取为 3~6 MPa。

表 3 正交试验设计
Table 3 Design of orthogonal experiment

水平	因素			
	模具温度	预热时间	模压时间	模压压力
	$A/^{\circ}\text{C}$	B/s	C/s	D/MPa
1	140	0	300	31
2	150	30	500	42
3	160	60	700	53
4	170	90	900	64

1.4 测试方法

试样的力学性能通过拉伸与三点弯曲试验进行检测，根据 GB/T 1447—2005^[16] 的要求，利用激光切割机从模压成形后层板中切割拉伸和弯曲测试试样，使用 CMT-5105GL 型电子万能试验机进行试验，测试在 20 ℃ 室温和 42% 相对湿度环境下以加载速度为 10 mm·min⁻¹ 进行。

2 试验结果及分析

2.1 正交试验结果

正交试验方案及结果如表 4 所示。通过计算各因素在不同水平下的平均采收率（即平均性能指标），并对比这些平均值之间的差异，可以评估各工艺参数对预浸料模压件性能的影响程度。极差 R 是指在同一因素的不同水平下，最大平均值与最小平均值之间的差异，可用于衡量该因素对性能的影响大小。极差越大，表示该因素对性能的影响越显著；反之，则表示其影响较小。

对某一因素，有 m 个水平，每个水平有 k 个试验结果时，通过式（1）和式（2）计算每个水平下试验结果的平均值与不同水平下平均值的极差数据。

各水平的平均值为：

表 4 正交试验方案和结果

Table 4 Schemes and results of orthogonal experiment

编号	$A/^\circ\text{C}$	B/s	C/s	D/MPa	抗拉强度/ MPa	抗弯强度/ MPa
1	140	0	300	1	439	621
2	140	30	500	2	482	761
3	140	60	700	3	462	701
4	140	90	900	4	485	710
5	150	0	500	3	516	792
6	150	30	300	4	520	801
7	150	60	900	1	469	720
8	150	90	700	2	501	736
9	160	0	700	4	503	782
10	160	30	900	3	509	799
11	160	60	300	2	502	780
12	160	90	500	1	506	751
13	170	0	900	2	488	768
14	170	30	700	1	501	704
15	170	60	500	4	505	765
16	170	90	300	3	458	754

$$\overline{X_i} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k X_{ij} \tag{1}$$

式中： $\overline{X_i}$ 为该影响因素在第 i 个水平时的全部试验结果的平均值， $i=1, 2, \dots, m$ ； X_{ij} 为该影响因素在第 i 个水平时的第 j 个试验结果。

各水平的极差值为：

$$R_i = \max(\overline{X_i}) - \min(\overline{X_i}) \tag{2}$$

式中： R_i 为该影响因素在第 i 个水平时的极差值； $\max(\overline{X_i})$ 和 $\min(\overline{X_i})$ 分别为该影响因素在第 i 个水平时的最大平均值与最小平均值。

通过计算可以得到表 5 所示的数据。其中， L 为抗拉强度， W 为抗弯强度， R_L 为抗拉强度极差值， R_W 为抗弯强度极差值。

分析极差数据可以发现，对 DP590 钢/玻璃纤维复合层板拉伸性能影响大小的排序为：模具温度>模压时间>模压压力>预热时间；对弯曲性能影响大小的排序为：模具温度>模压压力>模压时间>预热时间。在表 5 中弯曲性能最好的依次为： A （水平 3，即 160 ℃）、 B （水平 2，即 30 s）、 C （水

表 5 正交影响分析 (MPa)
Table 5 Orthogonal influence analysis (MPa)

水平	影响因素							
	A		B		C		D	
	L	W	L	W	L	W	L	W
1	467	698	487	741	480	739	479	699
2	502	762	503	764	502	767	493	761
3	505	778	485	742	488	749	498	764
4	488	748	488	738	492	730	492	762
R_L	38	—	18	—	22	—	19	—
R_W	—	80	—	26	—	37	—	65

平 2, 即 500 s)、D (水平 3, 即 3 MPa), 最佳水平对应的范围分别为: A 为 150~170 ℃、B 为 0~50 s、C 为 300~700 s、D 为 2~4 MPa。由于模压压力对弯曲性能的影响远大于模压时间, 并考虑模压压力与模压时间对抗拉强度的影响程度相似, 最终确定各因素排序及其水平区间, 设计如表 6 所示的单因素试验: 模具温度为 150~165 ℃、模压压力为 2.5~4.0 MPa、模压时间为 450~600 s、预热时间为 10~40 s。同时, 确定进行温度单因素试验时, 其他参数选取正交试验中弯曲强度最高时的工艺参数, 即预热时间为 30 s、模压时间为 500 s、模压压力为 3 MPa。

表 6 单因素试验设计
Table 6 Design of single-factor experiment

水平	因素			
	A/℃	D/MPa	C/s	B/s
1	150	2.5	450	10
2	155	3.0	500	20
3	160	3.5	550	30
4	165	4.0	600	40

2.2 单因素工艺参数优化

正交试验后进行单因素试验的目的在于深入了解各参数对结果的影响程度和变化趋势。正交试验筛选出主要影响因素及其水平范围; 单因素试验根据影响值大小, 逐一选取工艺参数通过更密集的试验进一步优化, 每个单因素找到最佳参数取值, 并作为后续其他因素优化时的固定参数。根据前述正交试验结果, 本文按照 $A>D>C>B$ 的顺序优先考虑模具温度的影响程度, 然后再考虑模压压力、模压时间、预热时间参数的影响。

2.2.1 模具温度

第 1 组试验选定的预热时间为 30 s、模压时间为 500 s、模压压力为 3 MPa, 根据优化的模具温度范围 (150~165 ℃) 制备不同的复合层板, 并进行拉伸与弯曲测试, 获得如图 2 所示的力学性能曲线。由图 2 可见, 在不同的模具温度下, 抗拉强度与抗弯强度均呈现先增大后减小趋势, 并且抗弯强度和抗拉强度均在模具温度为 155 ℃时取得最大值, 分别为 508 和 802 MPa。这两项性能指标呈先上升后下降趋势是由于温度升高后树脂的粘度随着温度升高而下降, 而纤维的浸润性则随着树脂粘度的降低而改善, 进而提升结合性能与力学性能。但是, 过高的温度会缩短树脂的固化时间, 使表面玻璃纤维层的固化速度加快, 将导致树脂不能完全将玻璃纤维渗透, 同时也减短了树脂对钢板的浸润时间, 从而造成结合性能与力学性能的下降。因此, 选定 155 ℃为最佳的模具温度。

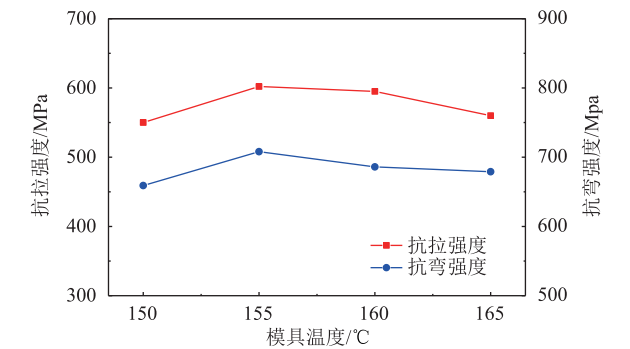


图 2 模具温度对力学性能的影响
Fig. 2 Influence of mold temperature on mechanical properties

2.2.2 模压压力

第 2 组试验采用前文确定的模具温度为 155 ℃以及预热时间为 30 s、模压时间为 500 s, 根据优化的模压压力范围 (2.5~4.0 MPa) 制备不同的复合层板, 并进行拉伸与弯曲测试, 得到如图 3 所示的力学性能曲线。由图 3 可见, 随着模压压力的增加, 抗拉强度和抗弯强度先逐渐上升, 当模压压力为 3 MPa 时达到最大值, 此时抗拉强度为 511 MPa、抗弯强度为 836 MPa。随着模压压力继续增加时, 抗拉强度和抗弯强度呈现不同程度的下降。这是由于适当的模压压力有助于增强树脂基质与纤维增强材料的界面结合强度, 同时减少纤维间的空隙率, 优化浸润效果。但过高的模压压力会导致树脂溢出, 造成复合板表面泛白和内应力残留增加等问题, 影响产品的力学性能。因此, 确定最佳的模压压力为 3 MPa。

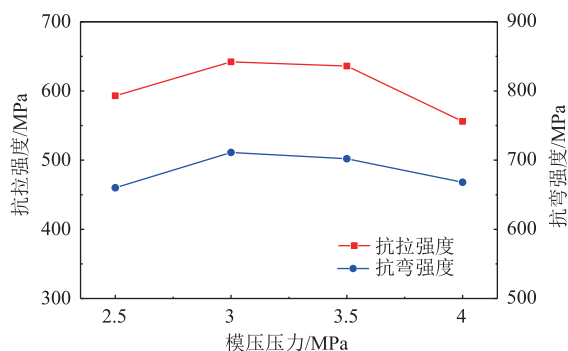


图3 模压压力对力学性能的影响

Fig. 3 Influence of molding pressure on mechanical properties

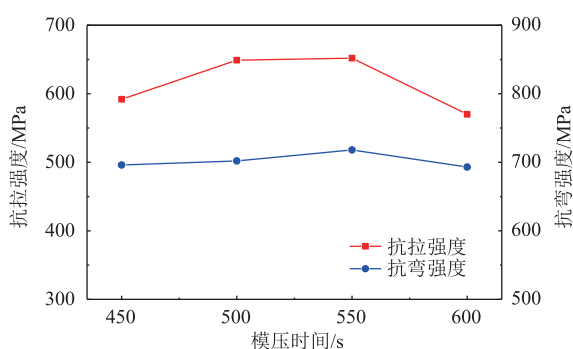


图4 模压时间对力学性能的影响

Fig. 4 Influence of molding time on mechanical properties

2.2.3 模压时间

第3组试验采用前文确定的模具温度为155℃、模压压力为3 MPa以及预热时间为30 s,根据优化的模压时间范围(450~600 s)制备不同的复合层板,并进行拉伸与弯曲测试,得到如图4所示的力学性能曲线。通过模具温度和模压压力的确定,可以看出,抗拉强度已经趋于稳定,但抗弯强度随着模压时间的增加呈先上升后下降的趋势;模压时间为550 s时,抗拉强度和抗弯强度分别达到519和856 MPa,表现出最佳的综合性能。模压时间对力学性能的影响主要由于其对树脂固化和钢板变形的影响。模压时间过短会导致树脂固化不充分,表面出现凹凸不平,易变形,并且结合处易发生失效。适当延长模压时间可有效控制玻璃纤维层收缩,提高钢板与玻璃纤维复合层的界面结合质量。但模压时间过长则会阻碍钢板的内部应力释放,不利于改善钢板的变形问题。因此,确定最佳的模压时间为550 s。

2.2.4 预热时间

第4组试验采用前文确定的模具温度为155℃、模压压力为3 MPa和模压时间为550 s,根据优化的

预热时间范围(10~40 s)制备不同的复合层板,并进行拉伸与弯曲测试,得到如图5所示的力学性能曲线。由图5可见,在该条件下力学性能随预热时间增加变化较小。但同时可发现,当预热时间为20 s时,抗拉强度和抗弯强度分别达到534和861 MPa,表现出最佳的力学性能。因此,确定最佳预热时间为20 s。预热时间影响层板性能的主要原因为树脂粘度,相比较模压时间,树脂只要在预热时间内升温,便能更好地流动,为后续模压做好准备。

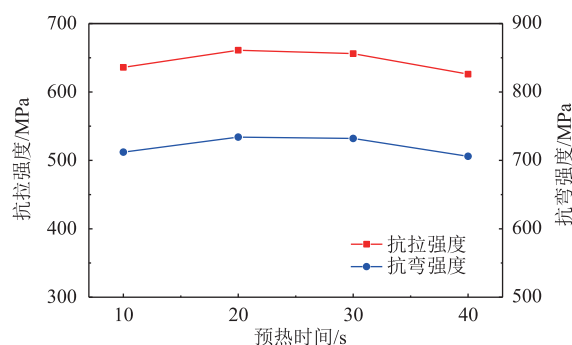


图5 预热时间对力学性能的影响

Fig. 5 Influence of preheating time on mechanical properties

3 生产工艺验证

根据前文研究结果制定某新能源汽车电池包上盖生产工艺,选取厚度为0.8 mm的DP590钢板与厚度为0.8 mm的玻璃纤维层。首先对钢板进行20 min电泳处理,再将玻璃纤维预浸料通过铺层软件得到的二维平面裁剪图导入裁布机,将得到的料片与经过电泳处理并冲压成形后的钢板进行铺层。然后采用最优工艺参数(模具温度为155℃、模压压力为3 MPa、预热时间为20 s、模压时间为550 s)进行生产。

从制造的一批产品中随机抽取4件产品,在其上面各取5根拉伸样条和5根弯曲样条进行测试,取平均值得到表7。可以看出,产品力学性能不仅能满足电池包上盖要求的抗拉强度大于500 MPa、抗弯强度大于700 MPa的性能要求,并且稳定性良好。这进一步表明优化的工艺方案实用可行。

4 结论

(1) 在DP590钢/玻璃纤维复合层板模压成形工艺中,模具温度、模压压力是最主要的影响因素,

表 7 产品力学性能

Table 7 Mechanical properties of product

产品编号	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa
1	529	845
2	534	840
3	531	855
4	538	849
平均值	533	847

其影响机制源于其对异种材料之间结合性能的影响,适当提高温度能改善树脂浸润性,压力则可以消除空隙提升结合面积。

(2) 通过正交试验加单因素试验对 DP590 钢/玻璃纤维复合层板的制备工艺参数进行优化,获得最佳工艺参数为:模具温度为 155 ℃、模压压力为 3 MPa、模压时间为 550 s 以及预热时间为 20 s;将该方案应用于某新能源汽车电池包上盖生产,力学性能测试结果表明,其平均抗拉强度和抗弯强度分别达到 533 和 847 MPa,满足电池包上盖的使用性能要求。

(3) 提出将钢板冲压成形后再将钢板与玻璃纤维预浸料铺层进行模压固化的生产工艺,能够实现纤维金属层板的高质量高效生产。

参考文献:

- [1] Vieira L M G, Dobah Y, Santos J C D, et al. Impact properties of novel natural fibre metal laminated composite materials [J]. Applied Sciences, 2022, 12 (4): 1869.
- [2] Hussain M, Imad A, Nawab Y, et al. Effect of matrix and hybrid reinforcement on fiber metal laminates under low-velocity impact loading [J]. Composite Structures, 2022, 288: 115371.
- [3] Maryan M S, Ebrahimnezhad-Khaljiri H, Farsani R E. The experimental assessment of the various surface modifications on the tensile and fatigue behaviors of laminated aluminum/aramid fibers-epoxy composites [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 154: 106560.
- [4] 陶杰, 李华冠, 潘蕾, 等. 纤维金属层板的研究与发展趋势 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47 (5): 626-636.
Tao J, Li H G, Pan L, et al. Review on research and development of fiber metal laminates [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47 (5): 626-636.
- [5] Zarezadeh M A, Liaghat G, Ahmadi H, et al. Numerical and experimental investigation of fiber metal laminates with elastomeric layers under low-velocity impact [J]. Polymer Composites, 2022, 43 (4): 1936-1947.
- [6] Shi Y, Pinna C, Soutis C. Impact damage characteristics of carbon fiber metal laminates: Experiments and simulation [J]. Applied Composite Materials, 2020, 27 (5): 511-531.
- [7] Ogi K, Tsutsumi M, Nasrullah B, et al. Quasi-isotropic fiber metal laminate with high specific modulus and near-zero coefficient of thermal expansion [J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2021, 4 (1): 27-36.
- [8] 赵宗, 郑兴伟, 钱仁飞, 等. 纤维稀土镁合金超混杂层板弯曲性能及其失效机理 [J]. 航空材料学报, 2021, 41 (4): 157-166.
Zhao Z, Zheng X W, Qian R F, et al. Bending properties and failure mechanism of fiber rare earth magnesium alloy super hybrid laminates [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41 (4): 157-166.
- [9] Li H G, Hao W, Alderliesten R, et al. The residual stress characteristics and mechanical behavior of shot peened fiber metal laminates based on the aluminium-lithium alloy [J]. Composite Structures, 2020, 254: 112858.
- [10] 刘世琛, 郎利辉, 关世伟, 等. 纤维增强金属层板零件充液成形过程及工艺分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (2): 272-278.
Liu S S, Lang L H, Guan S W, et al. Investigation on hydroforming technology and process of fiber reinforced metal laminate parts [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (2): 272-278.
- [11] Mirza H A, Lang L H, Tabasum M N, et al. An investigation into the forming of fiber metal laminates with different thickness metal skins using hydromechanical deep drawing [J]. Applied Composite Materials, 2022, 29 (3): 1349-1365.
- [12] Blala H, Lang L H, Sherkatghanad E, et al. An investigation into process parameters effect on the formability of GLARE materials using stamp forming [J]. Applied Composite Materials, 2019, 26 (5): 1423-1436.
- [13] Guo Y Q, Chen Z F, Li F Z, et al. Study on formability and failure modes of steel/CFRP based FMLs consisting of carbon fiber reinforced polymer prepreg and steel sheet [J]. Composite Structures, 2022, 281 (5): 114980.
- [14] Wang H, Wang Z H, Fan Y W, et al. Multi-objective lightweight design of automotive battery pack box for crashworthiness [J]. International Journal of Crashworthiness, 2023, 29 (2): 292-307.
- [15] 孙奋丽. 汽车电池包上盖模压工艺优化研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2021.
Sun F L. Optimization of the Molding Process for the Upper Cover of Automotive Battery Pack [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2021.
- [16] GB/T 1447—2005, 纤维增强塑料 拉伸性能试验方法 [S].
GB/T 1447—2005, Fiber-reinforced plastics composites—Determination of tensile properties [S].