

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.05.009

连续 GF 增强 PP 层合板铺放成型工艺参数研究^{*}

陈杰¹,张婷²,周天睿¹,郭兵兵¹,方立¹,周晓东¹

(1. 华东理工大学化学工程联合国家重点实验室,上海 200237; 2. 上海飞机制造有限公司航空制造研究所,上海 200436)

摘要:以自制的连续玻璃纤维增强聚丙烯预浸带为原料,通过铺放成型工艺制备层合板材。采用正交试验,研究了铺放成型过程中 4 个主要工艺参数——压力辊压力、热风枪工作温度、压力辊内导热油温度、铺放平台底板温度对层合板材的层间剪切强度(ILSS)和空隙率的影响。结果表明,压力辊压力对层合板 ILSS 影响最大,对空隙率的影响次于热风枪工作温度;热风枪工作温度对空隙率影响最大,对 ILSS 的影响次于压力辊压力;其它两个工艺参数对 ILSS 和空隙率的影响均较小。在可操作的范围内,适当提高压力辊压力、热风枪工作温度和压力辊内导热油温度以及选择适中的铺放平台底板温度有利于降低板材的空隙率,提高板材的 ILSS。在压力辊压力 0.15 MPa、热风枪工作温度 229℃、压力辊内导热油温度 100℃、铺放平台底板温度 95℃的最优工艺条件下,板材的 ILSS 达到 21.54 MPa,空隙率为 1.23%。

关键词:铺放成型;连续玻璃纤维增强聚丙烯;层间剪切强度;空隙率

中图分类号:TQ320.66 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2015)05-0043-06

Study on Processing Parameters of Tape Placement for Continuous GF Reinforced PP Laminates

Chen Jie¹, Zhang Ting², Zhou Tianrui¹, Guo Bingbing¹, Fang Li¹, Zhou Xiaodong¹

(1. State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Shanghai Aircraft Manufactory Factory Aerospace Manufacturing Technology Research Institute, Shanghai 200436, China)

Abstract : The prepreg made of polypropylene as matrix and continuous glass fiber as reinforcement by self was used to produce laminates through tape placement process. Orthogonal experiments were carried out to evaluate effects of four main processing parameters including roller pressure, working temperature of hot air gun, temperatures of heat conducting oil inside the roller and laying platform baseboard on interlaminar shear strength (ILSS) and void ratio of the laminates. The results show that the roller pressure has greatest impact on ILSS followed by the working temperature of hot air gun, on the contrary, the working temperature of hot air gun has greatest impact on void ratio than the roller pressure. The temperatures of heat conducting oil inside the roller and laying platform baseboard have less impact on ILSS and void ratio of the laminates. Besides, higher ILSS and less void content can be achieved by improving the roller pressure, working temperature of hot air gun and temperature of conducting oil inside the roller properly and adopting moderate temperature of laying platform baseboard in the suitable range for operation. Based on the optimal process parameters of that the roller pressure is 0.15 MPa, the working temperature of hot air gun is 229℃, the temperature of heat conducting oil inside the roller and laying platform baseboard is 100℃ and 95℃ severally, ILSS and void ratio of the laminate is 21.54 MPa and 1.23% respectively.

Keywords : tape placement ; continuous glass fibre reinforced polypropylene ; interlaminar shear strength ; void ratio

热塑性树脂基复合材料与热固性树脂基复合材料相比,具有较高的比强度和比刚度、优异的抗冲击性和耐腐蚀性、成型周期短以及可回收利用等优点,目前已经在汽车工业、航空航天、建筑以及电器等领域得到广泛应用,大大降低了结构质量,节约了设计成本^[1-3]。聚丙烯(PP)具有密度小、耐腐蚀性强、热变形温度高、价格便宜等优点,是目前用量较大的热塑性树脂基体之一。玻璃纤维(GF)具有原料易得、拉伸强度高、弹性模量高、绝缘性能好、耐热

性强、抗腐蚀性好等优点,是常用的增强材料。连续 GF 增强 PP 复合材料被广泛用来制造汽车零部件如保险杠横梁、发动机隔音罩、座椅骨架、座垫板、门

^{*}上海市技术委员会资助项目(13QB1401200),中央高校基本科研业务费专项资金项目

联系人:周晓东,教授,主要从事聚合物基复合材料制备及成型技术,聚合物材料的界面和嵌段共聚物的组装行为及相关功能材料的研究

收稿日期:2015-03-10

内板、车顶棚等^[4-5]。

目前连续 GF 增强热塑性树脂基复合材料的成型工艺主要有模压成型、拉挤成型、缠绕成型和铺放成型等,其中铺放成型发展较快,已成为航空航天领域结构件的关键制造技术之一^[6-8]。笔者利用自制的具有铺放功能的简易设备,制备了连续 GF 增强 PP 层合板,采用正交试验^[9]研究了铺放成型过程中的工艺参数——铺放平台底板温度,压力辊内导热油温度以及压力辊压力和热风枪工作温度对层合板层间剪切强度(ILSS)以及空隙率的影响,并对成型工艺进行了优化。

1 实验部分

1.1 原材料

连续 GF 增强 PP 预浸带:GF 质量分数为 65%,自制。

1.2 铺放成型工艺

采用自制的铺放成型设备,相应的成型工艺示意图如图 1 所示。图 1 中起扎点为铺放成型过程中压力辊与基层开始接触的部位;夹点区为热风枪吹扫前沿与压力辊和基层接触的横截面到起扎点的区域,如图中虚三角形所示;基层是指已铺好且固结的预浸带。

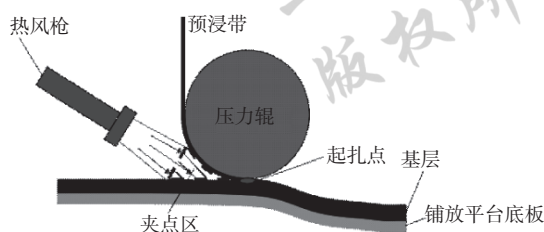


图 1 层合板铺放成型工艺示意图

将连续 GF 增强 PP 预浸带通过组合分散辊后,用热风枪将夹点区内预浸带朝向平台底板的一面加热熔融,通过程序控制铺放小车按照设定的铺层和铺放路径进行铺放,控制小车速度以使其与加热效率及操作停顿时间相匹配,同时由压力辊(内通导热油)施加一定的压力,铺在铺放平台底板上(底板内有电热丝),制得层合板材。

实验中统一铺放层数为 6 层,铺放方式为单向铺层。将实验制备的层合板沿纤维方向取样,按照各个标准制备相应的测试试样,每个测试项目的试样数不少于 5 个。

1.3 性能测试

层合板 ILSS 按 ASTM D2344-2000 测试;

层合板 GF 含量按 GB/T 2577-2005 测试;

层合板内空隙率按 ASTM D792-2000 测试。

2 结果与讨论

2.1 正交实验各因素水平的选定

实验中层合板是通过两步法铺放成型,以裁剪好的、宽度一致的预浸带为原料,第 1 步将已经固结成型的预浸带在外部热源如红外、激光、热风枪等的作用下短时间内重新熔融,笔者采用的是具有不同档位的大功率的热风枪,其吹扫面积大,效率高,能够和铺放小车速度相匹配,可以快速地制作层合板。第二步为层合板的原位固结,是整个铺放成型过程的关键所在,也是影响层合板 ILSS 等力学性能的关键因素。固结过程可以细分为熔融后预浸带的接触,树脂流动促进层与层间的紧密接触以及压力作用下界面分子链的扩散粘结 3 个过程,整个过程是在高温高压下完成,此时树脂黏度较低,具有比较好的流动性,需要控制合理的工艺条件,在保证层合板表观质量的同时,得到较高的 ILSS 和较低的空隙率。

采用正交实验,选取铺放平台底板温度,压力辊内导热油温度,压力辊压力以及热风枪档位 4 个主要的工艺参数,以板材的 ILSS 和空隙率为评价指标来考察这 4 个参数的影响程度。为了使各参数的水平选择更加合理,开展正交实验前,首先对热风枪各档位所能达到的最大温度和压力辊压力表各指示值进行了考察,同时通过一定的实验验证各水平的可操作性。

(1) 热风枪档位的选定。

为了选择合适的热风枪温度水平,对不同档位热风枪加热时出风口对应的温度进行了测定,得到的温度随时间的变化曲线如图 2 所示。在图 2 中以 PP 的熔点(170℃)虚线作为分界,可以看出为了保证 PP 熔融,6 档、7 档、8 档、9 档为 4 个可选择的热风枪档位。

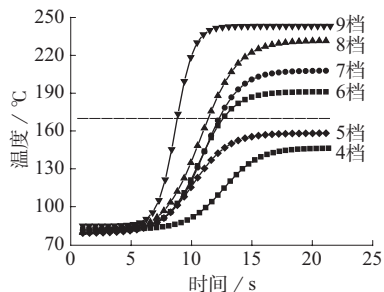


图 2 不同档位热风枪出风口温度随时间的变化曲线

考虑到温度过高或加热时间过长会导致夹点区内预铺放的预浸带和已铺好基层树脂降解,影响最终制品性能,以铺放小车的速度与热风枪加热效

率相匹配为基准,考察了不同档位热风枪加热时,夹点区预浸带 PP 树脂基体达到熔点 (170°C) 所需时间、加热到 8 s 时夹点区所能达到的温度以及所能达到的最高温度,结果如表 1 所示。

表 1 不同档位热风枪加热熔融 PP 树脂时的相关参数

热风枪档位	到 170°C 所需时间 / s	8 s 时的温度 / $^{\circ}\text{C}$	最高温度 / $^{\circ}\text{C}$
6	9.3	158.2	190.9
7	7.8	208.1	208.1
8	5.4	229.4	229.4
9	3.2	242.0	242.2

实验中铺放小车的速度为 350 mm/min ,此时随着小车的移动,预浸带夹点区每个点受热时间为 10 s,而从表 1 可以看出,这 4 个档位均能满足要求,从经济的角度出发,选择了 6 档、7 档、8 档作为考察的 3 个水平,将这 3 档使夹点区所能达到的最高温度称为热风枪工作温度。

(2) 压力辊压力的选定。

由于在设备的设计制造中对压力辊内部进行了改造,通入了导热油,因而压力辊的自重发生了变化,同时考虑到整个系统上下运动时的摩擦阻力,对原有的压力数显表进行了矫正,考察了压力表指示压力值与压力辊直接对铺放平台底板所施加的压力值(称为实测压力值,因压力辊与底板几乎是线接触,所以保留用 kg 来表示实测压力值的单位)的对应关系,结果如图 3 所示,为了方便说明,实验中压力辊压力仍沿用压力表指示值。

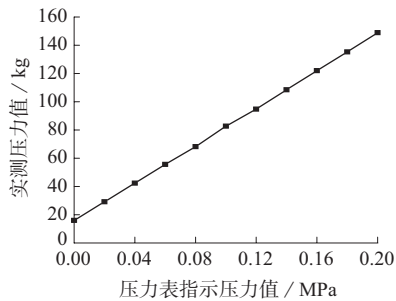


图 3 压力表指示值与实测压力值对应关系图

考虑到实际实验的可操作性,对不同压力辊压力条件下的实验情况进行探索。实验发现当压力辊压力小于 0.05 MPa 时,摩擦力较小,产生的转矩较小,会出现压力辊打滑不转动的情况,不能有效地给预浸带施加压力;当压力辊压力大于 0.15 MPa 时,由于熔融状态下树脂的黏度较低,压力太大会使得熔融树脂过多堆积在夹点区域,然后在压力辊的带动下预浸带会相对铺放台底板向前滑动,铺放位置发生改变。因此,实验中选择的适宜的压力辊压力 3 个水平为 $0.05, 0.10, 0.15\text{ MPa}$ 。

(3) 铺放平台底板温度的选定。

热风枪给热并快速达到较高温度,使预浸带的树脂基体熔融,而要保证熔融树脂快速原位固结成型,需要一定的温度差使预浸带降温,因此铺放平台底板的温度应该在 PP 软化点以下而且尽量低。同时为了能使预浸带之间以及预浸带与铺放平台底板表面有效贴合,预浸带与底板表面需要有一定的粘附力,由于 PP 与不锈钢之间的粘性很低,所以又需要对不锈钢底板加热来提高预浸带对底板的粘性。为此,在压力辊内导热油不加热、压力辊压力为 0.05 MPa ,热风枪加热档位为 6 档的条件下,进行了不同铺放平台底板温度下的预浸带对底板的粘接实验,结果如表 2 所示。

表 2 不同铺放平台底板温度下预浸带对底板的粘接实验结果

铺放平台底板温度 / $^{\circ}\text{C}$	粘性评定
25	与底板不粘接
50	与底板不粘接
75	粘接改善,短时间内脱粘
80	粘接时间变长,仍会脱粘
85	粘接良好,不脱粘
95	粘接良好,不脱粘
105	粘接良好,不脱粘
115	粘接良好,少量树脂粘附压力辊
125	粘接良好,大量树脂粘附压力辊

根据表 2 的实验结果,兼顾到预浸带与底板的粘接情况和预浸带熔融树脂不被压力辊带起,最终选择的铺放平台底板温度的 3 个水平为 $85, 95, 105^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 压力辊内导热油温度的选定。

在压力辊内通导热油的目的是辅助加热,提高热风枪的加热效率,减少因与温度较低的压力辊换热而带来的热损失,故压力辊内导热油需要具备较高的温度。但是,考虑到铺放平台底板温度选择实验中出现了预浸带粘附压力辊的情况,因此压力辊内导热油的温度不能太高。以最终成型板材的性能为出发点,由于压力辊和底板的温度不一致会使挤压区域内的复合材料产生热应力,因此压力辊与底板的温度应相近。最后实验选择的压力辊内导热油温度 3 个水平为 $60, 80, 100^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 正交实验设计及结果

根据上述各个参数的水平选定实验结果,选定正交实验的 4 个因素,即铺放平台底板温度(A)、压力辊内导热油温度(B)、压力辊压力(C)和热风枪工作温度(D),相应的因素水平表如表 3 所示,采用 $L_9(3^4)$ 的正交表进行正交实验,正交实验设计及结果如表 4 所示。

表3 因素水平表

水 平	因 素			
	A / °C	B / °C	C / MPa	D / °C
1	85	60	0.05	190
2	95	80	0.10	208
3	105	100	0.15	229

表4 正交实验设计及结果

实验 编号	因 素				ILSS / MPa	GF 质量分 数 / %	空隙率 / %
	A	B	C	D			
1 [#]	1	1	1	1	12.49	62.12	3.97
2 [#]	1	2	2	2	17.46	64.79	2.36
3 [#]	1	3	3	3	19.87	66.86	1.51
4 [#]	2	1	2	3	19.90	68.66	1.46
5 [#]	2	2	3	1	18.74	66.44	1.89
6 [#]	2	3	1	2	16.15	64.66	2.24
7 [#]	3	1	3	2	17.28	68.01	2.75
8 [#]	3	2	1	3	16.29	66.36	2.08
9 [#]	3	3	2	1	18.42	64.14	2.01

采用极差分析算法对实验结果进行分析,并用综合平衡法得到最优的实验方案,结果如表5、表6所示。

表5 以 ILSS 为指标的极差分析计算结果

项 目	因 素			
	A	B	C	D
k_1	16.61	16.56	14.98	16.55
k_2	18.26	17.50	18.59	16.96
k_3	17.33	18.15	18.63	18.69
R	0.72	1.59	3.65	2.14
因素影响主次	CDBA			
优化方案	$C_3D_3B_3A_2$			

注:表中 $k_i(i=1,2,3)$ 表示各因素的第 i 个水平的均值;R表示极差,下同。

表6 以空隙率为指标的极差分析计算结果

项 目	因 素			
	A	B	C	D
k_1	2.613	2.727	2.763	2.623
k_2	1.863	2.110	1.943	2.450
k_3	2.280	1.920	2.050	1.683
R	0.750	0.807	0.820	0.940
因素影响主次	DCBA			
优化方案	$D_3C_2B_3A_2$			

从表5和表6可以看出压力辊压力对层合板 ILSS 影响最大,对空隙率的影响次于热风枪工作温度;热风枪工作温度对空隙率影响最大,对 ILSS 的影响次于压力辊压力;其它两个工艺参数对 ILSS 和空隙率的影响均较小。

由表5和表6得出的优化方案并不相同,主要差别在于因素C,因此兼顾 ILSS 和空隙率,通过综合平衡法来选择最优方案:对于 ILSS 优选 C_3 ,对于空隙率优选 C_2 ,ILSS 较空隙率更重要,另外,因素C对 ILSS 的影响程度最大,故选取 C_3 。由此得到最优方案为 $C_3D_3B_3A_2$,该方案不在表4的9组实验方案中,故在该最优方案下,进行了实验验证,结果

表明 ILSS 为 21.54 MPa,空隙率为 1.23%,比表中最优组合 $C_2D_3B_1A_2$ (ILSS 为 19.90 MPa,空隙率为 1.46%)好,故可确定 $C_3D_3B_3A_2$ 为铺放成型的最优方案,即连续 GF 增强 PP 层合板材的最优铺放成型工艺参数为压力辊压力 0.15 MPa,热风枪工作温度 229°C,压力辊内导热油温度 100°C,铺放平台底板温度 95°C。

将表4中 ILSS 与空隙率作图,拟合得到 ILSS 与空隙率的变化关系曲线,如图4所示。从图4可以看出,在空隙率较低时,尤其是其小于 2.5% 时,空隙率的变化与 ILSS 的变化基本一致,ILSS 随着空隙率的增大而减小。表4中列出了各工艺条件下层合板的 GF 含量,其变化趋势与空隙率的变化趋势有差异,主要是铺放过程中少量树脂被挤压到板材边缘的缘故。

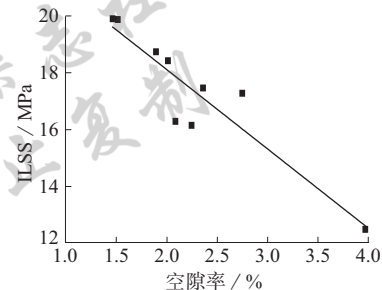


图4 层合板 ILSS 与空隙率的变化关系图

在铺放成型过程中,空隙主要存在于纤维束之间以及层间的界面处,一般空隙率越大,也伴随着空隙尺寸的增大,并明显降低层合板中层间界面的面积。当层合板受到外力挤压或冲击时,空隙处成为应力集中点,承载能力相对比较薄弱,其会逐渐开裂,空隙增大,从而使层合板沿层间遭到破坏,ILSS 降低。

2.3 各个工艺参数对层合板 ILSS 和空隙率的影响

根据表5和表6的不同因素不同水平均值分析结果,研究了压力辊压力、热风枪工作温度、压力辊内导热油温度和铺放平台底板温度对层合板 ILSS 和空隙率的影响趋势。

(1) 压力辊压力对 ILSS 和空隙率的影响。

图5和图6分别为压力辊压力对层合板 ILSS 和空隙率的影响。图5表明,实验中随着压力辊压力的增大,ILSS 也相应增加,但压力辊压力从 0.1 MPa 升到 0.15 MPa 时 ILSS 的增幅较小;图6表明,随着压力辊压力的增加,空隙率先降低,当压力辊压力从 0.1 MPa 升到 0.15 MPa 时又略有增加,但幅度很小。在压力辊上施加压力是使得熔融预浸

带与铺放平台底板以及与上一层已经固结的预浸带实现紧密接触的必备条件,随着压力的增加,空隙不断被挤压压缩。在预浸带间的接触逐渐趋向于 100% 的紧密接触后,增加压力会促进聚合物分子链的扩散使得 ILSS 仍有小幅的提高。对于成型层合板材,ILSS 较空隙率重要,且在压力辊压力为 0.15 MPa 下空隙率的变化很小,因此仍以 0.15 MPa 为优选的压力辊压力。

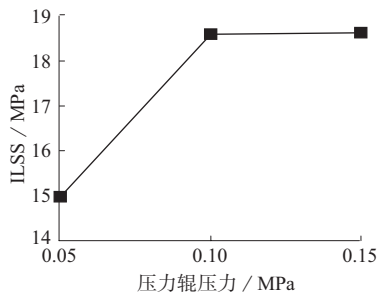


图5 压力辊压力对层合板 ILSS 的影响

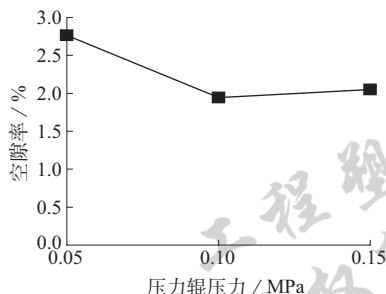


图6 压力辊压力对层合板空隙率的影响

(2) 热风枪工作温度对 ILSS 和空隙率的影响。

热风枪是使夹点处区域树脂熔融的最主要给热途径,所以热风枪的加热是影响实验结果的又一个关键因素。图 7 和图 8 分别为热风枪工作温度对层合板 ILSS 和空隙率的影响。图 7 和图 8 表明,随着热风枪工作温度的提高,层合板的空隙率逐渐降低,ILSS 逐渐提高。这是因为热风枪工作温度的提高,降低了树脂的黏度,提高了流动性,熔融树脂流动距离增加,更多空隙被树脂填充,从而使树脂对纤维的包覆和浸渍更为充分,获得了较强的界面粘结强度。但热风枪给热功率不能太大,较高的温度会使得夹点区树脂降解,因此热风枪加热档位以 8 档(最高加热温度为 229℃)为宜。

(3) 压力辊内导热油温度对 ILSS 和空隙率的影响。

表 5 和表 6 表明,在实验选定的范围内,压力辊内导热油温度对 ILSS 和空隙率的影响均较小,次于压力辊压力和热风枪工作温度。图 9 和图 10 分别为压力辊内导热油温度对层合板 ILSS 和空隙率的影响。

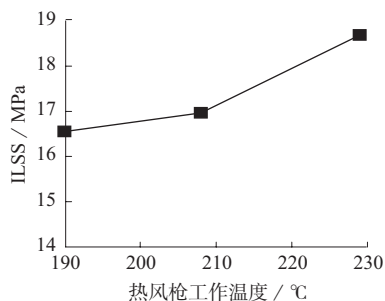


图7 热风枪工作温度对层合板 ILSS 的影响

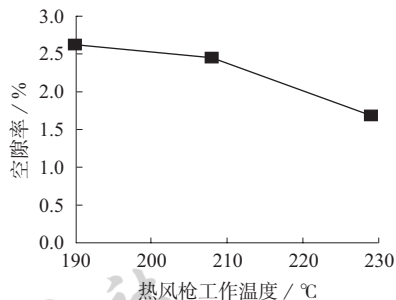


图8 热风枪工作温度对层合板空隙率的影响

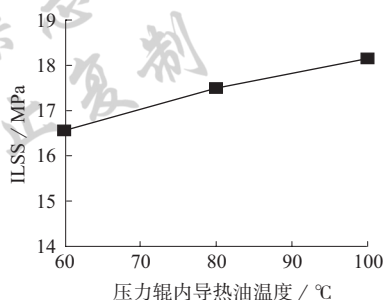


图9 压力辊内导热油温度对层合板 ILSS 的影响

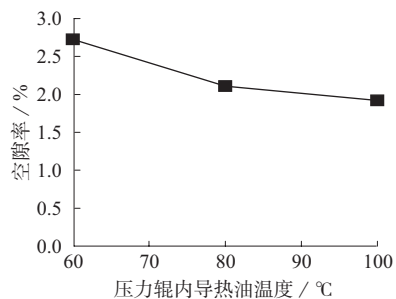


图10 压力辊内导热油温度对层合板空隙率的影响

由图 9 和图 10 可知,随着压力辊内导热油温度的提高,ILSS 逐渐提高,空隙率逐渐减小。铺放工艺中,压力辊与预浸带直接接触,压力辊内导热油温度升高,减少了压力辊对热量的吸收,减少了热交换产生的热量损失,一定程度上提高了热风枪加热效率;温度的升高延长了树脂低黏度状态的时间,有利于树脂对纤维的浸渍。但压力辊内导热油温度也不能太高,当温度高于 100℃ 时,熔融的树脂会大量粘附到压力辊上,不仅影响实验的可操作性,还会使得树脂大量流失,影响成型的层合板外观质量和力学性能,因此优选方案中压力辊内导热油温度为

100℃是较为合适的。

(4) 铺放平台底板温度对 ILSS 和空隙率的影响。

表 5 和表 6 表明,在实验选定的范围内,铺放平台底板温度对 ILSS 和空隙率的影响最小。图 11 和图 12 分别为铺放平台底板温度对层合板 ILSS 和空隙率的影响。由图 11 和图 12 可知,随铺放平台底板温度的提高,ILSS 先升高后降低,而空隙率的变化趋势刚好相反,从两者变化趋势上均可得出最优的铺放平台底板温度为 95℃。这是因为底板与第 1 层预浸带直接接触,温度过低,第 1 层预浸带不能与底板很好地粘结,容易错位,不利于实验操作;温度过高,已经铺放的预浸带层不能快速冷却固结。铺放平台底板温度为 95℃与优选的压力辊内导热油温度 100℃相近,也降低了由铺层厚度方向上的温度分布梯度而导致的厚度方向上的残余热应力。

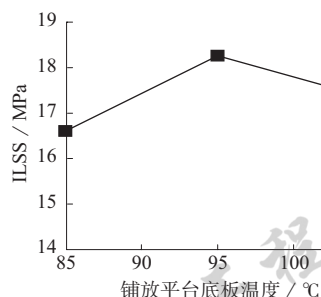


图 11 铺放平台底板温度对层合板 ILSS 的影响

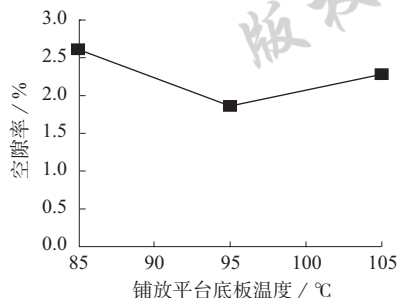


图 12 铺放平台底板温度对层合板空隙率的影响

3 结论

(1) 适当提高压力辊压力、热风枪工作温度、压力辊内导热油温度,选择适中的铺放平台底板温度,能够提高层合板的 ILSS,同时降低空隙率。在压力辊压力 0.15 MPa、热风枪工作温度 229℃、压力辊内导热油温度 100℃、铺放平台底板温度 95℃的最优工艺条件下,连续 GF 增强 PP 层合板材的 ILSS 达到 21.54 MPa,空隙率为 1.23%。

(2) 压力辊压力对铺放成型层合板 ILSS 的影响最大,热风枪工作温度、压力辊内导热油温度以及铺放平台底板温度对 ILSS 的影响依次递减;热风枪工作温度对铺放成型层合板空隙率的影响最大,压

力辊压力、压力辊内导热油温度以及铺放平台底板温度对空隙率的影响依次递减。

(3) 在空隙率小于 2.5% 时,层合板 ILSS 的变化与空隙率的变化呈现线性变化,ILSS 随着空隙率的增大而减小。

参考文献

- [1] Villegas I F, Moser L, Yousefpour A, et al. Process and performance evaluation of ultrasonic, introduction and resistance welding of advanced thermoplastic composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2013, 26(8):1 007-1 024.
- [2] Vieille B, Casado V M, Bouvet C. About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic-and thermosetting-composites:A comparative study[J]. Composite Structures, 2013, 101:9-21.
- [3] 方立,周晓东.连续玻璃纤维增强聚丙烯拉挤棒材的性能稳定性[J].玻璃钢/复合材料,2013(8):13-16.
Fang Li, Zhou Xiaodong. The stability of continuous glass reinforced polypropylene pultruded rods[J]. Fiber Reinforced Plastic / Composites, 2013(8):13-16.
- [4] 高亚楠,温龙飞.浅谈汽车材料的轻量化发展态势[J].汽车工业研究,2007(3):33-35.
Gao Yanan, Wen Longfei. Discussion on development trend of lightweight automotive materials[J]. Automotive Research, 2007(3):33-35.
- [5] 周翔,薛平,贾明印,等.连续 GF 增强 PP 层合片材破坏形式及层间剪切强度研究[J].工程塑料应用,2014,42(11):43-48.
Zhou Xiang, Xue Ping, Jia Mingyin, et al. Study on failure mode and interlaminar shear strength of continuous glass fiber reinforced polypropylene laminated sheets[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(11):43-48.
- [6] Lukaszewicz D H-J A, Ward C, Potter K D. The engineering aspects of automated prepreg layup:History, present and future[J]. Composites Part B:Engineering, 2012, 43(3):997-1 009.
- [7] Grouve W J B, Warnet L L, Rietman B, et al. On the weld strength of in situ tape placed reinforcements on weave reinforced structures[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(9):1 530-1 536.
- [8] 富宏亚,李玥华.热塑性复合材料纤维铺放技术研究进展[J].航空制造技术,2012(18):44-48.
Fu Hongya, Li Yuehua. Research on thermoplastic composites fiber placement technology[J]. Aeronautical Manufacturing Gechnology, 2012(18):44-48.
- [9] 张静静,宋孝周,白鹭,等.工艺参数对棉秆重组方材尺寸稳定性的影响研究[J].农机化研究,2015,37(4):136-139.
Zhang Jingjing, Song Xiaozhou, Bai Lu, et al. The effect of technical parameters on dimension stability of cotton-stalk reconsolidated square material[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4):136-139.