

# 基于锥体结构复合材料制品布带缠绕成型关键工艺参数优化

王慧敏 任亮 范微微 陈阳 孙丽

(北京玻璃钢复合材料有限公司, 北京 102101)

**文 摘** 为了研究布带缠绕工艺参数的精密控制与时变耦合效应对锥体结构复合材料制品性能及内部质量的影响,本文通过设计实验以及响应面法对喷管扩散段制品开展了布带缠绕成型关键工艺参数的优化研究。结果表明,采用50 mm宽碳布带缠绕成型时缠绕温度和缠绕压力控制在(60~65) °C/(700~800) N时,制品层间剪切强度达21 MPa,超声检测dB差值波动在5%左右。在此工艺条件下,制品内部质量有较大提升,可满足工程化高效提速要求。

**关键词** 布带缠绕,缠绕压力,缠绕温度,耦合域

中图分类号:TQ

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.05.012

## Optimization of Key Process Parameters for Tape Winding Based on Composite Products With Cone Structure

WANG Huimin REN Liang FAN Weiwei CHEN Yang SUN Li

(Beijing Composites Materials Co. Ltd., Beijing 102101)

**Abstract** In order to investigate the influence of the precise control and time-varying coupling effect of the process parameters of tape winding on the performance and internal quality of composite with conical structure, this paper conducted optimization research on the key process parameters of tape winding forming for nozzle diffusion section products through design experiments and response surface methodology. The results show when using 50 mm wide carbon cloth tape for winding forming, the winding temperature and pressure were controlled at (60~65) °C/(700~800) N, and the interlayer shear strength can research 21 MPa, with fluctuation of 5% in the dB difference defected by ultrasound. Under these process conditions, there is a significant improvement in the internal quality of the product, with can meet the requirements of engineering and speed increase.

**Key words** Tape winding, Winding pressure, Winding temperature, Coupling domain

### 0 引言

先进复合材料具有比强度高,比刚度高,高温性能好,可设计性强等独特优点,被广泛应用于航空航天中战略导弹、大型运载火箭、飞机以及无人机等领域,随着其构件需求量的增加,已从单纯结构件发展到具有隔热、防弹、耐腐蚀等结构功能一体化构件<sup>[1-5]</sup>。复合材料成型工艺方法、工艺参数与构件性能密切相关,不仅取决于各材料组分的自身性能,更依赖于成型方法及其成型工艺参数的精准和精确控制<sup>[6]</sup>。

复合材料布带缠绕是从纤维缠绕成型发展而来的一种干法缠绕成型工艺,主要应用于发动机喷管

扩散段、火箭发射管、导弹鼻锥等防热构件的研发与制造<sup>[7]</sup>,其中一般采用碳布/酚醛或高硅氧布/酚醛的预浸布带经预热发软发粘后按成型程序缠绕至芯模上形成预成型体,过程中能够实现布带不打折、高致密、紧贴合和均匀分布的工艺特点,保证预浸布带含胶量及厚度均可精确控制<sup>[8]</sup>。同时,在胶布带缠绕过程中的加热温度、压力、速度和时间对制品固化度、层间剪切强度以及残余应力的影响规律方面均做了大量的研究<sup>[9]</sup>。其中,DENG B等<sup>[10]</sup>结合压力保持恒定前提下以稳态有限元模型仿真分析了缠绕速度和温度耦合与制品质量的影响规律。TIERNEY等<sup>[11]</sup>基于布层间界面接触和自黏结理论建立了层间结合强

收稿日期:2022-06-09

第一作者简介:王慧敏,1988年出生,硕士,工程师,主要从事复合材料成型工艺研究工作。Email:905364464@qq.com

度模型,并证实了模型的准确性,结果表明工艺参数推辊压力、铺放速度对布层间黏结强度有着显著影响。由此可见,布带缠绕成型工艺过程为一多目标、多变量、变参数的时变耦合的控制过程。对于以高强度耐热特征碳布增强复合布带缠绕成型制品<sup>[12-13]</sup>,由于其布带本身的脆性、界面性将遗传并影响制品质量的提升,为此对布带缠绕成型工艺参数的精细优化是提高制品质量一致性的有效途径。

大部分学者是在缠绕速度0.3 m/s左右下进行的相关研究<sup>[14]</sup>,本文以缠绕速度0.45 m/s,分析缠绕温度等工艺参数对制品性能、产品质量的影响,最终确定合适的缠绕温度工艺参数。由于胶布带缠绕至芯模后缠绕张力会转化为径向向内的缠绕压力,缠绕温度、速度一定时,缠绕压力与缠绕张力的耦合作用中缠绕压力起主要作用。本文只讨论缠绕温度和缠绕压力,旨在提升产品量产化制造水平。

## 1 实验

### 1.1 原材料

本试验采用的增强材料为聚丙烯腈1K平纹碳布,基体原材料为低压钡酚醛树脂,两者经湿法浸胶工艺制备预浸布带,其规格及性能参数如表1所示。

表1 预浸布带基本性能参数

Tab. 1 Basic performance parameters of prepreg tape

预浸布带性能	宽规格度/ mm	单层厚度/mm	含胶量/%	不溶性树脂含量/%
性能参数	50±0.2	0.19±0.02	40~55	3~8

### 1.2 试验设备

主要实验设备及规格参数,如表2所示。

表2 主要实验设备及规格参数

Tab. 2 Main experimental equipment and specifications

设备名称	型号/规格	生产公司
数控缠绕机	Φ1 500×3 000	西北工业大学
材料万能试验机	10 kN	Instron
水浸超声C扫系统	NDTS-90	上海和伍精密仪器股份有限公司
90°剥离试验机	R-1029B	广东艾斯瑞仪器科技有限公司

### 1.3 测试与表征

#### 1.3.1 孔隙率测试

依据JC/T 287—2010标准进行测试,每组测试试样3个,取平均值。

#### 1.3.2 层间剪切强度测试

从制品小端端头取样,依据标准GB/T 1450.1—2005进行复合材料层间剪切强度测试,每组测试6个试样,计算平均值和离散系数。

#### 1.3.3 布带剥离拉力测试

依据GB/T 2792—2014标准,缠绕前采用90°剥离试验机对50 mm碳布/酚醛预浸布剥离张力进行确定,以(5.0±0.2)mm/s的速率匀速移动剥离,记录每个试样的负荷读数,最大允许误差为2%,试验设备与测试如图1。



图1 预浸布带剥离试验设备与测试

Fig. 1 The test equipment and test of prepreg tape peeling

#### 1.3.4 超声C扫测试

将制品从小直径端至大直径端按要求宽度分成10圈,在每圈的宽度内测试最高点与最低点的dB值记录。其中,工作方式为喷水对穿,探头频率为0.5 MHz,扫描间距为10 mm,以70 dB为检测灵敏度检测整个产品。

### 1.4 实验方案

复合材料布带缠绕成型过程是预浸胶布带与缠绕至芯模上的层合布带不断接触熔合的过程,该过程分为两个阶段,第1是发生在两接触表面的紧密接触过程,第2是发生在界面处的自黏接过程<sup>[11]</sup>。缠绕过程示意图如图2。

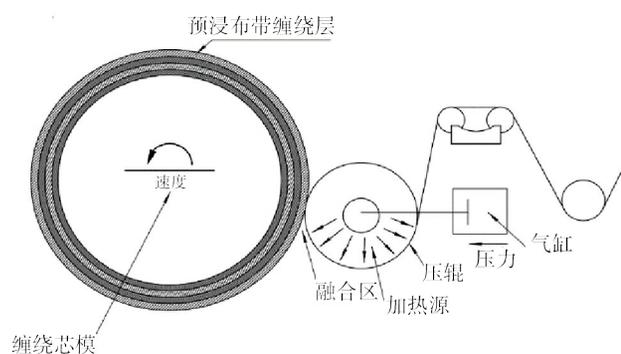


图2 布带缠绕过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tape winding process

#### 1.4.1 缠绕压力对性能影响试验方案

在不同缠绕压力下,采用平行层叠缠绕成型的环状试样筒经加压固化,沿布层方向机加成层间剪切试样。采用万能试验机检测试样层间剪切强度,并建立缠绕压力-层间剪切强度关系,分析确定合适的缠绕压力。

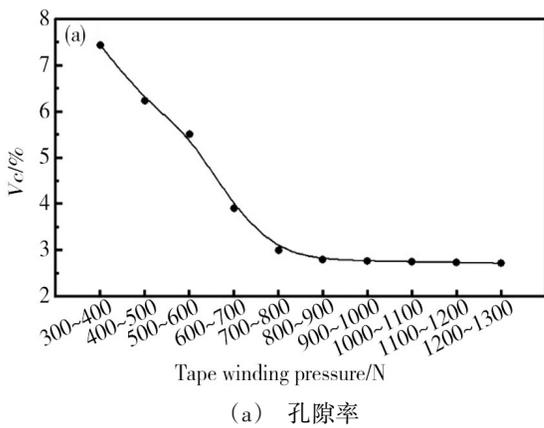
### 1.4.2 缠绕温度对性能影响试验方案

采用不同预热温度对预浸布带进行预热,并施加拉力,观察布带质量稳定性。采用无损检测设备检测制品内部质量,结合制品褶皱形成的数量及形貌,综合分析确定合适的布带缠绕温度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 布带缠绕压力域的工艺分析与确定

图3为缠绕压力对制品性能的影响。图3(a)表明随着缠绕压力域增加,制品孔隙率呈现逐渐降低趋于平稳的趋势,缠绕压力域(700~800)N开始出现拐点,



此时孔隙率接近2.5%左右,表明了在此缠绕压力域下布带贴合致密,纤维体积分数占比将接近极限,此时的树脂胶液能够充分地填充并融合于复合材料中;图3(b)随着缠绕压力域的增加,压力控制从(300~400)N增加到(1200~1300)N,层间剪切强度从16.0 MPa增加到25.6 MPa,说明了在此范围内两者呈现正相关关系,但到一定值后增加趋势变缓,结合工艺适用性,综合性能指标孔隙率、层间剪切强度和缠绕压力的关系,在一定范围内优选(700~800)N和(800~900)N作为优选的缠绕压力域。

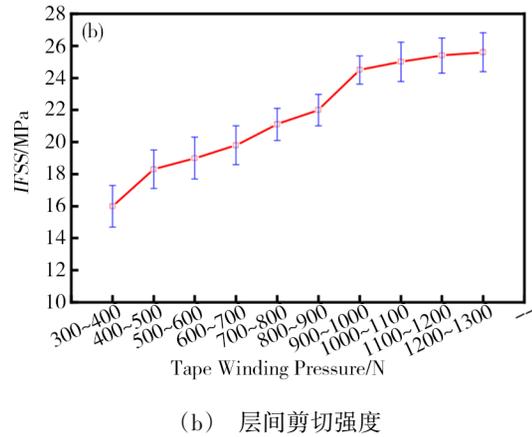


图3 缠绕压力与制品性能的关系

Fig. 3 Relationship between winding pressure and production properties

### 2.2 缠绕温度域的工艺分析与确定

#### 2.2.1 缠绕温度与胶布带质量情况分析

图4为剥离试验机模拟数控缠绕过程在不同缠绕温度下对预浸布带剥离拉力,随着缠绕温度域逐渐增加,在缠绕温度域(40~45)℃、(45~50)℃和(50~55)℃的条件下,预浸布带剥离拉力较大且离散系数偏大,这是由于在这些缠绕温度域下,树脂胶液的黏流性能较低,造成布带间粘附力过大进而表现出较大的剥离拉力,容易造成布带变形和贴合不充分。

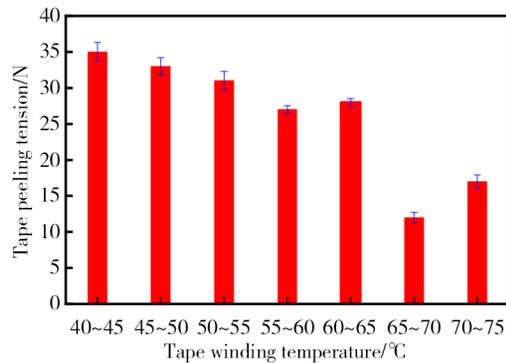


图4 缠绕温度与预浸布带剥离张力的关系

Fig. 4 Relationship between winding temperature and peeling tension of prepreg tape

如图5所示在缠绕温度下,预浸布带底色以纤维为主,树脂状态几乎没有变化;在缠绕温度域(55~60)℃、(60~65)℃条件下,剥离张力逐渐降低,这是因为温度适当提高后,树脂胶液的流动性能提高,表现出剥离张力降低,结合图5可知,此时的树脂出现“拉丝”现象,这对布带的持续贴合和布带间防止滑移均是有利的;在缠绕温度域(65~70)℃、(70~75)℃条件下,剥离张力会急剧锐减,这是由于树脂胶液已经充分流动,没有很强的黏附作用力,表现出较低的剥离张力,缠绕张力将会全部作用于布带的增强纤维中极易引发布带宽度方向上变化。

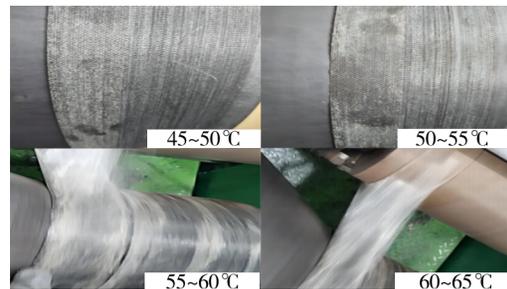


图5 不同缠绕温度下初始预浸布带质量的形貌变化

Fig. 5 Morphology change of initial prepreg tape quality at different winding temperatures

### 2.2.2 缠绕温度与制品褶皱情况、厚度均匀性分析

合理缠绕温度会使树脂流动充分,若缠绕初期不充分树脂流胶状态会遗传于后固化状态进而形成聚胶条纹或褶皱<sup>[15]</sup>。

图6为不同缠绕温度域条件下制品表面-内部褶皱数量的变化,在(50~55)°C、(65~70)°C下制品表面-内部褶皱数量居多,在(55~60)°C、(60~65)°C较少,表明了此时树脂的状态较好,对缠绕和固化状态的流动填充均是有益的。综合以上,在一定范围内优选(55~60)°C、(60~65)°C作为优选的缠绕温度域。

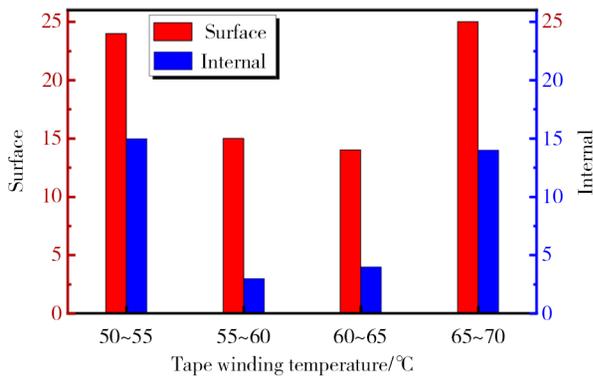


图6 不同缠绕温度域条件下制品表面-内部褶皱数量的变化

Fig. 6 Changes in the number of surface-internal wrinkles of products under different winding temperature ranges

### 2.3 缠绕压力-温度耦合域工艺分析与确定

#### 2.3.1 缠绕压力-温度耦合域对制品层间剪切强度的影响分析

复合材料布带缠绕制品性能是由多个工艺参数耦合共同决定的,不同参数的组合对层间剪切强度的影响不同。适宜的压力和温度,会促进基体树脂与增强材料之间的相互渗透和紧密贴合。

本文以缠绕压力、缠绕温度为自变量,以层间剪切强度为因变量,根据响应面法原理对实验数据进行分析,数据结果见表3,采用Matlab软件拟合关系见图7。

设缠绕压力为 $F$ ,缠绕温度为 $T$ ,层间剪切强度为 $R$ ,则

$$R=0.000\ 302\ 5(F)^2+4.265T-0.005\ 6F\cdot T-109-0.060\ 25F \quad (1)$$

由式(1)可知,缠绕温度和缠绕压力耦合时,缠绕温度对于层间剪切强度的影响占主导地位。根据式(1)和表3可知,缠绕压力在(650~900)N、缠绕温度在(55~65)°C时,层间剪切强度较优。

表3 耦合域下制品的层间剪切强度检测结果

Tab. 3 Interlaminar shear strength testing results of products in the coupling domain

序号	耦合域		层间剪切强度/MPa
	缠绕压力/N	缠绕温度/°C	
1	400~500	45~50	16.5
2	500~600	50~55	16.8
3	600~700	55~60	18
4	700~800	60~65	21
5	800~900	65~70	20.3
6	900~1 000	70~75	19.6

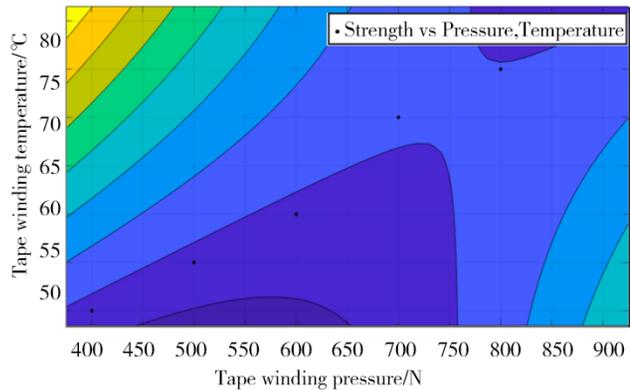


图7 耦合域下制品的层间剪切强度影响关系

Fig. 7 Interlaminar shear strength testing results of products in the coupling domain

#### 2.3.2 缠绕压力-温度耦合域对制品超声检测的影响分析

结合上述工艺试验和函数评价结果,优选的缠绕压力域和温度域将形成两者工艺参数的耦合域如表4所示。表5为No. 1、No. 2、No. 3、No. 4四种耦合域的组合参数和对应的喷管扩散段制品超声检测结果。

表4 各工艺条件对应最优域下的工艺参数

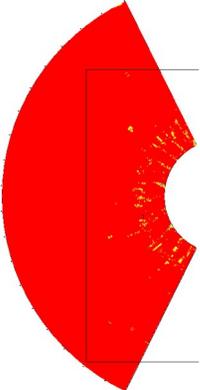
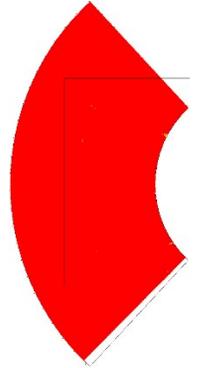
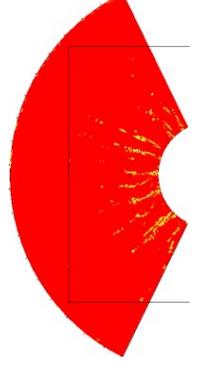
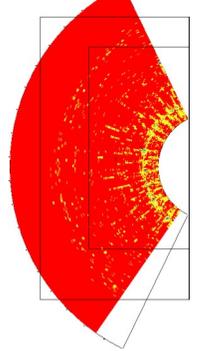
Tab. 4 Process parameters in the optimal domain corresponding to each process condition

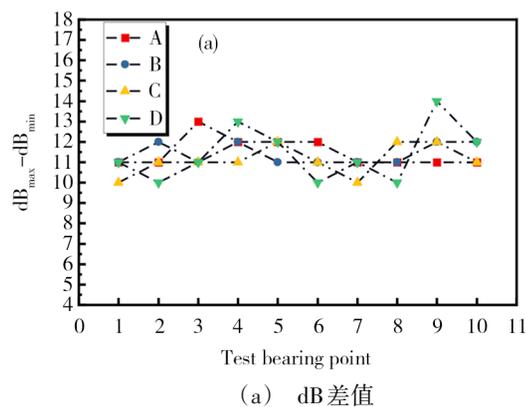
工艺条件	缠绕压力/N	缠绕温度/°C
I	700~800	55~60
II	800~900	60~65

从表5中可以看出,耦合域No2条件下制品超声检测结果相对较好,缺陷偏少,对实际生产是具有很强的借鉴意义的。耦合域No. 1、No. 3、No. 4均有波动变化。结合图8(a)不同耦合域条件下制品的超声检测dB的波动变化,可以发现,在沿喷管扩散段制品轴向10个测试位点,耦合域No. 2对应的喷管扩散

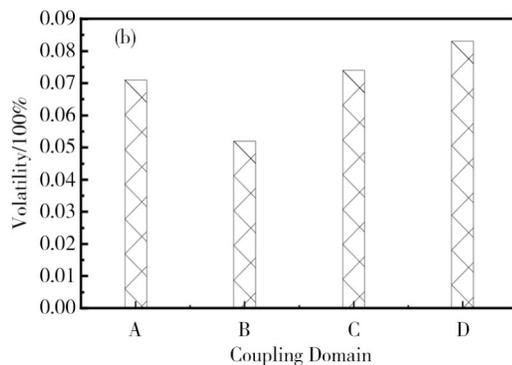
段制品的超声检测 dB 差值波动性最小,在 5 %左右,如图 8(b)。表明耦合域 No2 的工艺参数适用于喷管扩散段制品的数控式布带缠绕成型。

表 5 耦合域下制品的超声检测结果  
Tab. 5 Ultrasonic testing results of products in the coupling domain

序号	耦合域		制品超声检测结果
	缠绕压力/N	缠绕温度/°C	
No.1	700 ~ 800	55 ~ 60	
No.2	700 ~ 800	60 ~ 65	
No.3	800 ~ 900	55 ~ 60	
No.4	800 ~ 900	60 ~ 65	



(a) dB 差值



(b) 波动率

图 8 不同耦合域条件下制品的超声检测 dB 的波动变化  
Fig. 8 Fluctuation change of dB of ultrasonic inspection of products under different coupling domain conditions

### 3 结论

复合材料带缠绕成型工艺缠绕压力、缠绕温度的精准控制,可提高制品质量一致性。本文以喷管扩散段制品为例进行工艺试验,并借助响应面法对实验数据分析得到以下结论:

(1)通过单工艺参数优选确定,得到缠绕温度域(55 ~ 60)°C、(60 ~ 65)°C的优选域,缠绕压力域(700 ~ 800)N和(800 ~ 900)N的优选域;

(2)以喷管扩散段制品的高效提质为导向,对优选工艺参数耦合,确定了(60 ~ 65)°C/(700 ~ 800)N的工艺条件适用于喷管扩散段制品的数控式布带缠绕成型;

(3)采用耦合域(60 ~ 65)°C/(700 ~ 800)N的工艺参数条件成型的喷管扩散段制品其超声检测 dB 差值波动在 5 %左右,内部质量一致性有较大提升。

#### 参考文献

[1] 邢丽英,包建文,礼嵩明,等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327-1338.

XING L Y, BAO J W, LI S M, et al. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1327-

1338.

[2] 杜永, 马玉娥. 湿热环境下纤维增强树脂基复合材料疲劳性能研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(02): 431-445.

DU Y, MA Y E. Fatigue performance of fiber reinforced polymer composites under hygrothermal environment—A review [J]. Journal of Composite Materials, 2022, 39(02): 431-445.

[3] 周利, 秦志伟, 刘杉, 等. 热塑性树脂基复合材料连接技术的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3177-3183.

ZHOU L, QIN Z W, LIU S, et al. Progress on joining technology of thermoplastic resin matrix composites [J]. Materials Reports, 2019, 33(19): 3177-3183.

[4] 高禹, 李洋洋, 王柏臣, 等. 先进树脂基复合材料在航空发动机上的应用及研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(21): 16-21.

GAO Y, LI Y Y, WANG B C, et al. Application of advanced resin matrix composites in aeroengine and its research progress [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016(21): 16-21.

[5] 罗锐祺, 刘勇琼, 廖英强, 等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料力学性能影响因素的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 558-563.

LUO R Q, LIU Y Q, LIAO Y Q, et al. Research progress on the influencing factors of mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composites [J]. Materials Review, 2021, 35(S2): 558-563.

[6] 祖磊, 金书明, 张骞, 等. 基于精细化模型的纤维缠绕压力容器失效行为及容积特性影响因素分析[J]. 复合材料科学与工程, 2021(12): 40-47.

ZU L, JIN S M, ZHANG Q, et al. Failure behavior and influencing factors of volume characteristics of filament wound pressure vessel based on refined model [J]. Composites Science and Engineering, 2021(12): 40-47.

[7] 陈长胜, 谢富原, 董晓阳, 等. 国产碳纤维干法缠绕成型工艺研究[J]. 航天制造技术, 2022(01): 35-40.

CHEN C S, XIE F Y, DONG X Y, et al. Study on dry winding process of domestic carbon fiber [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022(01): 35-40.

[8] FENG P X, ZHANG S Y, LIANG Q, et al. A review of laser in-situ curing of thermoplastic composites [J]. China Plastics, 2021, 35(6): 111-124.

[9] 史耀耀, 俞涛, 何晓东, 等. 复合材料带缠绕成型工艺参数耦合机制及优化[J]. 复合材料学报, 2015, 32(03): 831-839.

SHI Y Y, YU T, HE X D, et al. Mechanism and optimization of process parameters coupling for composite tape winding [J]. Journal of Composite Materials, 2015, 32(03): 831-839.

[10] DENG B, SHI Y. Modeling and simulation of vovdis in composite tape winding process based on domain superposition technique [J]. Applied Composite Materials, 2018, 25(5): 1219-1236.

[11] TIERNEY J, GILLESPIE J W. Modeling of in situ strength development for the thermoplastic composite tow placement process [J]. Journal of Composite Materials, 2006, 40(16): 1487-1506.

[12] DAI S C, YE L. Characteristics of CF/PEI tape winding process with on-line consolidation [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(9): 1227-1238.

[13] FANG X, WU H, LU Y, et al. Jacobin matrix of multi-body system dynamics analysis and realization based on spatial operator algebra theory [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(12): 1429-1433.

[14] 俞涛, 史耀耀, 邓博, 等. 复合材料带缠绕成型过程建模及工艺参数优化[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(05): 627-633.

YU T, SHI Y Y, DENG B, et al. Process modeling and process parameter optimization of composite tape winding process [J]. Solid Rocket Technology, 2017, 40(05): 627-633.

[15] 王慧敏, 王齐崧, 何志华, 等. 发动机喷管扩散段的工艺研究及常见缺陷分析[C]//第二十一届玻璃钢/复合材料学术交流会论文集, 哈尔滨, 2016: 124-127.

WANG H M, WANG Q S, HE Z H, et al. Process research and common defect analysis of engine nozzle diffuser [C]// Proceedings of the 11<sup>th</sup> Academic Exchange Conference on Fiberglass/Composite Materials, Harbin, 2016: 124-127