

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.10.020

螺栓连接压力容器耐压强度性能

王明, 郑志才, 肖亚超, 王志增, 齐风杰, 葛林海, 孟祥武, 陈艳

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 针对较小长径比复合材料压力容器需进一步减重的应用需求,设计了一种螺栓连接大开口复合材料压力容器,并以直径290 mm压力容器为例,基于网络分析法,设计了碳纤维复合材料压力容器的纤维铺层厚度、缠绕角度以及层数等信息。利用水压试验首先考察了直径6.5 mm、材质分别为TC4和TC11的螺栓对大开口碳纤维复合材料压力容器耐压强度的影响;在此基础上考察了直径9 mm、材质分别为TC4, TC11和35CrMnSi的螺栓对压力容器耐压强度的影响。试验结果表明,螺栓连接复合材料压力容器承载内压时,螺栓连接部位的复合材料为薄弱区域,该部位复合材料需满足挤压、轴向拉伸以及环向承载,因此需额外补强。同时,螺栓需具备足够的抗拉、抗弯强度,相同材质下,随着螺栓直径的增大,受力面积增加,其抗拉、抗弯强度大幅提高;通过选用更高强度的螺栓,复合材料压力容器的耐压强度大幅提高。

关键词: 螺栓连接; 大开口; 压力容器; 复合材料; 耐压强度

中图分类号: TQ321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)10-0136-07

Compressive strength performance of bolt-jointed composite pressure vessel

WANG Ming, ZHENG Zhicai, XIAO Yachao, WANG Zhizeng, QI Fengjie, GE Linhai, MENG Xiangwu, CHEN Yan

(Shandong Non-metallic Materials Institute, Jinan 250031, China)

Abstract : To fill the application needs for further weight reduction of composite pressure vessels with small aspect ratio, a bolt-jointed large end-opened composite pressure vessel was designed. Taking a diameter of 290 mm pressure vessel as an example, the fiber layer thickness, winding angle, and number of layers of the carbon fiber composite pressure vessels were designed based on network analysis method. The influences of bolts with a diameter of 6.5 mm and materials of TC4 and TC11 respectively on the internal compressive strength of the large end-opened carbon fiber composite pressure vessels were first investigated by hydrostatic test. On the basis, the influences of bolts with diameter of 9 mm and materials of TC4, TC11, and 35CrMnSi on the internal compressive strength of the pressure vessels were also investigated. The tests results indicate that when bolt-jointed pressure vessels bear internal pressure, the composite material at the bolted joint is a weak area, the composite material at this location needs to meet the requirements of compression, axial tension, and circumferential bearing, therefore, additional reinforcement is needed. At the same time, bolts need to have sufficient tensile and bending strength. When the material of bolts is the same, as the diameter of the bolts increased, the stress area increased, its tensile and bending strength is greatly improved. By selecting bolts with higher strength material, the pressure resistances of composite pressure vessels are improved greatly.

Keywords : bolt-jointed ; large end-opened ; pressure vessel ; composite ; compressive strength

碳纤维具有高比强度、高比模量的特性,碳纤维增强树脂基复合材料在军、民领域均得到了广泛应用,通过缠绕工艺成型的碳纤维复合材料压力容器目前广泛应用于弹箭武器发动机壳体以及气瓶等^[1-5],可极大降低制品质量,达到减重提效的目的。

如采用碳纤维缠绕成型的固体火箭发动机壳体,相比于高强结构钢可减重30%以上,大幅降低了发动机的消极质量,提高了发动机推重比^[6-9]。

两端收口式压力容器为典型的复合材料压力容器^[10-13],结构如图1所示。包括碳纤维复合材料结

通信作者: 王明, 副研究员, 从事湿法缠绕复合材料压力容器研究

收稿日期: 2024-08-11

引用格式: 王明, 郑志才, 肖亚超, 等. 螺栓连接压力容器耐压强度性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(10): 136-142.

WANG Ming, ZHENG Zhicai, XIAO Yachao, et al. Compressive strength performance of bolt-jointed composite pressure vessel[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(10): 136-142.

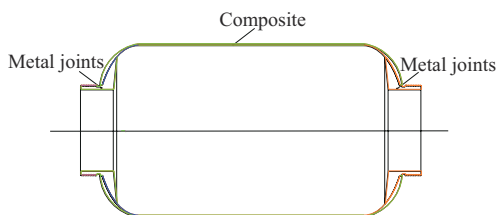


图1 收口式压力容器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of closed pressure vessels

构层和左右金属接头。其中复合材料层通过缠绕工艺将金属接头包裹,主要起内压承载作用,金属接头起密封以及连接作用。该种结构优点是适宜纤维缠绕工艺成型,符合纤维缠绕线型基本原理,成型工艺简单,不易滑纱。缺点是脱模困难,两端为收口结构,限制了使用范围。

随着智能化要求的提高,某些特殊用途的压力容器连接机构的工作单元越来越多,体积也越来越大。对于大尺寸压力容器,往往需要进行分段缠绕^[14-15]。上述需求导致敞开口式(大开口式)压力容器应运而生,其克服了两端收口式压力容器的缺点,脱模便利,可实现工作介质自由装填,结构如图2所示。典型的敞开口式压力容器的主要特点是一端(或两端)金属接头为薄壁大开口式结构,从而满足大尺寸连接机构的安装以及密封。

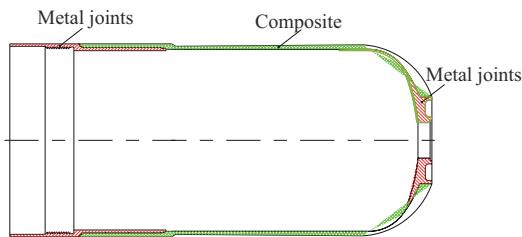


图2 大开口金属接头压力容器示意图

Fig. 2 Structure diagram of large end-opened pressure vessels with metal joint

然而,大开口金属接头压力容器承载内压时,大开口部位金属接头无法包裹、缠绕纤维,因此金属接头需满足内压轴向承载,根据应用工况的不同,甚至需要满足内压环向承载,这对金属接头的尺寸以及选材提出了很高的要求,导致在一些特殊工况,尤其是长径比较小的情况下减重效果不佳。

针对大开口金属接头压力容器存在的弊端,笔者提出了近/全复合材料压力容器方案,结构如图3所示,包括复合材料层以及左右两侧的金属件,复合材料层大开口圆周部位开有一排连接孔。其工作机理为利用螺栓通过复合材料的孔将压力容器与金属构件连接,大开口部位轴向内压由复合材料

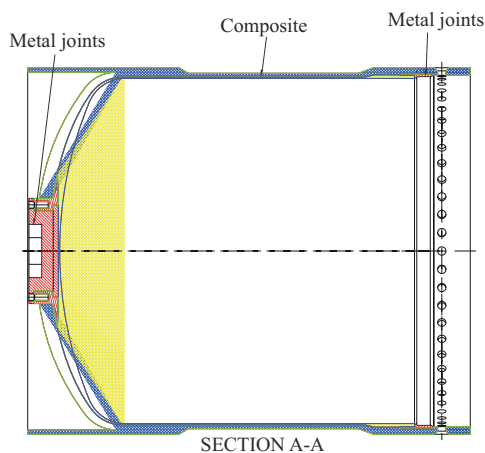


图3 大开口近/全复合材料压力容器示意图

Fig. 3 Structure diagram of large end-opened near/full composite pressure vessels

孔承担,这样可利用复合材料铺层的可设计性达到减重目的,同时该部位金属件仅起密封作用,因此对金属件的尺寸及材质要求不高。

近/全复合材料压力容器需对大开口部位复合材料开孔以作连接,开孔会对纤维造成破坏、损伤,承载内压时,开孔部位受力非常复杂,复合材料不仅承受挤压^[16-18],同时承受轴向拉伸、层间剪切。连接的螺栓承受径向拉伸、弯曲、剪切等复杂载荷^[19-22]。近/全复合材料压力容器成型方案不能简单利用网格理论进行计算,开孔部位为薄弱区域,需重点补强,以防低压破坏。目前对于螺栓连接大开口内压容器的研究较少。因此,笔者以直径290 mm的近/全复合材料压力容器进行设计分析,通过网格理论设计该压力容器厚度、碳纤维铺层角度、方向、数量,结合螺栓选择、结构设计,重点考察压力容器的破坏模式,复合材料开孔孔径、螺栓材质等因素对承压能力的影响。

1 压力容器结构及基本技术参数

近/全复合材料大开口压力容器模型如图4所示,由图4可见,后接头、密封环为金属材质,筒身为

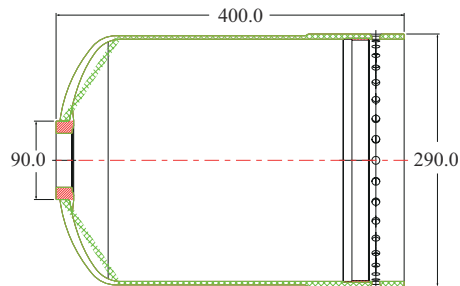


图4 压力容器结构剖视图

Fig. 4 Section view of pressure vessels

碳纤维缠绕复合材料。要求容器爆破压力 $P_b \geq 25$ MPa,极孔外径为 90 mm,大开口部位外径为 290 mm,壁厚 6 mm,总长度为 400 mm。

选用国产 T800 级碳纤维作为压力容器设计的增强材料,拉伸强度为 5 800 MPa,拉伸弹性模量为 290 GPa,体密度为 1.8 g/cm³,线密度为 450 g/km。压力容器开孔情况见表 1。压力容器所开孔均为沉头孔,沉头深度均为 2.5 mm,锥度 90°。

表 1 开孔工艺方案

Tab. 1 Technological scheme of trepanning		
Scheme	Sample	Hole specification/quantity
A	1	Ø6.5 mm, 60
	2	Ø6.5 mm, 60
	3	Ø9 mm, 40
B	4	Ø9 mm, 40
	5	Ø9 mm, 40

2 压力容器铺层结构设计

在树脂基复合材料中,树脂为基体材料,纤维为增强材料,相较于纤维,树脂的拉伸强度和拉伸弹性模量很低,用于制造压力容器时,其加强作用可忽略不计,复合材料压力容器的内压承载可全部视为由纤维提供。因此,在设计碳纤维复合材料压力容器时,认为在复合材料中承受内压时的薄膜应力完全由纤维承担,采用网络分析法^[23-26],通过纤维强度确定缠绕铺层工艺秩序,并对大开口部位进行重点补强。

2.1 缠绕角度计算

复合材料压力容器采用纵向加环向缠绕的成型工艺方式,纵向缠绕角度需符合纤维缠绕原理,即极孔决定缠绕角。其缠绕角见式(1)。

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{r}{R}\right) \quad (1)$$

式中: α 为纵向缠绕角, r 为极孔半径, R 为筒身段半径。根据计算纵向缠绕角度可取 18°。

2.2 筒身,封头段缠绕层数

复合材料压力容器一般由环向及纵向纤维缠绕而成。而封头段无法实现环向缠绕,只能纵向成型,且由于封头形状的影响,封头段缠绕过程存在纤维堆积及架空等缺陷存在。因此,在利用网格理论计算压力容器纵向以及环向缠绕层数时,为使封头段满足内压要求,需对纵向缠绕纤维强度引入应力平衡因子^[27-28]。纵向以及环向纤维厚度由式(2)和式(3)决定。

$$h_{\alpha} = \frac{RP_b}{2K_s\sigma_{fb}\cos^2\alpha} \quad (2)$$

$$h_{\theta} = \frac{RP_b}{2\sigma_{fb}}(2 - \tan^2\alpha) \quad (3)$$

式中: h_{α} 和 h_{θ} 分别为纵向和环向纤维厚度; R 为压力容器内径; P_b 为爆破压力; α 为纵向缠绕角; σ_{fb} 为纤维发挥强度; K_s 为应力平衡因子。

由纵向及环向纤维厚度可计算出所需纵向及环向纤维的层数,纤维层数由式(4)和式(5)决定。

$$n_{\alpha} = \frac{\sigma_{fb}h_{\alpha}}{f_0m} = \frac{h_{\alpha}W_1}{A_0n} \quad (4)$$

$$n_{\theta} = \frac{\sigma_{fb}h_{\theta}}{f_0m} = \frac{h_{\theta}W_2}{A_0n} \quad (5)$$

式中: n_{α} 和 n_{θ} 为所需纤维的纵向和环向层数; f_0 为纤维拉断力; m 为纱片密度,即单位长度上的纱条数; n 为纤维股数; A_0 为纤维截面积; W_1 为纵向纤维展纱宽度; W_2 为环向纤维展纱宽度。

T800 碳纤维取 σ_{fb} 为 4 600 MPa (纤维发挥强度取 0.793),应力平衡因子 K_s 为 0.8,截面积 A_0 为 0.25 mm², f_0 为 1 200 N,纤维股数 n 为 3 股,单束纱环向展纱宽度为 3 mm,纵向展纱宽度为 2.5 mm。为满足内压要求,筒身及封头段需 3 层纵向,8 层环向。

2.3 大开口部位缠绕层数

大开口部位需对复合材料开孔连接,内压载荷作用下开孔连接部位复合材料同时承受拉伸以及挤压应力。拉伸应力由孔间的复合材料承载,开孔导致受力面积减小。挤压应力由孔边复合材料承载。因此,需要额外的纵向层纤维。压力容器结构如图 4 所示,该部位缠绕 10 层纵向,7 层环向。

2.4 设计结果

根据给定的爆破压力条件,最终确定筒身及封头段纵向层为 3 层,环向为 8 层。大开口部位纵向层为 10 层,环向为 7 层。根据复合材料产品固化特点及产品内压作用下变形情况,确定缠绕铺层秩序为: $[\pm 18^{\circ}/90^{\circ}/\pm 18^{\circ}/90^{\circ}]_{筒身}/\pm 18^{\circ}/(90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ})_{筒身}/\pm 18^{\circ}/90^{\circ}/\pm 18^{\circ}/\pm 18^{\circ}/\pm 18^{\circ}/90^{\circ}/\pm 18^{\circ}/\pm 18^{\circ}/90^{\circ}/\pm 18^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}]$,筒身意为仅仅在筒身段缠绕环向层纤维。

3 试验部分

3.1 主要原材料

环氧树脂基体 A: TDE-85,天津晶东化学复合材料有限公司;

环氧树脂基体 B: E-51,南通星辰合成材料有限

公司;

固化剂:4,4-二氨基二苯甲烷(DDM),上海三爱思试剂有限公司;

碳纤维:SYT55S-12K,连云港中复神鹰碳纤维股份有限公司。

3.2 主要设备及仪器

数控缠绕机:SKLCR50/500,哈尔滨工业大学;

旋转烘箱:BJ3-2500,吴江正达烘箱制造有限公司;

电动试压泵:4DSY,饶阳鸿源机械有限公司。

3.3 成型过程

将缠绕成型模具安装到位后架设到数控缠绕机上,将环氧树脂基体A与环氧树脂基体B混合,在电热套中加热搅拌至合适的黏度,然后将固化剂加入至混合树脂,迅速搅拌,混合均匀,完成后将树脂胶液倒入胶槽,并设置胶槽温度。按照设定好的缠绕程序进行缠绕,缠绕铺层顺序按设定的铺层秩序进行。缠绕完成后放入旋转烘箱内固化,固化秩序为:90℃/1.5 h→120℃/2 h→160℃/3 h。固化完成后脱模,并按照压力容器结构图纸进行机加工得到最终样件。

3.4 螺栓选择

选取的螺栓尺寸规格以及材质见表2。螺栓均为沉头螺栓,沉头深度均为2.5 mm,锥度90°;样件1[#],2[#]选用螺栓丝扣为M6,螺距1 mm,长5 mm,共计60个;样件3[#],4[#],5[#]选用螺栓丝扣为M8,螺距1 mm,长5 mm,共计40个。具体结构如图5和图6所示。

表2 螺栓尺寸及材质

Tab. 2 Size and materials of bolts

Scheme	Sample	Bolts specification/materials
a	1 [#]	Ø6.5 mm, TC4
	2 [#]	Ø6.5 mm, TC11
b	3 [#]	Ø9 mm, TC4
	4 [#]	Ø9 mm, TC11
	5 [#]	Ø9 mm, 35CrMnSi

4 性能试验

利用水压试验机对方案a,b的试验样件进行试验,结果如下。

(1)方案a。1[#],2[#]压力容器利用Ø6.5 mm的螺栓将大开口部位圆周方向的60个Ø6.5 mm的通孔与水压工装连接、密封。压力容器1[#],2[#]进行水压试验后螺栓均从退刀槽部位发生断裂,复合材料仅在大开口部位局部向外张开,分层。其中1[#]压力容器爆

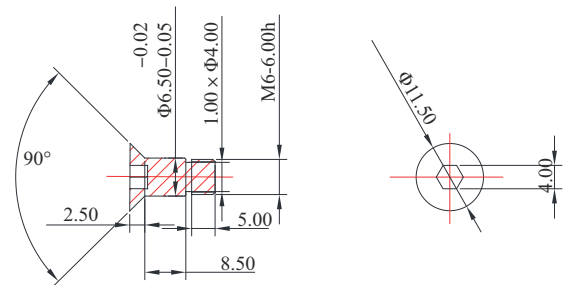


图5 方案a螺栓结构示意图

Fig. 5 Bolts structure of scheme a

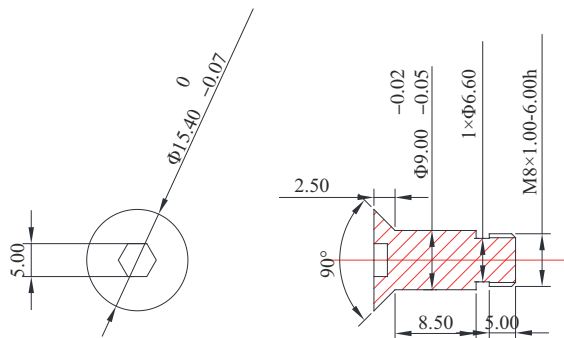


图6 方案b螺栓结构示意图

Fig. 6 Bolts structure of scheme b

破压强为10 MPa;2[#]压力容器爆破压强为12.3 MPa。1[#],2[#]压力容器远未达到设计要求。

(2)方案b。3[#],4[#],5[#]压力容器利用Ø9 mm的螺栓将大开口部位圆周方向的40个Ø9 mm的通孔与水压工装连接、密封。3[#]压力容器进行水压试验后,螺栓Ø9 mm部位弯曲变形,复合材料仅在大开口部位局部向外张开,孔部位复合材料局部破坏。爆破压强为17 MPa。4[#]压力容器进行水压试验后螺栓从退刀槽部位发生断裂,复合材料仅在大开口部位发生分层破坏。爆破压强为20.6 MPa。5[#]压力容器进行水压试验后螺栓从退刀槽部位发生断裂,复合材料仅在孔部位挤压破坏。爆破压强为29 MPa。

压力容器水压爆破结果见表3。

表3 压力容器水压试验结果

Tab. 3 Hydrostatic test results of pressure vessel

Sample	Bursting pressure/MPa
1 [#]	10
2 [#]	12.3
3 [#]	17
4 [#]	20.6
5 [#]	29

5 结果与讨论

5.1 方案a压力容器破坏分析

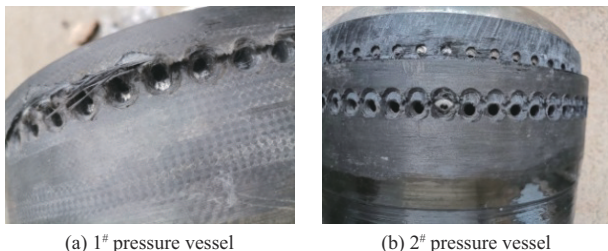
1[#],2[#]压力容器连接的螺栓退刀槽部位直径为Ø4 mm,Ø6.5 mm部位进入水压工装深度为5 mm,起

定位销作用,1#压力容器采用TC4材质螺栓,2#压力容器采用更高强度的TC11螺栓。1#,2#压力容器水压破坏模式相似,2#压力容器破坏压强更高,螺栓均从退刀槽部位断裂,开孔部位复合材料发生了破坏,如图7和图8所示。



图7 方案a螺栓断裂情况

Fig. 7 Damage of bolts of scheme a



(a) 1# pressure vessel

(b) 2# pressure vessel

图8 方案a压力容器破坏情况

Fig. 8 Damage of pressure vessels of Scheme a

水压试验过程中,复合材料产生径向变形,在水压推动下,大开口部位水压工装有轴向外移趋势,螺栓承受径向拉伸以及轴向弯曲应力,复合材料孔部位承受轴向拉伸以及挤压应力。随着内压升高,螺栓无法承载径向拉伸应力导致断裂(退刀槽部位),断裂的螺栓飞出;在瞬间冲击下,会伴随着水压工装失稳,向外打出,导致复合材料轴向发生破坏。

方案a中两件压力容器爆破压强远低于指标,原因在于螺栓抗拉、抗弯能力不足,退刀槽部位直径仅为4 mm,受力面积太小,而2#压力容器爆破压力更高的原因在于TC11比TC4具有更高的拉伸破坏强度。

5.2 方案b压力容器破坏分析

方案b中大开口部位开40个 $\varnothing 9$ mm的通孔,螺栓退刀槽部位直径提高至6.6 mm,其中 $\varnothing 9$ mm部位进入水压工装深度同样为5 mm,3#压力容器采用TC4材质螺栓,4#压力容器采用TC11材质螺栓,5#压力容器采用35CrMnSi材质螺栓,螺栓拉伸破坏强

度依次提高。3#,4#,5#压力容器水压试验破坏情况如图9、图10、图11所示。



图9 3#压力容器破坏情况

Fig. 9 Damage of 3# pressure vessel



图10 4#压力容器破坏情况

Fig. 10 Damage of 4# pressure vessel



图11 5#压力容器破坏情况

Fig. 11 Damage of 5# pressure vessel

由图9~图11可见,与 $\varnothing 6.5$ mm螺栓相比,随着螺栓直径增加, $\varnothing 9$ mm螺栓的抗拉、抗弯能力大幅提高。对3#压力容器进行试验结果显示,随着水压压力的提高,TC4材质螺栓不足以承载复合材料对螺栓施加的轴向弯曲应力,螺栓 $\varnothing 9$ mm部位弯曲变形,密封失效,水压工装打出,导致泄压,同时伴随着螺栓对复合材料的轴向挤压,复合材料孔部位发生局部开裂。4#压力容器试验结果显示,在将螺栓材质更换为TC11钛合金后,螺栓抗弯能力提高,螺栓退刀槽部位由于截面积较小,成为水压破坏的薄弱点,随着压力进一步提高,该部位无法承受径向拉拔,在螺栓破坏的同时,水压工装外移,导致复合材料发生分层破坏。当螺栓材质更换为35CrMnSi后,拉伸、弯曲强度大幅提高,表现为5#压力容器爆破压力最大,当压力达到29 MPa时,螺栓退刀槽部位发生断裂,此时瞬间冲击力巨大,复合材料孔部位发生劈裂破坏。

6 结论

(1)螺栓连接大开口内压力容器开口部位为薄弱区域,该部位复合材料需满足径向承载。开孔部位需满足轴向拉伸、挤压,由于开孔导致复合材料受力面积减少,需额外补强。

(2)对于螺栓连接大开口内压力容器,螺栓需具备足够的径向拉拔以及轴向弯曲性能,对螺栓材质提出了很高的要求。通过增大螺栓直径,更换更高强度的材质,其抗拉、抗弯能力大幅提升,相同工艺下压力容器爆破强度大幅提高。

(3)对于螺栓连接大开口内压力容器,宜选用大尺寸、高强度螺栓,以防止压力容器出现低压破坏现象。

参考文献

- [1] 何景轩,任全彬,董新刚,等.固体动力设计中的几个主要关键基础问题[J].固体火箭技术,2022,45(2):181-188.
HE Jingxuan, REN Quanbin, DONG Xingang, et al. Some fundamental problems on design of solid propulsion systems[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2022, 45(2):181-188.
- [2] 李靖,马虎,周长省,等.基于ANSYS ACP的固体火箭发动机复合材料壳体强度分析[J].固体火箭技术,2023,46(3):383-391.
LI Jing, MA Hu, ZHOU Changsheng, et al. Strength analysis of SRM composite case based on ANSYS ACP[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023, 46(3):383-391.
- [3] 李瑶.火箭发动机纤维缠绕复合材料壳体结构设计与分析[D].南京:南京理工大学,2016.
LI Yao. Structural design and strength analysis of filament wound composite shell for rocket engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [4] 陈汝训.纤维缠绕气瓶设计分析[J].固体火箭技术,2008,31(6):625-634.
CHEN Ruxun. Design analysis on the filament-wound gas cylinder [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(6):625-634.
- [5] 顾森东,石晓强,徐涛.超薄钛内衬复合材料高压气瓶力学特性分析[J].上海航天(中英文),2020,37(4):74-95.
GU Sendong, SHI Xiaoqiang, XU Tao. Analysis on mechanical properties of ultra-thin titanium-lined composite high-pressure vessels[J]. Aerospace Shanghai(Chinese & English), 2020, 37(4): 74-95.
- [6] 阮崇智.大型固体火箭发动机研制的关键技术[J].固体火箭技术,2005,28(1):23-28.
RUAN Chongzhi. Critical techniques in development of large-size solid rocket motors[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2005, 28(1):23-28.
- [7] 卢嘉德.固体火箭发动机复合材料技术的进展机器应用前景[J].固体火箭技术,2001,24(1):46-52.
LU Jiade. The progress and application prospect of composite techniques for SRM[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2001, 24(1):46-52.
- [8] 冯彬彬,袁金,胡旭辉,等.大长径比固体火箭发动机壳体轻量化设计[J].复合材料科学与工程,2021(5):43-48.
FENG Binbin, YUAN Jin, HU Xuhui, et al. Lightweight design of solid rocket motor casing with large aspect ratio[J]. Composites Science and Engineering, 2021(5):43-48.
- [9] 陈小平,王喜占.T800碳纤维在复合材料压力容器上的应用研究[J].高科技纤维与应用,2017,42(3):45-49.
CHEN Xiaoping, WANG Xizhan. T800 carbon fiber in the application of composite pressure vessel research[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2017, 42(3):45-49.
- [10] 王荣.不等极孔椭球类容器的纤维缠绕研究[D].西安:西安理工大学,2014.
WANG Rong. Study on filament wound ellipsoidal pressure vessels with unequal polar openings[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [11] 王洪运,陈家正,马国峰.不等极孔椭球容器结构及成型工艺研究[J].纤维复合材料,2018(2):43-45.
WANG Hongyun, CHEN Jiazheng, MA Guofeng. Study on structure and process properties of filament wound ellipsoid pressure vessel with unequal polar openings[J]. Fiber Composites, 2018(2): 43-45.
- [12] 费春东,杨丽萍,孙博,等.不等极孔压力容器缠绕线型的理论分析与计算[J].纤维复合材料,2006(1):40-43.
FEI Chundong, YANG Liping, SUN Bo, et al. Analysis and calculation of winding pattern of pressure vessels with different polar openings[J]. Fiber Composites, 2006(1):40-43.
- [13] 李翠云,李辅安.不等开口压力容器非测地线缠绕的CAD/CAM技术[J].玻璃钢/复合材料,2010(3):21-24.
LI Cuiyun, LI Fuan. CAD/CAM for non-geodesic winding on the pressure vessels with different polar openings[J]. FRP/CM, 2010(3):21-24.
- [14] 张雅,刘建超,高克洲.分段式固体发动机壳体连接技术研究概述[J].航天制造技术,2019(6):63-71.
ZHANG Ya, LIU Jianchao, GAO Kezhou. Overview of research on segmented SRM casing connection technology[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(6):63-71.
- [15] 王健儒,张光喜.分段式固体发动机技术发展与应用进展[J].固体火箭技术,2016,39(4):451-455.
WANG Jianru, ZHANG Guangxi. Research on application and development of segmented SRM[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(4):451-455.
- [16] 庄福建.复合材料层合板挤压失效预测与增强设计[D].南京:南京航空航天大学,2019.
ZHUANG Fujian. Failure prediction and enhancement design of composite laminate bearing behavior[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [17] 何柏灵,葛东云,莫与明,等.T800碳纤维增强复合材料双剪单

- 钉连接的拉伸试验及强度估算[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1 541–1 552.
- HE Boling, GE Dongyun, MO Yuming, et al. Tensile tests and strength estimation for double-lap single-bolt joints in T800 carbon fiber reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(7): 1 541–1 552.
- [18] 唐玉玲, 陈浩, 周振功, 等. C/C编织复合材料双剪连接结构的挤压强度[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 52–60.
- TANG Yuling, CHEN Hao, ZHOU Zhengong, et al. Bearing strength of carbon/carbon braided composites double shear joint [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18): 52–60.
- [19] 孙涛, 周金宇. 碳纤维复合材料螺栓连接性能综述[J]. 现代制造工程, 2018(9): 154–160.
- SUN Tao, ZHOU Jinyu. Summary for the connection performance of carbon fiber composite bolt[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018(9): 154–160.
- [20] 瞿凯. 复合材料螺栓连接接头失效破坏研究[D]. 广州: 暨南大学, 2018.
- QU Kai. Study on failure of composite bolted joints[D]. Guangzhou: Jinan University, 2018.
- [21] 黄学优. 复合材料螺栓连接接头失效行为研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- HUANG Xueyou. Failure behavior study of composite bolted joint [D]. Taiyuan: Central North University, 2016.
- [22] 王强, 贾普荣, 张龙, 等. 碳纤维增强复合材料沉头螺栓连接失效分析[J]. 航空材料学报, 2020, 40(6): 59–70.
- WANG Qiang, JIA Purong, ZHANG Long, et al. Failure analysis of carbon fiber reinforced composite countersunk bolt joint[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(6): 59–70.
- [23] 胡宽, 宋笔锋, 常新龙, 等. 基于网络理论的固体火箭发动机纤维缠绕壳体优化设计[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1 100–1 103.
- HU Kuan, SONG Bifeng, CHANG Xinlong, et al. Optimal design of solid rocket motor filament-wound case based on netting theory [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29 (9): 1 100–1 103.
- [24] 陈汝训. 固体火箭发动机壳体特性系数[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(5): 517–520.
- CHEN Ruxun. Characteristic factor of solid rocket motor cases[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008, 31(5): 517–520.
- [25] 安庆升, 王建昌. 某碳纤维复合材料发动机壳体设计研制[J]. 上海航天, 2007(4): 62–64.
- AN Qingsheng, WANG Jianchang. Development of some C filament wound solid-rocket motor[J]. *Aerospace Shanghai*, 2007(4): 62–64.
- [26] 陈汝训. 纤维缠绕压力容器爆破压强计算[J]. 宇航材料工艺, 2000(6): 28–30.
- CHEN Ruxun. Burst pressure calculation of the filament-wound pressure vessels[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2000(6): 28–30.
- [27] 陈汝训. 碳纤维壳体封头设计的几个问题[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(5): 543–547.
- CHEN Ruxun. Some problems for the dome design of carbon fiber case[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2009, 32(5): 543–547.
- [28] 陈汝训. 纤维缠绕壳体的应力平衡系数和圆筒缠绕角[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(6): 677–679.
- CHEN Ruxun. Stress equilibrium factor and the cylinder wound angle of the filament-wound case[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2009, 32(6): 677–679.