

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.018

高低温对碳纤维/环氧树脂复合材料高压气瓶的性能影响

李玉峰, 赵积鹏, 张海, 于斌

(兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 为了获得 T1000 碳纤维/环氧树脂复合材料高压气瓶环境适应能力, 有效地掌握气瓶高低温适应性固有规律, 以容积 50 L、工作压力 30 MPa 的复合材料气瓶(钛为内衬、碳纤维/环氧树脂为复合层)为研究对象, 首先介绍了高低温循环下带压气瓶(在 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内成功通过热真空、热循环验证, 具备高压承载能力)的热真空、热循环试验数据, 然后采用与气瓶相同复合材料的拉伸试样(缠绕角分别为 0° 和 90°), 通过高低温极限摸底试验获得了复合材料经历不同梯度高低温后的拉伸性能数据, 通过数据对比分析获得了高低温影响拉伸强度衰减的规律。同时, 提出了一种高低温极限摸底试验的可靠性评估方法。结果表明, 在 $-50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 试样拉伸强度及断裂伸长率变化较小; 当温度高于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 纤维和树脂的性能发生衰减, 导致拉伸强度明显降低; 当温度低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 树脂的性能发生衰减, 纤维受到的影响较小。试样高低温极限摸底试验的可靠度大于 0.999, 表明采用拉伸试样高低温拉伸强度数据的替代方式具有较高的等效性。

关键词: 复合材料; 高压气瓶; T1000 碳纤维缠绕气瓶; 环境适应性; 高低温影响

中图分类号: TG435+1, V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)09-0119-07

Effects of high-low temperature on properties of carbon fiber/epoxy resin composite high-pressure vessel

LI Yufeng, ZHAO Jipeng, ZHANG Hai, YU Bin

(Lanzhou Institute of Aerospace Technology and Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract : In order to obtain the environmental adaptability on the T1000 carbon fiber/epoxy resin composite vessel, and to grasp inherent characters on the high-low temperature adaptability of the vessel, the composite vessel (titanium as lining, carbon fiber/epoxy resin as composite layer) with volume 50 L and operating pressure 30 MPa was regarded as an object of study, firstly, the thermal vacuum and thermal cycle test data of the pressurized vessel under high-low temperature circulation were introduced (the composite vessel was successfully verified by thermal vacuum and thermal cycle test and had high pressure bearing capacity in the temperature range of $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Secondly, using tensile samples with the same composites of the vessel (the winding angle is 0° and 90° respectively), the tensile properties data of the composites after experiencing different gradient high and low temperature were obtained through high-low temperature limit diagnostic test, and the tensile strength attenuation rule affected by high-low temperature was obtained through data comparative analysis. Finally, a reliability assessment method on the high-low temperature limit diagnostic test was offered. The results show that, in the range of $-50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, the tensile strength and elongation at break of the samples change less, when the temperature is above $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, the properties of fibers and resin decay, resulting in a significant reduction in tensile strength, and when the temperature is below $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the performance of the resin attenuates, and the fibers are less affected. The reliability of the vessel high-low temperature limit diagnostic test is greater than 0.999, indicating that the alternative method of using high-low temperature tensile strength data of the tensile sample has high equivalence.

Keywords : composite ; high-pressure vessel ; T1000 carbon fiber winding vessel ; environmental adaptability ; high-low temperature effect

通信作者: 李玉峰, 硕士, 高级工程师, 研究方向为航天器压力容器的结构与仿真分析

收稿日期: 2024-05-14

引用格式: 李玉峰, 赵积鹏, 张海, 等. 高低温对碳纤维/环氧树脂复合材料高压气瓶的性能影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9): 119-125.

LI Yufeng, ZHAO Jipeng, ZHANG Hai, et al. Effects of high-low temperature on properties of carbon fiber/epoxy resin composite high-pressure vessel[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 119-125.

目前处于高低温环境下的大型航天高压气瓶材质由金属向复合材料的升级换代已成为航天工业发展的一种趋势,然而对长期高压状态下服役的复合材料气瓶高低温特性有待进一步研究和分析,这是因为高低温对复合材料气瓶全空间领域服役状况有重要的影响^[1]。同时,碳纤维与环氧树脂为非金属材料,高低温容易引起材料的功能失效及变脆,从而影响气瓶在高低温环境下的承压能力,通过可靠性提升试验获取高低温状态下气瓶稳定运行的适用温度范围,既能扩大产品应用领域^[2],又能提高产品高压服役可靠性,对高压气瓶高低温环境设计及扩展应用具有较大的参考意义。张世杰等^[3]介绍了目前复合材料气瓶用高性能纤维材料碳纤维、芳纶纤维等的发展现状及性能参数,陈伟明等^[4]介绍了高性能 T700 和 T800 碳纤维复合材料、双酚 A 环氧树脂的特性参数。

航天高新技术发展促使复合材料向高性能、低成本和多功能发展,T1000 碳纤维/环氧树脂复合材料是目前最先进的复合材料之一^[5],它以轻质、高强、耐高温等优点广泛应用于航空航天、国防军事及其他领域^[6-7]。笔者研究的复合材料气瓶采用 T1000 碳纤维增强材料和双酚 A 环氧树脂基体材料,均为各向异性材料,由这两种材料制备的复合材料在内压载荷作用下的应力、应变不同于各向同性材料,具有比强度高、比模量大及耐磨耐腐蚀的显著优点^[8]。

笔者首先介绍了高低温对复合材料气瓶环境适应性影响的固有规律,随后提出了高低温极限摸底试验方法及可靠性评估方法,以通过试验验证合格的气瓶高低温数据参数为基准,与基准温度下的拉伸试样性能检测数据建立对应的等效关系,并通过拉伸试样等效替代实际气瓶开展高低温极限摸底试验,进一步证明了采用拉伸试样替代气瓶进行高低温极限摸底试验具有一定的等效性,从而达到获取气瓶高低温极限适应能力、拓展应用领域的目的。

1 模型与方法

1.1 结构模型

以卫星用复合材料气瓶(容积 50 L、工作压力 30 MPa)为研究对象,如图 1 所示,该气瓶由金属内衬(钛内衬)和复合层(T1000 碳纤维/环氧树脂)组成,其中内衬厚度为 0.8 mm,复合层厚度为 6.2 mm。碳

纤维以 70% (体积分数)的配比与环氧树脂经湿法缠绕混合形成复合层,其中,气瓶封头结构采用螺旋纤维缠绕,其纵向和环向强度均由螺旋向纤维提供,圆柱筒体结构采用螺旋加环向交替层叠缠绕,纵向强度由螺旋向纤维提供,环向强度则由螺旋向和环向纤维共同提供^[9-11]。该复合材料气瓶的性能指标见表 1。



图 1 复合材料高压气瓶

Fig. 1 Composite high-pressure vessel

表 1 复合材料高压气瓶性能指标

Tab. 1 Performance index of composite high-pressure vessel

Parameter	Performance index	Parameter	Performance index
Working pressure/MPa	30	Validated temperature/°C	-40~80
Unsteady pressure/MPa	≥0.1	In orbit life/year	>17 lives
External leakage rate/(Pa·m ³ ·s ⁻¹)	≤1×10 ⁻⁷	Burst pressure/MPa	≥60
Test pressure/MPa	45	Fatigue life/times	>360

1.2 高低温极限摸底试验方法

1.2.1 技术方案

由于高低温主要对复合材料具有影响作用,故气瓶适应性验证仅与复合层材料在高低温下的强度趋势有关,在-40~80 °C 温度范围气瓶已成功通过了热真空、热循环带气压试验,验证了气瓶复合层具备承压能力,故通过相同复合材料拉伸试样的性能检测数据摸底气瓶所具备的温度适应能力极限:以气瓶经过承压能力考核的温度所对应的试样拉伸性能检测数据作为判据,拓宽温度上下限范围,测试试样在更广温度范围内的高低温拉伸性能,从而获取对应气瓶可适应的高低温极限,并验证采用拉伸试样拉伸强度变化趋势分析替代气瓶承压能力验证的方案是否具有一定的等效性。另外,高压气瓶具有一定特殊性,直接采用带气压气瓶在未知温度开展试验考核存在较大安全风险,采用拉伸试样开展未知温度下的强度考核能够有效降低风险。

采用与气瓶相同材料的拉伸试样(缠绕角 0° 和 90°)替代气瓶开展高低温极限摸底试验^[12-13],其中 0° 试样(缠绕角为 0°)的长和宽分别为230 mm和 (15 ± 0.5) mm, 90° 试样(缠绕角为 90°)的长和宽分别为170 mm和 (25 ± 0.5) mm,两种试样的厚度均为 (3 ± 0.1) mm,使用的加强片厚度为1.5 mm,试样制备方法、试样其他尺寸及高低温环境下的拉伸性能测试方法均参照GB/T 3354-2014。在高低温拉伸试验中,按照标准每组测试样本设置为6个,以此确保检测数据的一致性 & 准确性。试样拉伸试验时的温度为室温($20\sim 30^\circ\text{C}$),树脂方向 90° 的加载速率为2 mm/min,纤维方向 0° 的加载速度为5 mm/min。

1.2.2 试验要求

- (1)试验温度:测试温度包括 $-70, -50, -30, -10, 30, 60, 80, 100, 120, 140^\circ\text{C}$;
- (2)变温速率:试验中的温度平均升降速率为 $1\sim 5^\circ\text{C}/\text{min}$;
- (3)测温点设置:试样上设置两个温度传感器,一个用于温度控制,另一个用于响应测量;
- (4)高低温保持时间:不低于4 h。

1.3 高低温极限摸底试验可靠性评估方法

由于高低温极限摸底试验采用纤维增强树脂基复合材料,故在进行可靠性评估时,需将气瓶受力转换成纤维增强材料受力,从而用复合材料单向板拉伸强度代替气瓶强度进行计算。气瓶表面纵向受力与纤维增强材料试样拉伸受力的方向和大小一致,根据气瓶工作受力计算得到纤维材料工作时承受的轴向应力 σ_w 作为拉伸性能测试数据的下限,如图2所示。根据公式(1)可计算得到 σ_w 。

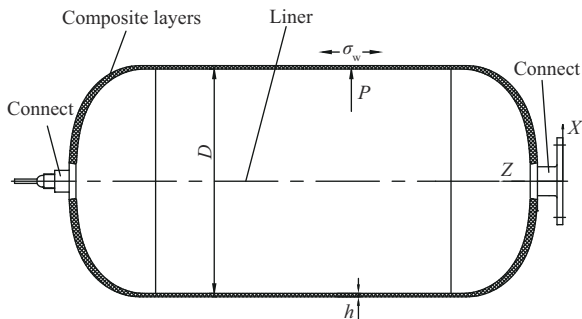


图2 复合材料高压气瓶受力示意图
Fig. 2 Schematic diagram of composite high-pressure vessel force

$$\sigma_w = \frac{PD}{4h} \quad (1)$$

式中: σ_w 为轴向应力,单位MPa; P 为瓶内压力,单位MPa; D 为气瓶的直径,单位mm; h 为气瓶的壁

厚,单位mm。

高低温极限摸底试验的试样拉伸强度(应力)均值 $\bar{\sigma}_L$ 按公式(2)计算,试样均方差 S_L 按公式(3)计算。

$$\bar{\sigma}_L = \frac{1}{n_L} \sum_{i=1}^{n_L} \sigma_{iL} \quad (2)$$

$$S_L = \sqrt{\frac{1}{n_L - 1} \sum_{i=1}^{n_L} (\sigma_{iL} - \bar{\sigma}_L)^2} \quad (3)$$

可靠度评估按公式(4)和公式(5)计算。

$$K_L = \frac{\bar{\sigma}_L - \sigma_w}{S_L} \quad (4)$$

$$\hat{R}_L = \Phi(K_L) \quad (5)$$

式中: σ_{iL} 为第 i 个试样的应力值; n_L 为试样数量; S_L 为试样均方差; K_L 为可靠度系数; $\Phi(K_L)$ 表示标准正态分布的概率密度函数,用于可靠度的查询; $\hat{R}_L$ 为可靠度。

2 结果与讨论

2.1 高低温循环对带压气瓶性质的影响分析

气瓶热试验考核包括热真空、热循环试验,试验中高低温对复合材料气瓶性质的影响存在一定规律,以已通过 $-40\sim 80^\circ\text{C}$ 热真空和热循环试验验证的气瓶为测试对象,分别在气瓶金属端面与复合层中部粘贴温度传感器,测量气瓶升压过程中的瓶体温度,结果如图3所示。由图3可知,复合材料气瓶加压过程中,热真空与热循环下瓶体温度随瓶内压力升高的变化不同,在同一环境温度相同压力下,金属内衬温度高于复合层,说明金属内衬升温更快,金属内衬的热传导速率更快,热真空试验下的金属内衬与复合层升温速率要低于热循环试验,热真空试验的真空度不高于 1.3×10^{-3} Pa,说明在真空环境下热传导速率更慢。

图4为气瓶在热真空环境下真空度随循环时间

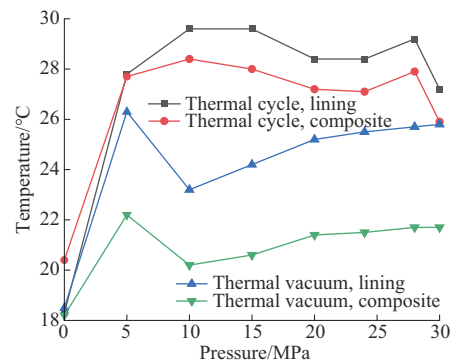


图3 气瓶瓶体温度随瓶内压力升高的变化规律

Fig. 3 Variation laws of vessel body temperature with the increase of pressure inside vessel

变化规律,共进行了6.5次高低温循环($-30\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$),图4中的红线表示该类气瓶进行热真空试验考核时,真空度应低于红线所对应的值。图4曲线说明了在热真空环境下进行高低温循环时,气瓶在高温端的真空度较大,真空度接近 $1.3\times 10^{-3}\text{ Pa}$,在低温端较小,真空度递减至 $2\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 。真空度会受到环境温度的影响,随温度循环次数增多,高温端真空度变化较小,低温端真空度逐渐降低。

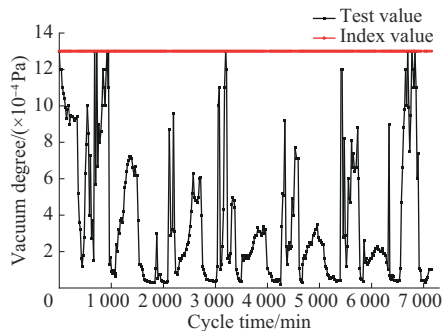


图4 气瓶真空度随循环时间变化规律

Fig. 4 Variation laws of vessel vacuum degree with cycle time

图5为瓶内加压(压力为30 MPa)恒定后气瓶金属端面瓶体温度随循环时间的变化规律,在热循环下每500 min进行一次温度循环(前250 min升温至 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$,后250 min降温至 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$),共进行18.5次高低温循环,最后的0.5次循环需要先升至高温再降至常温,以防出现冷凝水。由图5曲线可知,气瓶内衬温度在热循环试验时变化较为稳定,因此在复合材料气瓶热试验时往往以内衬温度测点作为温度控制点,另外,对于复合气瓶应从高温循环启动,可避免低温循环出现冷凝水对气瓶产生不利影响。

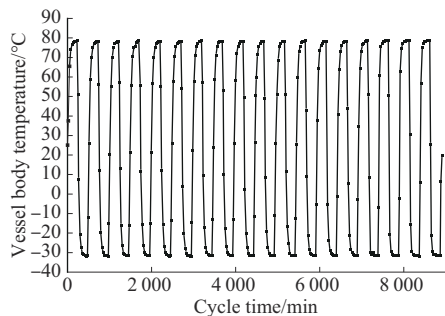


图5 气瓶瓶体温度随循环时间变化规律

Fig. 5 Variation laws of vessel body temperature with cycle time

图6为瓶内加压(压力为30 MPa)恒定后气瓶瓶内压力随循环时间变化规律,在热循环下每500 min进行一次温度循环(前250 min升温至 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$,后250 min降温至 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$),共进行18.5次温度循环,最后的0.5次循环需要先升至高温再降至常温,以防出

现冷凝水。由图6曲线可知,瓶内压力在热循环试验时变化稳定,瓶内压力随环境温度循环往复变化。

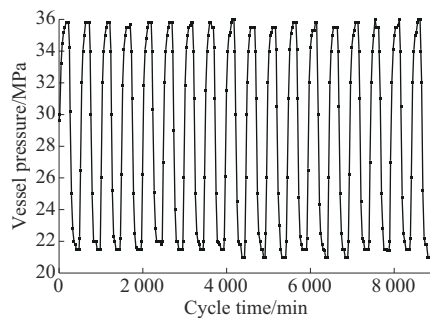


图6 气瓶瓶内压力随循环时间变化规律

Fig. 6 Variation laws of pressure inside vessel with cycle time

图7为气瓶高低温循环时瓶内压力/瓶体温度随时间变化规律。由图7曲线可知,气瓶在热循环试验时压力与温度随循环时间均呈规律性变化,压力与温度始终呈正比例关系,依此规律可通过理论计算实时获得气瓶在各温度下对应的压力,确保气瓶在设计压力范围内工作。以上内容介绍了复合材料气瓶在带压状态下开展高低温循环试验时所固有的规律,并通过图示方式给出了已通过热试验验证合格的气瓶内压、真空度、温度等参数的变化规律,从而为复合材料气瓶热设计与试验提供参考。

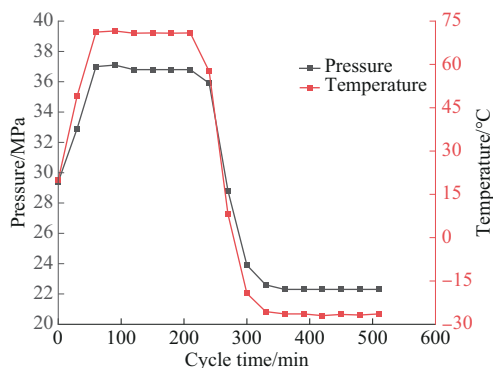


图7 温度循环时瓶内压力/瓶体温度随循环时间变化规律

Fig. 7 Variation laws of pressure inside vessel/vessel body temperature with cycle time during temperature cycling

2.2 高低温极限摸底试验结果与分析

随着对深空未知领域的深入探索,高压气瓶已验证的 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高低温环境已无法覆盖其全寿命领域应用,有必要拓宽温度影响研究,摸底功能失效的温度极限,对于带气压气瓶未经考核的温度范围,可以通过拉伸试样在不同温度下的性能检测数据开展极限温度的摸底,具体结果如图8和图9

所示。

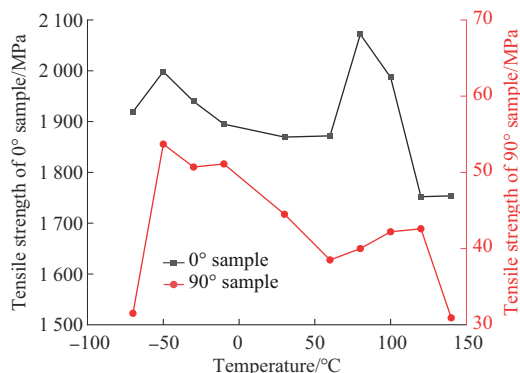


图8 不同温度下0°试样和90°试样的拉伸强度

Fig. 8 Tension strength of 0° and 90° specimens at different temperatures

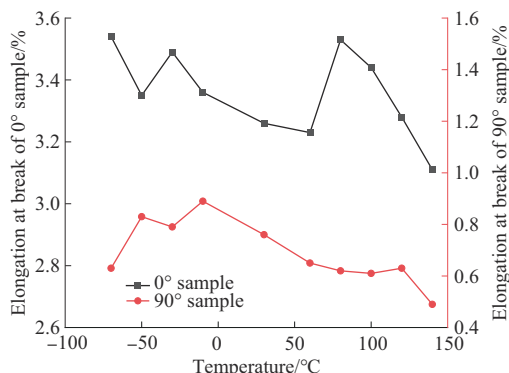


图9 不同温度下0°试样和90°试样的断裂伸长率

Fig. 9 Elongation at break of 0° and 90° specimens at different temperatures

由图8可知,在-70~100℃范围内纤维方向0°试样拉伸强度随温度升高变化较小,且拉伸强度均优于通过气瓶热试验承载能力考核的60℃基准数据,在120℃和140℃时拉伸强度有明显下降,强度均值由1 871.9~2 071.6 MPa (-70~100℃)降低至1 752.1~1 753.8 MPa (120~140℃)。从分析可知,由碳纤维与环氧树脂缠绕的气瓶在-70~100℃范围内,性能无衰减,超出该温度范围性能会下降。树脂方向90°试样拉伸强度随温度升高在-50~120℃

范围有略微变化,且低温段的拉伸强度略高于高温段,但拉伸强度均高于通过气瓶热试验承载能力考核的60℃基准数据,在-70℃和140℃拉伸强度有明显下降,在高温端强度均值由38.5~42.6 MPa (60~120℃)降低至30.9 MPa (140℃),在低温端强度均值由50.7~53.7 MPa (-50~-10℃)降低至31.5 MPa (-70℃),说明环氧树脂承受拉力的能力远小于纤维,并且试样在低于-50℃或高于120℃时拉伸强度有明显衰减。综合分析,可确定纤维方向及树脂方向下试样拉伸强度在-50~100℃范围内随温度增加的变化均较小,即可推出在-50~100℃温度范围内温度对气瓶性能的影响小,该范围以外的极高温和极低温对气瓶承载能力有一定影响,由此可知,该类气瓶在高低温环境下稳定运行的适用范围为-50~100℃,超出该温度范围,则容易出现承压能力衰减^[14-16]。

由图9还可以看出,纤维方向0°试样断裂伸长率随温度升高有不同程度变化,除140℃断裂伸长率低于60℃基准数据外,断裂伸长率基本高于通过气瓶热试验承载能力考核的60℃基准数据。树脂方向90°试样断裂伸长率随温度升高在-70~120℃范围内变化较小,且与通过气瓶热试验承载能力考核的60℃基准数据基本一致,在140℃断裂伸长率有所下降。综合分析,可推定试样断裂伸长率与气瓶性能不存在对应的规律关系,即气瓶性能不受断裂伸长率的影响。

2.3 高低温极限摸底试验可靠性评估结果与分析

通过该类复合材料气瓶受高低温影响后的可靠度计算结果以进一步说明采用拉伸试样间接验证气瓶抗环境适应能力具有一定的等效性,利用0°试样各高低温下的拉伸强度数据(均值见表2)作为示例进行可靠性评估(每个温度下测试的试样数量为6个)。

表2 各温度下试样拉伸强度均值及标准偏差和分散系数

Tab. 2 Tensile strength mean value, standard deviation and coefficient of dispersion of samples at different temperature

Items	Temperature/°C									
	-70	-50	-30	-10	60	80	100	120	140	30
Tensile strength mean value/MPa	1 919.3	1 998.3	1 939.7	1 894.9	1 871.9	2 071.6	1 987.1	1 752.1	1 753.8	1 869.5
Standard deviation	124.82	111.31	103.81	129.85	50.57	153.24	136.52	91.17	36.92	86.84
Coefficient of dispersion	0.065 0	0.055 7	0.053 5	0.068 5	0.027 0	0.074	0.069 11	0.052 4	0.021	0.046

从表2中各个温度下的试样中选取54个有效试样($n_L = 54$),根据公式(2)和公式(3),得到试样拉伸强度(应力)均值 $\bar{\sigma}_L$ 与均方差 S_L 计算结果分别为

1 847.12 MPa 和 166.02 MPa,根据公式(4)和公式(5),得到可靠度评估计算结果 $K_L=6.16$, $\hat{R}_L=0.999\ 999\ 999\ 6$ 。

由计算结果可知,通过拉伸试样高低温性能检测数据验证了气瓶在 $-50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高低温环境下的承压能力及热环境适应能力具有较高的可靠性,可靠度远大于气瓶产品0.999的可靠度要求,进一步证明了在研究高低温对气瓶性能的影响时采用拉伸试样高低温拉伸强度数据的替代方式具有较高的等效性。另外,通过可靠度也证明了气瓶高低温极限摸底试验的验证方式对气瓶承压安全性验证具有较高参考价值。

3 结论

(1)碳纤维/环氧树脂复合材料高压气瓶在 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围具备高压承载能力,已成功通过了热真空、热循环验证。然后拓宽气瓶应用温度范围,进行高低温极限摸底试验,通过对同材料同工艺制备的拉伸试样开展拉伸性能参数检测,获取试样在更宽温度范围($-70\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$)内的高低温拉伸强度数据,然后通过可靠性评估方法证明了拉伸试样的拉伸强度能够等效映射气瓶性能,从而获取了气瓶高低温极限适应能力的相关数据。

(2)通过高低温极限摸底试验,获得气瓶在高压服役时可适应的极限温度摸底数据及特性,充分考核了高低温对碳纤维、环氧树脂性能衰减影响。由摸底数据可知,在 $-50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,试样拉伸强度变化较小,说明在该环境下强度性能无衰减。同时, $-50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围以外的极高温和极低温对气瓶承载能力有一定的影响,极低温下,纤维强度变化较小,树脂强度有明显衰减,说明极低温使树脂有变脆的趋势;极高温下,纤维强度有下降趋势,树脂强度也有明显衰减,说明极高温对纤维和树脂均有衰减影响。在性能基本无衰减温度范围内,气瓶可以高可靠应用,对于超出温度范围之外的应用,应根据实际任务需求,通过合理的设计,使气瓶能够在更宽的温度范围内得到应用。

(3)提出了高低温极限摸底试验的可靠性评估方法,发现试验的可靠度远大于气瓶产品0.999的可靠度要求,证明了采用拉伸试样替代气瓶进行高低温极限摸底试验具有一定的等效性,降低了直接采用带压气瓶进行试验的风险。

参考文献

- [1] 付丽,石宇萌,赵峥嵘,等.美国最新研制的无内衬全复合材料低温压力容器[J].航天制造技术,2020(6):57-65.
FU Li, SHI Yumeng, ZHAO Zhengrong, et al. New linerless, all-composite cryogenic pressure vessels developed in the USA[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2020(6):57-65.
- [2] 杨强,刘洪新,何端鹏,等.高导热沥青基碳纤维复合材料在航天器中的应用现状及展望[J].材料导报,2024,38(1):212-219.
YANG Qiang, LIU Hongxin, HE Ruipeng, et al. Application status and prospect of high thermal conductivity pitch-based carbon fiber composites in spacecraft[J]. Materials Reports, 2024, 38(1): 212-219.
- [3] 张世杰,王汝敏,廖英强.不同纺丝工艺T800碳纤维及其缠绕压力容器性能差异性研究[J].新型炭材料,2019,34(6):578-586.
ZHANG Shijie, WANG Rumin, LIAO Yingqiang. A comparative study of two kinds of T800 carbon fibers produced by different spinning methods for the production of filament-wound pressure vessels[J]. New Carbon Materials, 2019, 34(6):578-586.
- [4] 陈伟明,王成忠,周同悦,等.高性能T800碳纤维复合材料树脂基体[J].复合材料学报,2006,23(4):29-35.
CHEN Weiming, WANG Chengzhong, ZHOU Tongyue, et al. High-performance resin matrix for T800 carbon fiber composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(4):29-35.
- [5] 刘勇,潘子韬,周宏根,等.纤维增强复合材料钻削热研究进展与展望[J].复合材料学报,2023,40(8):4 416-4 439.
LIU Yong, PAN Zitao, ZHOU Honggen, et al. Review and prospect of drilling heat for fiber reinforced composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8):4 416-4 439.
- [6] 熊健,李志彬,刘惠彬,等.航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展[J].复合材料学报,2021,38(6):1 629-1 650.
XIONG Jian, LI Zhibin, LIU Huibin, et al. Advances in aerospace lightweight composite shell structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6):1 629-1 650.
- [7] 于斌,黄诚,杨文博,等.航天器用大型复合材料贮箱研制技术[J].压力容器,2022,39(9):77-86.
YU Bin, HUANG Cheng, YANG Wenbo, et al. Development technique of large-scale composite tank for space-vehicle[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(9):77-86.
- [8] 王晓洁,梁国正,李辅安,等.T-1000碳纤维/环氧树脂基复合材料性能研究[J].材料科学与工艺,2005,13(5):540-543.
WANG Xiaojie, LIANG Guozheng, LI Fuan, et al. Study on the property of T-1000 carbon fiber/epoxy resin composite[J]. Materials Science and Technology, 2005, 13(5):540-543.
- [9] 李玉峰,靳庆臣,刘志栋.复合材料高压气瓶的碳纤维缠绕设计和ANSYS分析技术[J].推进技术,2013,34(7):968-976.
LI Yufeng, JIN Qingchen, LIU Zhidong. Filament-wound design and ANSYS analysis for composite material high-pressure vessel [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(7):968-976.
- [10] 林松,牛鸿庆,李文斌.聚酯亚胺纤维与碳纤维缠绕复合气瓶性能对比研究[J].材料科学与工艺,2018,26(6):23-29.
LIN Song, NIU Hongqing, LI Wenbin. Comparative study on performance of polyimide fiber and carbon fiber composite cylinders[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(6):23-29.
- [11] 张加俏,赵晓航,王朝,等.深冷高压储氢气瓶复合材料层低温

- 力学性能分析与优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(1):21–29.
- ZHANG Jiaqiao, ZHAO Xiaohang, WANG Chao, et al. Analysis and optimization of cryogenic mechanical properties of composite layer of cryo-compressed hydrogen storage vessel[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2023, 53(1):21–29.
- [12] 石建军, 任银银, 贾彬, 等. 高低温循环-湿度-荷载耦合作用对碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸性能的影响[J]. 航空材料学报, 2022, 42(6):97–106.
- SHI Jianjun, REN Yinyin, JIA Bin, et al. Coupling effect of high and low temperature cycle-humidity-load on tensile properties of carbon fiber/epoxy composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(6):97–106.
- [13] 李晖, 吕海宇, 邹泽煜, 等. 热环境下纤维增强复合材料圆柱壳非线性振动分析与验证[J]. 航空学报, 2022, 43(9):693–703.
- LI Hui, LYU Haiyu, ZOU Zeyu, et al. Analysis and verification of nonlinear vibrations of fiber-reinforced composite cylindrical shells in thermal environment[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2022, 43(9):693–703.
- [14] 王洪锐, 许光, 廖传军. 低温复合材料气瓶爆破压力的有限元分析与试验研究. 压力容器, 2016, 33(3):39–44.
- WANG Hongrui, XU Guang, LIAO Chuanjun. Finite element analyses and experimental study about bursting pressure of cryogenic composite overwrapped pressure vessels (COPV)[J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(3):39–44.
- [15] 侯红宇, 李彦斌, 陈强, 等. 力/热环境下复合材料薄壁结构的分离动力学分析[J]. 宇航学报, 2020, 41(11):1 385–1 392.
- HOU Hongyu, LI Yanbin, CHEN Qiang, et al. Separation dynamic analysis of thin-walled composite structure under thermal and static load[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(11): 1 385–1 392.
- [16] 南田田, 赵亮, 孟玲宇, 等. 湿-热-载荷共同作用下碳纤维增强环氧树脂基复合材料老化性能研究[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(1): 21–27.
- NAN Tiantian, ZHAO Liang, MENG Lingyu, et al. Study on the aging performances of carbon fiber reinforced plastic composite under hygrothermal environment and loading[J]. Fiber Composites, 2020, 37(1):21–27.