**doi**:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.11.001

专题报告

# 极端环境材料行为及其对压力容器设计的影响

郑津洋[1,2],孙　珊[1,2],高睿哲[1,2],陆群杰[1,2],李奇楠[1,2],花争立[1,2],邢百汇[1,2],马　凯[1,2]

(1.浙江大学特种装备研究所,杭州 310013;2.浙江省氢能储输技术与装备重点实验室,杭州 310013)

**摘　要:**随着储能、新材料等战略性新兴产业的蓬勃发展,以及氢能、深海、核聚变等未来产业的快速崛起,压力容器的应用领域不断拓展,迎来了新的发展机遇。这对压力容器的极端化提出了更高要求,也带来了新的技术挑战。在极端环境下,材料行为检测难度大、损伤机制复杂,导致极端压力容器在服役性能预测、主动调控与寿命评估方面面临巨大困难。本文以高压氢气、深冷和火灾场景3种极端环境为例,系统分析了极端环境对压力容器材料行为的影响规律和机制,并重点探讨了相关研究成果在高压储氢容器抗氢脆设计、基于材料深冷强化的深冷压力容器轻量化设计,以及车载高压氢气瓶耐火性能预测等方面的应用。

**关键词:**高压容器;极端环境;氢脆;深冷容器;高压氢气瓶;耐火性能

**中图分类号:**TH49;TH122;TG113.25　　**文献标志码:**A

# Materials behaviour in extreme environments and its implications for design of pressure vessels

ZHENG Jinyang[1,2],SUN Shan[1,2],GAO Ruizhe[1,2],LU Qunjie[1,2],LI Qinan[1,2],
HUA Zhengli[1,2],XING Baihui[1,2],MA Kai[1,2]

(1.Institute of Advanced Equipment,Zhejiang University,Hangzhou 310013,China;2.Zhejiang Key Laboratory of Hydrogen Energy Storage and Transportation Technology and Equipment,Hangzhou 310013,China)

**Abstract:**With the vigorous development of strategic emerging industries such as energy storage and new materials,as well as the rapid rise of future industries including hydrogen energy,deep-sea technologies,and nuclear fusion,the application scope of pressure vessels continues to expand,ushering in new development opportunities.This trend has placed higher demands on the extremity performance of pressure vessels and introduced new technical challenges.In extreme environments,the detection of material behavior becomes more difficult,and damage mechanisms grow increasingly complex,making it significantly challenging to predict service performance,achieve active control,and conduct life assessment of extreme pressure vessels.This paper takes three typical extreme conditions—high-pressure hydrogen,cryogenic temperatures,and fire scenarios—as examples to systematically analyze the mechanisms and patterns by which extreme environments affect the behavior of pressure vessel materials.It further focuses on the application of relevant research findings in several areas:hydrogen embrittlement-resistant design for high-pressure hydrogen storage vessels,lightweight design of cryogenic pressure vessels based on cryogenic strengthening of materials,and fire resistance performance prediction of onboard high-pressure hydrogen cylinders.

**Key words:**high pressure vessel;extreme environments;hydrogen embrittlement;cryogenic vessel;high pressure hydrogen cylinder;fire resistance

**收稿日期:**2025-09-20

**基金项目:**国家重点研发计划课题(2022YFB4003002)

## 0 引言

压力容器是物质转化、储存、换热、分离、输送等过程的关键装备，广泛应用于工业生产、人民生活、科学探索和国防军工等诸多领域，如氨合成塔、医用高压氧舱、物理质子成像实验容器、潜艇用高压气瓶等。在国民经济建设和社会发展中，压力容器发挥着极为重要的作用。

“华龙一号”核反应器、万米深潜器、高达138 m的丙烷脱氢装置、重量超3 000 t的加氢反应器以及压力达98 MPa的高压储氢容器等国之重器，不仅是关系到国家安全和国民经济命脉的基础性支撑装备，也是载人航天、西气东输、国和一号等大国工程中的核心装备，更是中国制造的靓丽名片。

近年来，随着储能、新材料等战略性新兴产业的蓬勃发展，以及氢能、深海、核聚变等未来产业的快速崛起，压力容器的应用领域持续扩展，迎来了新的发展机遇。例如，储氢高压容器、大型液氢压力容器、车用高压氢气瓶等新型应用场景不断涌现。与此同时，这些新场景也对压力容器极端化提出了更高要求，带来了新的技术挑战。

这种极端化主要体现在两个维度：一是在尺度方面，表现为超厚（如400 mm厚管板）、超高（如138 m塔式容器）、超大（如4 732 $m^3$液氢容器）、超重（单台容器重量超3 000 t）等特征；二是在环境方面，涵盖高压氢气（如140 MPa储氢容器）、极低温（如−253 ℃液氢容器）、火灾（如车用气瓶火烧）、超高温（如1 000 ℃熔岩储热罐）、强辐照（如高温高压核容器）、大温差（如月球储能装置昼夜温差超300 ℃）、强爆炸等苛刻条件。

经过多年的发展，我国压力容器行业取得了历史性成就，国际竞争力持续增强，部分产品的技术水平和市场占有率已跻身世界前列，我国现已成为压力容器制造大国。然而，面对极端环境的挑战，压力容器行业仍然面临着严峻的考验：一是极端环境会诱发材料相变、脆化等环境效应，导致其力学行为与常温常压下的表现存在显著差异，目前，极端环境的模拟及力学行为原位检测仍存在瓶颈，亟待突破；二是极端环境还可能引发新的损伤机制，或改变主导失效模式，并且通常多种损伤机制耦合并存，竞争演化。最后，由于材料在极端环境下行为数据的匮乏以及损伤机制的复杂性，极端压力容器在服役性能预测、主动调控与寿命评估方面面临巨大挑战。

鉴于此，本文以高压氢气、深冷和火灾场景这3种极端环境为例，系统分析了极端环境对压力容器材料行为的影响规律和机制，并重点探讨了相关研究成果在储氢高压容器抗氢脆设计、深冷强化压力容器轻量化设计，以及车载碳纤维全缠绕高压氢气瓶耐火性能预测等方面的应用。

## 1 储氢高压容器抗氢脆设计

氢能是全球能源绿色低碳转型的重要方向，也是实现碳中和目标的关键途径[1]。2024年，我国氢气产量超3 650万吨，位居全球第一[2]，储氢是氢能产业链的核心环节。然而，在氢气环境中，氢分子会向金属表面迁移并发生物理吸附，随后部分氢分子解离为氢原子并渗入金属内部。氢原子能够在晶格间隙中扩散，并在位错、空位、夹杂物等缺陷以及应力集中区域发生偏聚，进而引发材料塑性降低、韧性下降等氢脆现象[3-4]。因此，深入研究氢脆的机制与演化规律，是开发高性能储氢容器材料的基础前提，也是保障氢能装备安全服役的核心支撑。

### 1.1 氢环境氢脆原位检测

早期氢脆研究广泛采用高压高温气相预充氢和电化学预充氢检测技术。然而，这些方法存在氢侵入与载荷施加不同步的问题，与实际承载件中氢侵入与载荷同步的服役条件不一致，且难以模拟高应力梯度区（如裂纹尖端等）氢的动态侵入和偏聚行为，所得的材料力学性能数据难以直接用于储氢容器设计。

为解决上述问题，亟需发展能够真实模拟服役工况的高压氢气环境下的氢脆原位检测技术。但由于氢气分子尺寸小、易泄漏，高压密封难度大；同时，氢侵入材料易导致应变传感器信号漂移，使得高压氢环境下的应变测量面临挑战。

针对这些技术难题，浙江大学氢能装备团队突破了组合式高压氢气动密封、低溶氢应变传感等关键技术，于2015年成功研制出国际先进的140 MPa材料，高压氢脆原位检测装置[5]，使我国成为继日本、美国之后第三个掌握该等级高压氢脆试验能力的国家。

在该装置的基础上，浙江大学氢能装备团队牵头起草了GB/T 34542.1—2017《氢气储存输送系统 第1部分：通用要求》、GB/T 34542.2—2018《氢气储存输送系统 第2部分：金属材料与氢环境

相容性试验方法》和GB/T 34542.3—2018《氢气储存输送系统 第3部分：金属材料氢脆敏感度试验方法》，并构建了国产材料高压氢脆性能数据库。该数据库涵盖奥氏体不锈钢S30408，S31603，铬钼钢4130X，管线钢X52，X70，X80等材料，包含拉伸、疲劳、断裂韧度等关键性能数据，最高试验压力达140 MPa，为氢能高压储运装备的研发与安全评估提供了核心数据支撑。

### 1.2 氢环境氢脆的影响因素

传统氢脆研究主要关注“材料-环境-应力”三因素的交互作用。

#### 1.2.1 材料

化学成分、抗拉强度和微观组织显著影响氢脆敏感性。低合金钢的氢脆敏感性通常与抗拉强度成反比，一般而言，材料的强度越高，氢脆越严重[6]。奥氏体相比马氏体相和贝氏体相具有更优的氢相容性。合金元素对氢脆特性的影响复杂，需结合组织形态、应力状态等综合分析[7]。HU等[8]基于大量Cr-Mo钢高压氢疲劳裂纹扩展数据，结合机器学习方法，发现Mo元素可抑制裂纹扩展，而P，S元素则起促进作用。

#### 1.2.2 环境

依据Sievert定律，材料表面氢浓度与环境中氢分压的平方根成正比，氢分压升高，通常会加剧氢脆[6,9]。最新研究表明[10]，即使氢分压恒定，气体总压升高也可能促进氢脆。此外，气体杂质$CO_2$，$H_2S$会加速氢脆[11-12]，而CO，$O_2$则具有显著的抑制作用[13]。在天然气掺氢等实际场景中，需特别考虑气体杂质的影响。温度通过影响氢的吸附、解离、扩散与捕获行为等，间接影响氢脆过程[14-16]，但具体影响机制尚存争议[17-19]。

#### 1.2.3 应力

氢脆行为与构件所受应力水平密切相关。在循环载荷作用下，裂纹尖端氢浓度会随新裂纹面生成而动态变化。疲劳裂纹扩展初期，裂纹尖端氢浓度显著高于无裂纹表面；而在失稳扩展阶段，氢的供应速率可能低于裂纹扩展速率，导致氢浓度下降。在较低应力水平下氢脆不显著甚至没影响。研究表明，高压氢气主要影响低周疲劳寿命，而对高周疲劳影响较小[20-21]；在较低应力强度因子范围内，氢对疲劳裂纹扩展的促进效果也不明显[22]。

除上述三因素外，制造工艺（如成形、焊接、热处理等）也会影响材料的氢脆敏感性[23-25]。以S30408奥氏体型不锈钢为例[26]，冷成形过程会诱导α′马氏体相形成，加剧氢环境疲劳裂纹扩展；而通过温成形调控组织结构，可在提升材料强度的同时增强其抗氢脆能力。因此，应综合考虑“材料-环境-应力-制造”四因素对材料氢脆的耦合影响。

### 1.3 Cr-Mo钢在高压氢环境中的氢脆特性

#### 1.3.1 拉伸性能

研究表明[26-30]，高压氢气环境中Cr-Mo钢的断裂韧度明显下降，断后伸长率和断面收缩率有所下降，但屈服强度和抗拉强度保持基本不变。当抗拉强度超过950 MPa后，其断裂韧度急剧下降（见图1），因此，多项标准将Cr-Mo钢的抗拉强度上限设为950 MPa。

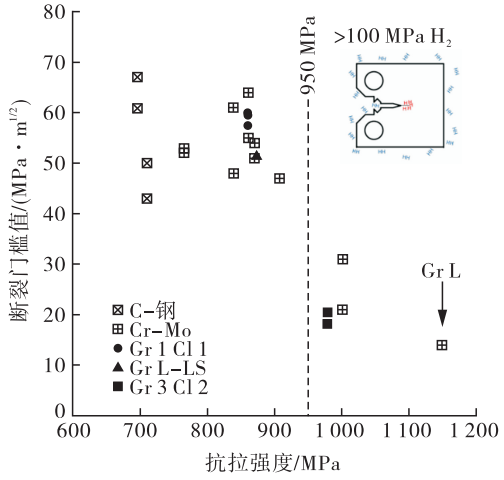


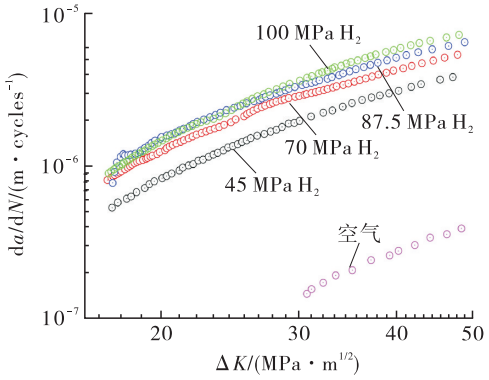

图1 Cr-Mo钢氢致断裂门槛值和抗拉强度的关系[27]

#### 1.3.2 疲劳性能

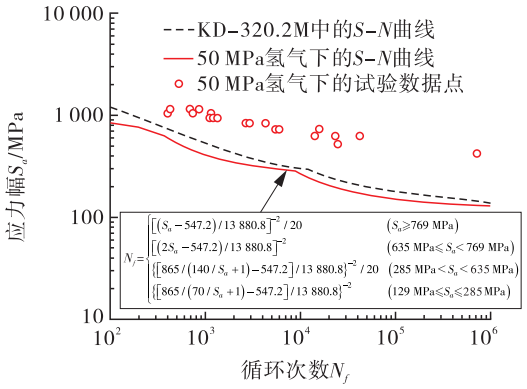
高压氢环境对Cr-Mo钢疲劳裂纹扩展速率（d$a$/d$N$）影响与应力强度因子变化范围有关[28-30]。图2（a）显示，当应力强度因子变化范围较大时，与空气环境相比，Cr-Mo钢在45，70，87.5，100 MPa高压氢环境中的d$a$/d$N$分别加快了10~15倍，14~20倍，20~25倍，20~25倍。尽管更高压力下d$a$/d$N$更快，但氢气压力的影响程度逐渐减小。此外，浙江大学氢能装备团队首次获得了50 MPa在高压氢环境下Cr-Mo钢的$S$-$N$疲劳曲线[31]，如图2（b）所示。氢对Cr-Mo钢疲劳寿命的影响具有应力幅阈值依赖性，高于该阈值时寿命显著缩短，低于时则影响可忽略。

欧盟联合研究中心、日本九州大学、美国圣地亚国家实验室及浙江大学等机构开展了含裂纹储氢容器/管道的氢气疲劳试验。研究表明，氢气对裂纹萌生阶段的影响较为有限，这是因为在裂纹

初期，裂纹尖端的应力强度因子较小，在较低应力水平下，氢对材料力学性能的影响不明显，甚至可以忽略不计。但当储氢容器/管道存在初始裂纹时，在氢气压力、残余应力等应力共同作用下，裂纹尖端处会产生应力集中，在较高应力水平下，裂纹尖端最大应力强度因子超过一定限值时，在氢气作用下，会加速裂纹扩展过程，从而使得含缺陷的容器/管道寿命下降。例如，在最高压力约为41 MPa的全幅循环载荷作用下，对于内表面裂纹深度超过壁厚6%的容器，以氢气为试验介质时，其疲劳寿命相较于使用油、氮气等惰性介质时下降超过90%。




（a）不同气体环境d$a$/d$N$–Δ$K$关系曲线[30]




（b）50 MPa氢环境下Cr-Mo钢$S$–$N$疲劳曲线[31]

图2 Cr-Mo钢疲劳性能

## 1.4 储氢高压容器抗氢脆设计

### 1.4.1 材料选择

材料的氢相容性是指其在氢气环境中保持其力学、物理及化学性能稳定的能力，通常通过慢应变速率拉伸、疲劳、疲劳裂纹扩展、断裂韧度、氢渗透等试验进行评价。若材料在氢环境中性能未发生退化或仅出现轻微变化，即可认为其具备良好的氢相容性。

在工程应用中，更关键的是构件在氢环境下满足设计要求的服役能力，即氢适用性。即使材料在氢中存在一定性能衰减，只要实际构件在服役过程中仍能满足设计指标，即可保障安全使用。目前，判断氢适用性主要采用两种方法：一是计算分析法，即通过试验获取材料在氢环境中的性能数据，结合构件实际应力状态进行服役性能仿真与安全性评估；二是试验验证法，即对零部件模拟实际工况进行试验，依据实测结果判定其是否满足设计要求。

具备优良氢相容性的材料往往强度较低，可能导致容器壁厚增大和成本上升，因此，更适用于示范验证阶段。进入推广应用阶段后，应更多基于氢适用性原则，优先选用较高强度的材料，以实现安全性与经济性的平衡。至规模化应用阶段，则需综合考虑强度、抗氢脆能力、成本及可靠性等因素，积极开发低成本、高强度且高抗氢脆的新型材料，并通过结构创新设计降低氢接触区域的应力集中，从而支撑氢能装备的大规模应用。

### 1.4.2 设计方法

目前，储氢高压容器抗氢脆设计主要采用两种方法。

第一种方法基于材料在空气环境中的力学性能进行设计。该方法选用氢相容性优良的材料，并严格规定储氢容器的结构形式以及材料的化学成分与力学性能指标。其基本假设为氢气环境对材料性能无影响，因此，可依据空气环境中的材料性能数据，参照常规设计或分析设计标准完成设计。该方法的主要优点为设计过程较为简便，但适用范围有限。

第二种方法则基于材料在氢气环境中的力学性能进行设计。该方法需考虑材料在氢环境中的抗拉强度、屈服强度、疲劳裂纹扩展速率、断裂韧度等关键性能参数，并系统评估包括塑性垮塌、脆性断裂、疲劳、局部过度应变及泄漏在内的多种失效模式，从而保证容器在整个设计寿命内具有足够的安全裕度。这一方法适用性广泛，但其有效性高度依赖于原位获取高压氢气环境中的材料力学性能数据。

浙江大学氢能装备团队构建了高压氢气环境材料性能数据库，首次获得了50 MPa高压氢气环境下Cr-Mo钢的疲劳设计曲线，提出了材料化学成分和力学性能的合格指标，并牵头起草了GB/T 44457—2024《加氢站用储氢压力容器》等系列国家标准，逐步建立了高压储氢容器抗氢脆设

计技术体系。相关成果已成功应用于钢带错绕式储氢容器、旋压无缝储氢容器、多层整体包扎式储氢容器和单层整锻式储氢容器等储氢高压容器的设计与制造，实现了工程化推广，为我国储氢高压容器的自主可控提供了关键核心技术支撑。经过20多年的发展，我国储氢高压容器技术整体已达到国际先进水平，并在部分关键性能指标上实现国际领先。

## 2 深冷压力容器轻量化设计

随着经济发展与能源结构转型，氧气、氮气、氢气、天然气等气体的需求持续增长。深冷压力容器作为储存和运输液氧、液氮、液氢、液化天然气等冷冻液化气体的关键装备，广泛应用于能源、冶金、交通、化工及国防等重要领域。目前，我国已成为全球深冷容器最大生产国，占据约40%的国际市场份额。

### 2.1 现有深冷容器设计方法

当前，深冷压力容器设计主要采用以下两种方法。

#### 2.1.1 常温力学性能设计法

基于材料在室温20 ℃下的力学性能进行设计，采用此方法的标准包括GB/T 150，GB/T 4732，ASME BPVC Ⅷ-1等。

#### 2.1.2 应变强化设计法

通过提高奥氏体型不锈钢的许用应力（如提高至273 MPa），并实施超压应变强化工艺，相关标准包括GB/T 18442.7，EN 13530-2等。

然而，上述设计方法在实际应用中存在明显局限。首先，设计冗余过大。以按GB/T 150设计的深冷容器为例，其室温爆破压力可达设计压力的5倍以上，导致材料严重浪费；其次，现有方法难以准确评估深冷环境下容器的疲劳与屈曲等失效行为，无法满足特种应用场景（如重载火箭、潜艇等）对液氧/液氢容器轻量化的迫切需求。

因此，亟需系统研究材料在深冷环境下的力学行为，建立基于深冷性能的设计准则，以推动深冷容器向轻量化、高性能方向发展。

### 2.2 深冷环境原位力学性能测试装置

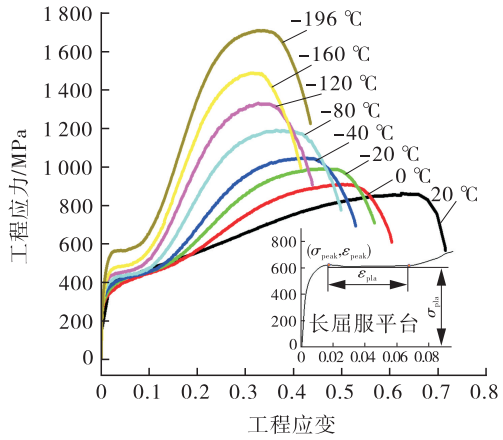
浙江大学氢能装备团队于2012年自主研制了深冷环境材料疲劳试验装置[32]，采用“无液冷却技术”，最低温度可达-253 ℃，覆盖液化天然气、液氮、液氧、液氢等典型介质温区。该装置已成功用于测试S30408，S30403，S31603，S31608等奥氏体型不锈钢在深冷条件下的力学行为[33-37]，并构建了材料深冷力学性能数据库，为材料选型与设计优化提供了关键数据支撑。

### 2.3 深冷环境奥氏体型不锈钢力学行为

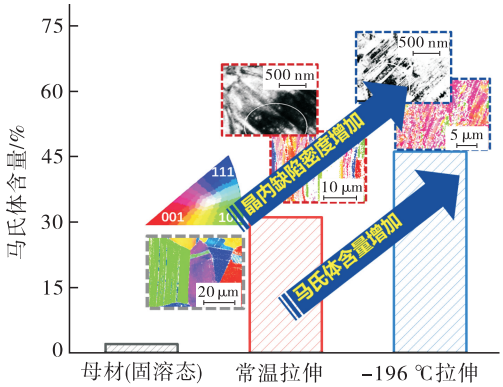
#### 2.3.1 拉伸性能

以深冷容器典型用材S30408奥氏体型不锈钢为例，与室温条件相比，其在深冷环境下的拉伸性能表现出如下特征[33]（见图3（a））：出现应变范围约为2%~7.2%的长屈服平台；屈服强度和抗拉强度显著提高，应变硬化指数提高至0.6~0.7（室温下约0.5），弹性模量小幅上升（增幅小于10%）。

随温度降至-160，-196 ℃乃至-253 ℃，S30408奥氏体型不锈钢的抗拉强度增至常温的2倍以上，而断后伸长率仍保持在30%以上。从微观角度分析（见图3（b）），深冷促进了应变诱导马氏体相变、位错密度增加及剪切带的发展，从而导致显著的深冷强化。




（a）深冷环境下奥氏体不锈钢S30408拉伸性能[35]




（b）深冷强化机制

图3 S30408奥氏体不锈钢深冷强化曲线及微观机制示意图

为支撑工程设计与安全评估，需建立能够准确描述材料在深冷环境下力学响应的本构模型。传统ASME模型和Ludwigson模型在应变0.02~0.2区间高估了应力，预测误差最高达53.3%。DING等[33]在Ludwigson模型中引入马氏体相变演化项，提出新本构模型（见式1），可更精确表征深冷环境下倒“S”形应力–应变响应。

$$\sigma_t = K_1\varepsilon^{n_1} + \exp(K_2 + n_2\varepsilon) - K_3 n_3 \beta \times (\varepsilon - \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon)^{n_3 - 1} \exp\left[-\beta(\varepsilon - \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon)^{n_3}\right] \quad (1)$$

式中，$\sigma_t$为真实应力；$K_1$为强度系数；$K_2$为Ludwigson修正强度系数；$K_3$为马氏体相修正系数；$\varepsilon$为真实塑性应变；$\varepsilon_0$为临界应变；$\Delta\varepsilon$为附加应变系数；$n_1$为应变强化指数；$n_2$为Ludwigson修正指数；$n_3$为马氏体形核指数；$\beta$为奥氏体相稳定性系数。

### 2.3.2 疲劳性能

研究表明，深冷环境对疲劳寿命的影响与应力幅密切相关：当应力幅超过阈值时，寿命与常温下相比显著缩短；而低于阈值时，寿命延长[37]。目前，中国GB/T 4732、美国ASME BPVC Ⅷ-2、欧盟EN 13445等标准中的疲劳设计曲线均未充分考虑深冷环境对疲劳的影响。中国和美国标准仅规定了疲劳设计曲线的最高适用温度。欧盟标准允许疲劳设计曲线用于零度以下容器的疲劳设计。但这一规定值得商榷，在高应变区，现行标准给出的疲劳曲线与基于深冷环境下原位测试得出的疲劳设计曲线存在交叉，直接采用标准设计可能带来安全隐患。

## 2.4 深冷压力容器轻量化设计技术

与高温容器依赖材料高温性能、常温容器依赖常温性能的设计理念一致，深冷容器的设计也应基于材料在深冷环境下的力学性能（如拉伸强度、疲劳寿命、断裂韧性等），全面评估脆性断裂、塑性垮塌、疲劳、局部过度应变、泄漏与屈曲等失效模式，以实现高性能、轻量化和低成本的协同优化。在疲劳评定中，应采用深冷环境下奥氏体型不锈钢的疲劳设计曲线，以提升评估的准确性与安全性。

基于这一理念，浙江大学氢能装备团队突破了“基于常温性能设计深冷容器”的传统思路，提出“基于深冷性能设计深冷容器”的新方法，充分挖掘材料低温承载潜力，结合数据库与仿真手段，实现对疲劳、屈曲等失效的精准预测和控制。

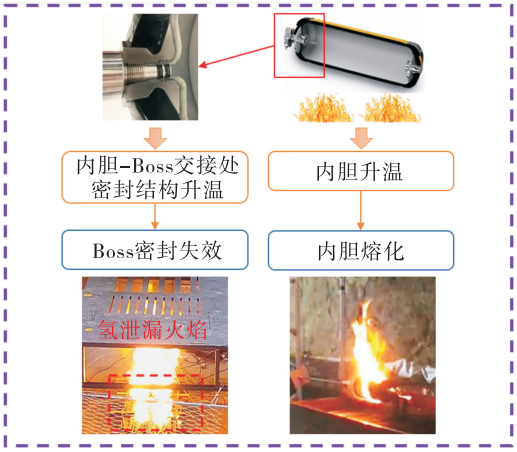
工程实践表明，该技术可使深冷容器的内容器实现25%以上的减重，显著降低材料成本与能源消耗，提升运载效率，为航天、舰船等高端装备的轻量化发展提供了重要技术支撑。

## 3 车载碳纤维全缠绕高压氢气瓶耐火性能预测

火灾是车辆常见事故类型之一，其典型发展过程为“先局部起火，后整体燃烧”。该类事故对车载碳纤维全缠绕高压氢气瓶构成严重威胁，一旦气瓶爆炸，所产生的冲击波、热辐射及碎片将对周边人员与设施造成灾难性后果。因此，系统研究氢能车辆在不同火灾场景下的热载荷特性，是准确评估车用高压氢气瓶耐火性能的基础与关键。




（a）Ⅲ/Ⅳ型瓶共有失效模式




（b）Ⅳ型瓶特有失效模式

图4 车载氢气瓶火烧失效模式

车载高压氢气瓶主要包括铝内胆碳纤维全缠绕气瓶（Ⅲ型）和塑料内胆碳纤维全缠绕气瓶（Ⅳ型）两类。其在火灾环境下的失效模式复杂多样（见图4）。为预防气瓶爆炸，氢气瓶均配备温度驱动式压力泄放装置（TPRD），当环境温度超过设定阈值时自动泄放氢气。然而，在实际火灾场景中，因局部温度不足或TPRD设计缺陷，该装置可能无法正常启动，从而导致气瓶超压爆炸，构成最危险的失效模式。

### 3.1 氢气瓶耐火极限试验研究

浙江大学联合大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司及大连理工大学，在国内首次开展了无TPRD保护的70 MPa Ⅲ型与Ⅳ型氢气瓶室内耐火极限试验。通过模拟实际火灾中“先局部、后整体”的热载荷过程，获取了从点火至失效全过程中的热-力响应数据。

48 L-70 MPa Ⅲ型瓶试验结果如图5[38]所示。点火后气瓶尾部表面温度迅速上升并趋于稳定，温度场呈现明显梯度分布：底部温度最高，侧部次之，顶部最低。在第1 327 s时气瓶发生爆炸，爆破压力为112.3 MPa，破裂位置位于瓶尾瓶肩区域。

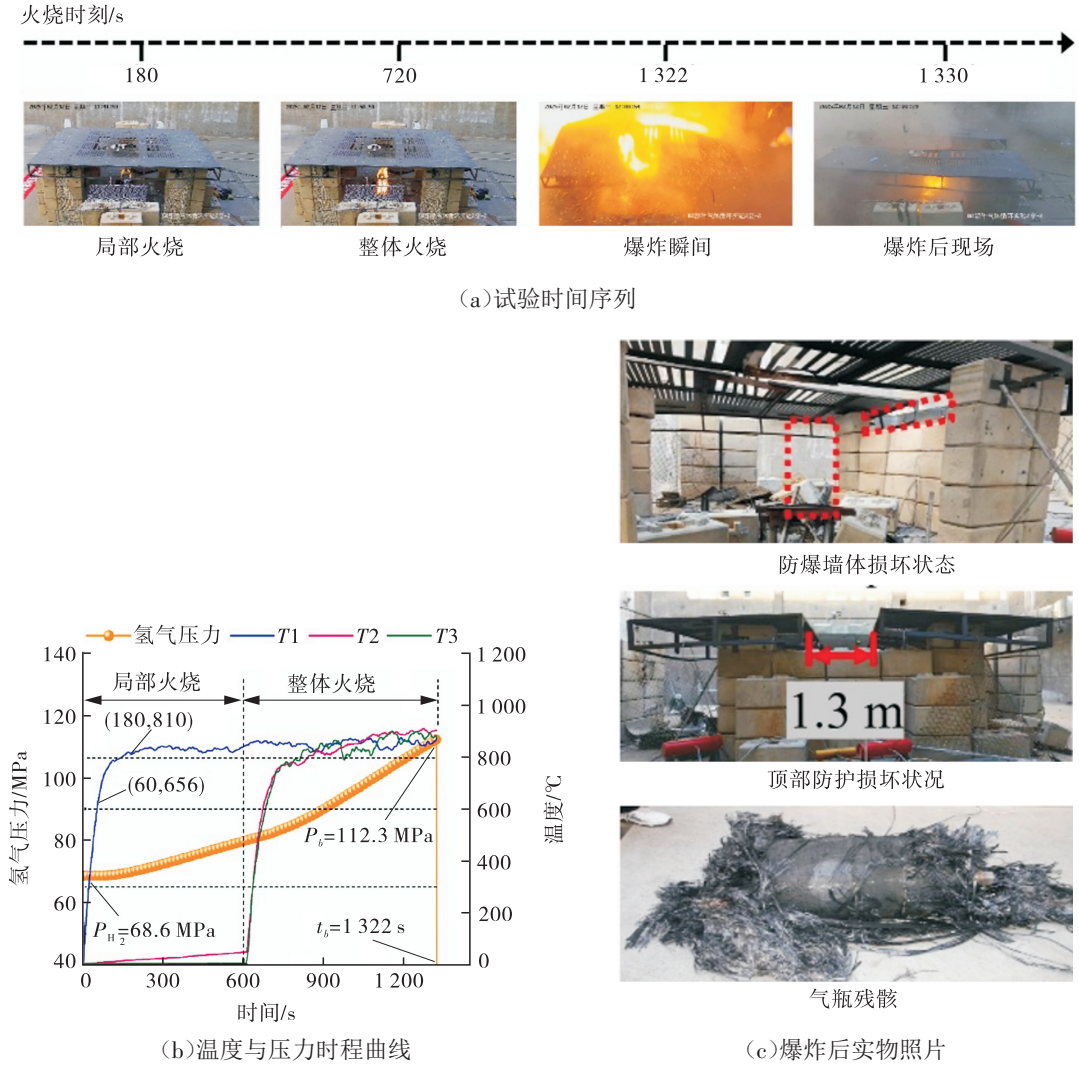



图5 Ⅲ型气耐火极限试验[38]

63.9 L-70 MPa Ⅳ型瓶试验结果如图6所示。结合压力曲线与影像记录发现，在653 s和1 204 s时，瓶尾及瓶口金属-塑料连接区先后发生泄漏。至1 403 s时，塑料内胆在瓶尾底部熔化挤出，气瓶最终通过该路径快速泄压。

### 3.2 氢气瓶耐火极限预测方法

复合材料氢气瓶的耐火试验成本高、风险大，数值模拟成为研究其失效机制与影响因素的有效手段。然而，现有模拟方法普遍存在以下问题：燃烧与传热未完全耦合、封头区域变厚度结构简化

过度、热–力模型数据传递精度不足、复合材料损伤演化模型过于简化等，限制了其在失效机理分析中的适用性。

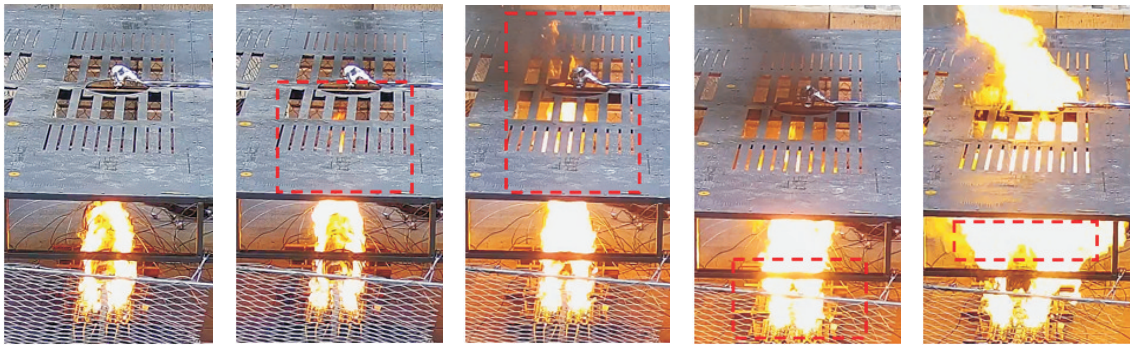



图6 Ⅳ型气耐火极限试验及其失效模式

为实现高精度预测，浙江大学氢能装备团队开发了一套“基于Fluent–Abaqus二次开发的复合材料氢气瓶热–流–固耦合渐进失效分析方法”[38]。该方法包括两个核心模块：火烧热响应CFD模型与爆破压力预测FEA模型，通过跨平台数据交互实现耦合分析。

（1）火烧热响应CFD模型。

基于Fluent平台，耦合燃烧、湍流与辐射传热，采用变密度–变比热容–定导热系数模型表征复合材料热解过程，结合GPGPU–CPU并行计算构建共轭传热模型。

（2）爆破压力预测FEA模型。

基于渐进失效理论，开发集成Hashin失效准则与非线弹性损伤演化的UMAT子程序，引入材料力学性能的温度依赖性，建立爆破压力有限元预测模型。

（3）跨平台数据交互。

构建精确表征封头变厚度/变角度几何特征的实体模型，提出基于域转换与节点插值法的CFD–FEA温度场传递策略，实现不同时刻温度场的高精度映射与渐进失效分析。

该方法可准确预测瓶内压力与瓶壁温度的时变行为，以及耐火时间、爆破压力与起爆位置。模拟结果与试验数据吻合良好，压力与温度响应误差较小，失效起始位置与试验爆破区域一致。耐火时间与爆破压力的预测相对误差分别为10.7%和12.1%，表明该方法具备工程适用性。

火灾中气瓶的失效可分为3个阶段。

（1）初始热解阶段。

火焰作用下外层树脂软化热解，形成烧焦体，碳纤维复合材料承载能力下降，加上热膨胀的影响，导致缠绕层外层应力降低；

（2）热解扩展阶段。

外层烧焦体开始热解，随着热解区域向厚度方向扩展，内部树脂软化分解，内层大角度缠绕层的力学性能迅速退化，外层应力水平逐渐上升；

（3）最终失效阶段。

外层烧焦体完全热解，纤维散丝导致外层材料承载能力大幅度下降。同时，内层大角度缠绕层的力学性能进一步退化，致使缠绕层外层的应力显著上升。最终，碳纤维发生热解，缠绕层外层丧失承载能力，气瓶结构失效爆炸。

### 3.3 气瓶设计方法展望

研究建立的预测方法可在设计阶段可靠评估气瓶耐火性能，实现主动安全调控，提高火烧试验通过率。当前气瓶研发仍以“试验主导、模拟辅助”为主，耐火、疲劳等关键性能严重依赖实物试验，即便通过试验亦难以量化安全裕度，导致研发周期长、成本高、轻量化水平受限。

未来应推动研发模式向“模拟主导、试验验证”转型。通过高精度多物理场仿真，可在设计阶段对耐火性能与疲劳寿命进行定量评估，支持多工况性能预测与方案优化，显著提升研发效率，降低成本，推动高压储氢气瓶向更轻、更安全的方向发展。

## 4 结语

（1）高压氢气、深冷、火灾等极端环境材料力学行为的研究，为高压储氢容器抗氢脆设计、深冷压力容器轻量化设计、车载氢气瓶耐火性能预测提供了关键技术支撑，推动了压力容器设计技术进步。

（2）揭示极端环境材料行为机制和规律，建立准确、完整的性能数据库，为实现极端压力容器高安全、轻量化、低成本协同优化的核心基础之一。

（3）为满足氢能、储能、深空、深海等国家战略需求，需布局超高压超高温、超高压深冷、万米深海等极端环境材料基础研究平台，攻克基于极端环境材料性能和失效模式的设计制造技术，引领极端压力容器高质量发展。

## 参考文献：


[1] HUA Z L，GAO R Z，XING B H，et al.State-of-the-art and knowledge gaps in gaseous hydrogen pipelines：From the perspective of materials，design，and integrity management [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A，2025，26(2)：87-108.

[2] 国家能源局能源节约和科技装备司，国能氢创科技有限责任公司．中国氢能发展报告(2025)[R]．北京：人民日报出版社，2025.

[3] YU P，CUI Y G，ZHU G Z，et al.The key role played by dislocation core radius and energy in hydrogen interaction with dislocations [J]. Acta Materialia，2020，185：518-527.

[4] SUN B H，ZHAO H，DONG X Z，et al. Current challenges in the utilization of hydrogen energy-A focused review on the issue of hydrogen-induced damage and embrittlement [J]. Advances in Applied Energy，2024，14：100168.

[5] 郑津洋，周池楼，顾超华，等．高压氢气环境材料耐久性试验装置的研究[J]．太阳能学报，2015(5)：1073-1080.
ZHENG J Y，ZHOU C L，GU C H，et al.Research of materials testing apparatus in high-pressure hydrogen [J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2015 (5)：1073-1080.

[6] NANNINGA N E，LEVY Y S，DREXLER E S，et al. Comparison of hydrogen embrittlement in three pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen environments[J].Corrosion Science，2012，59：1-9.

[7] GROBNER P J，SPONSELLER D L，DIESBURG D E. Effect of molybdenum content on the sulfide stress cracking resistance of AISI 4130-type steel with 0.035%Cb[J].Corrosion，1979，35(6)：240-250.

[8] HU J C，MA K，ZHANG Z Q，et al. Machine learning-based prediction of hydrogen-assisted fatigue crack growth rate in Cr-Mo steel [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2025，122：1-11.

[9] SHANG J，CHEN W F，ZHENG J Y，et al.Enhanced hydrogen embrittlement of low-carbon steel to natural gas/hydrogen mixtures [J]. Scripta Materialia，2020，189：67-71.

[10] SHANG J，HUA Z L，XING B H，et al. Enhanced hydrogen embrittlement of steel by the premature hydrogen dissociation with the increasing inert gas pressure in hydrogen-containing mixtures [J]. Acta Materialia，2023，259：119279.

[11] ZHOU C S，HE Y M，JIANG J H，et al. Hydrogen uptake induced by $CO_2$ enhances hydrogen embrittlement of iron in hydrogen blended natural gas [J].Corrosion Science，2022，207：110594.

[12] WEI H T，SHEN C T，XU M，et al.Coupling effect of $H_2S$ and $H_2$ on the fracture mechanical properties of X80 pipeline steel：Experiment vs DFT[J]. Corrosion Science，2025，254：113056.

[13] XING B H，GAO R Z，WEI H T，et al.Co-adsorption of $H_2$+nCO+m$O_2$ on α-Fe (110)：Effect on hydrogen adsorption，dissociation and diffusion[J].International Journal of Hydrogen Energy，2024，54：729-739.

[14] GAO R Z，XING B H，YANG C，et al.Synergic effects of temperature and pressure on the hydrogen diffusion and dissolution behaviour of X80 pipeline steel [J]. Corrosion Science，2024，240：112468.

[15] BODA A，ALI S M. First principles DFT analysis on the diffusion kinetics of hydrogen isotopes through bcc iron (Fe)：Role of temperature and surface coverage [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2022，47(73)：31481-31498.

[16] XING X，PANG Z W，ZHANG H，et al. Study of temperature effect on hydrogen embrittlement in X70 pipeline steel [J]. Corrosion Science，2024，230：111939.

[17] OGAWA Y，UMAKOSHI K，NAKAMURA M，et al. Hydrogen-assisted，intergranular，fatigue crack-growth in ferritic iron：Influences of hydrogen-gas pressure and temperature variation[J]. International Journal of Fatigue，2020，140：105806.

[18] ZHOU J J，CHENG H J，YAO N，et al. Temperature dependence of hydrogen embrittlement behavior in a medium-entropy alloy[J]. Acta Materialia，2025，298：121396.

[19] CHOI Y H，LEE J H，KIM S M，et al. Temperature-dependent hydrogen embrittlement of austenitic stainless steel on phase transformation [J]. Metals，2023，13(1)：35.

[20] AN T，PENG H T，BAI P P，et al. Influence of hydrogen pressure on fatigue properties of X80 pipeline steel [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2017，42(23)：15669-15678.

[21] GILGERT J,CAPELLE J,PLUVINAGE G.Hydrogen effect on fatigue and fracture of pipe steels [C]// International Conference on Hydrogen Safety. Hydrogen Knowledge Centre,2009.

[22] DREXLER E S,SLIFKA A J,AMARO R L,et al. Fatigue crack growth rates of API X70 pipeline steel in a pressurized hydrogen gas environment[J].Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014,37(5):517-525.

[23] CHEN X Y,ZHOU C S,ZHENG J Y,et al.Effects of α′ martensite and deformation twin on hydrogen-assisted fatigue crack growth in cold/warm-rolled type 304 stainless steel [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2018,43(6):3342-3352.

[24] RONEVICH J A,SONG E J,FENG Z L,et al.Fatigue crack growth rates in high pressure hydrogen gas for multiple X100 pipeline welds accounting for crack location and residual stress [J]. Engineering Fracture Mechanics,2020,228:106846.

[25] TAN L H,LI D D,YAN L C,et al.A novel heat treatment for improving the hydrogen embrittlement resistance of a precipitation-hardened martensitic stainless steel [J].Corrosion Science,2022,206:110530.

[26] WU Z T,ZHANG K Y,ZHOU C S,et al. Warm deformation enhances strength and inhibits hydrogen induced fatigue crack growth in metastable 304 and 316 austenitic stainless steels [J]. Materials Science and Engineering:A,2021,818:141415.

[27] MARCHI C S,BORTOT P,FELBAUM J,et al.Fatigue and fracture of high-hardenability steels for thick-walled hydrogen pressure vessels [C]// International Conference on Hydrogen Safety,2017.

[28] WANG R. Effects of hydrogen on the fracture toughness of a X70 pipeline steel [J]. Corrosion Science,2009,51(12):2803-2810.

[29] MYHRE A O,WAN D,SENDROWICZ A,et al. Hydrogen enhanced fatigue crack growth rates in a vintage and a modern X65 pipeline steel [J]. International Journal of Fatigue,2025,201:109186.

[30] ZHANG R M,MA K,PENG W Z,et al. Effects of hydrogen pressure on hydrogen-assisted fatigue crack growth of Cr-Mo steel [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2024,129:104202.

[31] ZHENG J Y,HU J C,MA K,et al.Study on low cycle fatigue properties of Cr-Mo steel in 50 MPa gaseous hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2024,84:1042-1049.

[32] 缪存坚.深冷疲劳试验装置和应变强化奥氏体不锈钢疲劳特性研究[D].杭州:浙江大学,2012.
MIAO C J. Fatigue testing machine for cryogenic environment and fatigure properties of cold stretched austenitic stainless steel [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2012.

[33] DING H M,WU Y Z,LU Q J,et al. A method for calculating low-temperature stress-strain curves of austenitic stainless steels[J].Cryogenics,2020,107: 103059.

[34] DING H M,WU Y Z,LU Q J,et al.A modified stress-strain relation for austenitic stainless steels at cryogenic temperatures [J]. Cryogenics, 2019, 101: 89-100.

[35] DING H M,WU Y Z,LU Q J,et al.Tensile properties and impact toughness of S30408 stainless steel and its welded joints at cryogenic temperatures [J]. Cryogenics,2018,92:50-59.

[36] LU Q J,ZHENG J Y,HUANG G,et al. Enhancing combined cryogenic mechanical properties of metastable austenitic stainless steel by warm forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021,291:117017.

[37] 郑津洋,王振宇,陆群杰,等.奥氏体不锈钢深冷容器疲劳设计曲线探讨[J].压力容器,2021,38(5): 26-34.
ZHENG J Y,WANG Z Y,LU Q J,et al.Discussion on design fatigue curves of austenitic stainless steels for cryogenic pressure vessels [J]. Pressure Vessel Technology,2021,38(5):26-34.

[38] LIU G L,LI B,TAO S W,et al.Full-scale explosion experiment and overpressure prediction method for 70 MPa hydrogen fuel cell vehicle tank under standard fire test [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2025,170:151194.

**作者简介**:郑津洋(1964),男,博士,教授,博士研究生导师,中国工程院院士,长期致力于储氢高压容器、深冷压力容器、柔性高压复合管、纤维缠绕承压设备等领域的研究,通信地址:310013 浙江省杭州市西湖区浙江大学玉泉校区特种装备研究所,E-mail:jyzh@zju.edu.cn。

**本文引用格式**:
郑津洋,孙珊,高睿哲,等.极端环境材料行为及其对压力容器设计的影响[J].压力容器,2025,42(11):1-10.
ZHENG Jinyang,SUN Shan,GAO Ruizhe,et al.Materials behaviour in extreme environments and its implications for design of pressure vessels [J].Pressure Vessel Technology,2025,42(11):1-10.