doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.09.005

设计计算

加氢策略对旋压无缝储氢容器疲劳寿命的影响分析

贾晓亮[1],陈志伟[1],袁卓伟[2],葛　颂[3]

(1.中国特种设备检测研究院 国家市场监管重点实验室(特种设备安全与节能),北京 100029;
2.中材科技(苏州)有限公司,江苏苏州 215000;3.空气化工产品(中国)投资有限公司,上海 201200)

摘　要:针对加氢策略对储氢容器疲劳寿命的影响,系统分析了内压循环载荷上限(P_{max})恒定及压力波动范围(ΔP)恒定两类常用加氢策略对旋压无缝储氢容器疲劳寿命的影响规律,并给出了可控制各级储氢容器实现同步疲劳寿命消耗的基于载荷比控制的加氢策略。结果表明,内压循环载荷工况及材料参数恒定,且径比相同时,储氢容器的疲劳评定结果基本一致;采用P_{max}恒定策略时,可最大限度地利用容器承载潜力,采用ΔP恒定策略可有效提高容器的疲劳寿命,但以上两种策略均无法实现容器组各级容器疲劳寿命同步消耗;采用载荷比控制策略,可使各级储氢容器运行时在一定程度上同步消耗疲劳寿命,进而支撑加氢站基于疲劳寿命消耗程度制定储氢容器维护及修理计划。该研究理清了不同加氢策略对储氢容器疲劳寿命的影响规律,为加氢站稳定运行及降低运维成本提供支撑。

关键词:储氢容器;加氢策略;疲劳寿命

中图分类号:TH49;TE966;O346.2　　**文献标志码:**A

Analysis of the influence of hydrogen fuelling strategies on the fatigue life of spin-formed seamless hydrogen storage vessels

JIA Xiaoliang[1],CHEN Zhiwei[1],YUAN Zhuowei[2],GE Song[3]

(1.Key Laboratory of Special Equipment Safety and Energy-saving for State Market Regulation,China Special Equipment Inspection & Research Institute,Beijing 100029,China;2.Sinoma Science & Technology(Suzhou),Suzhou 215000,China;
3.Air Products China,Shanghai 201200,China)

Abstract: To address the lack of systematic research on the influence of hydrogen fueling strategies on the fatigue life of hydrogen storage vessels, this study systematically analyzes the impact of two commonly used hydrogen fueling strategies, constant maximum internal pressure cycling load(P_{max}) and constant pressure fluctuation range(ΔP), on the fatigue life of spin formed seamless hydrogen storage vessels. Based on the analysis results, a hydrogen fueling strategy based on load ratio control is proposed to enable synchronous fatigue life consumption across different levels of hydrogen storage vessels in a system.The results show that when the internal pressure cycling load conditions, material parameters, and diameter ratio are constant, the fatigue assessment results of hydrogen storage vessels are essentially consistent.Using the P_{max} constant strategy maximizes the utilization of the vessel's load bearing potential, while the ΔP constant strategy effectively improves the vessel's fatigue life.However, neither of these two strategies can achieve synchronous fatigue life consumption across different vessel levels in a system.The load ratio control strategy enables a certain degree of synchronous fatigue life consumption during the operation of hydrogen storage vessels at different levels, thereby supporting hydrogen refueling stations in formulating maintenance and repair plans for hydrogen storage vessels based on the degree of fatigue life consumption.This study clarifies the influence patterns of different hydrogen fueling strategies on the fatigue life of hydrogen storage vessels and provides support for the stable operation and reduced maintenance costs of hydrogen refueling stations.

Key words:hydrogen storage vessel;hydrogen fueling strategy;fatigue life

收稿日期:2025-07-22　**修回日期:**2025-08-29

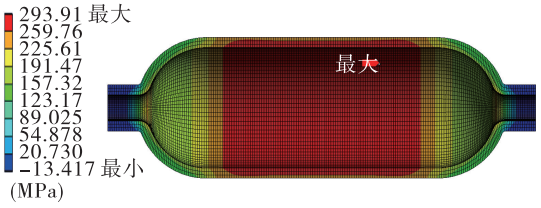
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB4003004)

0 引言

加氢站作为给氢燃料电池汽车充氢的重要氢能基础设施，目前正在全球广泛布局和建设[1-2]。截至2024年，我国累计建成507座加氢站，其中大部分是35 MPa级加氢站，少量为70 MPa级加氢站[3-4]。储氢容器是加氢站的核心设备之一，主要用于存储高压氢气及为车载储氢气瓶加氢，我国加氢站广泛采用的储氢容器为4130X钢制单层旋压无缝容器，其结构及应力分布特点如图1所示。在结构方面，加氢站用储氢容器通常为成组使用，各台容器两端固定在同一连接板上。在应力分布方面，储氢容器在设计时，要求最大应力位置出现在筒体内壁，从设计层面须避免最大应力出现在封头等易产生应力集中的位置。



(a)储氢容器组



(b)储氢容器应力分布

图1 加氢站用储氢容器结构型式

Fig.1 Structural types of hydrogen storage vessels for hydrogen refueling stations

35 MPa级加氢站通常配套设计压力不大于50 MPa的储氢容器，70 MPa级加氢站通常配套设计压力不大于99 MPa的储氢容器，容器中储存的氢气纯度高达99.999%。高压氢气环境易导致储氢容器材料出现塑性损减、疲劳裂纹扩展速率增大等现象。同时，储氢容器在工作时压力波动范围大(通常为20%~80%设计压力)、循环加卸载频繁(设计寿命内通常为10^3~10^5次)，因此，疲劳失效是储氢容器的主导失效模式[2]。

对于结构和材料相同的储氢容器，内压循环载荷工况是影响疲劳寿命的关键参数。加氢站往往基于单日设计加氢量、汽车加氢需求、氢气压缩机及加氢机的性能参数等，制定加氢工艺控制策略，以控制各级储氢容器的加氢顺序、压力波动范围、内压循环载荷极值等。因此，储氢容器的内压循环载荷工况主要取决于加氢工艺控制策略[5]，本文将其简称为“加氢策略”。加氢策略是影响加氢站用储氢容器疲劳寿命的关键因素之一，不同加氢站的加氢策略并不完全相同，如何将加氢策略的制定与储氢容器的疲劳设计相匹配，以最大限度开发储氢容器承载潜力，提高加氢站运行效益，已成为储氢容器设计制造及使用企业共同关注的问题。研究加氢策略对储氢容器疲劳寿命的影响，对指导储氢容器设计及加氢策略的制定具有重要的工程意义。目前，大量学者已分别对加氢策略及储氢容器疲劳评定方法进行了系统性研究，我国已发布GB/T 44457—2024《加氢站用储氢压力容器》，用于加氢站用储氢容器的设计，该标准中给出了储氢容器疲劳寿命的评定方法，但针对不同加氢策略对储氢容器疲劳寿命的影响规律尚缺乏系统性研究[6-11]。

本文针对加氢策略对储氢容器疲劳寿命的影响问题，基于断裂力学疲劳评定方法，以广泛用于35 MPa级加氢站的旋压无缝容器(设计压力50 MPa左右)为研究对象，分析当前35 MPa级加氢站各类典型加氢策略的特点，以及加氢站用储氢容器疲劳设计常用方法的应用和研究现状，同时，对典型旋压无缝储氢容器在不同加氢策略下开展疲劳评定，研究不同加氢策略对容器疲劳寿命的影响规律及在工程应用中需关注的技术关键点。通过开展研究，可进一步理清各加氢策略的工程适用性和应用关键，为加氢站稳定运行及降低运维成本提供技术支撑。

1 常用加氢策略

为氢燃料电池汽车加注氢气的基本原理：利用储氢容器和车载储氢瓶之间的压力差，驱动高压氢气由储氢容器向车载储氢瓶充装，直至达到目标加注质量或压力时加注完毕。

目前应用较多的加氢策略主要为二级加注模式和三级加注模式。二级加注模式为将储氢容器分为低压和高压两组，两组容器并联，在加注时依次给氢燃料电池汽车加注。三级加注模式是将储氢容器分成3组，分别为低压组、中压组和高压

组；在加注时，按顺序由低、中、高三级储氢容器逐级向车载储氢气瓶加注氢气，当车载储氢瓶内压力与某级储氢容器内压力差达到平衡时，切换至下一级储氢容器继续加氢，直至车载储氢瓶内氢气压力达到预设压力时加氢完毕。二级和三级加注模式的加注流程分别如图2、图3所示[6]。

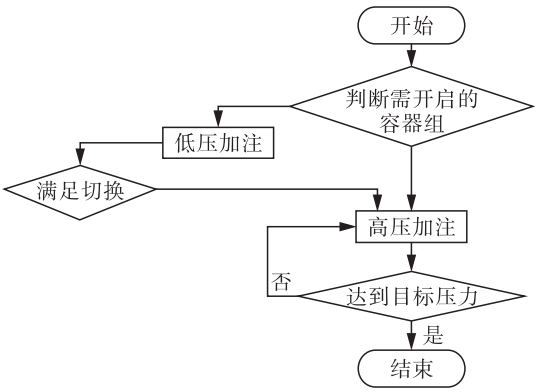


图2 二级加注模式加注流程

Fig.2 Fuelling procedure for two-stage fuelling mode

由于基于三级加注模式的加氢策略的氢气利用率明显高于基于二级加注模式的加氢策略，而三级加注模式的管路复杂性及控制难度高于二级加注模式，故我国早期建设的部分加氢站采用二级加注模式，而新建加氢站大多为三级加注模式[7]。不同加注模式下的加氢策略可归纳为如下2类。

（1）将各级储氢容器的压力波动范围设置不变（即ΔP恒定），低、中、高三个压力等级（或低、高两个压力等级）储氢容器内压循环载荷的下限及上限值均随压力等级逐级升高（见表1中序号1和序号3）。本文将这种加氢策略简称为“ΔP恒定策略”。该方式的优势在于降低了部分储氢容器的内压循环载荷极值和压力波动范围，使容器载荷处于浅循环状态。相当于降低了储氢容器的服役载荷，有利于容器安全运行。而该方式的劣势在于，各级储氢容器的压力波动范围小，在完成较少车次的加注后，需要启动压缩机为容器补充氢气，频繁启动与停止会加快压缩机的寿命消耗。因此，该方式对氢气压缩机的可靠性及耐久性要求较高。

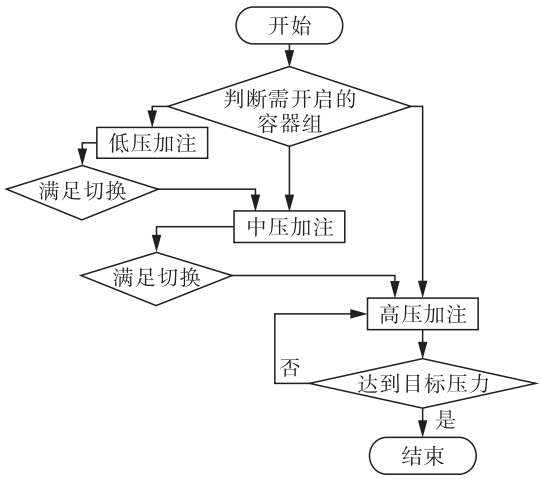


图3 三级加注模式加注流程

Fig.3 Fuelling procedure for three-stage fuelling mode

（2）设置各级储氢容器的内压循环载荷最大值（P_{max}）相等，低、中、高三个压力等级（或低、高两个压力等级）的储氢容器压力波动范围设置为随压力等级增大而逐级减小（见表1中序号2和序号4）。本文将这种加氢策略简称为“P_{max}恒定策略”。该方式的优势在于，可在完成多次加注后，才需要启动氢气压缩机为储氢容器补充氢气。因此，对压缩机的可靠性和耐久性要求相对较为宽松，而对于储氢容器本身的性能提出了较高的要求。

表1 不同加氢策略下储氢容器组压力设置规律

Tab.1 Pressure setting patterns for hydrogen storage vessel groups under different fuelling strategies

序号	加氢策略	压力波动范围设置	
		通用载荷工况/MPa	示例/MPa
1	ΔP恒定策略	低压：$(P_{max}-2\Delta P)$~$(P_{max}-\Delta P)$；高压：$(P_{max}-\Delta P)$~P_{max}	低压：33~38；高压：38~43
2	P_{max}恒定策略	低压：$(P_{max}-\Delta P_1)$~P_{max}；高压：$(P_{max}-\Delta P_2)$~P_{max}	低压：33~43；高压：38~43
3	ΔP恒定策略	低压：$(P_{max}-3\Delta P)$~$(P_{max}-2\Delta P)$；中压：$(P_{max}-2\Delta P)$~$(P_{max}-\Delta P)$；高压：$(P_{max}-\Delta P)$~P_{max}	低压：21~28；中压：28~35；高压：35~42
4	P_{max}恒定策略	低压：$(P_{max}-\Delta P_1)$~P_{max}；中压：$(P_{max}-\Delta P_2)$~P_{max}；高压：$(P_{max}-\Delta P_3)$~P_{max}	低压：17~45；中压：28~45；高压：40~45

注：P_{max}表示内压循环载荷最大值；ΔP及ΔP_i表示所设置的压力变化量。

从表1可以看出，不同加氢策略对应的储氢容器内压循环载荷工况完全不同。因此，有必要系统地研究加氢策略对储氢容器疲劳寿命的影响规律，以确保既能发挥容器最大承载潜力，又能使

容器长周期安全运行。

以图1中典型储氢容器为对象进行研究。依据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》，容器材料力学性能取4130X钢在50 MPa氢气环境中开展相关试验获得的实测值，具体如下：氢环境下断裂韧度$K_{IH}=80\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$；当应力强度因子代数差$\Delta K\leqslant 25\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$时，疲劳裂纹扩展速率系数$C=3.71\times10^{-10}\ \text{m/cycle}$，疲劳裂纹扩展速率指数$m=2.58$；当$\Delta K>25\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$时，$C=2.18\times10^{-8}\ \text{m/cycle}$，$m=1.32$。

2 储氢容器疲劳评定方法

国内外压力容器建造标准（如GB/T 44457—2024，ASME Ⅷ-3—2025等）中规定，可用于储氢容器疲劳评定的方法有2种：疲劳设计曲线法和断裂力学法。采用疲劳设计曲线法的前提为容器可通过未爆先漏判定，且须采用考虑高压氢气环境影响的疲劳设计曲线[8]。采用断裂力学法不需要进行未爆先漏判定，但须采用考虑高压氢气环境影响的材料断裂韧度和疲劳裂纹扩展速率[9]。由于断裂力学法所需的材料力学参数更易获得，且无需进行未爆先漏判定，因此，储氢容器疲劳分析大多采用该方法[10]。

在基于断裂力学的疲劳评定方法方面，GB/T 19624—2019《在用含缺陷压力容器安全评定》基于断裂力学法，给出了含裂纹等表面缺陷压力容器的剩余疲劳寿命通用评定方法。GB/T 44457—2024《加氢站用储氢压力容器》及ASME Ⅷ-3—2025 *Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels* 均给出了储氢压力容器专用疲劳评定方法，且技术路线基本一致，对储氢容器的疲劳评定更具适用性。

本文基于GB/T 44457—2024中给出的加氢站用储氢压力容器专用断裂力学疲劳评定标准方法开展系列研究。GB/T 44457—2024中的断裂力学疲劳分析流程概述如下。

（1）假设储氢容器筒体内壁存在轴向半椭圆裂纹（裂纹深长比为1/3），并根据容器制造企业的无损检测能力确定裂纹的深度（不小于0.5 mm）。

（2）根据内压循环载荷工况确定容器的应力分布后，采用式（1）（2）确定循环载荷工况下的应力强度因子最大值（$K_{I\max}$）和最小值（$K_{I\min}$）。

$$\sigma=A_0+A_1\frac{x}{a}+A_2\left(\frac{x}{a}\right)^2+A_3\left(\frac{x}{a}\right)^3 \tag{1}$$

$$K_I=[(A_0+A_P)G_0+A_1G_1+A_2G_2+A_3G_3]\sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \tag{2}$$

其中：

$$Q=1+4.593\left(\frac{a}{l}\right)^{1.65}-q_y \tag{3}$$

$$q_y=\frac{\{[(A_0+A_p)G_0+A_1G_1+A_2G_2+A_3G_3]/S_y\}^2}{6} \tag{4}$$

式中，$A_i(i=0\sim3)$为拟合系数；x为从内壁沿裂纹扩展方向测得的深度，mm；a为裂纹深度，mm；A_P为容器内部压力，MPa；$G_i(i=0\sim3)$为裂纹表面修正系数，该系数可基于GB/T 44457—2024求得；l为裂纹长度，mm。

（3）基于考虑应力比修正的Pairs模型，采用式（5）计算当前裂纹尺寸下的疲劳裂纹扩展速率，确定扩展后的裂纹尺寸及循环次数。

$$\mathrm{d}a/\mathrm{d}N=C[f(R_K)]\Delta K_I^m \tag{5}$$

其中：

$$f(R_K)=\begin{cases}1+3.53R_K & R_K\geq0\text{且}R_{eL}>620\ \text{MPa}\\ [2.88/(2.88-R_K)]^m & R_K\geq0\text{且}R_{eL}\leqslant620\ \text{MPa}\\ [1/(1-R_K)]^m & R_K<0\text{且}R_{eL}\leqslant620\ \text{MPa}\\ [1.5/(1.5-R_K)]^m & R_K<0\text{且}R_{eL}>620\ \text{MPa}\end{cases} \tag{6}$$

$$R_K=\frac{K_{I\min}}{K_{I\max}} \tag{7}$$

$$\Delta K_I=K_{I\max}-K_{I\min} \tag{8}$$

式中，C，m为基于GB/T 34542.2—2018测得的疲劳裂纹扩展速率参数实测值；$K_{I\max}$，$K_{I\min}$分别为在基于储氢容器内压循环载荷工况中载荷最大值及载荷最小值计算的裂纹前沿应力强度因子。

（4）判定扩展后的裂纹尺寸是否达到储氢容器的临界裂纹尺寸（临界裂纹尺寸取0.8倍壁厚和断裂韧度对应的裂纹尺寸二者间的较小值）。如扩展后的裂纹尺寸不大于临界裂纹尺寸，则重复步骤（1）~（3）继续迭代计算；如扩展后的裂纹尺寸达到临界裂纹尺寸，则终止计算，并判定当前的循环次数为储氢容器在该内压循环载荷工况下的疲劳寿命。

3 壁厚对疲劳寿命的影响分析

容器材料性能一定时，其承载能力主要由直径和壁厚决定。为确定图1算例对容器结构参数

的适用范围，以内压循环载荷工况17~45 MPa为例，基于断裂力学法分别进行了如下两方面研究：(1)保持容器筒体外直径恒定为485 mm，计算不同壁厚下的疲劳寿命；(2)按比例改变筒体外径和内径，使容器径比(外径/内径)维持恒定，并计算疲劳寿命，结果如图4、图5所示。

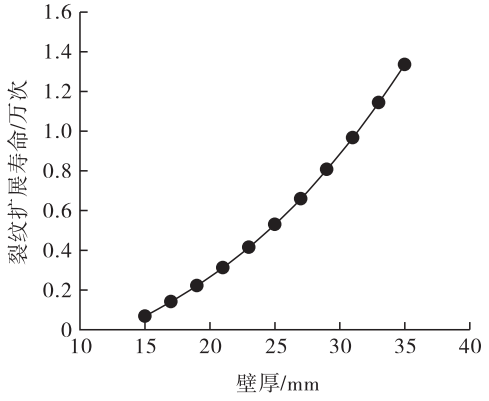


图4 外径恒定、壁厚减小计算结果

Fig.4 Calculation results for constant outer diameter with reduced wall thickness

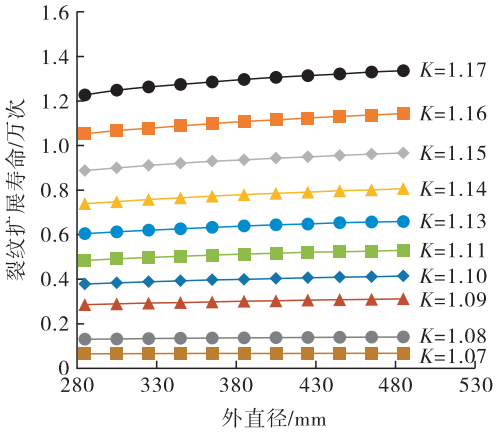


图5 径比恒定、外径减小计算结果

Fig.5 Calculation results for constant diameter ratio with reduced outer diameter

通过分析图4、图5可知，当储氢容器外径恒定时，随壁厚的减小，容器疲劳寿命呈指数减少趋势。如果保持径比恒定，则无论外径和壁厚如何变化，容器疲劳寿命基本不变。如图5中，径比$K\in[1.07,1.17]$时，各径比下的疲劳寿命曲线形态相同，且外直径485 mm与280 mm对应的疲劳寿命相对差异平均值仅为7.7%。因此，在材料参数一定时，选用某一种径比下的储氢容器结构作为算例，计算出的疲劳寿命分布规律对其他径比下的储氢容器同样具有借鉴意义。因此，本文基于图1结构，开展加氢策略对储氢容器疲劳寿命的影响规律研究工作。

4 P_{max}恒定策略对疲劳寿命的影响分析

针对P_{max}恒定策略，为分析P_{max}恒定，ΔP变化对储氢容器疲劳寿命的影响规律，设定P_{max}=45 MPa，在载荷比$(P_{max}-\Delta P)/P_{max}\in[0,1)$范围内计算储氢容器疲劳寿命$N$，其结果如图6所示。

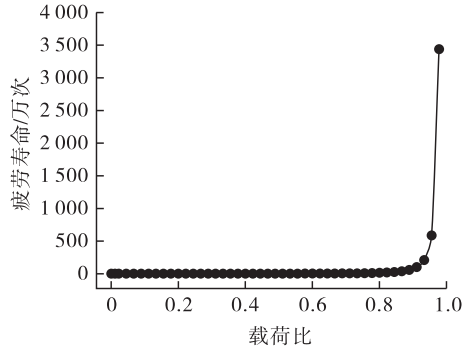


图6 载荷比∈[0,1)时疲劳寿命计算结果

Fig.6 Fatigue life calculation results for load ratio ∈[0,1)

通过分析图6可知，对于本算例，当载荷比从0.01上升至0.89时，载荷比增大88倍，而疲劳寿命从约1万次上升至58万次，增长了57倍。而当载荷比从0.89上升至0.98时，载荷比仅增大约10.1%，而疲劳寿命从约59万次上升至3 438万次，也增涨了57倍。故以载荷比0.89为拐点，当载荷比小于0.89时，随载荷比增加，疲劳寿命缓慢增加；当载荷比大于0.89后，疲劳寿命呈陡增趋势。为分析载荷比∈[0,0.89]时，疲劳寿命随载荷比的变化规律，分别绘制载荷比∈[0,0.5)及载荷比∈(0.5,0.89]的疲劳寿命曲线，如图7、图8所示。可以看出，以载荷比0.13为分界点，储氢容器疲劳寿命呈先降低、后上升趋势，载荷比为0.13时疲劳寿命最少。载荷比∈[0,0.13)时，疲劳裂纹扩展速率$\mathrm{d}a/\mathrm{d}N$随深度变化结果如图9所示。

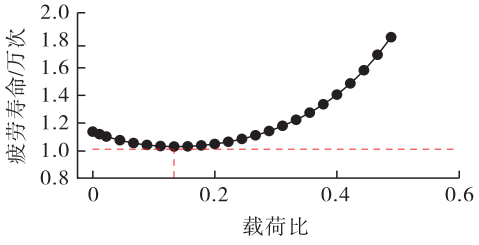


图7 载荷比∈[0,0.5)时疲劳寿命计算结果

Fig.7 Fatigue life calculation results for load ratio ∈[0,0.5)

由图9及式(5)可以看出，随载荷比增加，$f(R_K)$呈增大趋势，而ΔK_I呈减小趋势。因此，在某一载荷比下，$\mathrm{d}a/\mathrm{d}N$会出现极大值，而此时计算出的疲劳寿命最少。

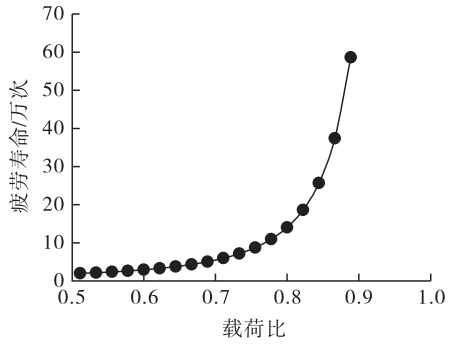


图8 载荷比∈(0.5,0.89]时疲劳寿命计算结果

Fig.8 Fatigue life calculation results for load ratio ∈(0.5,0.89]

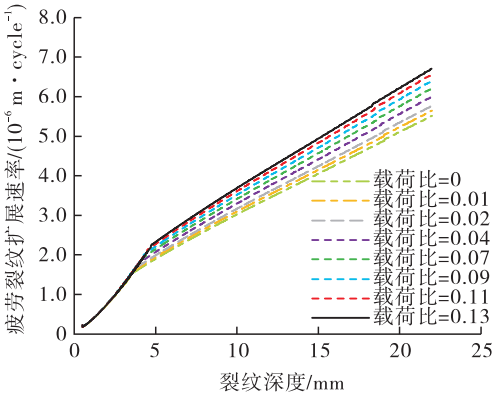


图9 载荷比∈[0,0.13)时d*a*/d*N*随深度变化结果

Fig.9 d*a*/d*N* versus depth results for load ratio ∈[0,0.13)

由上述分析可知，采用P_{max}恒定策略时，加氢站用储氢压力容器具有各级容器组内压循环载荷上限高、载荷波动范围大（即载荷比较小）的特点，且疲劳寿命会在某载荷比下达到最低值，故在实际应用中，应首先计算出导致疲劳寿命达最低值的载荷比，进而避免容器在该载荷比下运行。

采用该加氢策略优势在于可最大限度利用储氢容器的承载潜力，降低氢气压缩机的启动次数，减少压缩机的工作强度。劣势如下：(1)各级容器内压循环载荷上限长期维持在45 MPa，且载荷波动范围大，故容器的疲劳寿命较短，对容器本身的设计制造要求较高；(2)高压级与低压级容器组的寿命可相差98%左右，故需要频繁调换容器组级别，以确保各级容器疲劳寿命消耗相同，否则有可能出现高压级容器组频繁更换的情况，增加运维成本。

5 ΔP恒定策略对疲劳寿命的影响分析

针对ΔP恒定策略，为分析ΔP恒定，P_{max}变化对储氢容器疲劳寿命的影响规律，计算$\Delta P \in [5,23]$ MPa，P_{max}单调递增时容器的疲劳寿命N。以P_{max}为横坐标，N为纵坐标，绘制不同ΔP水平下疲劳寿命曲线如图10所示。为分析采用ΔP恒定策略时，载荷比$(P_{max}-\Delta P)/P_{max}$对疲劳寿命的影响规律，绘制不同$\Delta P$水平下疲劳寿命曲线如图11所示。

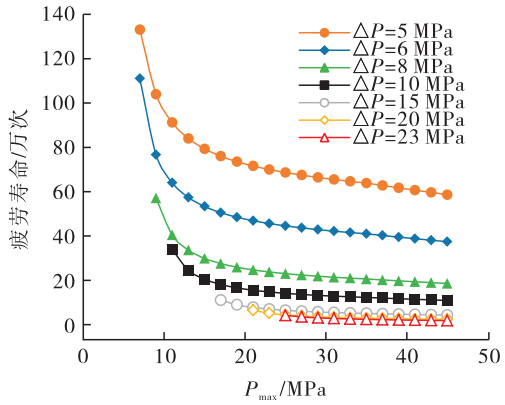


图10 不同ΔP水平下载荷上限–疲劳寿命曲线

Fig.10 Maximum load versus fatigue life curves under different ΔP levels

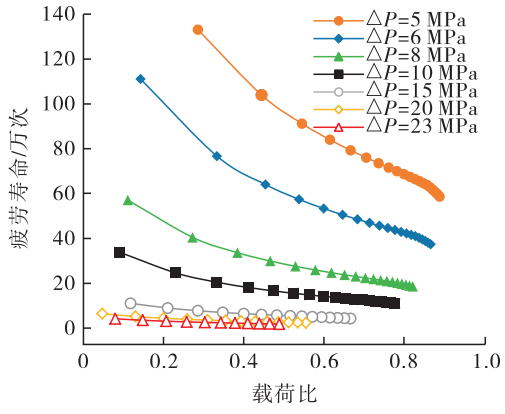


图11 不同ΔP水平下载荷比–疲劳寿命曲线

Fig.11 Load ratio versus fatigue life curves under different ΔP levels

通过分析图10和图11可知，不同ΔP下，疲劳寿命N与P_{max}呈反比关系，ΔP恒定时，随载荷比增加（即循环载荷上下限同时升高），疲劳寿命呈单调减少趋势，无明显陡降拐点。当疲劳寿命取某恒定值时，以该值做平行于X轴的直线，则直线基本只与2个ΔP等级的疲劳寿命曲线有交点。该结果表明，采用ΔP恒定策略时，不同等级的ΔP间基本不存在“等寿命线”。因此，当采用该策略时，无法通过控制ΔP值的方式使不同级别容器组达到相同的疲劳寿命消耗。

分别以P_{max}和载荷比为横坐标，以疲劳寿命变化率为纵坐标，绘制曲线如图12、图13所示。可以看出，随载荷比的增加，不同ΔP水平下的疲

劳寿命变化率呈现指数型下降趋势，且各条曲线的分布呈“喇叭口”型。当载荷比小于0.6时，不同ΔP水平下的疲劳寿命变化率差异很大；当载荷比大于0.6时，不同ΔP水平下的疲劳寿命变化率基本一致。

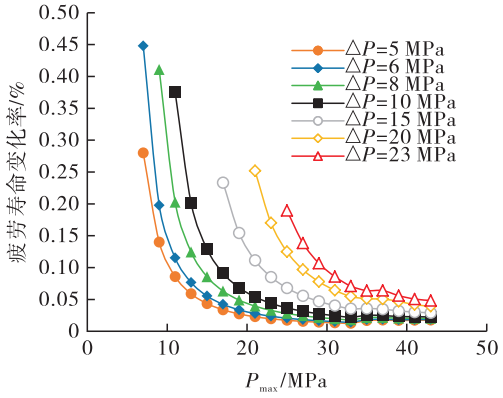


图12 不同ΔP水平下载荷上限-疲劳寿命变化率曲线

Fig.12 Load ratio versus fatigue life curves under different ΔP levels

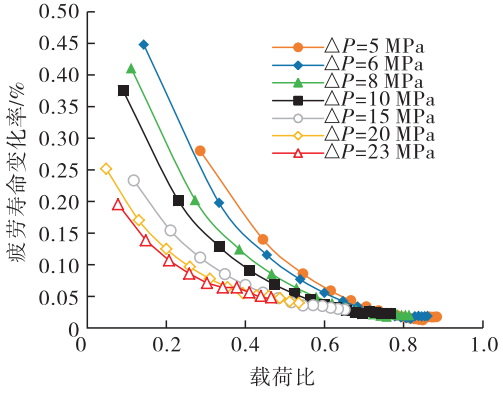


图13 不同ΔP水平下载荷比-疲劳寿命变化率曲线

Fig.13 Load ratio versus life change rate curves under different ΔP levels

由上述分析可知，采用ΔP恒定策略时，加氢站用储氢压力容器组具有各级容器组内压循环载荷上限逐级递减、载荷波动范围小（即载荷比较大）的特点。当载荷比大于0.6时，不同ΔP下的疲劳寿命变化率差异不大。根据实际运行情况需调整容器组的ΔP等级时，应尽量使载荷比大于0.6，以减少容器预期疲劳寿命的波动。

采用该加氢策略的优势在于有效降低了容器的承载负荷，使容器具有较高的疲劳寿命。劣势如下：(1)各级储氢容器载荷波动范围小，造成压缩机频繁启动为容器充氢，压缩机的工作强度较高；(2)由于不同ΔP下的各级容器疲劳寿命曲线呈带状分布，故与P_{max}恒定策略类似，在不调整容器组内压循环载荷工况的条件下，无法使各级容器的疲劳寿命同步消耗。

6 载荷比控制策略对疲劳寿命的影响分析

通过上述研究可知，目前加氢站普遍采用的两种加氢策略均无法在不调整容器组压力等级的前提下，控制各容器组实现疲劳寿命同步消耗。故首先分析了载荷比$(P_{max}-\Delta P)/P_{max}$恒定条件下，$P_{max}$对疲劳寿命的影响规律，而后给出了基于载荷比控制的加氢策略（简称“载荷比控制策略”）。

针对图1储氢容器，在载荷比$\in[0,0.8]$条件下，计算$P_{max}\in[11,45]$ MPa时的疲劳寿命N，绘制不同载荷比下的疲劳寿命及疲劳寿命变化率曲线，分别如图14、图15所示。

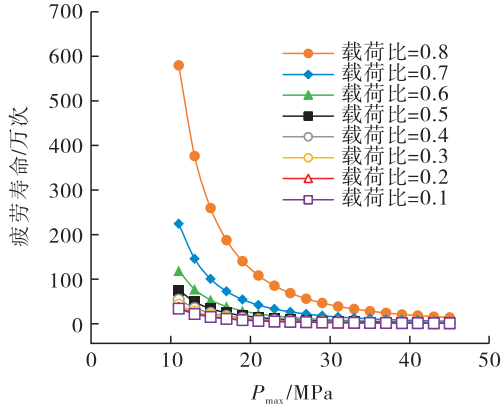


图14 不同载荷比下载荷上限P_{max}-疲劳寿命曲线

Fig.14 Maximum load P_{max} versus fatigue life curves under different load ratios

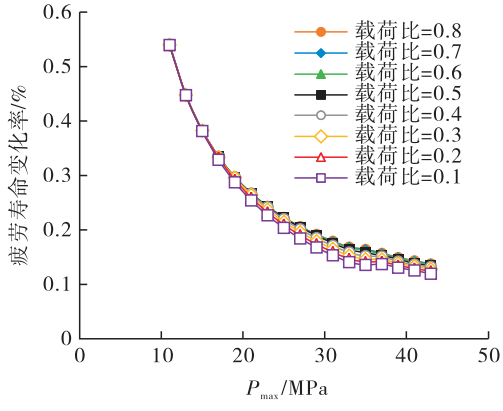


图15 不同载荷比下内压循环载荷上限P_{max}-疲劳寿命变化率曲线

Fig.15 Maximum internal pressure cycling load P_{max} versus fatigue life change rate curves under different load ratios

通过分析图14可知，不同载荷比下，疲劳寿命N随P_{max}的变化曲线均符合幂函数模型，且呈反比关系。当疲劳寿命取某恒定值时，以该值做

平行于X轴的直线，该直线可与多个载荷比等级对应的疲劳寿命曲线有交点。该结果表明，采用载荷比控制策略时，不同等级的载荷比间存在“等寿命曲线”。

通过分析图15可知，随P_{max}的增加，不同载荷比下的疲劳寿命变化率呈现指数型下降趋势，且各条曲线基本重合。因此，当依据载荷比调整加氢策略时，不会导致疲劳寿命变化率过大，有利于容器寿命的使用管理。

基于图14中数据，以P_{max}为横坐标，载荷比为纵坐标，绘制$N\in[3,10]$万次的等寿命曲线，如图16所示。当采用载荷比控制策略时，首先，基于断裂力学疲劳分析，确定各级载荷比下的等寿命曲线；然后，基于高压组容器的内压循环载荷上限（P_{max}）和等寿命曲线确定内压循环载荷下限（P_{min}）；最后，根据计算出的高压组容器内压循环载荷工况和等寿命曲线，逐级确定中、低压组别容器的P_{max}和P_{min}。

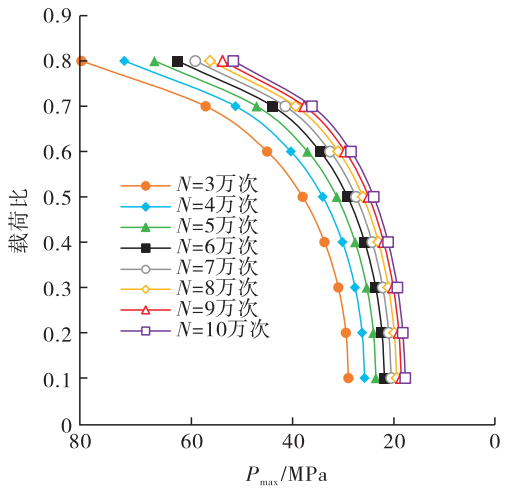


图16 基于载荷比控制的疲劳等寿命曲线

Fig.16 Fatigue equal-life curves based on load ratio control

根据图16中等寿命曲线，针对图1结构给出的各级容器内压循环载荷上下限如表2所示。

表2 基于载荷比控制方法的50 MPa级储氢容器组循环载荷上下限

Tab.2 Cyclic load upper and lower limits for 50 MPa-class hydrogen storage vessel groups based on load ratio control method

疲劳寿命/万次	高压级容器组		中压级容器组		低压级容器组	
	P_{max}/MPa	P_{min}/MPa	P_{max}/MPa	P_{min}/MPa	P_{max}/MPa	P_{min}/MPa
3	45	27.0	33.0	12.3	29.0	3.1
4	45	29.4	29.4	10.9	26.0	3.9
5	45	30.8	30.8	15.1	24.0	4.7
6	45	31.8	31.8	17.6	22.0	3.0
7	45	32.6	32.6	19.6	21.0	4.2
8	45	30.2	30.2	17.3	19.5	2.3
9	45	33.7	33.7	22.2	22.2	9.1
10	45	34.1	34.1	23.2	23.2	11.1

如实际采用的50 MPa级储氢容器径比与图1中容器相同，且材料力学性能参数不低于本文使用的数据，理论上该容器的预期疲劳寿命不低于表2中各载荷对应的疲劳寿命。

由上述分析可知，采用载荷比控制策略时，可根据等寿命曲线确定各级储氢容器组的内压循环载荷工况，实现不同级别容器组的疲劳寿命同步消耗。当各级容器组同步达到加氢站设定的使用寿命上限时，加氢站可统筹实施储氢容器批量更换，避免因各级容器组寿命消耗不同导致的频繁更换问题，保障加氢站连续稳定运行，降低运维成本，提升加氢站运营效益。

7 结论

（1）储氢容器内压循环载荷工况及材料参数恒定，且径比（外径/内径）相同时，储氢容器的疲劳评定结果基本保持不变。

（2）采用内压循环载荷最大值P_{max}恒定策略，可最大限度利用容器承载潜力，但会导致储氢容器疲劳寿命变短，容器的疲劳寿命会在某固定载荷比下（对于本算例，该载荷比为0.13）达到最低值。采用压力波动范围ΔP恒定策略，可使容器载荷始终处于浅循环状态，提高容器疲劳寿命，应尽量使载荷比大于某值（对于本算例，该载荷比为

0.6），以保持多台储氢容器疲劳寿命变化率一致。

（3）采用本文提出的载荷比控制策略，可基于载荷比和疲劳等寿命曲线，确定各级容器组的内压循环载荷上下限。容器组在该方法确定的内压循环载荷下运行时，可在一定程度上实现疲劳寿命同步消耗，进而支撑加氢站在储氢容器达到设定的使用寿命后，同步开展各级储氢容器的修理维护工作。

参考文献：

[1] 陈志伟，贾晓亮，李翔，等. 加氢站用高压气态储氢容器标准体系现状分析和若干建议[J]. 压力容器，2022，39（7）：50-56.
CHEN Z W，JIA X L，LI X，et al. Analysis and suggestion on standard system of high-pressure gaseous hydrogen storage vessel for hydrogen refueling station [J]. Pressure Vessel Technology，2022，39（7）：50-56.

[2] 郑津洋，马凯，叶盛，等. 我国氢能高压储运设备发展现状及挑战[J]. 压力容器，2022，39（3）：1-8.
ZHENG J Y，MA K，YE S，et al. Development status and challenges of equipment for storage and transportation of high-pressure gaseous hydrogen in China[J]. Pressure Vessel Technology，2022，39（3）：1-8.

[3] 阳月，杨明，陆晖. 我国氢能产业发展综述[J]. 红水河，2025，44（1）：54-57.
YANG Y，YANG M，LU H. A review of development on hydrogen energy industry in China [J]. Hongshui River，2025，44（1）：54-57.

[4] 王璐，段秋爽. 新时期新型工业化绿色发展道路及其意义研究[J]. 新型工业化，2024，14（3）：72-80.
WANG L，DUAN Q S. Research on the path and significance of green development in the new era of new industrialization [J]. The Journal of New Industrialization，2024，14（3）：72-80.

[5] 郑津洋，马凯，周伟明，等. 加氢站用高压储氢容器[J]. 压力容器，2018，35（9）：35-42.
ZHENG J Y，MA K，ZHOU W M，et al. High-pressure gaseous hydrogen storage vessel for hydrogen refueling station [J]. Pressure Vessel Technology，2018，35（9）：35-42.

[6] 刘京京，陈华强，周伟，等. 燃料电池汽车氢气加注控制策略分析[J]. 能源与节能，2017（10）：80-81.
LIU J J，CHEN H Q，ZHOU W，et al. Analysis of hydrogen filling control strategies for fuel cell vehicles [J]. Energy and Energy Conservation，2017（10）：80-81.

[7] 冯慧聪，周伟，马建新. 加氢站高压储氢瓶分级方法[J]. 太阳能学报，2010，31（3）：401-406.
FENG H C，ZHOU W，MA J X. Method for multi-division of high pressure storage cylinder in hydrogen refueling station[J]. ACTA Energiae Solaris Sinica，2010，31（3）：401-405.

[8] 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]. Interantional Journal of Hydrogenh Energy，2024，84：1042-1049.

[9] 袁舒梦，黄淞，惠虎. 基于GB/T 34019标准与ASME Ⅷ-3标准的钢制瓶式容器疲劳寿命分析[J]. 压力容器，2022，39（1）：69-78.
YUAN S M，HUANG S，HUI H. Fatigue life assessment of steel cylinders based on GB / T 34019 and ASME VIII-3 [J]. Pressure Vessel Technology，2022，39（1）：69-78.

[10] 王云峰，王哲，徐双庆，等. 高压Ⅳ型储氢气瓶充氢工艺分析[J]. 流体机械，2024，52（10）：24-32.
WANG Y F，WANG Z，XU S Q，et al. Numerical analysis of hydrogen charging process for the high-pressure type Ⅳ hydrogen storage cylinder [J]. Fluid Machinery，2024，52（10）：24-32.

[11] JIA X L，CHEN Z W，JI F. Fracture mechanics assessment of hydrogen storage vessel [C]// Proceedings of ASME 2021 Pressure Vessels and Piping Conference. Virtual，Online，2021：PVP2021-60601，V002T03A041.

作者简介：贾晓亮（1991），男，工程师，主要从事承压设备结构弹塑性分析与标准化相关工作，通信地址：100029北京市朝阳区北三环东路26号中国特种设备检测研究院，E-mail：jxl@cscbpv.org。

通信作者：陈志伟（1980），男，正高级工程师，主要从事压力容器弹塑性设计方法研究及标准化相关工作，通信地址：100029北京市朝阳区北三环东路26号中国特种设备检测研究院，E-mail：czw@cscbpv.org。

本文引用格式：

贾晓亮，陈志伟，袁卓伟，等. 加氢策略对旋压无缝储氢容器疲劳寿命的影响分析[J]. 压力容器，2025，42（9）：35-43.

JIA Xiaoliang，CHEN Zhiwei，YUAN Zhuowei，et al. Analysis of the influence of hydrogen fuelling strategies on the fatigue life of spin-formed seamless hydrogen storage vessels[J]. Pressure Vessel Technology，2025，42（9）：35-43.