

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2020.02.009

技术综述

氢气管道与天然气管道的对比分析

刘自亮^{1,2},熊思江³,郑津洋^{1,2,4},张银广³,花争立^{1,2},顾超华^{1,2}

(1. 浙江大学 化工机械研究所,杭州 310027;2. 高压过程装备与安全教育部工程研究中心,杭州 310027;
3. 国家电投集团氢能科技发展有限公司,北京 102209;4. 流体动力与机电系统国家重点实验室,杭州 310027)

摘要:利用氢气管道是长距离氢能运输最为高效的方式之一,但相较于成熟的天然气管网体系,氢气管道建设量相对较少,近年来将天然气管道改造成氢气管道的方式受到研究人员的广泛关注。从建设现状、规范标准、材料选择、设计制造、事故后果和安全间距等方面,对氢气管道和天然气管道进行了系统的对比分析,为氢气管道的建设和天然气管道改造技术的应用提供一定的参考。

关键词:氢气管道;天然气管道;规范标准;材料选择;失效后果

中图分类号:TH142;TK91;TE973

文献标志码:B

Comparative Analysis of Hydrogen Pipeline and Natural Gas Pipeline

Liu Ziliang^{1,2}, Xiong Sijiang³, Zheng Jinyang^{1,2,4}, Zhang Yinguang³, Hua Zhengli^{1,2}, Gu Chaochao^{1,2}

(1. Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. High-pressure Process Equipment and Safety Engineering Research Center of Ministry of Education, Hangzhou 310027, China;

3. Hydrogen Energy Technology Development Co., Ltd., State Power Investment Corporation Limited, Beijing 102209, China;

4. State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Use of hydrogen pipeline is one of the most efficient ways to transport hydrogen in a long distance. However, compared with the mature natural gas pipeline network, the construction of hydrogen pipelines is still relatively small. In recent years, the technology of converting natural gas pipeline into hydrogen pipeline has attracted extensive concern of researchers. The comparative analysis of hydrogen pipeline and natural gas pipeline was conducted in terms of construction status, specifications and standards, material selection, design and manufacture, accident consequences and safety distances, which can provide some references for the construction of hydrogen pipelines and the application of natural gas pipeline transformation technology.

Key words: hydrogen pipeline; natural gas pipeline; regulation and standards; material selection; failure consequences

0 引言

氢能具有储运便捷、来源多样、洁净环保的突出优点,是21世纪新能源结构中的重要组成部分,许多国家均把发展氢能作为重要的能源战略^[1-2]。氢的输送是氢能利用的重要环节,安全高效的输氢技术是氢能大规模商业化发展的前

提^[3-4]。依据氢在输送时所处状态的不同,可分为气态输氢、液态输氢和固态输氢,其中高压气态输氢是现阶段最为成熟的输氢方式。根据氢的输送距离、用氢要求以及用户的分布情况,高压氢气可以通过氢气管道和长管拖车进行输送,对于输送量大且距离较远的场合,利用管道输送是最为高效的方式。

氢气管道可分为长距离输送管道和短距离配

收稿日期:2019-10-22 修稿日期:2019-12-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0801500);中央高校基本科研业务费专项资金(2019FZA4012)

送管道。长输管道输氢压力较高,管道直径较大,主要用于制氢单元与氢气站之间的高压氢气的长距离、大规模输送;配送管道输氢压力较低,管道直径较小,主要用于氢气站与各个用户之间的中低压氢气的配送。氢气配送管道建设成本较低,但氢气长输管道建设难度大、成本高,目前氢气长输管道的造价约为 63 万美元/公里,天然气管道的造价仅为 25 万美元/公里左右,氢气管道的造价约为天然气管道的 2.5 倍^[4-5]。

由于氢气长输管道昂贵的建设成本,利用现存天然气管道输送氢气与天然气混合气^[6-8]或将天然气管道改造为氢气管道的技术受到了研究人员广泛的关注^[9-10]。2019 年,世界上第一条由天然气管道改造而成的氢气管道已在 Dow Benelux 和 Yara 之间投入使用。但由于氢气易燃易爆且易造成金属材料脆化的性质,氢气管道与天然气管道存在着一定的差异,掺氢天然气输送技术和天然气管道改造技术的可行性仍需进一步的评估。

本文从建设现状、规范标准、材料选择、设计制造、事故后果和安全间距 6 个方面,系统介绍氢气管道和天然气管道的区别,为氢气管道的建设、掺氢天然气的输送以及天然气管道的改造提供一定的参考。

1 建设现状

截至 2017 年,欧洲大约有 1 598 公里氢气管道^[11],输氢压力一般为 2 ~ 10 MPa,多采用无缝钢管^[12],管道直径为 0.3 ~ 1.0 m,管道材料主要为 X42, X52, X56 等低强度管线钢;美国氢气管道总长度约为 2 575 km^[5],多采用埋地布置,输氢压

力一般不超过 7 MPa^[13],管道材料主要采用 X52 ~ X80 范围内的管线钢,预期使用寿命 15 ~ 30 年。为降低氢气管道的材料成本,美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)和萨凡纳河国家实验室(Savannah River National Laboratory, SRNL)开展了高压氢环境下纤维增强聚合物(FRP)材料的力学性能研究,美国能源部燃料电池技术工作组(Fuel Cell Technologies Office, FCTO)开展了 FRP 材料的标准化工作^[5,14]。2016 年,ASME B31.12^[15]将 FRP 材料纳入标准,规定其最大服役压力不超过 17 MPa。

我国氢气管道总里程约 400 km,主要分布在环渤海湾、长三角等地,位于河南省的济源与洛阳之间的氢气管道是我国目前里程最长、管径最大、压力最高、输送量最大的氢气管道,其管道里程为 25 km,管道直径 508 mm,输氢压力 4 MPa,年输氢量达到 10.04 万吨^[4]。按照《中国氢能产业基础设施发展蓝皮书》^[16]预计,到 2030 年,我国氢气管道将达到 3 000 km。

截至 2016 年^[17],全球天然气管道总里程约 127 万公里,主要集中于北美、俄罗斯及中亚、欧洲、亚太地区,其中我国天然气管道总长约为 6.7 万公里,基本已经形成了贯穿全国、联通海外的天然气输送系统^[17]。天然气管道输气压力较高,一般为 6 ~ 12 MPa,近年来随着高强度管线钢的应用,设计压力可达到 20 MPa,管道直径一般为 1.0 ~ 1.5 m。

相较于天然气管道,目前氢气管道的建设量仍然较少,管道直径和设计压力也均小于天然气管道。世界范围内氢气管道与天然气管道建设现状对比见表 1。

表 1 氢气管道与天然气管道建设现状对比

管道类型	管道直径/mm	设计压力/MPa	建设里程/km	常用材料
氢气管道	304 ~ 914	2 ~ 10	6 000	X42, X52
天然气管道	1 016 ~ 1 420	6 ~ 20	1 270 000	X70, X80

随着氢能的发展,输氢管道的需求量预计会在未来几十年出现大幅增长。Tzimas 等^[18]针对氢能未来可能出现的 3 种不同的发展模式(快速发展、中速发展和慢速发展),对世界范围内氢气长距离输送管道和短距离配送管道的需求量进行了预估,如表 2 所示。

表 2 2050 年世界范围内输氢管道需求量^[18] km

管道类型	快速发展	中速发展	慢速发展
长距离输送管道	435 000	75 000	10 000
短距离配送管道	4 000 000	1 000 000	250 000

2 规范标准

随着经济全球化和一体化进程的加快,标准化成为氢能技术实施产业化的重要环节,也成为企业及其相关技术和产品占领全球市场的重要基础性工作^[19-21],诸多国际标准化组织和国家标准化机构都成立了专门负责氢能领域有关标准化工作的部门,并持续对相关标准的研制进行资助。相关部门主要包括国际氢能技术委员会(International Organization for Standardization/Technical Committees 197, ISO/TC 197)、欧洲工业气体协会(European Industrial Gases Association, EIGA)和美国机械工程师学会(American Society of Mechanical Engineers, ASME)。国际氢能技术委员会 ISO/TC 197 主要负责与氢能有关的生产、储存、运输、检测和使用等方面的标准化工作。我国与 ISO/TC 197 对口的专业标准化技术委员会是全国氢能标准化技术委员会(SAC/TC 309),于2008年6月成立,秘书处承担单位为中国标准化研究院^[22]。SAC/TC 309主要负责我国氢能生产、储运、应用等领域的标准化工作。

世界范围内氢气管道的相关设计标准主要包括 ASME B31.12—2014《Hydrogen Piping and Pipelines》^[15]、CGA G-5.6—2005(2013年修订)《Hydrogen Pipeline Systems》^[23]和我国国家标准 GB 50177—2005《氢气站设计规范》^[24]、GB 4962—2008《氢气使用安全技术规程》^[25]。ASME 标准和 IGC 标准均适用于长距离氢气输送管道和短距离氢气配送管道的设计,但我国已发布的两个标准仅适用于供氢站、车间内氢气短距离配送管道,而可用于氢气长输管道的标准 GB/T 34542.5《氢气储存输送系统 第5部分:氢气输送系统技术要求》^[26]正在编制过程中。

现阶段天然气管道输送技术已经形成了较为完善的标准体系。国外天然气管道相关设计标准主要包括 ASME B31.8—2018《Gas Transmission and Distribution Piping Systems》^[27]、CSA Z662—2011《Oil and Gas Pipeline Systems》^[28]和 ASCE ALA—2001《Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe》^[29]。我国相应的标准规范主要为 GB 50251—2015《输气管道工程设计规范》^[30],该标准从输气工艺、输气线路、结构设计、加工制

造、安全检测、辅助设施等方面对天然气管道建设作出了系统全面的要求。

3 材料选择

与天然气环境相比,金属材料长期工作在氢环境下会造成力学性能的劣化,称为环境氢脆。金属材料的高压氢脆性能的主要研究方法是进行氢环境原位试验,即将材料直接置于氢环境中进行试验,试验类型主要包括慢应变速率拉伸试验、断裂韧性试验、裂纹扩展速率试验、疲劳寿命试验和圆盘压力试验等。金属材料氢脆的程度可以依据美国 No. NASA8-30744 提出的判断氢脆程度的标准进行判断^[31],也可以依据 ASTM G142—98 (Reapproved 2011) 标准,将氢脆敏感度试验结果与对照性材料进行对比,以评价材料对氢脆的抵抗力^[32]。

世界范围内已有众多学者针对管线钢与高压氢环境的相容性展开了研究。Moro 等^[33]针对 X80 管线钢材料,开展了不同压力、应变速率下的拉伸试验,并通过微观观测结果,推论出材料近表面处扩散氢的存在是氢脆发生的主要原因; Briottet 等^[34]同样针对 X80 管线钢,系统开展了材料在高压氢环境下的慢应变速率拉伸试验、断裂韧性试验、圆片试验、疲劳裂纹扩展试验和 WOL 试验,结果表明,氢环境下材料的弹性模量、屈服强度及抗拉强度均未发生明显变化,但材料塑性、断裂韧性显著降低,疲劳裂纹扩展速率明显加快; Hardie 等^[35]通过电化学充氢的方法,研究了 X60, X80 和 X100 管线钢的氢脆敏感度,结果表明,当充氢电流密度达到某一限度时,随着材料强度的增大,材料氢脆的敏感度显著增大,故对埋地管道采用阴极电保护时,应重点关注电流密度。我国浙江大学利用自主研发的高压氢环境耐久性试验装置^[36-37],对 X70, X80 材料在氢环境和掺氢天然气环境下的相容性做了系统的评估^[38],并进一步开发出了国产金属材料在高压氢环境下的材料性能数据库^[39]。

由于环境氢脆的影响,氢气管道用材在合金元素、钢级、管型、操作压力等方面与天然气管道相比存在一定的限制范围。ASME B31.8—2018 中规定的天然气管道可用材料包括 API SPEC 5L 中所有钢管,但在实际工程中,为减小管道壁厚,

一般优先选择高强度钢管,常用管型有直缝埋弧焊管(SAWL)、螺旋缝埋弧焊管(SAWH)、高频电阻焊管(HFW)及无缝钢管(SMLS)^[40]。在氢气管道中,由于氢环境的存在会诱导管道发生氢脆,进而有可能引发管道失效,而钢管成型工艺、焊缝质量、缺陷大小、钢材强度等因素都会影响其失效

概率^[41-42],所以 ASME B31. 12—2014 在 API SPEC 5L 中限定了几种可用于氢气管道的钢材类型,并指明禁止使用炉焊管,标准中规定可用于氢气管道的管线钢材料及最大许用压力如表 3 所示。

表 3 氢气管道可用材料

材料类型(API 5L)	X42	X52	X56	X60	X65	X70	X80
屈服强度/MPa	289.6	358.5	386.1	413.7	448.2	482.7	551.6
抗拉强度/MPa	413.7	455.1	489.5	517.1	530.9	565.4	620.6
最大许用压力/MPa	20.68	20.68	20.68	20.68	10.34	10.34	10.34

合金元素如 C, Mn, S, P, Cr 等会增强低合金钢的氢脆敏感性^[43]。同时,氢气压力越高、材料的强度越高,氢脆和氢致开裂现象就越明显^[37,44],因此,在实际工程中,氢气管道用钢管优先选择低钢级钢管。ASME B31. 12—2014 中推荐采用 X42, X52 钢管,同时规定必须考虑氢脆、低温性能转变、超低温性能转变等问题,所以在应用现有天然气管网设施输送氢气及天然气管道转变为氢气管道时需要重点考虑^[6]。

4 设计制造

由于氢气会引起管道的氢致失效,所以氢气管道与天然气管道中钢管设计公式不同。氢气管道设计公式中增加一项“材料性能系数”,材料性能系数反映了氢气对金属管道力学性能的不利影响,增加材料性能系数后,管道计算壁厚会相对增大,设计压力会相对降低,这样更有利于保障氢气长输管道的安全性。氢气管道和天然气管道的设

计公式如下。

氢气管道设计公式:

$$P = \frac{2St}{D} FETH_f \quad (1)$$

天然气管道设计公式:

$$P = \frac{2St}{D} FET \quad (2)$$

式中 P ——设计压力,MPa,规定设计压力不得超过管道试验压力的 85%,一般为最大工作压力的 1.05 ~ 1.10 倍;

S ——最小屈服强度,MPa;

t ——公称壁厚,mm;

D ——公称直径,mm;

F ——设计系数;

E ——轴向接头系数;

T ——温度折减系数;

H_f ——材料性能系数。

不同材料材料性能系数如表 4 所示。

表 4 材料性能系数 H_f

设计压力/MPa	<6.895	13.79	15.169	16.548	17.927	19.306	20.685
X42, X52	1.0	1.0	0.954	0.910	0.880	0.840	0.780
X56, X60	0.874	0.874	0.834	0.796	0.770	0.734	0.682
X65, X70	0.776	0.776	0.742	0.706	0.684	0.652	0.606
X80	0.694	0.694	0.662	0.632	0.610	0.584	0.542

注:设计压力处于中间数值时采用插值法取值

ASME B31. 12—2014 中规定输氢管道可采

用两种不同的设计方法,分别为规范化设计方法

(方法 A) 和基于材料性能的设计方法(方法 B)。方法 A 与天然气管道设计方法基本相同,但氢气管道设计公式中的设计系数 F 取值较小,目的是为了增加氢气管道的安全性。设计系数 F 取值见表 5。方法 B 依据 ASME BPV Code Section VIII, Division 3 中 Article KD-10^[45] 的试验要求,规定

材料必须开展室温氢环境下材料应力强度因子门槛值 K_{Ih} 的测试试验,要求试验压力不得小于设计压力,当测得的 K_{Ih} 大于等于临界裂纹尺寸存在时的断裂韧度 K_{Ic} 值,且数值不小于 $50 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$ 时,材料满足要求。方法 B 设计公式中的设计系数 F 与天然气管道设计系数基本相同。

表 5 设计系数 F

区域等级		一级地区	二级地区	三级地区	四级地区
氢气管道	方法 A	0.50	0.50	0.50	0.40
	方法 B	0.72	0.60	0.50	0.40
天然气管道		0.72 ~ 0.80	0.60	0.50	0.40

焊接是长输管线的重要连接工艺,其热作用会导致接头部位出现严重的组织不均匀和复杂的残余应力,性能与母材相比发生一定的恶化,可能加剧氢致脆化失效的风险。已有学者研究表明,焊接残余应力和组织不均匀性均会导致管线钢中氢扩散的发生^[46],焊接接头区域的氢致裂纹扩展速度明显快于母材区域^[47]。鉴于此,氢气管道对于焊前预热和焊后热处理具有更高的要求。

5 事故后果

氢气无色无味,与天然气相比密度小,扩散系数大,泄漏后很难发现。若泄漏后被立即点燃会产生喷射火焰^[48-51],若在受限或半受限空间内泄漏后易发生可燃氢的积聚,延迟点燃后产生氢气云爆炸,甚至引发爆燃爆轰^[52-54]。氢气与天然气的介质特性对比见表 6。

表 6 氢气与天然气介质特性

介质	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	定压比热/ [$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	热值/ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	可燃极限 (vol%)	爆轰极限 (vol%)	最小点火能量/ MJ	燃烧速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
氢气	0.084	14.4	120 ~ 142	4.0 ~ 75.0	18.3 ~ 59	0.02	2.65
天然气	0.651	2.31	50.1 ~ 55.9	5 ~ 15	6.5 ~ 12	0.28	0.4

埋地管道内氢气、天然气泄漏事故后果具有显著的差异。刘延雷等^[55]基于有限体积法,建立了管道内高压氢气及天然气的泄漏扩散模型,考虑了氢气与天然气的管道泄漏事故的不同危险性,通过数值模拟研究得出了管道泄漏后氢气与天然气的不同泄漏扩散特性,结果表明,高压氢气泄漏扩散形成的危险云团较大且集中,扩散最大高度较天然气增加得快,在近地面区氢气泄漏扩散产生的危险后果较天然气小。Wilkening 等^[56]对比分析了埋地氢气管线与天然气管线发生泄漏事故后泄漏规律的不同,并结合能量的观点,讨论了氢气与天然气泄漏事故中可燃能量与总体化学能比值的差异,结果表明,甲烷可燃能量在总体化学能所占比例为 10% ~ 15%,而氢气可燃能在总体化学能所占比例为 60% ~ 80%,但大部分的可

燃氢气云是远离地面和建筑物的,发生爆炸情形的概率较低。赵博鑫等^[57]利用 DNV PHAST 软件对不同程度的管道泄漏事故进行模拟分析,确定天然气及氢气管道泄漏后的扩散状态及影响范围,得出了燃烧爆炸事故对周围的热辐射影响距离,结果表明,小孔泄漏(10 mm 孔径)情况下,可燃氢气、天然气沿风向扩散最远距离分别为 7.1 m 和 4.2 m,氢气、天然气喷射火焰热辐射影响距离分别为 9.8 m 和 36.2 m;大孔泄漏(50% 孔径)情况下,可燃氢气、天然气沿风向扩散最远距离分别为 96.7 m 和 218.1 m,氢气、天然气喷射火焰热辐射影响距离分别为 140.7 m 和 236.9 m。虽然已有学者模拟研究了氢气、天然气埋地管道泄漏事故后果,但由于管道内氢气、天然气泄漏速度很高,近似于当地声速,且土壤模型的建立较为

复杂,故研究过程中忽略了管道上方覆土对泄漏过程的影响,易造成模拟结果偏大。

6 安全间距

关于埋地管道的最小埋地厚度和安全间距,

氢气、天然气相关标准 ASME B31.12—2014, ASME B31.8—2018 和 GB 50251—2015 分别做出了不同的要求,其具体要求如表 7 所示。由于氢气是分子量最小的元素,比天然气更易于泄漏,适当加大埋地厚度,可以有效避免第三方的破坏。

表 7 管道最小埋地厚度和安全间距要求

标准	最小埋地厚度/mm	与地下管道、建筑物最小间距/mm
ASME B31.12—2014	正常地段	914
	石方地段	610
	掺氢农田地段	914
ASME B31.8—2018	正常地段	610 ~ 910
	石方地段	300 ~ 610 ($D \geq 500$) 460 ~ 610 ($D < 500$)
		457 (若不满足,需采用相应的隔离措施)
GB 50251—2015	干旱地段	600 ~ 800
	水田地段	800
	岩石地段	500
		150 (若不满足,需采用相应的隔离措施)
		300 (若不满足,需在两管间设置绝缘隔离物)

7 结论

在建设现状、规范标准、材料选择、设计制造、事故后果和安全间距等方面,对氢气管道和天然气管道做了系统的对比分析,主要结论如下。

(1)相较于天然气管道,氢气管道建设量较少,管道直径和设计压力较低,相关标准体系仍不完善,目前国内仍没有适用于氢气长输管道的设计标准,应重点加强长距离氢气管道输送技术的标准化工作。

(2)由于环境氢脆的影响,氢气管道选材具有更严格的限制,材料需满足高压氢环境相容性试验要求,ASME B31.12—2014 推荐使用 X42, X52 等低强度管线钢,且规定必须考虑低温性能转变等问题。

(3)为降低管道发生氢致失效的概率,相较于天然气管道,氢气管道设计公式里增加了“材料性能系数”,提高了管道的整体壁厚水平,同时氢气管道对焊前预热和焊后热处理的要求更为严格。

(4)与天然气泄漏相比,管道内高压氢气泄漏形成的危险云团较大且集中,扩散最大高度增加较快,在近地面区产生的危险后果较小,但氢气影响范围区间更广,更易扩散,且达到同样火焰热

辐射水平时,氢气的热辐射距离更近,能量相对更强。

(5)氢气管道最小埋地厚度与天然气管道差异较小,但氢气管道与地下其他管道、建筑物之间的最小间距要求明显高于天然气管道,以避免高压氢气泄漏事故发生后引发多米诺效应。

参考文献:

- [1] 郑津洋,张俊峰,陈霖新,等. 氢安全研究现状[J]. 安全与环境学报,2016,16(6):144-152.
- [2] 王赓,郑津洋,蒋利军,等. 中国氢能发展的思考[J]. 科技导报,2017,35(22):105-110.
- [3] 郑津洋,开方明,刘仲强,等. 高压氢气储运设备及其风险评估[J]. 太阳能学报,2006(11):1168-1174.
- [4] 毛宗强. 将氢气输送给用户[J]. 太阳能,2007(4):18-20.
- [5] DRIVE U S. Hydrogen Delivery Technical Team Roadmap[R]. California: Hydrogen Delivery Technical Team (HDTT),2017:14-16.
- [6] 赵永志,张鑫,郑津洋,等. 掺氢天然气管道输送安全技术[J]. 化工机械,2016,43(1):1-7.
- [7] Melaina M W, Antonia O, Penev M. Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory (NREL),2013:1-16.

- [8] Messaoudani Zine Labidine, Rigas Fotis, Binti Hamid Mahar Diana, et al. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: A critical review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(39): 17511–17525.
- [9] Nathan Parker. Using Natural Gas Transmission Pipeline Costs to Estimate Hydrogen Pipeline Costs [R]. California: Institute of Transportation Studies, 2004: 15–38.
- [10] Marta Moreno-Benito, Agnolucci Paolo, Papageorgiou Lazaros G. Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, 102: 110–127.
- [11] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 26–28.
- [12] 张小强, 蒋庆梅. ASME B31.12 标准在国内氢气长输管道工程上的应用 [J]. *压力容器*, 2015, 32(11): 47–51.
- [13] Fekete James R, Sowards Jeffrey W, Amaro Robert L. Economic impact of applying high strength steels in hydrogen gas pipelines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(33): 10547–10558.
- [14] Barton Smith, Eberle Cliff, Frame Barbara, et al. FRP Hydrogen Pipelines [R]. Washington: DOE Hydrogen Program, 2006: 8–23.
- [15] American Society of Mechanical Engineers. Hydrogen Piping and Pipelines: ASME B31.12—2014 [S]. 2014: 13–26.
- [16] 全国氢能标准化技术委员会. 中国氢能产业基础设施发展蓝皮书 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 16–18.
- [17] 祝恣智, 吴超, 李秋扬, 等. 全球油气管道发展现状及未来趋势 [J]. *油气储运*, 2017, 36(4): 375–380.
- [18] Tzimas E, Castello P, Petevs S. The evolution of size and cost of a hydrogen delivery infrastructure in Europe in the medium and long term [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(10–11): 1369–1380.
- [19] 王赓, 左阿惠, 李爱仙, 等. 我国氢能技术标准化战略研究 [J]. *中国标准化*, 2010(8): 24–26.
- [20] 王赓, 左阿惠, 李爱仙, 等. 我国氢能标准体系框架构建研究 [J]. *中国标准化*, 2010(4): 34–37.
- [21] 刘洪生, 段焱, 杨燕梅, 等. 标准化助力氢能产业发展 [J]. *中国标准化*, 2018(15): 46–52.
- [22] 张俊峰, 欧可升, 郑津洋, 等. 我国首部氢系统安全国家标准简介 [J]. *化工机械*, 2015(2): 6–10.
- [23] Compressed Gas Association. Hydrogen Pipeline Systems: CGA G–5.6 [S]. 2014: 37–42.
- [24] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 氢气站设计规范: GB 50177—2005 [S]. 北京: 中华人民共和国信息产业部, 2005.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 氢气使用安全技术规程: GB 4962—2008 [S]. 北京: 全国安全生产标准化技术委员会, 2008.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 氢气储存输送系统 第1部分: 通用要求: GB/T 34542.1—2017 [S]. 北京: 全国技术氢能标准化委员会, 2017.
- [27] American Society of Mechanical Engineers. Gas Transmission and Distribution Piping Systems: ASME B31.8—2018 [S]. 2018: 36–76.
- [28] Canadian Standard Association. Oil and Gas Pipeline Systems: Z662—2011 [S]. 2011: 33–80.
- [29] American Society of Civil Engineers. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe: ALA—2001 [S]. 2001: 29–32.
- [30] 中华人民共和国建设部. 输气管道工程设计规范: GB 50251—2015 [S]. 北京: 油气田及管道建设设计专业标准化委员会, 2015.
- [31] 陈瑞, 郑津洋, 徐平, 等. 金属材料常温高压氢脆研究进展 [J]. *太阳能学报*, 2008, 29(4): 502–508.
- [32] 翟建明, 徐彤, 寿比南, 等. 高压临氢环境中材料氢脆测试方法讨论 [J]. *中国特种设备安全*, 2017, 33(10): 1–6.
- [33] Moro I, Briottet L, Lemoine P, et al. Hydrogen embrittlement susceptibility of a high strength steel X80 [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2010, 527(27–28): 7252–7260.
- [34] Briottet L, Moro I, Lemoine P. Quantifying the hydrogen embrittlement of pipeline steels for safety considerations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(22): 17616–17623.
- [35] Hardie D, Charles E A, Lopez A H. Hydrogen embrittlement of high strength pipeline steels [J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(12): 4378–4385.
- [36] 周池楼. 140 MPa 高压氢气环境材料力学性能测试装置研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [37] 郑津洋, 周池楼, 徐平, 等. 高压氢环境材料耐久性测试装置的研究进展 [J]. *太阳能学报*, 2013, 34(8): 1477–1483.
- [38] Bo Meng, Gu Chaohua, Zhang Lin, et al. Hydrogen

- effects on X80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11):7404–7412.
- [39] 韩勇,陈兴阳,周成双,等. 极端临氢环境金属材料力学性能数据库开发及应用[J]. *科技导报*, 2016, 34(8):89–95.
- [40] 蒋庆梅,张小强. 氢气长输管道钢管选材研究[J]. *油气田地面工程*, 2016, 35(9):1–3.
- [41] 蒋庆梅,张小强. 氢气与天然气长输管道线路设计 ASME 标准对比分析[J]. *压力容器*, 2015, 32(8):44–49.
- [42] 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.
- [43] 万晓景,陈业新,程晓英. 金属间化合物环境氢脆的研究进展[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(5):458–464.
- [44] Dadfarnia Mohsen, Nagao Akihhide, Wang Shuai, et al. Recent advances on hydrogen embrittlement of structural materials[J]. *International Journal of Fracture*, 2015, 196(1):223–243.
- [45] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels. Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels; ASME BPVC – VIII – 3—2017 [S]. 2017:136–139.
- [46] 张体明,赵卫民,蒋伟,等. X80 钢焊接残余应力耦合接头组织不均匀下氢扩散的数值模拟[J]. *金属学报*, 2019, 55(2):258–266.
- [47] Ronevich Joseph A, D'Elia Christopher R, Hill Michael R. Fatigue crack growth rates of X100 steel welds in high pressure hydrogen gas considering residual stress effects[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 194:42–51.
- [48] Mogi T, Horiguchi S. Experimental study on the hazards of high-pressure hydrogen jet diffusion flames [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(1):45–51.
- [49] Molkov Vladimir, Saffers Jean-Bernard. Hydrogen jet flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(19):8141–8158.
- [50] Schefer R W, Houf W G, Williams T C, et al. Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(12):2081–2093.
- [51] Cirrone D M C, Makarov D, Molkov V. Simulation of thermal hazards from hydrogen under-expanded jet fire [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(17):8886–8892.
- [52] Groethe M, Merilo E, Colton J, et al. Large-scale hydrogen deflagrations and detonations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13):2125–2133.
- [53] Grune J, Sempert K, Friedrich A, et al. Detonation wave propagation in semi-confined layers of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11):7589–7599.
- [54] Grune J, Sempert K, Haberstroh H, et al. Experimental investigation of hydrogen-air deflagrations and detonations in semi-confined flat layers [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(2):317–323.
- [55] 刘延雷,徐平,郑津洋,等. 管道运输高压氢气与天然气的泄漏扩散数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(10):1252–1255.
- [56] Wilkening H, Baraldi D. CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13):2206–2215.
- [57] 赵博鑫,朱明,彭莹,等. 基于 PHAST 软件模拟氢气、天然气管道泄漏[J]. *石化技术*, 2017, 24(5):48–50.

作者简介:刘自亮(1996),男,主要研究方向为高气氢气的储运安全,通信地址:310027 浙江省杭州市西湖区浙大路 38 号浙江大学玉泉校区第四教学楼 204, E-mail: liuziliang@zju.edu.cn。

通讯作者:花争立(1990),男,助理研究员,研究方向为先进能源承压设备,通信地址:310027 浙江省杭州市西湖区浙大路 38 号浙江大学玉泉校区第四教学楼 101, E-mail: huazhengli007@126.com。

本文引用格式:

刘自亮,熊思江,郑津洋,等. 氢气管道与天然气管道的对比分析[J]. *压力容器*, 2020, 37(2):56–63.

Liu Ziliang, Xiong Sijiang, Zheng Jinyang, et al. Comparative analysis of hydrogen pipeline and natural gas pipeline [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2020, 37(2):56–63.