

国内外输氢管道相关标准及 技术要求分析*

宋海辉^{1,2}, 毕宗岳^{1,2}, 祝少华^{1,2}, 任永峰^{1,2},
薛磊红^{1,2}, 刘 斌^{1,2}

(1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 陕西 宝鸡 721008;
2. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 为了更好地了解国内外输氢管道标准制定和应用情况, 对 ASME B31.12—2019《氢气管道和管线》、CGA G-5.6—2005 (R2013)《氢气管道系统》以及 GB/T 34542《氢气储存输送系统》、GB/T 9711《石油天然气工业管线输送系统用钢管》和 T/CSPSTC 103—2022《氢气管道工程设计规范》等标准分别从标准内容、适用范围、管材设计与选用、检测评价以及试验方法等方面进行了分析对比, 以期为我国输氢管材研究、输氢管道标准制定以及管道建设提供参考。

关键词: 输氢管道; 标准; 管材; 管道安全

中图分类号: TE832

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.01.010

Analysis on Technical Requirements and Standards for Domestic and International Hydrogen Transmission Pipelines

SONG Haihui^{1,2}, BI Zongyue^{1,2}, ZHU Shaohua^{1,2}, REN Yongfeng^{1,2}, XUE Leihong^{1,2}, LIU Bin^{1,2}

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: In order to better understand the development and application of the domestic and international hydrogen pipeline standards, analysis and comparison were conducted on ASME B31.12—2019 *Hydrogen Pipelines and Pipelines*、CGA G-5.6—2005 (R2013) *Hydrogen Pipeline System*、GB/T 34542 *Hydrogen Storage and Transportation Systems*、GB/T 9711 *Steel Pipes for Pipeline Transportation Systems in the Petroleum and Natural Gas Industry* and T/CSPSTC 103—2022 *Design Specification for Hydrogen Pipeline Engineering* from the aspects of standard content, application scope, pipe design and selection, testing and evaluation, and testing methods in order to provide reference for the research of hydrogen pipeline materials, the formulation of hydrogen pipeline standards, and pipeline construction in China.

Key words: hydrogen transmission pipeline; standards; pipe; pipeline safety

0 前 言

氢能作为一种高效、清洁、可持续的零碳能源, 是未来能源结构中重要的一环, 在能源转型和碳中和的道路上扮演着关键角色。随着氢能的

发展与相关技术的成熟和完善, 大规模集中制氢和氢的长距离运输是未来趋势^[1]。高效经济的管道运输方式, 是氢能实现大规模商业化发展的重要方向, 世界上已有多个国家建设运行了输氢管道。

*基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科技研发项目“中长距离管道纯氢/掺氢输送关键技术研究”(项目编号 2021DJ5002 (JT))。

在氢能领域标准化工作方面,国际标准化组织氢能技术委员会(ISO/TC 197)负责国际上与氢能有关的生产、储存、运输、检测和使用等方面的标准化工作。我国于2008年6月成立了全国氢能标准化技术委员会(SAC/TC 309),负责我国氢能相关的标准制修订工作以及与ISO/TC 197对口工作,其秘书处由中国标准化研究院承担^[2]。钢管作为输氢管道最主要的装备,其质量和性能对输氢管道的安全运行具有极大的影响。本研究对国内外相关输氢管道用钢管标准进行分析及对比研究。

1 国外输氢管道标准

欧美国家对输氢管道的研究和建设起步较早,经过多年研究和工程经验积累,形成了比较健全的氢气输送管道标准体系。美国工程师协会编制的ASME B31.12《氢气管道和管线》和欧洲压缩气体协会编制的CGA G-5.6—2005(R2013)《氢气管道系统》均适用于氢气输送管道的设计、施工、运行、维护等。

1.1 ASME B31.12—2019

1.1.1 总体结构

该标准由美国机械工程师协会发布,适用于将氢气从制造厂输送到使用地的长输管道、分输管道和服务管线。标准主要由三部分组成,第一部分即GR部分,为一般性要求,主要包含了管道及其附件所用材料、成型、焊接、热处理、测试、检验、检查、操作和维护等的定义和要求;第二部分即IP部分,为工艺管道,该部分适用于氢气生产与应用方面,包括炼厂、化工厂、发电厂、加氢站、氢燃料装置和相关设施等领域^[3],对工艺管道的材料和部件、设计、制造、装配、安装、

检测、检查、测试、操作和维护等提出了要求;第三部分即PL部分,为管线部分,适用于将氢气从生产设施输送至最终使用点的输送管线、分配管线和供气管线,规定了氢气管线的材料、部件、设计、制造、装配、检验、测试、运行和维护等要求。另外,在附录中,规定了地上氢设施如压缩机、防爆、检漏、建筑等设计要求,规定了引用标准、名词定义、保障措施、气体泄漏控制准则、金属管道设计许用应力和质量系数等。

1.1.2 管材设计与性能要求

针对氢气管道用钢管,ASME B31.12从材料化学成分、组织类型、力学性能以及焊接性等多个方面提出了要求。在材料选择方面,ASME B31.12指出碳钢材料已经在氢气管道输送中应用达几十年,工业气体公司在美国和欧洲运营了超过1 600 km的管线。在此背景下,氢气工况中已经验证过的钢有ASTM A106的B级、ASTM A53的B级,以及API SPEC 5L的X42级和X52级(PSL2级)等,建议优先使用API SPEC 5L PSL2的X42级和X52级。与API SPEC 5L相比,对C元素和S元素最大含量限制更严,并要求晶粒细化,减少夹杂物和组织偏析;为了提高焊接性,减小氢脆,进一步降低碳当量,并要求焊缝硬度低于248HV₁₀;管材强度等级推荐选用X52(360 MPa)及以下,管型可采用电阻焊管、无缝管或双面埋弧焊管。

针对断裂控制,给出了方法A和方法B两个选项,其试验和要求见表1和表2。方法A对韧性提出了要求,可实现脆性断裂控制,但对管道韧性的要求较API SPEC 5L标准偏低,按照API SPEC 5L标准生产的钢管基本符合要求^[4]。相对于方法A,方法B对管材各项性能要求更高,管材除

表1 基于规范的设计方法(方法A)

性能	要求
脆性断裂	管径>114.3 mm时,参照API SPEC 5L附录G进行冲击和落锤试验,夏比冲击试样平均剪切值≥80%(较小尺寸试样平均剪切值≥85%),落锤撕裂试验平均断口剪切面积≥40%;管径<114.3 mm时,不需要开展试验。试验温度为0℃或预期的最低金属温度。
止裂韧性	管径>114.3 mm时,参照API SPEC 5L附录G进行冲击和落锤试验,夏比冲击功值≥ $0.008(RT)^{0.39}\sigma_h^2$ (R 为管道半径; t 为公称壁厚; σ_h 为设计压力下的环向应力);管径<114.3 mm时,不需要开展试验。试验温度为0℃或预期的最低金属温度。
强度	管体和焊缝金属抗拉强度均不应超过690 MPa;钢管屈服强度不应超过485 MPa。
冲击韧性	焊缝和热影响区夏比冲击功:外径≤1 422 mm时,对于全尺寸试样≥27 J,或小尺寸试样338 kJ/m ² ;外径>1 422 mm时,对于全尺寸试样≥40.6 J,或小尺寸试样508 kJ/m ² 。

表2 基于材料抗氢性能的设计方法（方法B）

性能	要求
韧性	脆性断裂控制、止裂韧性、焊缝及热影响区强度和冲击韧性的要求与选项A相关要求一致。
抗断裂性	临界应力强度系数 K_{IH} 应 $\geq K_{IA}$,且不应小于 $55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。
钢管和焊接材料	符合ASME BPVC规范第Ⅷ卷第3部分的第KD-10条规定的适用规则。
成分及夹杂	$w(\text{P}) \leq 0.015\%$;需注意控制夹杂形状。
强度	管体和焊缝金属最大抗拉强度均不应超过758 MPa;钢管最小屈服强度不应超过552 MPa。

应满足 API SPEC 5L PSL 2 的所有适用规则,同时还应满足氢气环境中管材抗氢性能要求。为了获得氢气环境下更高的断裂韧性, ASME B31.12 明确提出, 管材的显微组织为均匀分布的多边形铁素体和针状铁素体, 晶粒度为 ASTM 9 级或更细, 并采用低碳微合金钢, P_{cm} 应小于 0.17%, 采用热机械控制轧制 (TMCP) 工艺加工。

1.2 CGA G-5.6—2005 (R2013)

该标准由欧洲压缩气体协会(CGA)和欧洲工业气体协会 (EIGA) 共同编制, 适用于纯氢及氢混合物的输送和配送系统, 仅限于气态产品, 温度在 $-40 \sim 175 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 总压力为 $1 \sim 21 \text{ MPa}^{[5]}$ 。

1.2.1 通用要求

CGA G-5.6 规定氢气管道用钢管的制造工艺、材料、等级和检验要求应符合 API SPEC 5L 规范。管型可采用 HFW 焊管、无缝管或埋弧焊管。管体、焊缝及热影响区硬度不应超过 22HRC。为了控制氢脆的发生, 在材料组织控制方面应满足: ①应优选具有均匀细晶显微组织的合金; ②避免使用过硬或高强度合金; ③使用洁净度更高的钢, 尽量减少非金属夹杂物; ④无明显的表面和内部缺陷。如果无法满足上述四个条件, 则可能需要降低管道运行压力 (低于规定的最小屈服强度的 30% 或规定的最小极限抗拉强度的 20%, 以较低者为准); 钢管表面应无划痕、缺口、腐蚀等缺陷; 水压试验时, 钢管应在规定最小屈服强度的 75%~100% 载荷下进行测试, 根据直径的不同, 压力保持时间至少为 5~10 s。

1.2.2 碳钢要求

许多金属材料在氢气环境中会发生脆化, 包括碳钢 (特别是高强度钢)、不锈钢和镍合金。其中碳钢作为输氢管线中最常用的材料, CGA G-5.6 对于碳钢的材料性能要求见表 3。应

该注意的是, 焊接接头通常比母材更硬, 因此更容易脆化。材料的抗拉强度和屈服强度越大, 氢脆风险越大, 所以在氢气管道材料设计中不仅要规定材料的最小屈服强度, 还要规定其最大屈服强度, 以降低氢脆发生的概率^[6]。API SPEC 5L X52(及更低强度牌号)和 ASTM A 106 B 级已广泛应用于输氢管道。

表3 碳钢材料性能要求

热处理	焊缝应进行局部正火热处理。对于要在高应力水平下使用的管道, 最好是对碳钢进行正火处理。
化学分析	①CE 应 $\leq 0.43\%$, 所有额外添加的元素, 如用于控制硫化物形状的钙和稀土, 用于脱氧的铝, 以及可用于 CE 计算的元素, 均应报告; ②拉伸强度, 推荐最大抗拉强度为 800 MPa。
韧性要求	满足附录 K 中的参考文献 2.1 和 16.3.1。

1.2.3 微合金钢要求

微合金钢管材目前已成为输氢管道的首选管材。自 20 世纪 90 年代初以来, 国外已有大量的 X52 级微合金管材用于输送压力超过 7 MPa 的氢气输送管道。管型可采用 HFW 焊管、无缝管和埋弧焊管, 由于微合金钢管主要采用高频焊 (HFW) 工艺制造, 此部分主要针对焊管的要求。

(1) 钢级: 微合金钢氢管道允许的钢级为 X42 和 X52, 不得用高强度等级的钢材替代。

(2) 制造过程和材料要求: 钢管材料应为氧气顶吹或连续铸造的电炉钢, 并经过完全脱渣脱气处理; HFW 焊管焊缝和热影响区应进行正火热处理。允许在水压试验前对钢管进行低温应力消除。

(3) 化学成分: $w(\text{S})$ 不应超过 0.01% (API SPEC 5L PSL 2 限值为 0.015%)。 $w(\text{P})$ 不应超过 0.015% (API SPEC 5L PSL 2 限值为 0.025%)。碳当量 CE 最高 0.35% (API SPEC 5L PSL2 限值 0.43%)。任何额外添加的元素, 如稀土、钛、铌、

硼、铝等，以及任何影响碳当量CE的元素，都应报告。碳钢中建议锰碳比至少为3:1，但不宜过大。

(4) 金相组织：管材金相组织以细晶铁素体为主，晶粒度应达到ASTM 8或更细；在整个焊缝厚度上焊接熔合良好；母材、焊缝和热影响区硬度不应超过210HV₁₀。

(5) 力学性能：管材实际屈服强度和抗拉强度的最大值与最小值之差应小于以下值：①X52为165 MPa；②X42为172 MPa。HFW焊管的压扁试验验收标准比API SPEC 5L进一步加严，减小到原钢管外径的一半^[7]。夏比冲击功要求见表4，测试温度为0℃。试验应采用全尺寸试样，剪切面积均

表4 不同尺寸试样夏比V形缺口冲击功要求

试样尺寸	横向冲击功/J		纵向冲击功/J	
	单值	均值	单值	均值
全尺寸	94	71	118	88
3/4	71	53	88	67
2/3	48	48	78	58
1/2	34	35	58	43
1/3	23	23	39	30
1/4	18	18	30	22

表5 GB/T 34542《氢气储存输送系统》的组成部分

序号	标准号	名称	状态
1	GB/T 34542.1—2017	氢气储存输送系统 第1部分:通用要求	已发布
2	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	已发布
3	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	已发布
4	GB/T 34542.4	氢气储存输送系统 第4部分:氢气存储系统技术要求	未发布
5	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	未发布
6	GB/T 34542.6	氢气储存输送系统 第6部分:氢气压缩系统技术要求	未发布
7	GB/T 34542.7	氢气储存输送系统 第7部分:氢气充装系统技术要求	未发布
8	GB/T 34542.8	氢气储存输送系统 第8部分:防火防爆技术要求	未发布

GB/T 34542.1—2017对氢气输送用管材成分、组织、性能等涉及不多，只是沿用了国内前期无缝金属管道设计，与国外相比有较大差距。GB/T 34542.2—2018中规定了氢气管道及容器氢脆敏感性评价方法：①慢应变速率拉伸试验；②疲劳寿命试验；③断裂韧性试验；④疲劳裂纹扩展速率试验等。但是，仅仅给出了试验方法，无验收指标。GB/T

值应至少为75%，单值不得低于60%。对于小直径钢管，只需要纵向试样。

2 国内输氢相关标准

我国对氢气长输管道的研究和建设起步较晚，与发达国家有较大差距。近年我国已陆续建设多条输氢管道，且已开展了多项相关试验，但目前尚未制定发布氢气长输管道国家标准及规范。与其相关的标准有GB/T 34542《氢气储存输送系统》、GB/T 9711《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》和T/CSPSTC 103—2022《氢气管道工程设计规范》等。以下分别对上述标准进行介绍。

2.1 GB/T 34542

GB/T 34542《氢气储存输送系统》适用于工作压力不大于140 MPa，环境温度不低于-40℃且不高于65℃的氢气储存、输送、压缩、充装及其组合系统。该标准共分为8个部分，其中，第1、2、3部分已发布实施，第4、5、6、7、8部分处于起草编制中^[8]。表5列出了GB/T 34542中各部分组成情况。

34542.3—2018规定了氢气环境下的圆片小试样爆破试验方法。

2.2 GB/T 9711

GB/T 9711是我国使用范围比较广泛的石油天然气输送用钢管的国家标准，自1988年第一版发布以来，经历了1997年、2011年、2017年、2022年4次修订，第4次修订中内容变化最大的是增加了附录A纯氢输送管道用PSL2钢管订购

的内容。该部分规定了适用于氢气纯度不小于99.99%、外径不大于610 mm、钢级不高于L360/X52的纯氢输送管道用PSL2钢管的附加条款^[9]。该标准增加的氢气输送管材技术内容,结合了目前国际上广泛采用的ASME31.12—2019《氢气管道系统和管道》和CGA G-5.6—2005 (R2013)《氢气管道系统》,在大量实物试验研究和验证的基础上,提出了相关内容。该标准已经于2023年11月27日正式发布,可为我国纯氢输送管道建设和钢管制造提供标准支撑。

2.3 T/CSPSTC 103—2022

该标准为国内首个氢气长输管道工程设计团体标准,由中国科技产业化促进会组织,中国石油管道工程有限公司、国家管网、宝山钢铁股份有限公司、宝鸡石油钢管有限责任公司等50余家管道上下游相关单位共同联合参与起草编制,该标准的发布实施,为我国下一步氢气管道建设奠定了标准基础。

管材的选用方面,规定输氢管道用钢管制造应执行GB/T 9711规定,等级为PSL2,钢管类型可采用HFW焊管、无缝管和埋弧焊管,钢管钢级不宜大于L360 (X52)。对于钢管的最大屈服强度不宜超过规定最低屈服强度120 MPa,最大抗拉强度不宜超过规定最低抗拉强度150 MPa^[10]。

3 输氢管道检验标准

氢环境会影响管材力学性能的各个方面,如抗拉强度、伸长率、疲劳寿命、疲劳裂纹扩展速率和断裂韧性等。GB/T 34542.2—2018中规定了氢气管道及容器氢脆敏感性评价方法,通过氢气环境下对小试样进行相关试验,可以评估其力学性能的变化情况^[11]。

(1) 慢应变拉伸试验。评估材料在氢环境中的应变率敏感性,可以在氢环境下或者试样预先充氢后在空气或氢中进行。GB/T 34542.2—2018中要求该试验通过对光滑圆棒试样或带缺口的圆棒试样采用恒位移速率加载,对于光滑圆棒试样的试验应变速率最大不应超过 2×10^{-5} m/s;带缺口的圆棒试样,应变速率最大不应超过 2×10^{-6} m/s。在氢环境下,通过对光滑试样或缺口试样的慢应变拉伸,获得应力-应变曲线、抗拉强度、屈服强度、断面收缩率和断后伸长率等^[12]。

(2) 疲劳寿命试验。评价材料在氢环境下的疲劳寿命,试验采用载荷控制时,试验程序应符合GB/T 3075《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》的相关要求;当采用应变控制时,还应满足GB/T 26077《金属材料疲劳试验轴向应变控制方法》或GB/T 15248《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》的相关要求;试验频率宜取0.1~1 Hz。主要试验指标为应力/应变下的循环次数。

(3) 断裂韧性试验。评价材料在氢环境下的断裂韧性 K_{Ic} ,试验程序应满足GB/T 21143《金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法》的相关要求,试验以缺口张开位移或横梁位移作为控制变量,试验指标为断裂韧性值。在测试中,预制裂纹的试样在氢气环境中加载应力进行拉伸,能够引起裂纹增量的最小外加应力强度因子常被用来评价抗氢脆裂纹性能^[9]。

(4) 疲劳裂纹扩展速率试验。试验程序应满足GB/T 6398《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展方法》,试验主要指标为疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与裂纹预制结束时的应力强度因子范围 ΔK 的关系曲线。

(5) 氢脆敏感度试验。氢脆敏感性试验方法国内外相关标准见表6。用来测试在高压氢气下金

表6 国内外氢脆敏感性试验方法标准

试验标准	国外	国内
慢应变速率拉伸	ASTM G142	GB/T 34542.2—2018
疲劳裂纹扩展	ASTM E647	GB/T 6398
断裂韧性	ASTM E1820/ISO 7539.9	GB/T 21143、GB/T 2538
圆盘压力试验	ASTM F1459	GB/T 34542.3
应力强度因子门槛值测试	ASTM E1681	—
冲击韧性	ISO148-1	—

属材料的氢脆，薄膜状的圆盘试样放在试验容器中承受高压氢气和氢气，以恒定的升压速率对腔体加气体压力直至圆片爆破，氢气和氮气的爆破压力比能够显示材料在氢环境中的氢脆敏感性^[13]。

4 结 论

(1) 在输氢管道标准方面，ASME B31.12 和 CGA G-5.6 是国际上广泛采用的标准，内容全面详细，认可度较高，有大量的实际应用案例，可为我国当前输氢管道建设和钢管生产提供参考。

(2) 针对输氢管材抗氢性能的试验方法，GB/T 34542 给出了相关试验方法指导，但缺少对于抗氢性能试验结果评价的验收标准，因此还需要开展大量的试验评价，研究制定对于不同压力和氢气比例下针对输氢管材抗氢性能的验收标准。

(3) 国内前期在输氢管道相关标准中钢管选材多推荐使用低钢级无缝管，而 ASME B31.12 和 CGA G-5.6 并无此限制，而且大量采用 HFW 焊管，关键是要对管材化学成分和组织进行优化设计和严格控制。

参考文献：

- [1] 张鹏程,胡龙,张佳,等.中国西部地区开展天然气管道氢气掺输的思考[J].国际石油经济,2021,29(9):73-78.
- [2] 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):8.
- [3] The American Society of Mechanical Engineers. Hydrogen

Piping and Pipelines: ASME B31.12—2019[S].New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2019.

- [4] 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.
- [5] European Industrial Gases Association. Hydrogen Pipeline Systems: CGAG-5.6-2005 (R2013) [S]. Brussels, Belgium: European Industrial Gases Association, 2013.
- [6] 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.
- [7] 陈林,董绍华,李凤,等.氢环境下压力容器及管道材料相容性研究进展[J].力学与实践,2022(3):503-508.
- [8] 国家市场监督管理总局.氢气储存输送系统第1部分:通用要求:GB/T 34542.1[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.石油天然气工业管线输送系统用钢管:GB/T 9711[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [10] 中国科技产业化促进会.氢气管道工程设计规范:T/CSPSTC 103—2022[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [11] 国家市场监督管理总局.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:GB/T 34542.2[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [12] 韩秀林,孙宏,李建一,等.输氢管道钢管研究进展[J].钢管,2023,52(1):1-7.
- [13] 国家市场监督管理总局.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:GB/T 34542.3 [S].北京:中国标准出版社,2018.
- [14] 李妍,张国庆,阳利军,等.输氢海底管道选材探讨[J].腐蚀与防护,2022,43(9):99-102.
- [15] 钟桂香,郝祥远.输氢管道工程设计要点[J].焊管,2023,46(3):59-64.

作者简介：宋海辉（1991—），男，大学本科，工程师，主要从事标准制修订工作。

收稿日期：2023-08-18

编辑：罗 刚

欢迎投稿

欢迎订阅