



中华人民共和国国家标准

GB/T 34542—5

氢气储存输送系统 第 5 部分：氢储运系统 技术要求

Storage and transportation systems for gaseous hydrogen
Part 5: Technical requirements for hydrogen transportation system

（点击此处添加与国际标准一致性程度的标识）

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语、定义和符号.....	3
3.1 术语和定义.....	3
3.2 符号.....	4
4 基本规定.....	5
4.1 通用要求.....	5
4.2 氢气品质.....	5
4.3 典型设备.....	5
4.4 环境管理.....	6
5 氢输运系统类别和选择原则.....	6
5.1 管道输氢系统.....	6
5.2 道路运氢系统.....	7
5.3 水路运氢系统.....	7
5.4 铁路运氢系统.....	7
5.5 多式联运输氢系统.....	8
5.6 氢输运系统选择原则.....	8
6 临氢材料.....	9
6.1 金属材料.....	9
6.2 非金属材料.....	11
7 设计.....	11
7.1 基本要求.....	11
7.2 工艺设计.....	12
7.3 机械设计.....	12
7.4 超压泄放.....	13
8 制造.....	14
8.1 成形.....	14
8.2 焊接.....	14
8.3 无损检测.....	15
附 录 A（资料性）氢输运系统选择指南.....	16
附 录 B（资料性）氢气中杂质组分控制指南.....	17
附 录 C（资料性）氢输运系统常用管线钢和铬钼钢临氢疲劳性能.....	19
附 录 D（资料性）氢气及掺氢天然气基本物性参数计算方法.....	22
附 录 E（资料性）输氢管道流速确定指南.....	27

前 言

GB/T 34542《氢气储存输送系统》分为以下八部分：

- 第1部分：通用要求；
- 第2部分：金属材料与氢环境相容性试验方法；
- 第3部分：金属材料氢脆敏感度试验方法；
- 第4部分：氢气储存设施；
- 第5部分：氢输运系统技术要求；
- 第6部分：氢气灌装系统；
- 第7部分：氢气压缩、增压设施；
- 第8部分：氢气储存输送系统的安全、测试和维护。

本部分为GB/T 34542的第5部分。

本部分按照GB/T 1.1—2020给出的规则起草。

本部分由全国氢能标准化技术委员会（SAC/TC 309）提出并归口。

本部分起草单位：XXXX、XXXX、XXXX、XXXX。

本部分主要起草人：XXX、XXX、XXX、XXX。

氢气储存输送系统

第 5 部分：氢输运系统技术要求

1 范围

本文件规定了氢输运系统的通用要求、氢气品质、典型设备和环境管理的基本要求，氢输运系统类别和选择原则，以及临氢材料、设计与制造的基本要求。

本文件适用于管道输氢系统、道路运氢系统、水路运氢系统、铁路运氢系统及多式联运输氢系统，具体范围如图 1 所示。

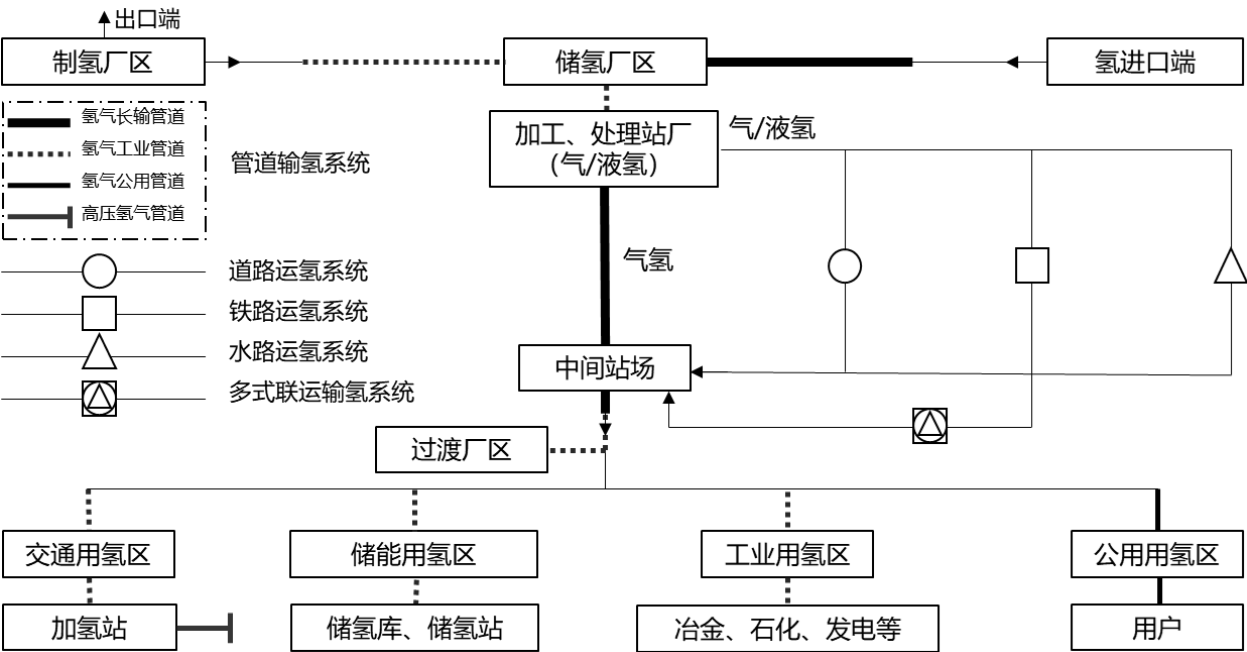


图1 本文件适用的氢输运系统范围

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 150（所有部分） 压力容器
- GB/T 3634.1 氢气 第 1 部分：工业氢
- GB/T 3634.2 氢气 第 2 部分：纯氢、高纯氢和超纯氢
- GB/T 4732（所有部分） 压力容器分析设计
- GB/T 5832.1 气体分析 微量水分的测定 第 1 部分：电解法
- GB/T 5832.2 气体分析 微量水分的测定 第 2 部分：露点法
- GB/T 6285 气体中微量氧的测定 电化学法
- GB/T 9711 石油天然气工业 管线输送系统用钢管

GB/T 10410 人工煤气和液化石油气常量组分气相色谱分析法

GB/T 11060.1 天然气含硫化合物的测定 第1部分：用碘量法测定硫化氢含量

GB/T 11062 天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法

GB/T 13609 天然气取样导则

GB/T 13610 天然气的组成分析 气相色谱法

GB/T 20801.1 压力管道规范 第1部分：工业管道

GB/T 20801.2 压力管道规范 工业管道 第2部分：材料

GB/T 20801.3 压力管道规范 工业管道 第3部分：设计和计算

GB/T 20801.4 压力管道规范 工业管道 第4部分：制作和安装

GB/T 20801.5 压力管道规范 第5部分：氢用管道

GB/T 20801.6 压力管道规范 工业管道 第6部分：安全防护

GB/T 24360 多式联运服务质量要求

GB/T 24499 氢气、氢能与氢能系统术语

GB/T 26466 固定式高压储氢用钢带错绕式容器

GB/T 29461 聚乙烯管道电熔接头超声检测

GB/T 29729 氢系统安全的基本要求

GB/T 30490 天然气自动取样方法

GB/T 31032 钢制管道焊接及验收

GB/T 33215 气瓶安全泄压装置

GB/T 34275 压力管道规范 长输管道

GB/T 34542.2 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 34542.3 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 34903.2 石油、石化与天然气工业 与油气开采相关介质接触的非金属材料 第2部分：弹性体

GB/T 35544 车用压缩氢气铝内胆碳纤维全缠绕气瓶

GB/T 37124 进入天然气长输管道的气体质量要求

GB/T 37244 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气

GB/T 38942 压力管道规范 公用管道

GB/T 42536 车用高压储氢气瓶组合阀门

GB/T 42610 高压氢气瓶塑料内胆和氢气相容性试验方法

GB/T 42612 车用压缩氢气塑料内胆碳纤维全缠绕气瓶

GB/T 42820 多式联运货物分类与代码

GB/T 42933 多式联运运载单元标识

GB/T 44430 集装箱多式联运运单

GB/T 44457 加氢站用储氢压力容器

GB/T 46599 氢气储输管道用钢管

GB 1589 汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值

GB 2894 安全色和安全标志

GB 50028 城镇燃气设计规范

GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范

GB 50177 制氢供氢工程设计标准

GB 50251 输气管道工程设计规范

GB 55009 燃气工程项目规范

HG/T 22821 氢气管道设计规范

JT/T 1428 营运车辆后向碰撞预警系统性能要求和测试规程
JT/T 1524 营运车辆全景环视系统技术要求和试验方法
JT/T 1568 氢气（含液氢）道路运输技术规范
NB/T 10354 长管拖车
NB/T 11745 移动式真空绝热液氢压力容器
NB/T 47013.1 承压设备无损检测 第1部分：通用要求
NB/T 47013.2 承压设备无损检测 第2部分：射线检测
NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第3部分：超声检测
NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测
NB/T 47013.5 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测
NB/T 47013.6 承压设备无损检测 第6部分：涡流检测
NB/T 47013.15 承压设备无损检测 第15部分：相控阵超声检测
NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
TB/T 30008 铁路危险货物运输技术要求
TSG R0005 移动式压力容器安全技术监察规程

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

GB/T 29729、GB/T 24499 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

氢运输系统 hydrogen delivery system

氢气或液氢从氢源输送到中间站场或用户的系统，包括管道输氢系统、道路运氢系统、水路运氢系统、铁路运氢系统和多式联运输氢系统。

注：文件中的氢气包括纯氢、工业氢和氢气摩尔分数超过3%的掺氢天然气；氢源包括制氢厂、氢气站、储氢库、储氢罐等；用户包括配气中心、加氢站、储氢库、炼油厂、合成氨厂等。

3.1.2

管道输氢系统 hydrogen pipe transportation system

通过管道将氢气从气源输送到中间站场或用户的系统，包括氢气长输管道、氢气工业管道、氢气公用管道和高压氢气管道。

3.1.3

道路运氢系统 hydrogen highway transportation system

通过道路将氢气或液氢从氢源输送到中间站场或用户的系统，输送工具一般包括用于压缩氢气的长管拖车、管束式集装箱或瓶式集装箱，以及用于冷冻液态氢的液氢罐车或液氢罐式集装箱。

3.1.4

水路运氢系统 hydrogen waterway transportation system

通过水路将液氢从氢源输送到中间站场或用户的系统，输送工具一般为配备液氢储罐或液氢罐式集装箱的海运船舶或内河船舶。

3.1.5

铁路运氢系统 hydrogen railway transportation system

通过铁路将氢气或液氢从氢源输送到中间站场或用户的系统，输送工具一般为铁路罐车或液氢罐式集装箱。

3.1.6

多式联运输氢系统 hydrogen multi-modal transportation system

由两种或两种以上的氢输运方式相互衔接、转运而共同完成的氢输运系统。

3.1.7

高压氢气管道 high pressure hydrogen pipeline

设计压力大于 41 MPa 的氢气管道。

3.1.8

数字化设备 digital equipment

利用数字技术进行数据采集、处理、存储、传输或控制的电子设备。

3.1.9

冲蚀流速 erosion velocity

导致管道内表面材料发生显著冲蚀损失的流体流速。

注：冲蚀流速通常与流体密度、固体颗粒含量、管道材质及流态等因素相关。

3.1.10

安全流速 safety velocity

综合考虑冲蚀、噪声、振动等因素后，管道系统允许运行的最大流体流速。

3.1.11

经济流速 optimum velocity

基于全寿命周期成本分析，统筹输送效率、能耗、投资、维护及安全等因素所确定的管道系统最优运行流体流速。

3.1.12

材料氢相容性 material hydrogen compatibility

材料在氢环境中保持其力学、物理及化学性能稳定的能力。

3.1.13

材料氢适用性 material hydrogen suitability

材料能满足零部件/设备在氢环境中设计要求的能力。

3.1.14

损伤容限设计 damage tolerance design

假定结构中存在初始裂纹，通过材料性能评估、应力分析和断裂力学计算，使含缺陷结构在定期检测的保障下，在整个服役期内始终满足安全要求的设计方法。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

K_{IC}	平面应变断裂韧度，单位为兆帕根号米（ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ）；
LE	侧膨胀值（平均值），单位为毫米（mm）；
M_s	低温马氏体自转变温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；
Ni_{eq}	镍当量，单位为百分比（%）；
A	奥氏体稳定系数。

4 基本规定

4.1 通用要求

4.1.1 氢输运系统的设计、建造、运行、维护及退役处置，应遵守国家相关法律、法规、标准及特种设备安全技术规范的规定。

4.1.2 氢输运系统应针对氢气的泄漏性、扩散性及易燃易爆特性，在设计、建造及运行中采取有效的防泄漏、防积聚和防点燃措施，并满足 GB/T 29729 的有关规定。

4.1.3 氢输运系统临氢承压元件的选材、设计、制造和检验，应充分考虑并评估氢环境引起的材料氢脆风险。

4.1.4 氢输运系统中压力容器、气瓶及压力管道等特种设备，其材料、设计、制造、安装、改造、修理、使用、检验和安全附件及仪表，应满足相应标准的要求。压力容器应遵守 GB/T 150、GB/T 4732、GB/T 26466、GB/T 44457 等标准；气瓶应遵守 GB/T 35544、GB/T 42612 等标准；压力管道应遵守 GB/T 46599、GB/T 20802.5、HG/T 22821 等标准。

注：文件中的压力容器包括固定式储氢容器和移动式储氢容器（如氢气长管拖车、氢气管束式集装箱、氢气瓶式集装箱、液氢罐车、液氢罐式集装箱等）；气瓶包括高压氢气瓶、液氢瓶和内装储氢材料的气瓶等。

4.1.5 氢输运系统中电气设备和线路的防爆等级、安装及使用条件应符合 GB 50058 的规定。

4.1.6 氢输运系统的操作、维护及应急处理人员应接受氢气特性、设备操作规程、维护保养及应急处置等专项培训，并经考核合格后方可上岗。其中，涉及特种设备作业的人员，应取得相应项目的特种设备作业人员证书。

4.1.7 氢输运系统的设备与管道应按照 GB 2894 的规定，设置清晰、持久和规范的安全标识。标识内容应包括但不限于：介质名称、流向箭头（仅管道适用）、设计压力等级及“易燃易爆”危险警示标志。

4.1.8 氢输运系统在首次投运前，应按设计文件规定进行系统气密性试验或泄漏试验，试验结果应记录并存档，保存期限不得少于系统的设计使用年限。系统在运行期间如发生氢气或液氢泄漏事件，应在修复后重新进行泄漏试验，试验合格后方可恢复运行。

4.2 氢气品质

4.2.1 纯氢

4.2.1.1 纯氢的品质要求应根据使用场景确定，并符合 GB/T 3634.2 的规定。

4.2.1.2 氢燃料电池用氢气的品质应符合 GB/T 37244 的规定。

4.2.2 工业氢

工业氢的品质要求应根据其使用场景确定，并符合 GB/T 3634.1 的规定。

4.2.3 掺氢天然气

掺氢天然气中氢气摩尔分数应大于 3%，其他成分要求应符合 GB/T 37124 的规定。

4.3 典型设备

4.3.1 增压设备

4.3.1.1 氢气长管拖车、氢气管束式集装箱和氢气瓶式集装箱输送氢气时，业主和用户端应按氢气储

存或加注参数设置和选用增压用氢气压缩机和储氢容器。

4.3.1.2 氢气管道输送氢气时，应按输送参数（管径、压力、流量等）选用氢气压缩机和储氢容器。

4.3.2 减压设备

4.3.2.1 氢气减压设备应确保输出压力在要求的范围内稳定。其额定流量及调节能力应与下游用氢系统的需求相匹配。

4.3.2.2 氢气减压设备中的临氢承压元件宜评估氢气快速减压引起的局部温度骤降造成的损伤。

4.3.2.3 氢气减压设备出口侧或下游应设置安全泄压装置。

4.3.3 计量设备

4.3.3.1 管道输送氢气时，宜采用质量流量计。

4.3.3.2 采用氢气长管拖车、氢气管束式集装箱或氢气瓶式集装箱输送氢气时，可依据储氢瓶几何容积及起始与终止压力、温度及压缩因子等参数计算输氢量。

4.3.4 数字化设备

4.3.4.1 氢输运系统应配置数字化设备，根据输送方式功能需求实时监测氢气或液氢的温度、压力、流量、组分、氢含量或水露点等参数。

4.3.4.2 管道输氢系统应设置监控与数据采集系统，其功能应符合 GB 50251 的相关规定。

4.3.4.3 液氢罐车或液氢罐式集装箱应通过车载数字化装置，将液氢的压力、温度、液位等数据上传至控制中心，并具备超限自动报警功能。

4.3.4.4 可能出现氢气积聚的场所应设置固定式氢气检测器，并接入数字化平台实现泄漏报警。露天装置经评估无积聚风险时，可不设固定式氢气检测器。

4.4 环境管理

4.4.1 环境影响评估

氢输运系统的规划与建设应符合城乡规划、节能与集约用地要求，并应协调与铁路、道路、输电线路、河流等既有设施的关系。系统选址及设计时，应识别并评估其对环境敏感地区可能产生的影响。

4.4.2 氢气泄漏控制

氢输运系统应采取有效措施减少气体泄漏及操作排放。应评估氢气泄漏对大气、水体和土壤等环境要素的潜在影响，并进行综合环境影响评价。

4.4.3 噪声控制

氢输运系统的运行应控制噪声水平，使其符合所在地的噪声监测与控制标准。

4.4.4 社会影响与应急

氢输运系统的规划与运营应充分考虑周边社区和公众对氢能风险的认知与关切。应评估事故状态下可能造成的社会影响，并据此进行社会风险评估，并制定相应的应急预案。

5 氢输运系统类别和选择原则

5.1 管道输氢系统

管道输氢系统主要包括氢气长输管道、氢气工业管道、氢气公用管道和高压氢气管道。

5.1.1 氢气长输管道

5.1.1.1 氢气长输管道的设计、建造与检验应满足 GB/T 34275 和 GB/T 20801.5 的相关规定。

5.1.1.2 氢气长输管道的输送压力和管径，应在综合考虑气源条件、用户需求、环境条件等因素的基础上，经技术可行性、安全可靠性及经济性比选后确定。

5.1.2 氢气工业管道

氢气工业管道应满足 GB/T 20801.1~6 和 GB 50177 的规定。

5.1.3 氢气公用管道

5.1.3.1 氢气公用管道应符合 GB 55009、GB 50028 和 GB/T 20801.5 的规定。

5.1.3.2 在气源储备设施与城镇氢气管网之间，应设置输送能力和可靠性满足要求的输送系统。当储备设施位于异地时，应采取有效措施，确保储备气源能够可靠、按需输送至城镇氢气管网，并实现连续稳定供气。

5.1.4 高压氢气管道

5.1.4.1 高压氢气管道组成件（除密封件外）不应选用非金属材料。

5.1.4.2 高压氢气管道应采用无缝钢管及管件，不应使用铸件。

5.2 道路运氢系统

5.2.1 道路运氢宜采用压缩氢气或液氢输送方式。若采用其他方式，应经技术经济论证。

5.2.2 压缩氢气输送宜采用氢气长管拖车、氢气管束式集装箱或氢气瓶式集装箱，液氢输送宜采用液氢罐车或液氢罐式集装箱。

5.2.3 氢气（含液氢）道路运输技术应符合 JT/T 1568 的规定；运输车辆的外廓尺寸、轴荷及质量限值应符合 GB 1589 的规定。

5.2.4 氢气运输车辆宜装备符合 JT/T 1524 规定的全景环视系统。

5.2.5 氢气运输车辆的后向碰撞预警系统应符合 JT/T 1428 的规定。

5.2.6 道路运氢系统中的承压设备，其材料、设计、生产等应满足《道路危险货物运输管理规定》（交通运输部令 2023 年第 13 号）、《危险货物国际道路运输欧洲公约（ADR）》等相关法规和标准的规定。

注：文件中的承压设备包括压力容器、气瓶及压力管道。

5.3 水路运氢系统

5.3.1 水路运氢宜采用液氢输送方式。若采用其他方式，应经技术经济论证。

5.3.2 液氢水路输送工具宜为配备液氢储罐或液氢罐式集装箱的海运船舶或内河船舶。该船舶应经国家海事管理机构认可的船舶检验机构检验合格，并持有效的检验证书。

5.3.3 水路运氢系统中的承压设备，其材料、设计、生产等应满足《船舶载运危险货物安全监督管理规定》（交通运输部令 2024 年第 14 号）、《国际海运危险货物规则（IMDG Code）》、《危险货物国际内河运输欧洲公约（ADN）》等相关法规和标准的规定。

5.4 铁路运氢系统

5.4.1 铁路运氢宜采用液氢或压缩氢气输送方式。若采用其他方式，应经技术经济论证。

5.4.2 压缩氢气输送宜采用氢气管束式集装箱，液氢输送宜采用铁路罐车或液氢罐式集装箱。

5.4.3 铁路运氢系统中的承压设备，其材料、设计、生产等应满足 TB/T 30008、《铁路危险货物运输安全监督管理规定》（交通运输部令 2022 年第 24 号）、《危险货物国际铁路运输欧洲公约（RID）》等法规和标准的规定。

5.5 多式联运输氢系统

5.5.1 一般规定

5.5.1.1 多式联运输氢宜采用液氢罐式集装箱。采用其他方式时，应经技术经济论证。

5.5.1.2 多式联运输氢用液氢罐式集装箱的设计维持时间，应充分考虑罐箱装卸、运输、航行、转运等待及延误滞留等全过程所需时间，并在使用说明书或铭牌标识中给出充满率和设计维持时间的关系曲线。

5.5.1.3 多式联运输氢的货物分类原则和方法应符合 GB/T 42820 的规定，运载单元标识应符合 GB/T 42933 的规定。

5.5.1.4 多式联运输氢的基本原则、服务过程质量要求及质量评价指标应符合 GB/T 24360 的规定。

5.5.1.5 多式联运各方宜建立联合应急处置机制，明确分工和责任，实现各方 24 小时的信息互通与共享。发生液氢罐式集装箱泄漏事故时，应立即通知所有关联方，以便协同采取有效处置措施。

5.5.2 联运方式

5.5.2.1 水路-道路联运输氢应符合 TSG R0005、《船舶载运危险货物安全监督管理规定》（交通运输部令 2024 年第 14 号）、《道路危险货物运输管理规定》（交通运输部令 2023 年第 13 号）等标准或规范的要求。

5.5.2.2 铁路-水路联运输氢应符合 TSG R0005、《铁路危险货物运输安全监督管理规定》（交通运输部令 2022 年第 24 号）、《船舶载运危险货物安全监督管理规定》（交通运输部令 2024 年第 14 号）等标准或规范的要求。所用铁路液氢罐式集装箱应与港口装卸设备兼容。

5.5.2.3 道路-铁路联运输氢应符合 TSG R0005、《道路危险货物运输管理规定》（交通运输部令 2023 年第 13 号）、《铁路危险货物运输安全监督管理规定》（交通运输部令 2022 年第 24 号）等标准或规范的要求。所用液氢罐式集装箱应同时满足铁路和道路运输的振动与冲击标准。

5.5.2.4 采用上述未列的其他联运方式输氢时，应经技术和经济论证后确定。

5.5.3 接口基本规定

5.5.3.1 应根据各类输送系统的特点，制定相应的接口程序和装卸协议，应考虑不同输运方式与输氢设备在物理连接、数据互通和安全兼容方面的要求。

5.5.3.2 宜从整体角度对多式联运接口进行统一管理，在接口处推行标准化流程，并可考虑建立统一的多式联运系统管理机构。

5.5.3.3 内贸多式联运输氢的集装箱运单组成、设计与应用应符合 GB/T 44430 的规定。

5.5.3.4 进出口氢输运多式联运应满足《联合国国际货物多式联运公约》的规定。

5.6 氢输运系统选择原则

5.6.1 管道、道路、水路、铁路和多式联运输氢系统的选择应经技术经济论证确定。

5.6.2 氢输运系统选择应综合考虑输送安全性、运输距离、运输规模、运输成本、适配性、能耗、碳排放水平等因素，以确保输送方案满足安全、稳定、经济和环保的综合要求。

5.6.3 氢输运系统选择时，应结合基础设施发展现状，并根据氢的输运条件（用氢状态、运距、运

输量等），参照本文件附录 A 的规定进行比选。

5.6.4 氢输运系统应与上游制氢及下游用氢场景相匹配，以满足交通、储能、工业及发电等领域在用氢规模、连续性、纯度及成本等方面的要求。

5.6.5 氢输运系统宜根据实际情况灵活配置，构建多元化、多层次的氢输运网络体系。

6 临氢材料

6.1 金属材料

6.1.1 一般规定

6.1.1.1 氢输运系统临氢承压元件的金属材料选择，应综合评估材料（化学成分、微观组织、力学性能等）、使用条件（设计压力、设计温度、氢气品质、操作特点、电化学环境等）、应力状态（平均应力、应力幅、加载频率等）及制造工艺（成形、焊接、热处理等）对氢脆的影响。

6.1.1.2 选择临氢传感器件金属材料时，应考虑氢环境对材料电信号传输性能的影响。

6.1.1.3 临氢金属材料应选用有成熟使用经验或经试验验证具有良好氢相容性的材料，如管线钢、奥氏体不锈钢、碳素钢（碳锰钢）、铬钼钢、6061 铝合金等。所用材料的化学成分、组织状态、强度等级与热处理等应满足 GB/T 35544、GB/T 44457、GB/T 46599 等相关标准的要求。

6.1.1.4 临氢金属材料不应选用铸铁、马氏体不锈钢、牌号不明的材料或回收材料。

6.1.2 材料氢相容性评价

6.1.2.1 评价豁免条件

6.1.2.1.1 满足以下条件之一时，材料氢相容性评价可豁免：

- 1) 压力不超过 90 MPa 的 6061 铝合金制临氢承压元件；
- 2) 压力不超过 140 MPa，且镍含量不低于 12%、镍当量 28.5% 以上的 S31603 奥氏体不锈钢制临氢承压元件；
- 3) 环向应力低于材料规定最小屈服强度的 20%、最大操作压力不超过 6.3 MPa，且满足 GB/T 20801.2、GB/T 34275、GB/T 38942 等标准的输氢钢管；
- 4) 最大操作压力不超过 6.3 MPa、材料等级为 L360/X52 及以下，且满足 GB/T 34275 规定的无缝钢管或焊接钢管母材；
- 5) 对于同种材料，除压力外其他条件相同，且已在更高压力下通过氢相容性试验验证具有良好氢相容性。

6.1.2.1.2 即使满足 6.1.2.1 规定的豁免条件，若出现下列任一情形，仍应进行材料氢相容性评价：

- 1) 累计服役时间超过 10 年，或其服役历史、检验记录、腐蚀状况等不明的在役天然气管道材料；
- 2) 承受冲击载荷、频繁交变载荷，或者长期处于高湿度、含硫、酸性或电化学等腐蚀性环境的材料；
- 3) 设计单位或业主认为不能豁免的材料。

6.1.2.2 评价方法

6.1.2.2.1 氢输运系统临氢金属材料的氢相容性评价，应基于材料在预期服役条件下的性能要求，开展满足 GB/T 34542.2 等适用标准要求的专项试验。专项试验包括但不限于：慢应变速率拉伸试验、疲劳寿命试验、疲劳裂纹扩展速率试验及断裂韧性试验。试验项目的确定与合格判据的建立，应综合考虑材料类型和制造工艺，以及应力状态、氢气压力、使用温度等服役参数。

6.1.2.2.2 氢输运系统临氢金属材料的氢脆敏感性测试应满足 GB/T 34542.3 的要求。

6.1.2.2.3 用于氢相容性测试的材料，其牌号、处理工艺等应与实际服役材料一致，并应从制造完成后的成品或试件中取样。

6.1.2.2.4 氢相容性专项试验的气体环境应考虑氢气纯度及杂质组分的影响，具体宜参照附录 B 执行。

6.1.2.2.5 氢输运系统焊接接头的氢相容性测试应满足 GB/T XXXX《输氢管道焊接接头氢相容性试验方法》的规定。

6.1.3 材料氢适用性评价

6.1.3.1 氢输运系统临氢金属材料的氢适用性评价应采用计算分析法或试验验证法。

6.1.3.2 采用计算分析法时，应基于材料在相应氢气环境下的性能数据，并依据相关标准开展服役性能计算分析，结果应满足设计要求。

6.1.3.3 采用试验验证法时，应在模拟实际服役工况条件下，对零部件或设备进行性能测试，并依据相关标准对实测结果进行评价，以确认其服役性能满足设计要求。

6.1.4 常用临氢金属材料

6.1.4.1 高压氢气承压元件用钢

6.1.4.1.1 管线钢

氢气长输管道宜采用 X80 及以下强度等级的管线钢，其化学成分和力学性能应符合 GB/T 34275 和 GB/T 9711 的要求，疲劳裂纹扩展速率可依据附录 C 或基于设计压力下氢气环境中的试验数据确定。

6.1.4.1.2 铬钼钢

用于设计压力大于 41 MPa 的氢气承压元件铬钼钢应满足以下要求：

(1) 化学成分：磷（P）含量 $\leq 0.015\%$ 、硫（S）含量 $\leq 0.008\%$ ；

(2) 力学性能：

a) 调质热处理后，材料在空气中的实测抗拉强度应不超过 950 MPa，屈强比应不大于 0.9（横向取样）；

b) 在设计压力下氢气环境中的断裂韧性 K_{IC} 应不小于 $50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ；

c) 疲劳裂纹扩展速率和设计循环次数小于 10^6 次的设计疲劳曲线应基于设计压力下氢气环境中的试验数据确定。若设计压力不超过 50 MPa，疲劳裂纹扩展速率可依据附录 C 确定，疲劳设计可采用附录 C 给出的设计疲劳曲线。

6.1.4.1.3 奥氏体不锈钢

用于设计压力大于 41 MPa 承压元件奥氏体不锈钢，其镍含量应不小于 12%，镍当量应不小于 28.5%，镍当量 Ni_{eq} 应按式（6.1.4-1）计算：

$$Ni_{eq}=12.6 \text{ C}+0.35 \text{ Si}+1.05 \text{ Mn}+\text{Ni}+0.65 \text{ Cr}+0.98 \text{ Mo} \dots\dots\dots (6.1.4-1)$$

6.1.4.2 液氢承压元件用奥氏体不锈钢

(1) 化学成分应满足以下要求：

a) 奥氏体稳定性系数 $A \geq 0$ ，其中 A 应按式（6.1.4-2）计算：

$$A=\text{Ni}+0.5 \text{ Mn}+35 \text{ C}-0.0833(\text{Cr}+1.5 \text{ Mo}-20)^2-12 \dots\dots\dots (6.1.4-2)$$

b) 低温马氏体自转变温度 M_s 应不超过内容器最低设计温度， M_s 按式（6.1.4-3）计算：

$$M_s(^{\circ}\text{C})=\{75(14.6-\text{Cr})+110(8.9-\text{Ni})+60(1.33-\text{Mn})+50(0.47-\text{Si})+3000 \times [0.068-(\text{C}+\text{N})]-32\}/1.8 \dots\dots (6.1.4-3)$$

(2) 奥氏体不锈钢铁素体显示含量应不大于 3%。

(3) 奥氏体不锈钢应进行最低设计温度或-196℃下的冲击试验，并满足以下要求：

a) 最低设计温度冲击试验：3 个标准试样冲击吸收能量的平均值应不低于 54 J，侧膨胀值（平均值） LE 应不低于 0.53 mm；

b) -196℃冲击试验：3 个标准试样冲击吸收能量的平均值应不低于 70 J，侧膨胀值（平均值） LE 应不低于 0.76 mm。

6.2 非金属材料

6.2.1 一般规定

6.2.1.1 氢输运系统临氢非金属材料选择时，应综合考虑材料的耐氢渗透性能、耐老化性能、溶胀性能、热物理性能、力学性能，以及使用条件（设计压力、设计温度、氢气品质、操作特点等）、失效模式、制造工艺以及经济性等因素。

6.2.1.2 氢输运系统中的非金属材料宜选用与氢气具有良好相容性的聚合物，如聚乙烯（含改性聚乙烯）、聚酰胺（含改性聚酰胺）等塑料材料，以及氟橡胶、硅橡胶、三元乙丙橡胶等橡胶材料。

6.2.2 材料氢相容性评价

6.2.2.1 氢相容性评价所用非金属材料的牌号与加工工艺应与实际临氢承压元件所用材料一致，且测试试样应取自符合相应产品标准的成品。当成品无法满足取样要求，可采用与成品牌号相同的材料制备试样，但应充分考虑加工工艺对材料最终性能的影响。

6.2.2.2 氢输运系统用密封件、高压加氢柔性软管及内衬等零部件橡胶材料（如），应通过以下试验进行评价：

a) 符合 GB/T 42536 规定的氢气相容性试验；

b) 符合 GB/T 34903.2 规定的快速气体减压试验，且试验介质应为氢气。

6.2.2.3 氢输运系统用气瓶内胆材料应依据 GB/T 42610 的规定，进行氢气渗透试验、物理性能试验、拉伸性能试验、氢气循环试验及氢气老化试验。

6.2.2.4 氢输运系统用非金属管道及其焊接接头材料氢相容性测试应符合 GB/T XXXX《输氢管道焊接接头氢相容性试验方法》的规定。

7 设计

7.1 基本要求

7.1.1 设计基本原则

氢输运系统设计应遵循以下基本原则：

a) 安全优先原则：设计应贯彻安全第一的理念，遵循国家有关法律法规及国家或行业标准，采用失效安全设计思想，实现自动安全控制，预防事故并减轻事故后果；

b) 系统协调原则：统筹系统全生命周期各阶段，强化与制氢端及用氢端的参数匹配与接口协同，确保系统整体协调、高效稳定运行；

c) 技术适用原则：选用成熟可靠或先进适用技术，推进标准化与模块化设计，提升系统的兼容性、可靠性与可维护性；

d) 经济合理原则：应以全生命周期平准化输氢成本为核心进行技术经济决策，在满足可靠性要求的前提下，优先选用经济性良好的技术与设备。

e) 绿色低碳原则：在满足上述原则的基础上，应优先采用低能耗、低排放、高效率的技术与装备，促进可再生能源消纳，并在全寿命周期内减少碳足迹和环境影响，推动氢输运系统的绿色、安全与可持续发展。

7.1.2 设计条件

设计委托方应以正式书面形式向设计单位提交设计条件，其内容至少应包括：

- a) 氢输运需求：近期与远期输氢需求，包括输氢量、输氢模式（连续稳定输运或间歇波动输运）及动态负荷特性等；
- b) 路径与地理环境：起点（氢源）、终点（用户）、输送路径，以及沿线地形地貌、环境温度、抗震设防烈度、腐蚀环境等；
- c) 氢源条件：氢气纯度、压力、温度，以及杂质种类与含量（如 H_2O 、 O_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2S 等）；
- d) 用户要求：氢气交付的质量指标（压力、温度、纯度等）、流量波动范围与系统响应时间要求、关键设备选材要求、泄漏检测方法 & 合格指标、系统预期使用年限等；
- e) 经济目标：项目总投资与运营成本预算、目标平准化输氢成本要求；
- f) 法规与标准：项目须遵守的国家、地区及行业强制性规范与标准；
- g) 其他必要条件：设计所需的其他必要信息或特定要求。

7.1.3 设计流程

氢输运系统设计应遵循以下基本流程：

- a) 设计条件输入确认：全面审查与确认设计输入条件；
- b) 技术路线选择与可行性分析：基于设计条件，采用决策矩阵等方法进行技术路线比选与可行性论证；
- c) 系统建模与详细设计：开展工艺、机械、安全与风险量化等专项工程设计，并通过仿真分析和必要的试验验证设计方案；
- d) 关键设备选型与系统集成：完成动设备、静设备、仪表与控制、辅助系统等选型与集成设计；
- e) 综合评估：进行成本估算与经济性分析，并开展安全、环境及社会影响等可持续性评估。

7.2 工艺设计

7.2.1 氢输运系统中工艺设计所需的基本物性参数计算，包括但不限于其状态方程、黏度、摩阻系数、热值、燃烧极限及压缩因子等，其计算方法宜按附录 D 的规定执行。

7.2.2 在输氢管道的工艺设计中，氢气的设计流速宜参照附录 E 给出的计算方法确定。

7.3 机械设计

7.3.1 通用要求

氢输运系统承压设备应严格依据设计条件进行设计，应考虑其在全寿命周期中可能出现的所有失效模式，并提出防止失效的措施。

7.3.2 主要失效模式

氢输运系统承压设备的主要失效模式包括：脆性断裂、塑性垮塌、局部过度应变、屈曲、疲劳、棘轮、泄漏及冲蚀等。

7.3.3 设计所需材料力学性能的确定依据

7.3.3.1 同时满足以下条件的氢输运系统承压设备，可基于材料在空气环境中的力学性能进行设计：

- a) 满足本文件 6.1.2.1 条款规定的氢相容性评价豁免条件;
- b) 无需进行疲劳分析;
- c) 材料符合相关产品标准的要求。

7.3.3.2 不满足 7.3.3.1 条件时, 氢气输运系统临氢承压设备设计所需的材料力学性能, 应依据设计压力下氢气环境中的试验数据确定。液氢输运系统临氢承压设备设计所需的最低设计温度下拉伸性能、设计循环次数小于 10^6 次的设计疲劳曲线应当依据试验数据确定。

7.3.4 疲劳失效评定

氢输运系统承压设备疲劳失效评定应符合以下规定:

- a) 评定方法可采用疲劳设计曲线法、疲劳裂纹扩展分析法或疲劳试验法;
- b) 采用疲劳设计曲线法时, 应确保承压设备满足“未爆先漏”的设计准则;
- c) 采用疲劳裂纹扩展分析法时, 计算应采用材料在压力不低于部件设计压力的氢气环境下的疲劳裂纹扩展速率参数及平面应变断裂韧度进行计算;
- d) 采用疲劳试验法时, 试验介质应采用氢气;
- e) 对兼具储存与输送功能的氢管道进行疲劳失效评定时, 所采用的应力比应不低于其在实际服役条件下的应力比。

7.3.5 损伤容限设计

氢输运系统承压设备的损伤容限设计应按以下步骤进行:

- a) 识别潜在损伤模式和关键部位: 基于工程经验及相关标准, 系统识别可能导致裂纹萌生和扩展的潜在损伤模式, 并确定断裂关键部位;
- b) 设定初始裂纹尺寸: 依据制造质量水平与无损检测能力, 参照本文件 8.3.6, 确定用于分析的初始裂纹尺寸。该尺寸通常取为最大可能漏检的裂纹尺寸。
- c) 建立载荷谱与应力分析: 构建典型设计载荷谱, 并对已识别的关键部位进行详细的应力分析, 获取用于裂纹扩展计算的应力参数;
- d) 计算裂纹扩展寿命: 综合考虑氢气环境(包括压力、温度、气体成分等)与载荷条件的共同影响, 定量分析初始裂纹的扩展行为, 计算其扩展至临界尺寸前的寿命;
- e) 确定临界裂纹尺寸: 根据材料在氢环境条件下的断裂韧度, 确定导致部件发生失效的临界裂纹尺寸;
- f) 制定检修与检测方案: 在初始裂纹尺寸与临界裂纹尺寸之间设定适当的安全裕度, 并据此制定合理的在役无损检测方案与检测周期, 确保在裂纹扩展至临界尺寸前能够被有效检出并处理。

7.4 超压泄放

7.4.1 基本要求

7.4.1.1 氢输运系统的超压泄放装置包括安全阀、爆破片装置、易熔合金塞装置、玻璃泡驱动装置、易熔合金驱动装置、爆破片与安全阀复合装置、爆破片与易熔合金塞复合装置, 其性能应满足 GB/T 29729、GB/T 33215 等相关标准的要求。

7.4.1.2 超压泄放装置应随产品提供有效的质量证明文件或产品合格证, 并应在其明显部位设置永久性标识或铭牌。

7.4.1.3 超压泄放装置设计时应考虑氢气环境对装置疲劳寿命的影响。

7.4.2 高压氢气泄放

7.4.2.1 爆破片装置破裂时应不产生碎片、脱落物或火花。爆破片的设计爆破压力应满足相应产品标准的规定。

7.4.2.2 爆破片与易熔合金塞复合装置中，易熔合金塞应设置在爆破片泄放一侧。爆破片装置与安全阀串联使用时，爆破片装置与安全阀之间应设置排气口。

7.4.2.3 超压泄放装置应参照 NB/T 10354 的规定设置泄放管。泄放管的布置与尺寸应不妨碍易熔合金塞在动作时的顺利排出。

7.4.3 液氢泄放

7.4.3.1 液氢容器应设置不少于两组相互独立的超压泄放装置，并满足 NB/T 11745 的相关要求。

7.4.3.2 液氢罐车或液氢罐式集装箱应设置运输压力控制阀，以防止运输过程中因容器内压力升高或液体膨胀导致充装率超过最大允许充装率。

7.4.3.3 确定液氢罐车或液氢罐式集装箱内容器的安全泄放量时，计算所考虑的工况应至少包括：绝热结构完好、夹层真空失效、外部火灾及其可能组合。

7.4.3.4 液氢罐车或液氢罐式集装箱应设置排气系统。排气系统的设计应能有效防止冷凝的空气液滴或水分从集中排放管倒流回排放管路。

7.4.4 管道输氢系统放空

7.4.4.1 氢气输送管道的站场，宜在进站截断阀上游和出站截断阀下游分别设置放空设施。

7.4.4.2 相邻线路截断阀（室）之间的管段应设置氢气放空阀。该阀宜预留与固定式氢气放空处理系统的接口，或具备连接移动式氢气泄放设施的安装条件。

7.4.4.3 放空的氢气应经点火燃烧或安全放散处理，放空过程中应维持系统正压。放空系统的设计应能防止介质在系统内部发生意外燃烧或爆炸。站场或阀室放空系统在不具备点火条件时，经专项安全评估后，可采用高空放散处理。采用点火放空时，应配置可靠的点火及防回火装置。

7.4.4.4 管道线路放空时，应控制放空速率，以确保放空管段及邻近管材的温度不低于材料的最低允许运行温度。

7.4.4.5 放空管的内径应大于其所连接安全阀的泄放口直径。放空总管的截面积应大于接入该总管的所有安全阀泄放口截面积之和。

7.4.4.6 放空管应采取防止雨水积聚和杂物堵塞的措施。放空总管低点宜设置带阀门的排水管。

8 制造

8.1 成形

8.1.1 氢输运系统零部件的成形工艺（冷成形、热成形或温成形）应根据材料特性、设计使用条件（包括介质、温度、压力、循环载荷等）及其对材料最终性能的影响进行综合评估，确保成品满足全部安全与性能要求。

8.1.2 临氢奥氏体不锈钢管路冷弯时，其弯曲部位使用铁素体仪测得的铁素体显示含量应不大于 3%；当超过此限时，管路应进行固溶处理。

8.1.3 临氢奥氏体不锈钢承压元件冲压成形时，宜采用温度范围为 120℃~250℃的温成形。

8.1.4 成形过程应控制工装与操作，避免在材料表面留下可能导致应力集中或诱发氢致裂纹的机械损伤。

8.2 焊接

8.2.1 氢气管道连接应优先采用通过焊接工艺评定的焊接。焊接工艺评定及实施应符合 GB/T 31032、GB/T 20801.5 及 NB/T 47014 等相关标准的规定。

8.2.2 焊材的选用应保证焊缝金属在氢环境下的相容性，其力学性能与耐蚀性不应低于母材。宜选用低氢型或化学成分更稳定的焊接材料。

8.2.3 对于液氢管道焊接接头，其焊缝金属使用铁素体仪测得的铁素体显示含量应不大于 8%。

8.2.4 设计压力大于 20 MPa 的氢输运系统，承压焊缝不宜采用角焊缝。焊接支管接头禁止采用鞍座式或翻边式接头。

8.2.5 密封焊接仅可用于防止螺纹接头泄漏，不应用于增加接头的连接强度。

8.2.6 当受条件限制无法采用焊接时，经设计许可宜采用法兰、螺纹或卡套等机械连接方式，其选型、安装与检验应符合 GB 50177 等相关标准的规定。

8.3 无损检测

8.3.1 氢输运系统临氢承压元件无损检测应按照 NB/T 47013（相应部分）标准进行。射线检测合格级别不低于Ⅱ级，超声检测和表面检测合格级别为Ⅰ级。

注：文件中的超声检测包括 A 型脉冲回波超声检测、衍射时差法超声检测、相控阵超声检测等，表面检测包括磁粉检测、渗透检测、涡流检测等。

8.3.2 超声检测前应采用专用对比试块设定检测灵敏度，对比试块应与被检工件材质、规格及状态相同或相似。

8.3.3 临氢承压元件用锻钢件应在机加工后应进行 100%超声直探头检测，筒形件应增加 100%超声斜探头检测。

8.3.4 临氢承压元件用管材应进行 100%超声检测或涡流检测。管材壁厚大于等于 3 mm 应采用超声检测，应按 NB/T 47013.3 执行。管材壁厚小于 3 mm 或其他原因无法实施超声检测时，可采用涡流检测，应按 NB/T 47013.6 执行。

8.3.5 临氢承压元件用对接焊接接头应进行 100%射线检测或超声检测，对接焊接接头以外的其他焊缝应进行 100%磁粉检测或渗透检测。需进行焊后热处理的，检测应在热处理完成后进行。

8.3.6 采用相控阵超声检测方法测定氢输运系统承压元件裂纹深度时，其检测灵敏度应满足以下要求：

a) 壁厚小于 20 mm 的锻钢件和筒形件，检测灵敏度为 0.2 mm；

b) 壁厚大于或等于 20 mm 的锻钢件和筒形件，检测灵敏度为壁厚的 1%，且最大不超过 0.5 mm。

注：检测灵敏度应采用具有人工缺陷的专用对比试块进行验证。

8.3.7 非金属焊接接头无损检测应参照 GB/T 29461 和 GB/T XXXX《聚乙烯管道焊接接头相控阵超声检测》的要求执行。

附录 A

(资料性)

氢输运系统选择指南

A.1 概述

本附录提供了针对不同应用场景与输运条件的氢输运系统选择建议。

A.2 基本规定

A.2.1 大规模、长周期、连续稳定用氢（如氢能主干网运输、区域内氢能分配运输等）时，宜采用管道输氢系统。

A.2.2 中小规模、需求灵活、布局分散或临时性的用氢场景，宜采用道路运氢系统。当用户端需求为气氢时，宜选用高压氢气道路运氢系统；当用户端需求为液氢时，宜选用液氢道路运氢。

A.2.3 超大规模、超长距离（特别是远洋）的氢输运场景，宜选用水路运氢系统。

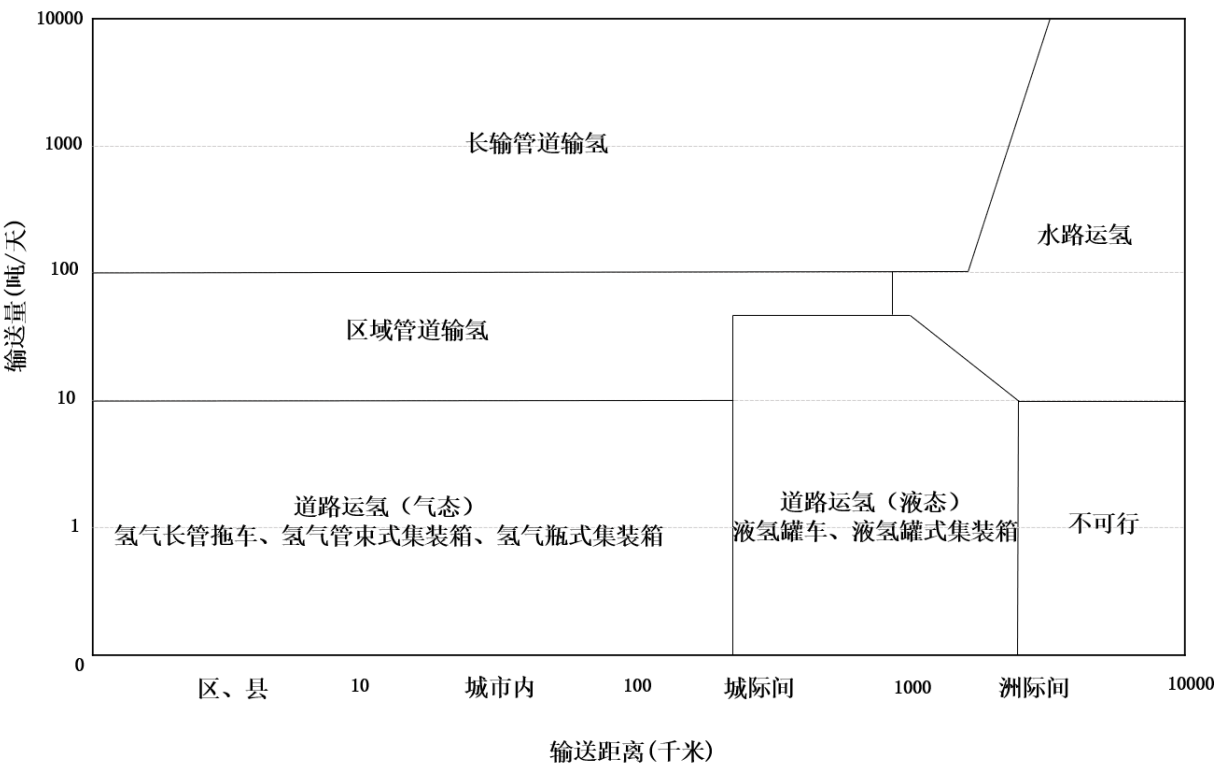


图 A.1 管道、道路及水路输氢系统适用场景建议图

注：1.本图中道路运氢的经济性分析已计入上游环节的运行能耗成本（如氢气压缩或液化的能耗），未计入上游环节的设备投资成本（如压缩机、液化装置等）。

2.本图所述“区域管道”，指服务于特定区域（如工业园区、城市群、省际交界地带，或主干管网至城市门站的连接段等）的氢气输送管网。

附录 B

(资料性)

氢气中杂质组分控制指南

B.1 概述

B.1.1 氢输运系统中临氢承压元件，应考虑其材料在氢环境下的氢脆敏感性，并应根据本文件第 6 章的要求开展材料氢相容性测试。

B.1.2 材料氢相容性测试应充分考虑氢气环境中微量杂质组分对氢在材料中吸附、解离、侵入及扩散等过程的影响。相关杂质包括但不限于二氧化碳 (CO₂)、硫化氢 (H₂S)、一氧化碳 (CO)、氧气 (O₂)、水 (H₂O)、硫氧化物 (SO_x) 和氮氧化物 (NO_x) 等。

B.2 杂质组分对氢脆影响规律

对于氢输运系统中的临氢承压元件，宜关注以下杂质组分对材料氢脆行为的影响：

a) 促进作用：二氧化碳 (CO₂) 或硫化氢 (H₂S) 的存在，通常会加剧材料的氢脆倾向。

b) 抑制作用：一氧化碳 (CO) 或氧气 (O₂) 的存在，通常会抑制材料的氢脆倾向。

c) 协同抑制作用：一氧化碳 (CO) 和氧气 (O₂) 同时存在时，可能产生协同效应，对氢脆的抑制作用会增强。

B.3 材料氢相容性测试气体成分控制要求

B.3.1 对于纯氢输运系统临氢承压元件，其材料氢相容性测试用气体环境应满足 GB/T 34542.2 的要求。

B.3.2 对于掺氢输运系统临氢承压元件，其材料氢相容性测试气体环境应满足以下要求：

a) 系统准备与置换：试验前，应用氮气或惰性气体对试验系统及供氢管路系统进行置换，再用测试气体进行二次置换。置换结束后，试验系统内的一氧化碳和氧气体积分数均应小于或等于 1 ppm。

b) 测试气体成分：应根据材料实际服役环境确定测试气体的具体组分。其中，二氧化碳含量与实际服役环境中的含量偏差值不宜超过 10%；硫化氢含量应不低于实际气体中的含量，或取规定上限 (6 mg/m³)。

B.3.3 对于需要加热升温的试验测试环境，应对试验系统和供氢管路系统升温烘烤后再进行气体置换，烘烤置换后取样分析气体成分，并确定合适的烘烤方式，以满足 B.3.2 的要求。

B.4 掺氢天然气输送的杂质组分控制建议

B.4.1 在管道输氢系统中进行掺氢天然气输送时，应对气体成分进行控制，宜设法降低二氧化碳 (CO₂) 或硫化氢 (H₂S) 的含量。

B.4.2 在管道输氢系统中进行掺氢天然气输送时，气体成分在满足 GB/T 37124 要求的前提下，宜保留或添加适量的一氧化碳 (CO) 和氧气 (O₂)。其中，氧气 (O₂) 的总摩尔分数不应超过 0.1%。

B.5 杂质组分的检测与质量控制

B.5.1 管道输氢系统中，掺氢天然气管道气体的取样应参照 GB/T 13609 或 GB/T 30490 标准执行，取样点应在合同规定的天然气交接点。

B.5.2 试验系统内二氧化碳含量的测定可按 GB/T 13610 标准执行，硫化氢含量的测定可按 GB/T 11060.1 标准执行，一氧化碳含量的测定可按 GB/T 10410 标准执行，氧气含量的测定可按 GB/T 13610

或 GB/T 6285 标准执行，水含量的测定可按 GB/T 5832.1 或 GB/T 5832.2 标准执行。

B.5.3 在对掺氢天然气进行杂质组分控制时，应确保所采取的控制措施不影响其燃烧特性及高位发热量。高位发热量的计算应参照 GB/T 11062 执行。

附 录 C

(资料性)

氢输运系统常用管线钢和铬钼钢临氢疲劳性能

C.1 概述

本附录提供了氢输运系统常用管线钢和铬钼钢在氢气环境下的设计用疲劳性能数据。

C.2 符号

下列符号适用于本附录。

- da/dN 疲劳裂纹扩展速率，单位为毫米每循环 (mm/cycle)；
- N_f 循环失效次数，单位为次；
- S_a 许用应力幅，单位为兆帕 (MPa)；
- ΔK 应力强度因子范围，单位为兆帕根号米 (MPa·m^{0.5})。

C.3 管线钢

对于 X80 及以下钢级管线钢，在应力比小于等于 0.7、氢气压力小于等于 12 MPa 条件下，其设计疲劳裂纹扩展速率曲线见图 C.1，计算公式见表 C.1。

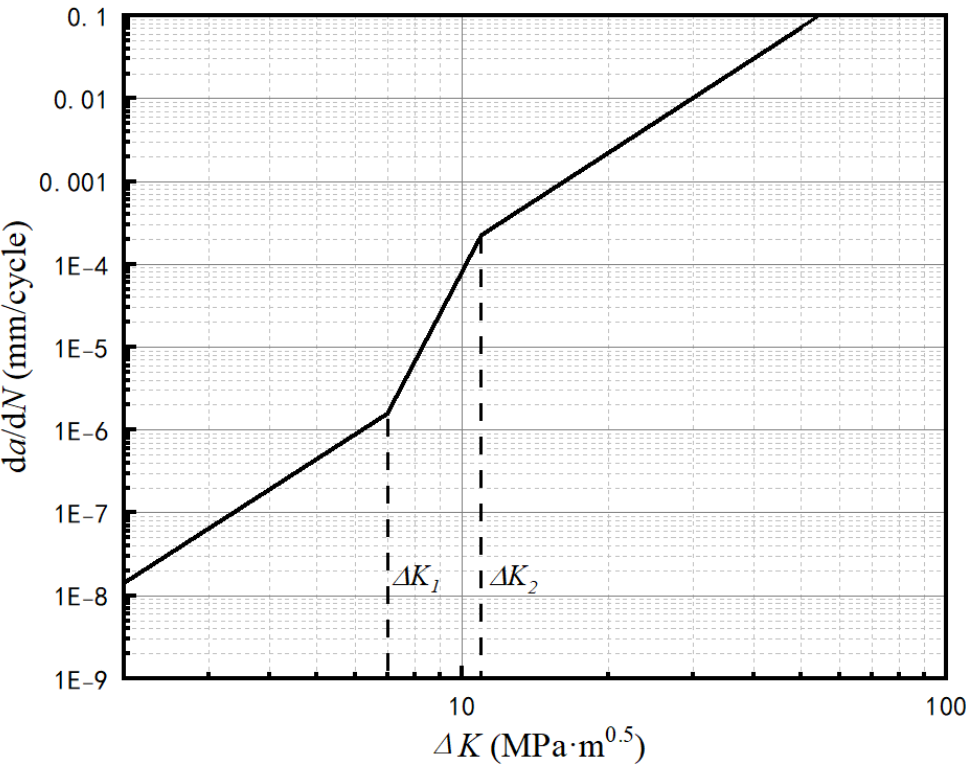


图 C.1 管线钢设计疲劳裂纹扩展速率曲线

表 C.1 管线钢设计疲劳裂纹扩展速率计算公式

应力强度因子范围	设计疲劳裂纹扩展速率
第一阶段： $\Delta K < \Delta K_1$	$\left(\frac{da}{dN}\right)_1 = 10.449 \times 10^{-10} (\Delta K)^{3.76}$
分段点 ΔK_1	7.000
第二阶段： $\Delta K_1 < \Delta K < \Delta K_2$	$\left(\frac{da}{dN}\right)_2 = 6.396 \times 10^{-16} \Delta K^{11.11}$
分段点 ΔK_2	10.945
第三阶段： $\Delta K > \Delta K_2$	$\left(\frac{da}{dN}\right)_3 = 2.585 \times 10^{-8} \Delta K^{3.79}$

C.4 铬钼钢

C.4.1 对于抗拉强度不大于 880 MPa 的铬钼钢，在应力比小于等于 0.5、应力强度因子范围小于等于 60 MPa·m^{0.5}、氢气压力小于等于 50 MPa 条件下，其设计疲劳裂纹扩展速率曲线见图 C.2，计算公式见表 C.2。

C.4.2 对于抗拉强度不大于 880 MPa 的铬钼钢，在氢气压力小于等于 50 MPa 的环境下，其设计疲劳曲线见图 C.3，计算公式见表 C.3。

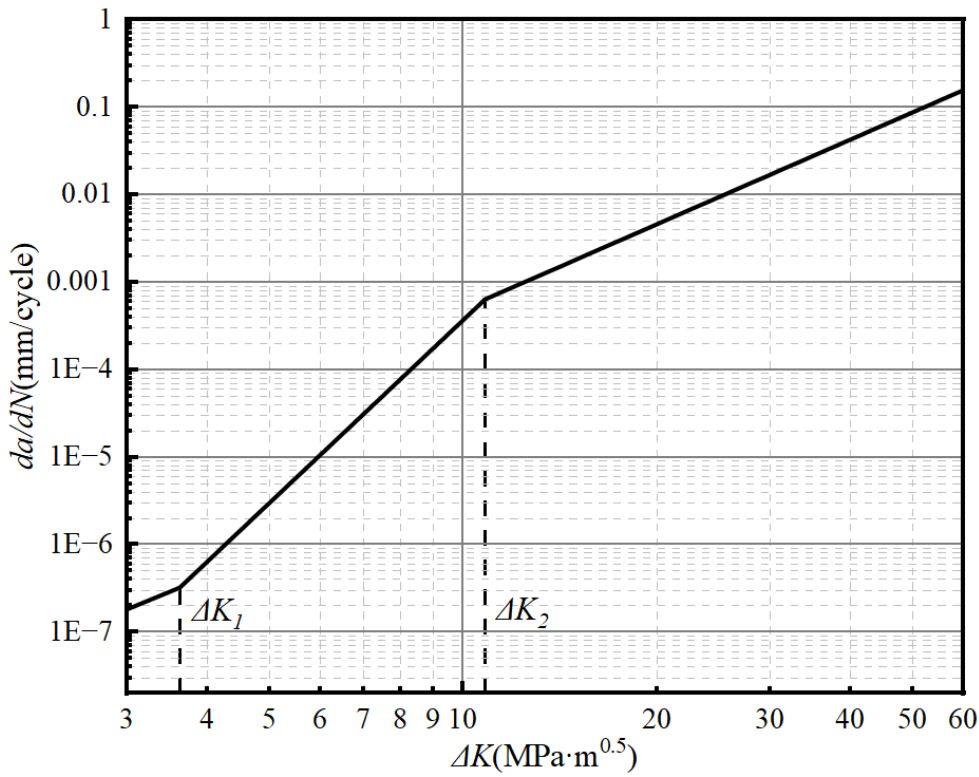


图 C.2 铬钼钢设计疲劳裂纹扩展速率曲线

表 C.2 铬钼钢设计疲劳裂纹扩展速率计算公式

应力强度因子范围	设计疲劳裂纹扩展速率
第一阶段： $\Delta K < \Delta K_1$	$\left(\frac{da}{dN}\right)_1 = 6.584 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.0223}$
分段点 ΔK_1	3.624
第二阶段： $\Delta K_1 < \Delta K < \Delta K_2$	$\left(\frac{da}{dN}\right)_2 = 4.229 \times 10^{-11} \Delta K^{6.9432}$
分段点 ΔK_2	10.808
第三阶段： $\Delta K_2 < \Delta K < 60$	$\left(\frac{da}{dN}\right)_3 = 3.004 \times 10^{-7} \Delta K^{3.2175}$

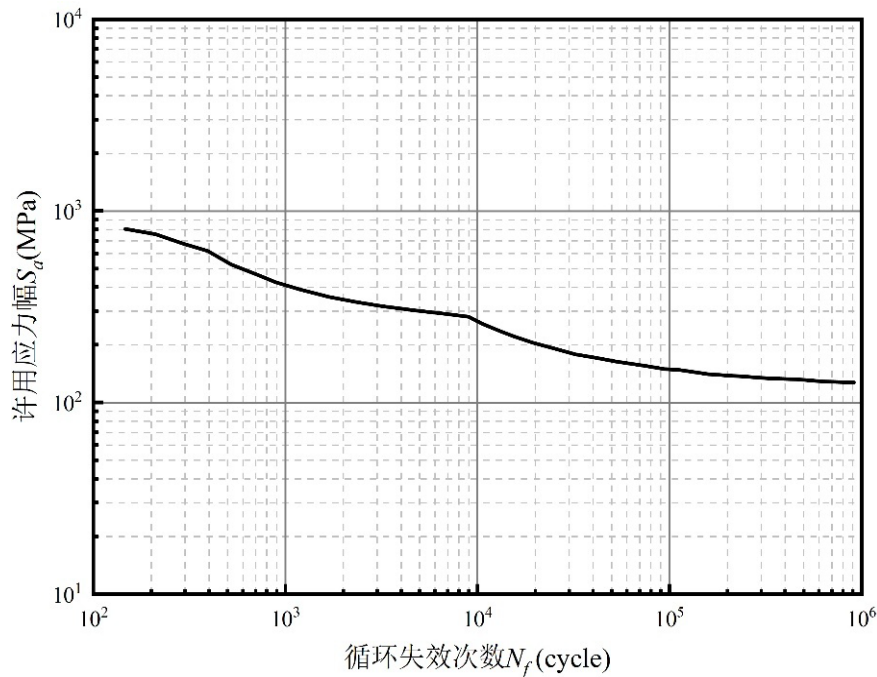


图 C.3 50 MPa 氢气环境下铬钼钢设计疲劳曲线

表 C.3 50 MPa 氢气环境下铬钼钢设计疲劳曲线表达式

许用应力幅 S_a	表达式
$S_a \geq 769\text{MPa}$	$N_f = \left[(S_a - 547.2) / 13880.8 \right]^{-2} / 20$
$635\text{MPa} \leq S_a < 769\text{MPa}$	$N_f = \left[(S_a - 547.2) / 13880.8 \right]^{-2}$
$285\text{MPa} \leq S_a < 635\text{MPa}$	$N_f = \left\{ \left[865 / (140 / S_a + 1) - 547.2 \right] / 13880.8 \right\}^{-2} / 20$
$129\text{MPa} \leq S_a < 285\text{MPa}$	$N_f = \left\{ \left[865 / (140 / S_a + 1) - 547.2 \right] / 13880.8 \right\}^{-2}$

附录 D

(资料性)

氢气及掺氢天然气基本物性参数计算方法

D.1 概述

本附录规定了氢气及掺氢天然气的基本物性参数的计算方法，主要包括状态方程、黏度、摩阻系数、热值、燃烧极限、压缩因子等。

D.2 符号

下列符号适用于本附录。

B	第二维里系数，单位为立方米每千摩尔 (m^3/kmol)；
c	甲烷体积分数；
d	内径，单位为米 (m)；
$f(x_{H_2}, T, P)$	修正函数；
HV_{H_2}	氢气热值，单位兆焦每立方米 (MJ/m^3)
HV_m	热值，单位兆焦每立方米 (MJ/m^3)
HV_{NG}	天然气热值，单位兆焦每立方米 (MJ/m^3)
i	掺氢比；
LFL_{H_2}	氢气燃烧下限；
LFL_m	燃烧下限；
LFL_{NG}	天然气燃烧下限；
M_g	混合气体平均摩尔质量，单位为千克每千摩尔 (kg/kmol)；
N	组分个数；
P	压力，单位为兆帕 (MPa)；
R	气体常数；
Re	雷诺数；
T	温度，单位为开尔文 (K)；
UFL_{H_2}	氢气燃烧上限；
UFL_m	燃烧上限；
UFL_{NG}	天然气燃烧上限；
X	无量纲系数，在混合摩擦区为0.8429，在阻力平方区为0.9234；
x_{H_2}	氢气的摩尔分数；

x_i	组分 <i>i</i> 的摩尔分数；
x_l	无量纲系数，在水力光滑区为0.7402，在混合摩擦区为0.4544；
Z	氢气压缩因子；
Z_m	掺氢天然气压缩因子；
α	亥姆霍兹自由能的无量纲形式；
α_{0i}^0	理想气体状态下 <i>i</i> 组分亥姆霍兹自由能的无量纲形式；
α_{0i}^r	<i>i</i> 组分剩余亥姆霍兹自由能的无量纲形式；
δ	混合物对比密度，无量纲；
ε	粗糙度，单位为微米（ μm ）；
λ	摩阻系数；
μ	黏度，单位为厘泊（ cP ）；
ρ	密度，单位为千摩尔每立方米（ kmol/m^3 ）；
ρ_c	混合气体临界参数，单位为千摩尔每立方米（ kmol/m^3 ）；
ρ_g	气体密度，单位为克每立方厘米（ g/cm^3 ）；
τ	混合物对比温度，单位为开尔文（ K ）。
$\Delta\alpha^r$	偏离函数的无量纲形式；

D.3 状态方程

D.3.1 BWRS 方程

当温度为 $-50^\circ\text{C}\sim 130^\circ\text{C}$ 、压力为 $0\sim 70\text{ MPa}$ 时，宜采用 BWRS 状态方程进行计算，具体按公式 (D.1)~(D.8) 计算：

$$P = \left(\rho RT + \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4} \right) \rho^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T} \right) \right) \times 10^{-3} \\ + \varphi \left(a + \frac{d}{T} \right) \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) e^{-\gamma\rho^2} \quad (\text{D.1})$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j A_{0i}^{0.5} A_{0j}^{0.5} (1 - k_{ij}) \quad (\text{D.2})$$

$$B_0 = \sum_{i=1}^n x_i B_{0i} \quad (\text{D.3})$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j C_{0i}^{0.5} C_{0j}^{0.5} (1 - k_{ij})^3 \quad (\text{D.4})$$

$$D_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j D_{0i}^{0.5} D_{0j}^{0.5} (1 - k_{ij})^4 \quad (\text{D.5})$$

$$E_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j E_{0i}^{0.5} E_{0j}^{0.5} (1 - k_{ij})^5 \quad (\text{D.6})$$

$$\alpha = \left(\sum_{i=1}^n x_i \alpha_i^{\frac{1}{3}} \right)^3 \quad (\text{D.7})$$

$$\gamma = \left(\sum_{i=1}^n x_i \gamma_i^{\frac{1}{2}} \right)^2 \quad (\text{D.8})$$

A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 、 E_0 、 γ 、 a 、 b 、 c 、 d 、 α 为参数， a 、 b 、 c 、 d 混合规则公式同 α 。

D.3.2 GERG-2008 方程

当温度为-213℃~427℃、压力为 0~70 MPa 时，宜采用 GERG-2008 状态方程进行计算，具体按公式(D.9)~(D.11)计算：

$$\alpha(\rho, T, x) = \alpha^0(\rho, T, \bar{x}) + \alpha^r(\rho, T, \bar{x}) \quad (\text{D.9})$$

$$\alpha^0(\rho, T, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \left[\alpha_{0i}^0(\rho, T) + \ln x_i \right] \quad (\text{D.10})$$

$$\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \alpha_{0i}^r(\delta, \tau) + \Delta \alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) \quad (\text{D.11})$$

D.4 黏度

当温度为-40℃~70℃、压力为 0.1 MPa~12 MPa 时，氢气及掺氢天然气的黏度按公式(D.12)~(D.16)计算：

$$\mu = 10^{-4} K \cdot e^{X \rho_g^Y} \times f(x_{H_2}, T, P) \quad (\text{D.12})$$

$$\begin{aligned} f(x_{H_2}, T, P) = & 0.845071785 + 0.000861594T - 0.007583357P + 0.050269447x_{H_2} \\ & - 1.55282P \times 10^{-6} T^2 + 5.73232 \times 10^{-5} P^2 - 0.286700394x_{H_2} \\ & + 2.11852 \times 10^{-5} (T \times P) - 0.000405236(T \times x_{H_2}) + 0.002671315(P \times x_{H_2}) \end{aligned} \quad (\text{D.13})$$

$$K = \frac{(9.379 + 0.01607M_g)(1.8T)^{1.5}}{209.2 + 19.26M_g + 1.8T} \quad (\text{D.14})$$

$$X = 3.448 + \frac{986.4}{T} + 0.01009M_g \quad (\text{D.15})$$

$$Y = 2.447 - 0.2224X \quad (\text{D.16})$$

D.5 摩阻系数

当温度为-40℃~70℃、压力为 0.1 MPa~12 MPa 时，摩阻系数按公式(D.17)~(D.18)计算。

氢气的摩阻系数按式(D.17)计算：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \times \lg \left(\frac{x_1 \varepsilon}{3.7d} + \frac{2.51}{\operatorname{Re}(1 + 0.325 \lg(1 + P/4))\sqrt{\lambda}} \right) \quad (\text{D.17})$$

掺氢比在 0~30%时，掺氢天然气摩阻系数按式(D.18)计算：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \times \lg \left(\frac{\varepsilon xc}{3.7d} + \frac{2.51}{\operatorname{Re}(1 + 0.325 \lg(1 + P/4))\sqrt{\lambda}} \right) \quad (\text{D.18})$$

D.6 热值

氢气及掺氢天然气的热值按式(D.19)计算：

$$HV_m = i \cdot HV_{H_2} + (1-i) \cdot HV_{NG} \quad (\text{D.19})$$

D.7 燃烧极限

氢气燃烧极限参照 GB/T 29729 的规定，掺氢天然气的燃烧极限按式(D.20)~(D.21)计算。

D.7.1 燃烧下限 (LFL_m)

$$LFL_m = \frac{1}{\left(1/LFL_{H_2}\right) + (1-i)/LFL_{NG}} \quad (\text{D.20})$$

D.7.2 燃烧上限 (UFL_m)

$$UFL_m = \frac{1}{\left(1/UFL_{H_2}\right) + (1-i)/UFL_{NG}} \quad (\text{D.21})$$

D.8 压缩因子

D.8.1 氢气压缩因子 (Z)

压力为 0.1~100 MPa、温度为-53℃~227℃时，氢气压缩因子 Z 按式(D.22)计算：

$$Z = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 v_{ij} p^{i-1} (100/T)^{j-1} \quad (\text{D.22})$$

式中： v_{ij} 为系数，见表 D.1。

表 D.1 系数 v_{ij}

v_{ij}		j			
		1	2	3	4
i	1	1.00018	-0.0022546	0.01053	-0.013205
	2	-0.00067291	0.028051	-0.024126	-0.0058663
	3	0.000010817	-0.00012653	0.00019788	0.00085677
	4	-1.4368E-07	1.2171E-06	7.7563E-07	-1.7418E-05
	5	1.2441E-09	-8.965E-09	-1.6711E-08	1.4697E-07
	6	-4.4709E-12	3.0271E-11	6.3329E-11	-4.6974E-10

D.8.2 掺氢天然气压缩因子 (Z_m)

当温度为-10℃~110℃，压力为 0~12 MPa，掺氢比为 50%以下时，掺氢天然气压缩因子 Z_m 按式 (D.23)计算：

$$Z = C_0 + a'T + b'P + c'T^2 + d'P^2 + f'TP \tag{D.23}$$

式中， C_0 、 a' 、 b' 、 c' 、 d' 、 f' 各系数为常数，见表 D.2。

表 D.2 系数 C_0 、 a' 、 b' 、 c' 、 d' 、 f'

掺氢比	C_0	a'	b'	c'	d'	f'
5%	0.31272	0.00427	-0.05489	-6.46848×10^{-6}	4.7972×10^{-4}	1.22535×10^{-4}
10%	0.93905	3.49032×10^{-4}	-0.05049	-4.05492×10^{-7}	5.02453×10^{-4}	1.09766×10^{-4}
20%	0.53371	0.00293	-0.03623	-4.38101×10^{-6}	4.48485×10^{-4}	7.99745×10^{-5}
30%	0.64022	0.00226	-0.02565	-3.34847×10^{-6}	4.16089×10^{-4}	5.6609×10^{-5}
40%	0.73658	0.00166	-0.01674	-2.4245×10^{-6}	3.74352×10^{-4}	3.77368×10^{-5}
50%	0.81572	0.00116	-0.00909	-1.66014×10^{-6}	3.39263×10^{-4}	2.16584×10^{-5}

注：

- 1) 气体考虑三元组分气体，分别是 CH₄、N₂、H₂；
- 2) 掺氢比例分别为 5%、10%、20%、30%、40%、50%；
- 3) 压力考虑 6 个条件：2 MPa，4 MPa，6 MPa，8 MPa，10 MPa，12 MPa；
- 4) 温度考虑 7 个条件：-10℃，10℃，30℃，50℃，70℃，90℃，110℃。

附录 E

(资料性)

输氢管道流速确定指南

E.1 概述

E.1.1 输氢管道内氢气流速的选取，应满足工艺要求，并确保管道系统安全、经济、高效地运行。

E.1.2 氢气输送管道系统的水力和热力计算，应参照 GB 50251 的相关规定执行；计算所需的物性参数，宜参照本文件附录 D 的规定确定。

E.1.3 氢气长输管道（线路部分）的输送流速选择，应综合考虑计划输量、水力与热力分析结果、输送系统经济性、操作维护要求以及冲蚀防控等因素，经综合分析与技术经济对比后确定。经济评价宜基于可比的投資费用、运行费用及维护费用，并结合费用现值进行综合比较，以确定适用于具体的经济流速。

E.1.4 氢气管道站场内部管道的输送流速选择，应综合考虑允许的管路压降、冲蚀防治、噪音控制、流致振动控制、操作维护要求等条件，经综合分析后确定。

E.1.5 当氢气满足进入管道输送介质要求（不含固体杂质）时，氢气实际流速不应超过工作条件下冲蚀流速的 50%。

E.2 符号

下列符号适用于本附录。

M_w	摩尔质量，单位为克每摩尔（g/mol）；
P	氢气管道工作压力（绝压），单位为兆帕（MPa）；
P_1	减压元件上游压力，单位为兆帕（MPa）；
P_2	减压元件下游压力，单位为兆帕（MPa）；
PWL_{source}	声功率级，单位为分贝（dBA）；
SFF	声速流校正因子，单位为分贝（dBA）；
T	氢气温度，单位为开尔文（K）；
T_e	上游介质温度，单位为开尔文（K）；
W	质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；
v	介质流速，单位为米每秒（m/s）；
v_e	冲蚀速度，单位为米每秒（m/s）；
Z	给定压力、温度条件下氢气的压缩系数；
ρ	工作状态下的流体密度，单位为千克每立方米（kg/m ³ ）。

E.3 流速确定方法

E.3.1 基于冲蚀控制的允许最大流速

E.3.1.1 对于输送不含固体杂质的氢气管道，其冲蚀流速按式(E.1)计算。

E.3.1.2 对于输送可能含有固体杂质的氢气管道，应结合具体工程实际，采用数值模拟等方法对关键部位的冲蚀速率进行分析计算。

$$v_e = \frac{7.8436}{\sqrt{P/ZT}} \tag{E.1}$$

E.3.2 基于流致振动控制的允许最大流速

E.3.2.1 对于站场长期连续运行的氢气管道，为控制流致振动风险，其允许的管道最大氢气流速宜满足表 E.1 的限值要求。

表 E.1 站场输氢管道长期连续操作流速限值

操作压力 P / MPa	ρv^2 / [kg/m·s ²]
$P \leq 2.0$	$\leq 6\,000$
$2.0 < P \leq 5.0$	$\leq 7\,500$
$5.0 < P \leq 8.0$	$\leq 10\,000$
$8.0 < P \leq 12.0$	$\leq 15\,000$

E.3.2.2 放空阀下游的管道流速不应超过 0.8 马赫，并应满足式(E.2)的要求：

$$pv^2 \leq 200\,000 \tag{E.2}$$

E.3.3 基于噪声控制的允许最大流速

E.3.3.1 应采取措施控制因流速过高、湍流加剧或局部压降导致的噪声。对于装有减压元件的氢气管道，其声压级宜按式(E.3)估算：

$$PWL_{source} = 10 \times \log \left[\left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right)^{3.6} \times W^2 \times \left(\frac{T_e}{M_w} \right)^{1.2} \right] + 126.1 + SFF \tag{E.3}$$

注：SFF 为用于补偿声速流的校正因子，如果存在声速条件，则 SFF=6 dBA，否则 SFF=0。

E.3.3.2 氢气管道的声压级应不高于 110 dBA。

E.3.4 经济流速确定方法

E.3.4.1 经济流速应通过技术经济综合比选确定。比选时应针对不同的设计压力、管径、站场压比等参数，进行全寿命周期（包括建设期和运营期）的成本分析与评估。

E.3.4.2 经济流速的确定宜遵循以下步骤：

- 1) 基础数据收集：收集并明确项目边界条件，主要包括：
 - a) 氢源侧参数：包括氢气供应量、压力、温度、流量波动特性、气质组分等；
 - b) 用户侧参数：包括分布情况、用氢需求量、用氢压力与温度、需求波动特性及气质要求等；
 - c) 管线工程参数：管道走线路由、长度、沿线地形地貌与高差等；
 - d) 经济性参数：包括电价或燃料价格、管材与设备投资成本、运行维护费用、折旧年限、基准收益率等。
- 2) 技术可行性分析：构建不同压力等级、管径配置及压缩机压比组合的系统方案，对各方案进行水力与热力计算，并进行压降及安全流速复核。
- 3) 经济性分析：基于全寿命周期成本理论，建立涵盖建设投资、运营成本及维护费用的成本模型，对各备选方案进行经济性评估与比较。
- 4) 方案比选与确定：综合技术可行性分析与经济性分析的结果，进行多方案比选，最终确定推荐的经济流速及相应的系统配置方案。