

引文:宋卫臣, 胡松岩, 程光旭, 等. 纯氢长输管道环焊缝典型缺欠应力集中及适用性评价准则[J]. 油气储运, 2025, 44(4): 1-9.

SONG Weichen, HU Songyan, CHENG Guangxu, et al. Stress concentration analysis of typical imperfections in girth welds of pure hydrogen long-distance transmission pipelines and exploration of applicability evaluation criteria[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(4): 1-9.

纯氢长输管道环焊缝典型缺欠应力集中及适用性评价准则

宋卫臣^{1,2} 胡松岩² 程光旭² 黄孝波² 汪兵³ 涂圣文²

1. 中石化石油工程设计有限公司; 2. 西安交通大学化工学院; 3. 钢铁研究总院有限公司

摘要:【目的】输氢管道是实现氢能长距高效利用的重要途径,长输管道通常由大量的环焊缝连接而成,焊缝缺欠是造成管道失效的高风险点,但目前尚无对长输纯氢管道施工中可能存在的环焊缝缺欠的风险评级及验收标准。【方法】通过对比国内外长输石油天然气管道环焊缝缺欠的分类评级标准,以适合中国标准的典型缺欠提取到的特征尺寸为基础,建立了 L245 管线钢含缺欠输氢管道有限元模型,分析研究缺欠尺寸、位置等因素对缺欠应力集中系数的影响。【结果】中国标准对于焊缝缺欠容限尺寸的限制普遍更为严格。在研究范围内,根部内凹缺欠的应力集中系数相对最高。对于圆形缺欠,其最大应力集中系数 K_{Tmax} 出现在直径为 3 mm 时, $K_{Tmax}=2.74$; 对于条形缺欠,其最大应力集中系数出现在长度为 25 mm 时, $K_{Tmax}=1.98$; 对于根部内凹缺欠,其最大应力集中系数出现在缺欠宽度为 0.5 mm、深度为 1 mm 时, $K_{Tmax}=3.58$; 对于错边量为 3 mm 的错边缺欠,其最大应力集中系数为 2.62; 附加弯矩会使直径为 4 mm 的圆形缺欠处的应力集中系数增大,高达 3.97。【结论】埋藏的圆形和条形缺欠越靠近壁面,尤其是内壁表面,应力集中越显著。圆形缺欠尺寸越大,应力集中越显著,而条形缺欠的长度对应应力集中影响不显著。错边量增大时,应力集中系数近似线性增大。根部内凹缺欠的宽度越窄、深度越深时,应力集中越显著。额外的弯矩作用会使缺欠处的应力集中显著增大。应力集中显著的焊接缺欠的存在,增加了在高压气态氢环境中服役管道的风险性,基于纯氢管道缺欠的应力集中定量分析,结合材料的氢脆敏感性随缺口应力集中系数变化的实验数据及工程运行经验,探讨了缺欠适用性评价准则。(图 11, 表 1, 参 27)

关键词: 输氢管道; 焊接缺欠; 应力集中; 特征尺寸; 有限元分析

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)04-0001-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.04.000

Stress concentration analysis of typical imperfections in girth welds of pure hydrogen long-distance transmission pipelines and exploration of applicability evaluation criteria

SONG Weichen^{1,2}, HU Songyan², CHENG Guangxu², HUANG Xiaobo², WANG Bing³, TU Shengwen²

1. Sinopec Petroleum Engineering Corporation; 2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University; 3. Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd

Abstract: [Objective] Hydrogen transmission pipelines offer an important solution for the long-distance and efficient utilization of hydrogen energy. Numerous girth welds exist along these pipelines, so weld imperfections are regarded as high-risk points that can lead to pipeline failure. However, there is currently a lack of risk rating and acceptance criteria for girth weld imperfections that may arise in long-distance pure hydrogen pipelines as a result of construction operations. [Methods] Chinese and foreign classification and ranking standards regarding girth weld imperfections in long-distance pipelines were reviewed and compared. Based on characteristic dimensions extracted from typical imperfections consistent with relevant Chinese standards, a finite element model of hydrogen transmission pipelines constructed with L245 pipeline steel and featuring imperfections was developed. This model was employed to analyze the influence of various factors, such as the sizes and locations of imperfections, on the stress concentration factor associated with weld imperfections in these pipelines. [Results] The review found that Chinese standards generally impose stricter provisions on the tolerance dimensions of weld imperfections. Within the study

range, the maximum stress concentration factor was found in concave imperfections located at the root of the welds. Specifically, the maximum stress concentration factor for circular imperfections was 2.74 at a size of 3 mm; for strip imperfections, it was 1.98 at a length of 25 mm; for concave imperfections at the root, it reached 3.58 with a width of 0.5 mm and a depth of 1 mm; and for misalignment imperfections, it was 2.62 with an offset of 3 mm. Furthermore, the stress concentration factor for 4 mm circular imperfections increased to 3.97 in the presence of any additional bending moment. **[Conclusion]** Buried circular and strip imperfections that are closer to the wall surface, particularly the inner wall surface, exhibit more significant stress concentration. Larger circular imperfections demonstrate more pronounced stress concentration; however, the length of strip imperfections does not significantly influence stress concentration. There is an approximately linear relationship between increases in misalignment and the growth of the stress concentration factor. Stress concentration becomes more pronounced in concave imperfections at the root as they become narrower and deeper. Additionally, bending moments are considered a contributing factor to the substantial increase in stress concentration at these imperfections. The presence of weld imperfections with significant stress concentration heightens the risk for pipelines operating in high-pressure gaseous hydrogen environments. Based on the quantitative analysis of stress concentration in imperfections of pure hydrogen pipelines, this study offers valuable insights into the applicability evaluation criterion of imperfections, which incorporates experimental data reflecting changes in hydrogen embrittlement sensitivity with varying stress concentration factors in imperfections, along with practical experience from engineering operations. (11 Figures, 1 Table, 27 References)

Key words: hydrogen transmission pipeline, weld imperfection, stress concentration, characteristic dimensions, finite element analysis

氢能作为一种清洁高效的二次能源,在推动国家能源结构转型升级、实现“双碳”目标中发挥着重要作用。当前,中国能源供给及需求空间分布不均衡,限制了氢能源的产业化应用。管道运输有助于实现氢气大规模、长距离输送,是实现氢能高效可持续利用的有效方式^[1-3]。焊接是长输管道必不可少的连接技术,环焊缝质量是保障长输管道质量的关键环节,对于纯氢输送管道,其环焊缝的氢脆敏感性更是需要重点关注的指标。然而,在施工过程中,环焊缝处将不可避免地存在缺欠,包括气孔、夹杂、根部内凹等体积型缺欠及未熔合、未焊透、裂纹等面积型缺欠^[4-5]。目前,由于缺乏纯氢输送管道缺欠适用性评价标准及规范,在实际工程中,多参照 SY/T 4109—2020《石油天然气钢质管道无损检测》对输氢管道进行无损检测及缺欠评级分类,并采用 SY/T 6477—2017《含缺陷油气管道剩余强度评价方法》对缺欠进行适用性评价^[6-7]。SY/T 4109—2020 中明确指出,II级对接接头应避免任何裂纹缺欠,如有超过规定尺寸的缺欠必须立刻返修,但对于未超过标准规定尺寸的缺欠是否会影响氢气管道的服役安全,尚需系统深入研究。管材在氢环境中服役,首先会面临氢脆的风险,而缺欠处的应力集中会使进入材料中的氢原子进一步聚集,导致管材的塑性、韧性、抗疲劳性能进一步降低^[8-11]。国内外学者通过实验、有限元等方法,对管线钢不同特征尺寸

典型缺欠的应力集中、危险区域应力三轴度分布、适用性评定等开展了研究。华罗懿等^[12]以 20 钢环焊缝根部内凹缺欠为研究对象,分析其特征尺寸对管道内压承载性能的影响。许志军等^[13]针对含气孔缺欠的 X60 钢制石油、天然气管道开展应力有限元分析,并总结了相关规律。杨辉等^[14]基于焊缝韧性储备不足的现状,对 X80 钢制管道环焊缝的结构性应力与拘束度进行了评估。然而,目前针对纯氢管道环焊缝缺欠评级与评价标准的研究较少,缺乏基础研究及实际运行数据积累,尚未形成相应标准。在此,以输氢管道常用的 L245 钢制环焊缝为研究对象,结合 6.3 MPa 纯氢气环境下慢应变速率拉伸实验结果,通过有限元方法计算不同特征尺寸典型焊接缺欠处的应力集中,以国内外现有标准中焊接缺欠的控制特征尺寸为考量,对于纯氢管道存在焊接缺欠条件下产生应力集中情况以及可能存在的风险展开探讨。

1 石油天然气管道焊接缺欠容限标准

目前,中国尚无成熟的氢气长输管道现场焊接缺欠验收标准,相关工作主要参考石油天然气管道标准。国内外石油天然气管道现场焊接与无损检测的常用标准主要有 ISO 13847-2013《石油天然气工业管道-运输系统-管道焊接》、API STD 1104-2021《管道及相关配件

的焊接》、CSA Z662-2023《油气管道系统》、SY/T 4109—2020(表 1)^[15-16]。与国外的标准相比, SY/T 4109—2020 的一个突出特点是将射线检测的结果进行

分级, 并规定天然气管道焊缝缺欠按 II 级评判。此外, SY/T 4109—2020 中无夹渣、气孔、空心焊道 3 类缺欠, 而是以条形、圆形缺欠两种类型代之。

表 1 国内外天然气管道焊缝无损检测验收标准对比表
Table 1 Comparison of acceptance standards for NDT of welds in natural gas pipelines in China and abroad

标准号	标准名称	适用特点	验收准则及分级	缺陷(欠)类型划分
ISO 13847-2013	《石油天然气工业管道-运输系统-管道焊接》	适用于碳钢、低合金钢, 对油气管道输送系统的环焊缝、支管、角焊缝的焊接及检验要求有详细规定, 在欧洲应用较多		包括未焊透、未熔合、根部内凹、烧穿、夹渣、气孔、空心焊道、裂纹及咬边 9 类
API STD 1104-2021	《管道及相关配件的焊接》	作为长输管道的现场焊接及验收标准, 在世界范围内广泛使用	给出了每种缺欠的验收准则, 不分验收级别	
CSA-Z662-2015	《油气管道系统》	适用于石油与天然气工业管道系统的设计、建造、运行、维护、停用、废弃全生命周期		
SY/T 4109—2020	《石油天然气钢质管道无损检测》		将射线检测的结果分为 I、未涉及无夹渣、气孔、空心焊道等缺欠, 仅分为条形缺欠与圆形缺欠两种	

此外, 对于未熔合、未焊透、内凹、烧穿等焊接缺欠, 中国标准相较国外标准总体偏于严格, 所允许缺欠长度普遍更保守, SY/T 4109—2020 中明确规定 II 级对接接头内应避免任何裂纹缺欠。根据历年管道焊接接头失效案例表明, 一次焊接中存在一定尺寸缺欠的焊接接头很少出现失效, 而返修是导致管道失效的主要因素之一。为避免薄壁焊缝出现大量不必要的返修, 与 SY/T 4109—2013 相比, 新版 SY/T 4109—2020 将部分缺欠尺寸的要求放宽。在后续研究中, 基于 SY/T 4109—2020 中的缺欠类型及临界特征尺寸, 选取其中典型体积型缺欠, 对其导致的应力集中进行分析。缺欠特征尺寸及模型简化方法根据

相关标准及文献确定^[12-13,17-18]。

2 典型焊接缺欠有限元分析

选取外径 273 mm、壁厚 15 mm、焊缝金属余高 1 mm 的管道(图 1, 其中 M_0 为弯矩)作为研究对象, 建立有限元模型。为避免端部效应, 取管道长度为 500 mm。依据实际服役条件, 对管道内壁施加 6.3 MPa 内压。假设实验管段为无约束管道, 管道承受的轴向应力计算式为:

$$\sigma_z = \frac{pt_c}{4t} \quad (1)$$

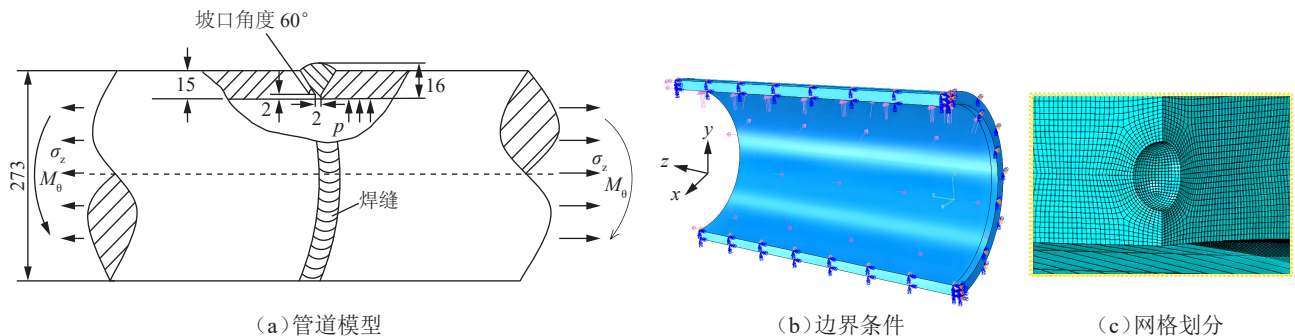


图 1 管道模型及网格划分示意图(mm)
Fig. 1 Pipeline model and mesh division

式中: σ_z 为轴向力, MPa; p 为内压, MPa; t 为壁厚, mm; t_c 为等效壁厚, mm。

利用式(1)计算得到该实验管段轴向应力为 27.09 MPa。

为考虑管道施工中的非对称轴向力或弯曲应力, 额外分析施加弯矩 M_0 情况。为了便于有限元分析, 圆形、条形、根部内凹缺欠选取管道 1/4 模型, 错边缺欠选取

管道 1/2 模型。在管道远端 $x-y$ 截面施加轴向力, 近端 $x-y$ 截面与 $y-z$ 侧向截面施加对称约束。对缺欠附近网格进行加密, 网格单元类型为 C3D8R。依据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》测得 L245 钢制环焊缝在 6.3 MPa 氢气环境下的工程应力-应变曲线(图 2)。考虑到缺欠附近应力集中可能造成材料局部区域塑性变形, 以修正后的应力-应变曲线作为材料力学属性在 ABAQUS 中建立弹塑性模型。材料弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 468 MPa, 抗拉强度为 629 MPa。

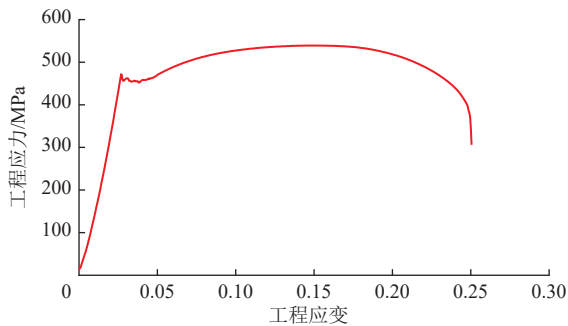


图 2 6.3 MPa 氢气环境下 L245 钢环焊缝工程应力-应变曲线
Fig. 2 Engineering stress-strain curve of L245 steel girth weld in 6.3 MPa hydrogen environment

由于缺欠附近应力状态复杂, 既存在正应力, 亦存在剪应力, 为准确描述管道缺欠附近区域受力严重情况, 以 Mises 等效应力(简称等效应力)计算缺欠的应力集中系数^[20]:

$$K_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ave}}} \quad (2)$$

式中: K_T 为应力集中系数; σ_{\max} 为最大等效应力, MPa; σ_{ave} 为对应危险截面的平均等效应力(即有限元计算所得该危险截面所有积分点等效应力的算数平均值), MPa。

为验证计算模型网格划分的有效性, 以距离内壁面 2 mm、直径为 2 mm 的圆形缺欠为例, 分别计算缺欠附近随网格尺寸变化的最大等效应力(图 3)。可见,

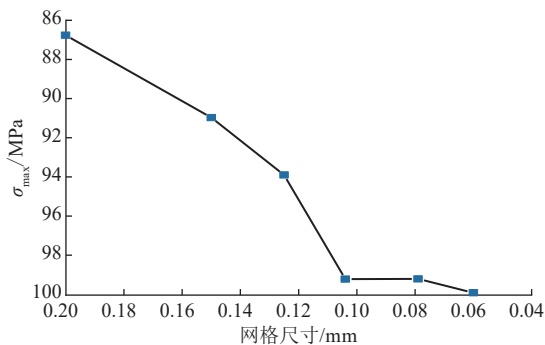


图 3 缺欠附近最大等效应力随网格尺寸变化曲线
Fig. 3 Variation curve of maximum equivalent stress near the imperfection with mesh size

当缺欠附近网格尺寸小于 0.1 mm 时, 结果收敛。因此, 为保证计算结果的准确可靠, 设置各类型缺欠附近的网格尺寸小于 0.1 mm。

2.1 圆形缺欠的应力集中

圆形缺欠指长宽比不超过 3 的缺欠。在焊缝中心区域不同高度位置设置不同直径 d 的圆形缺欠, 并以缺欠中心位置距离下表面的高度 h 与焊缝总高度 H 的比值作为相对高度, 描述缺欠所处位置(图 4)。

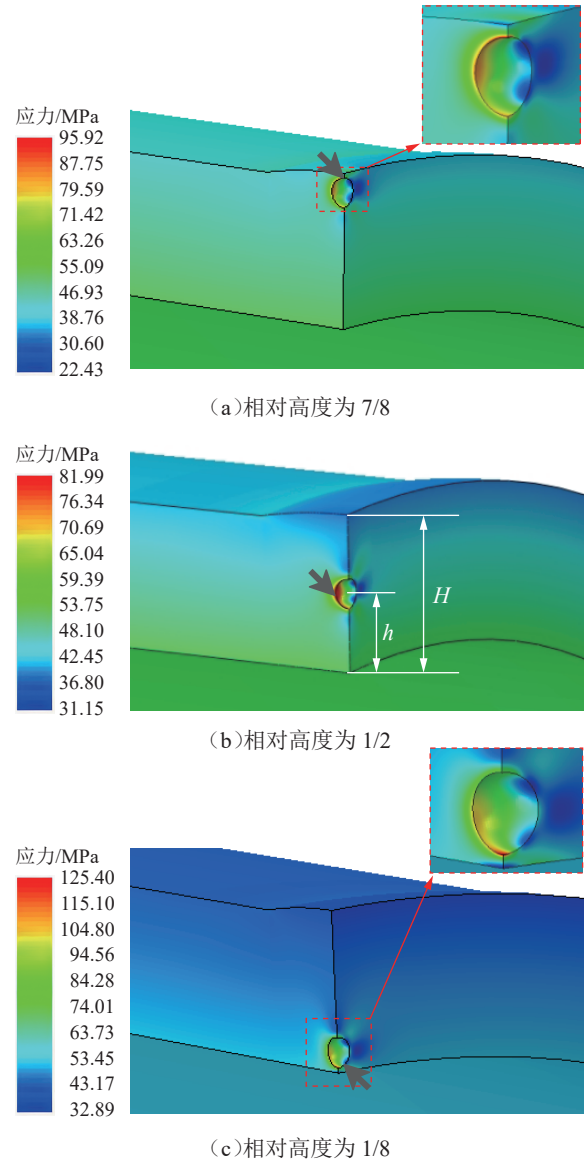


图 4 不同相对高度位置 3 mm 圆形缺欠附近应力分布云图
Fig. 4 Stress distributions near 3 mm circular imperfections at different relative heights

分别计算不同直径(2 mm、3 mm、4 mm)与不同相对高度(1/8、1/4、1/2、3/4、7/8)的圆形缺欠的应力集中情况(图 5)。需要说明的是, 由于直径为 4 mm 的圆形缺欠在相对高度为 1/8 和 7/8 时将与表面相切, 故其相应位置分别取 3/16、13/16。可见, 对于相对高

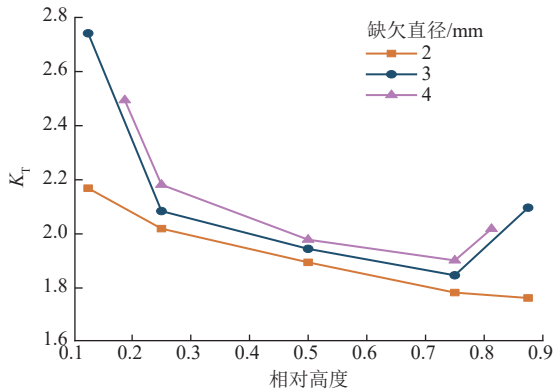


图5 圆形缺欠应力集中系数随相对高度变化曲线
Fig. 5 Variation curves of stress concentration factor for circular imperfections with relative height

度为 1/4、1/2、3/4 的缺欠, 内表面缺欠的应力集中高于外表面缺欠, 且缺欠尺寸越大, 应力集中越明显。直径为 3 mm、4 mm 圆形缺欠的边缘更加靠近管道壁面, 导致局部受力增大, 尤其对于靠近内壁面的缺欠, 在内压协同作用下, 应力集中更为显著。对于相对高度为 1/2、直径为 3 mm 圆形缺欠, 最大应力位置出现在缺欠中部; 对于相对高度分别为 7/8、1/8 且直径为 3 mm 圆形缺欠, 其最大应力位置分别出现在缺欠上部靠近管道外壁面、缺欠下部靠近内壁面位置。对于接近内壁面的缺欠, 应力集中最大的情况对应于距离内壁面 0.5 mm、直径为 3 mm 的圆形缺欠, 其应力集中系数达 2.74, 体现了近表面对缺欠应力集中的放大效应。

2.2 条形缺欠的应力集中

长宽比大于 3 的缺欠称为条形缺欠。选取截面直径 2 mm 的条形缺欠为研究对象, 模拟不同相对高度(1/8、1/4、1/2、3/4、7/8)与不同长度(6.25 mm、12.5 mm、25 mm)缺欠的应力集中情况(图 6)。可见,

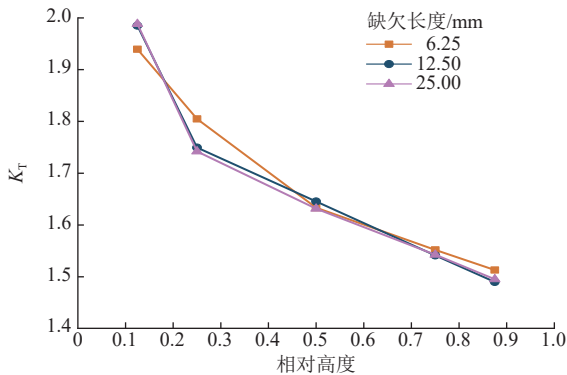


图6 不同长度、截面直径 3 mm 条形缺欠应力集中系数随相对高度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of stress concentration factor with relative height for strip imperfections with 3 mm of sectional diameter and different lengths

对于该截面尺寸的条形缺欠, 缺欠长度对条形缺欠应力集中的影响不明显, 但相对高度位置对缺欠产生的应力集中影响较大, 缺欠越靠近管道内壁, 应力集中越显著。以长度 l 为 25 mm 的条形缺欠(图 7)为例, 其最大应力出现在缺欠中部底端, 即靠近管道内壁面缺欠位置。虽然条形缺欠整体应力集中水平较圆形缺欠低, 但是近表面导致的应力集中效应依然明显。相对高度 1/8 的 25 mm 条形缺欠应力集中系数最大, 其达到 1.98。

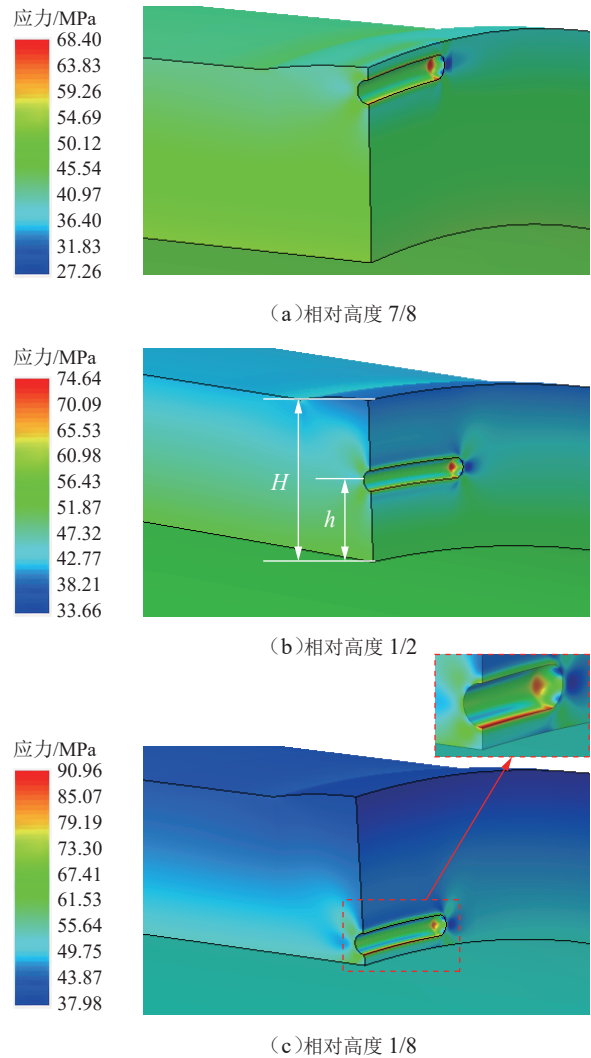


图7 不同相对高度 25 mm 条形缺欠附近等效应力分布云图
Fig. 7 Equivalent stress distributions near 25 mm strip imperfections at different relative heights

2.3 根部内凹的应力集中

根部内凹是根焊道两边已熔合、焊透, 但中间略低于管道内表面时出现的缺欠。基于 SY/T 4109—2020 中长度 25 mm 的临界内凹, 分析缺欠宽度 W 与深度 D 对应力集中的影响规律(图 8)。随着内凹缺欠深度增大、宽度变窄, 输送介质直接作用于内凹缺欠

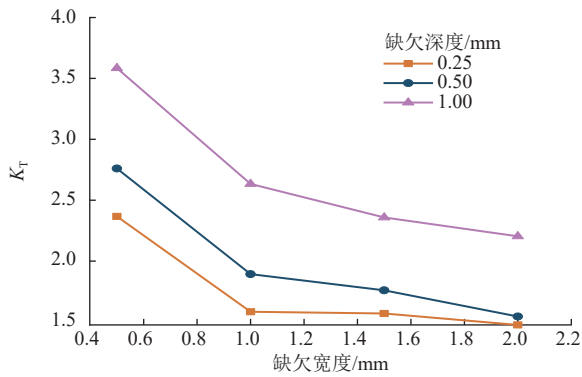


图8 不同深度 25 mm 根部内凹缺欠应力集中系数随缺欠宽度变化曲线

Fig. 8 Variation curves of stress concentration factor with imperfection width for concave imperfections with 25 mm of length and different depths at the root

侧壁,由此导致缺口根部出现扩张趋势,使内凹缺欠顶端承受更大应力,应力集中更加显著。

2.4 错边的应力集中

在敷设施工中,管道可能受管径不圆、母材壁厚不等、轴线中心存在平行偏差等因素的影响,产生错边缺欠,由此会在焊接根部造成应力集中。随着错边量从 1 mm 增加到 3 mm,应力集中系数从 1.75 增至 2.62(图 9)。

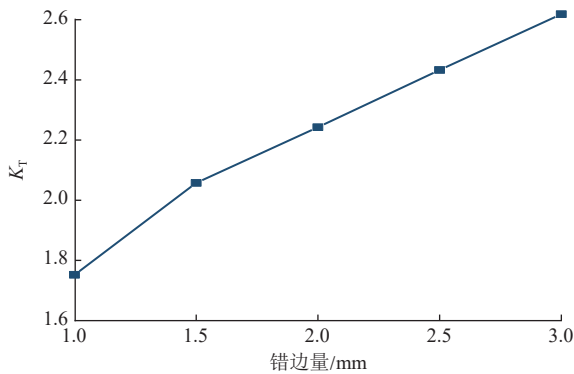


图9 应力集中系数随错边量变化曲线

Fig. 9 Variation curve of stress concentration factor with misalignment value

3 氢气管道典型焊接缺欠验收准则

通过对上述纯氢管道环焊缝可能存在的圆形缺欠、条形缺欠、根部内凹、错边等焊接缺欠进行有限元建模(图 1),模拟得到缺欠尺寸与位置变化造成的应力集中分布,发现缺欠附近产生的应力集中系数为 1.4~3.6,管道壁面的埋藏缺欠及宽度较窄、深度较深的内凹缺欠附近应力集中系数较大。对于圆形缺欠,其直径越大,应力集中系数越大;对于相同截面尺寸

的条形缺欠,长度变化对应力集中系数的影响很小,位置变化对应力集中系数的影响较大;对于根部内凹缺欠,内凹深度的影响较大,且应力集中情况严重;对于错边缺欠,随着错边量的增加,应力集中系数近似线性增大。钢制管道在高压气态纯氢环境服役时,氢会以原子形式侵入钢基体,使材料的塑性、韧性等机械性能发生劣化。同时,氢会在应力梯度作用下,向高应力区域扩散、聚集^[21-23],焊接缺欠所导致的应力集中将进一步突显氢脆对材料的影响,使高应力集中区域成为裂纹萌生、扩展甚至管道失效的优先位置。

制取 L245 钢制环焊缝圆棒缺口试样,在氮气环境及 6.3 MPa 纯氢环境下开展氢脆敏感性实验,以不同几何尺寸的缺口测试不同应力集中程度。当应力集中系数不超过 3.3 时,随着应力集中系数增大,氢致断面收缩率损失不断增大(图 10)。工程中常将氢致断面收缩率损失 25% 作为材料受氢脆影响的临界值^[24-25],在此次工作中,对应的临界应力集中系数 K_{T0} 为 2.9。在应力集中系数随缺欠参数变化曲线上,于应力集中系数 2.9 处作水平直线,直线下即为安全区域,对应缺欠尺寸如满足 SY/T 4 109—2020,即为验收合格缺欠。由此,可得出受氢脆风险影响较小、并能保障管道安全服役的缺欠应满足以下要求:对于圆形缺欠,近壁面距离应超过 1 mm,且直径 $d < 4$ mm;对于长条缺欠,近壁面应超过 1 mm,且 $l < 25$ mm、 $d < 2$ mm;对于错边缺欠,其错变量应满足 $a < 3$ mm。

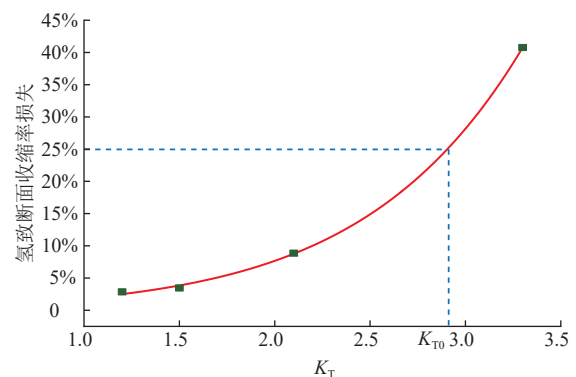


图10 氢致断面收缩率损失随应力集中系数变化曲线

Fig. 10 Variation curve of loss coefficient due to hydrogen-induced reduction of cross-sectional area as a function of stress concentration factor

此外,在实际工程中,受敷设路径、施工现场等因素影响,管道局部位置可能受到额外弯矩作用^[26-27],外载荷会使缺欠处的应力集中进一步加剧。对焊接中心 1/2 相对高度位置的不同直径圆形缺欠施加弯矩,模拟

得到应力集中情况(图 11)。随着弯矩与圆形缺欠尺寸增大, 应力集中系数也持续增大, 其高达 3.97, 可见弯矩对应力集中的影响趋于显著。对于有可能引起管道弯矩的复杂区域的焊接缺欠, 需将内压引起的缺欠应力集中与附加弯矩产生的缺欠应力集中叠加考虑, 更谨慎地进行评价。未来需要对不同类型及特征尺寸缺陷在复杂受力时的应力集中状态展开分析, 以进一步评判缺欠在纯氢环境中服役时的风险状况。

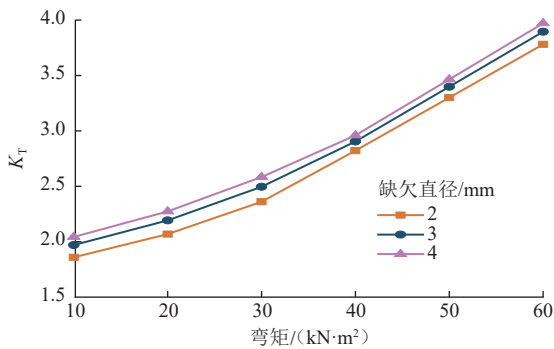


图 11 圆形缺欠应力集中系数随弯矩变化曲线
Fig. 11 Variation curves of stress concentration factor for circular imperfections with bending moment

4 结论

1) 与国外标准相比, 中国标准对于焊缝缺欠许可尺寸的限制总体偏保守, 且 SY/T 4109—2020 较 SY/T 4109—2013 对部分缺欠容限尺寸有所放宽, 以避免非必要返修的不利影响。

2) 对压力为 6.3 MPa 的输氢管道可能存在的体积型缺欠进行有限元分析, 发现圆形缺欠直径越大, 应力集中系数越大, 近内壁面时应力集中显著增大; 对于相同截面尺寸的条形缺欠, 长度变化对应力集中系数的影响很小, 近壁面时应力集中增加显著; 根部内凹缺欠越窄越深时, 应力集中系数越大; 错边量增大时, 应力集中系数近似线性增大。

3) 通过对焊缝金属内部不同位置、不同尺寸的典型环焊缝缺欠数据进行统计, 并结合缺口圆棒不同应力集中条件的氢脆实验结果, 发现内壁面缺欠、近内表面缺欠可能面临更大的风险性, 据此提出了管道施工过程中环焊缝缺欠评价原则的建议。随着实验室数据与工程运行数据的积累, 可基于应力集中情况为纯氢管道环焊缝焊接缺欠的适用性评价准则提供更加可靠的支撑。

参考文献:

- [1] 刘翠伟, 裴业斌, 韩辉, 周慧, 张睿, 李玉星, 等. 氢能产业链及储运技术研究现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2022, 41(5): 498–514. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.05.002.
LIU C W, PEI Y B, HAN H, ZHOU H, ZHANG R, LI Y X, et al. Research status and development trend of hydrogen energy industry chain and the storage and transportation technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(5): 498–514.
- [2] 李敬法, 李建立, 王玉生, 赵杰, 李汉勇, 宇波. 氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 856–871. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.08.002.
LI J F, LI J L, WANG Y S, ZHAO J, LI H Y, YU B. Research progress and development trends of key technologies for hydrogen energy storage and transportation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 856–871.
- [3] 曹权, 王洪建, 秦业美, 王敏. 纯氢管道输氢技术发展现状与分析[J]. 力学与实践, 2024, 46(1): 18–27. DOI: 10.6052/1000-0879-23-355.
CAO Q, WANG H J, QIN Y M, WANG M. Current status and analysis of the development of pure hydrogen pipeline hydrogen transmission technology[J]. Mechanics in Engineering, 2024, 46(1): 18–27.
- [4] 李晔, 吴志生, 李砚峰, 朱彦军. 基于 X 射线图像的焊接接头缺陷提取和识别方法综述[J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 6–10. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.19.002.
LI Y, WU Z S, LI Y F, ZHU Y J. Review of defects extraction and recognition methods for welding joints based on X-ray image[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(19): 6–10.
- [5] 王怡佳, 伍万, 龙雨娇, 史君林, 张颖. 含缺陷压力管道评定技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(18): 7476–7486. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2306985.
WANG Y J, WU W, LONG Y J, SHI J L, ZHANG Y. Review of evaluation technology of pressure pipelines with defects[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(18): 7476–7486.
- [6] 杨辉, 王富祥, 陈健, 雷铮强, 玄文博, 考青鹏. 油气管道环焊缝缺陷适用性评价现状与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 135–139. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.016.
YANG H, WANG F X, CHEN J, LEI Z Q, XUAN W B, KAO Q P. Current status and prospect of fitness-for-service evaluation on the girth weld defects in oil and gas line pipes[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 135–139.

- [7] 吴锴, 张宏, 杨悦, 刘啸奔, 隋永莉, 陈朋超. 考虑强度匹配的高钢级管道环焊缝断裂评估方法[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 1008–1016. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.09.006](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.09.006).
- WU K, ZHANG H, YANG Y, LIU X B, SUI Y L, CHEN P C. Fracture assessment method for girth welds of high-grade steel pipelines considering strength matching[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 1008–1016.
- [8] 王宇辰, 吴倩, 刘欢, 康泽天. 管线钢氢相容性测试方法及氢脆防控研究进展[J]. 油气储运, 2023, 42(11): 1251–1260. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.11.005](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.11.005).
- WANG Y C, WU Q, LIU H, KANG Z T. Research progress of hydrogen compatibility testing methods and hydrogen embrittlement prevention measures for pipeline steel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(11): 1251–1260.
- [9] DWIVEDI S K, VISHWAKARMA M. Hydrogen embrittlement in different materials: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(46): 21603–21616. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2018.09.201](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.201).
- [10] OGAWA Y, IWATA K. Fatigue crack propagation in pearlitic steel under pressurized gaseous hydrogen: influences of microstructure size and strength level[J]. ISIJ International, 2023, 63(7): 1251–1262. DOI: [10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-011](https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-011).
- [11] DJUKIC M B, BAKIC G M, SIJACKI ZERA VCIC V, SEDMAK A, RAJICIC B. The synergistic action and interplay of hydrogen embrittlement mechanisms in steels and iron: localized plasticity and decohesion[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 216: 106528. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2019.106528](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106528).
- [12] 华罗懿, 陆理平, 帅义. 环焊缝根部内凹缺陷对管道内压承载性能的影响[J]. 石油管材与仪器, 2023, 9(1): 76–82, 87. DOI: [10.19459/j.cnki.61-1500/te.2023.01.014](https://doi.org/10.19459/j.cnki.61-1500/te.2023.01.014).
- HUA L Y, LU L P, SHUAI Y. Effect of internal concavity defect at the root of girth weld on ultimate internal pressure bearing capacity of in-service pipelines[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2023, 9(1): 76–82, 87.
- [13] 许志军, 储玲玉, 鲍庆河, 李鑫, 徐杰. X60 钢管道环焊缝含气孔缺陷应力有限元分析[J]. 热加工工艺, 2022, 51(13): 107–111. DOI: [10.14158/j.cnki.1001-3814.20202703](https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20202703).
- XU Z J, CHU L Y, BAO Q H, LI X, XU J. Finite element analysis of pipeline girth weld of X60 steel with pore defects[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(13): 107–111.
- [14] 杨辉, 王富祥, 戴联双, 李梓激. 管道环焊缝结构性应力集中效应与拘束度评估[J]. 压力容器, 2022, 39(10): 78–86. DOI: [10.3969/j.issn.1001-4837.2022.10.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4837.2022.10.011).
- YANG H, WANG F X, DAI L S, LI Z W. Structural stress concentration effect and constraint evaluation of girth weld in pipeline[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(10): 78–86.
- [15] 刘保平. SY/T 4109 新旧标准对射线检测缺陷评定的比较[J]. 无损检测, 2015, 37(4): 76–82.
- LIU B P. Comparison of defect assessment by radiographic testing according to the new and old SY/T 4109 standard[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(4): 76–82.
- [16] 吉楠, 蒋浩泽, 李为卫, 杨明, 张杰, 邹斌. 管道环焊缝射线检测缺陷容限标准分析[J]. 石油管材与仪器, 2018, 4(6): 84–88. DOI: [10.19459/j.cnki.61-1500/te.2018.06.020](https://doi.org/10.19459/j.cnki.61-1500/te.2018.06.020).
- JI N, JIANG H Z, LI W W, YANG M, ZHANG J, ZOU B. Analysis on RT defect accept criteria of pipeline[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2018, 4(6): 84–88.
- [17] 冉龙飞, 王晓霖. 含体积型缺陷管道的剩余强度评价[J]. 石油化工高等学校学报, 2015, 28(1): 93–96. DOI: [10.3969/j.issn.1006-396X.2015.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-396X.2015.01.019).
- RAN L F, WANG X L. Assessment of remaining strength of the pipeline with volumetric type flaw[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2015, 28(1): 93–96.
- [18] 郭静, 刘昶辰, 顾荣利, 马利. 基于有限元分析的压力管道缺陷智能评估软件系统设计[J]. 化工机械, 2024, 51(2): 281–287, 303. DOI: [10.20031/j.cnki.0254-6094.202402017](https://doi.org/10.20031/j.cnki.0254-6094.202402017).
- GUO J, LIU C C, GU R L, MA L. Software system design for intelligent assessment of pressure pipeline defects based on finite element analysis[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2024, 51(2): 281–287, 303.
- [19] 宋卫臣, 胡松岩, 程光旭, 汪兵, 胡海军, 涂圣文. L245 管线钢环焊缝不同应力集中系数缺口氢脆敏感性实验[J]. 冶金分析, 2024, 44(9): 91–98. DOI: [10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.012453](https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.012453).
- SONG W C, HU S Y, CHENG G X, WANG B, HU H J, TU S W. Experimental study on hydrogen embrittlement sensitivity of L245 pipeline steel girth welds with different stress[J]. Metallurgical Analysis, 2024, 44(9): 91–98.
- [20] 程海根, 王文峰. 蚀坑尺寸对高强度钢绞线应力集中影响研究[J]. 太原科技大学学报, 2024, 45(2): 217–222. DOI: [10.3969/j.issn.1673-2057.2024.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2057.2024.02.019).

- CHENG H G, WANG W F. Study on effect of pit size on stress concentration of high strength steel Strand[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2024, 45(2): 217–222.
- [21] 程玉峰. 高压氢气管道氢脆问题明晰[J]. 油气储运, 2023, 42(1): 1–8. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.01.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.01.001).
- CHENG Y F. Essence and gap analysis for hydrogen embrittlement of pipelines in high-pressure hydrogen environments[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(1): 1–8.
- [22] YAO J Z, MACDONALD D D, MACDONALD M, CAO F H, DONG C F. Hydrogen permeation in 2205 duplex stainless steel under hydrostatic pressure and simulation by COMSOL[J]. Materials and Corrosion, 2019, 70(5): 838–852. DOI: [10.1002/maco.201810552](https://doi.org/10.1002/maco.201810552).
- [23] SUN B H, WANG D, LU X, WAN D, PONGE D, ZHANG X C. Current challenges and opportunities toward understanding hydrogen embrittlement mechanisms in advanced high-strength steels: a review[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34(6): 741–754. DOI: [10.1007/s40195-021-01233-1](https://doi.org/10.1007/s40195-021-01233-1).
- [24] 张林, 杜敏, 刘吉飞, 李妍, 刘培林. 海水中极化电位对 X70 钢氢脆敏感性的影响[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(5): 96–101. DOI: [10.11951/j.issn.1005-0299.20110520](https://doi.org/10.11951/j.issn.1005-0299.20110520).
- ZHANG L, DU M, LIU J F, LI Y, LIU P L. Effects of polarized potentials on the susceptibility to hydrogen embrittlement of X70 steel in seawater[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(5): 96–101.
- [25] 罗艳, 吴晓斌, 王宇, 王魁波. 低压环境中材料的氢损伤测试技术[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(9): 66–71. DOI: [10.11973/fsyfh-202009012](https://doi.org/10.11973/fsyfh-202009012).
- LUO Y, WU X B, WANG Y, WANG K B. Hydrogen damage test technology study for materials under low-pressure hydrogen condition[J]. Corrosion and Protection, 2020, 41(9): 66–71.
- [26] 侯富恒, 陈严飞, 贺国晏, 刘宇, 王志浩, 吴祖明. 含腐蚀-凹陷组合缺陷的海底管道极限弯矩承载力研究[J]. 中国造船, 2023, 64(6): 24–34. DOI: [10.3969/j.issn.1000-4882.2023.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4882.2023.06.003).
- HOU F H, CHEN Y F, HE G Y, LIU Y, WANG Z H, WU Z M. Ultimate bending capacity of subsea pipeline with corrosion-dent defects[J]. Shipbuilding of China, 2023, 64(6): 24–34.
- [27] 谷拴成, 贺恒炜, 茹国锋. 地铁隧道工程开挖过程中地下管线的受力情况分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(5): 14–18, 23. DOI: [10.16037/j.1007-869x.2015.05.004](https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.2015.05.004).
- GU S C, HE H W, RU G F. Analysis of underground pipeline stress caused by metro tunneling[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(5): 14–18, 23.

(编辑: 张腾)

基金项目: 中国石油化工集团有限公司研究项目“输氢管道工程建设关键技术研究”, J324075。

作者简介: 宋卫臣, 男, 1985年生, 高级工程师, 2012年硕士毕业于山东大学材料工程专业, 现主要从事管道材料及焊接方向的研究工作。地址: 山东省东营市东营区济南路49号, 257026。电话: 18605460413。Email: 18605460413@126.com

通信作者: 程光旭, 男, 1960年生, 教授, 1993年博士毕业于西安交通大学固体力学专业, 现主要从事石油化工重大装备可靠性及氢储运技术方向的研究工作。地址: 陕西省西安市咸宁西路28号, 710049。电话: 029-88965836。Email: gxcheng@xjtu.edu.cn

• Received: 2024-08-12

• Revised: 2024-10-08

• Online: 2025-01-03

