

铁素体/珠光体组织对管线钢中氢扩散行为的影响¹⁾

王晓霖^{*,2)} 程光[†] 李世瀚^{*} 杨静^{*}

^{*}(中石化(大连)石油化工研究院有限公司, 辽宁大连 116045)

[†](北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要 长距离管道输送是氢气输送的重要发展方向之一。氢在管线钢的扩散和局部聚集导致材料力学性能下降, 在外界作用下引发脆性失效。因此, 氢在管线钢材中的扩散和富集是评价管线钢相容性与判断管道升级可行性的重要参考依据。以三种不同等级的管线钢(X52, X65, X70)共 22 种材料为研究对象, 结合图像处理技术与基于材料内铁素体/珠光体组织结构的连续介质数值计算, 推算长期服役后结构内部氢的扩散和富集。考虑到铁素体和珠光体组织中的氢扩散速率与晶界的扩散阻碍作用, 通过对比量化不同铁素体/珠光体的结构分布和组织取向氢质量浓度和扩散通量的差异, 分析铁素体/珠光体组织对管线钢中氢的扩散和富集作用, 为长距离输氢管道材料选用提供技术参考。

关键词 管线钢, 微观结构, 铁素体/珠光体, 氢扩散, 有限元模拟

中图分类号: TE8 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-22-691

EFFECTS OF FERRITE/PEARLITE STRUCTURE ON HYDROGEN DIFFUSION IN PIPELINE STEELS¹⁾

WANG Xiaolin^{*,2)} CHENG Guang[†] LI Shihan^{*} YANG Jing^{*}

^{*}(Sinopec Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals Company Limited, Dalian 116045, Liaoning, China)

[†](College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract Long-distance pipeline transportation is one of the important development directions in the hydrogen energy development. The hydrogen diffusion and accumulation in pipeline steel would lead to mechanical properties degradation, and cause brittle failure under external load. Therefore, the hydrogen diffusion and accumulation in pipeline steels are an important technical reference to evaluate the compatibility of traditional pipelines and provide qualifications of pipeline steels for upgrading. In this paper, three grades of pipeline steels (X52, X65 and X70) and twenty-two types of steels are studied. Image processing and continuum scale simulation were conducted based on the actual ferrite/pearlite structure. The hydrogen diffusion and accumulation after long-term service were predicted. Considering the different hydrogen diffusion rates in ferrite, pearlite and grain boundaries, and the blocking effect of grain boundaries, the effects of pearlite distribution, diffusion direction and individual phase percentage on hydrogen diffusion were compared and quantified. The current study provided a new understanding of materials selection for long-distance hydrogen pipelines.

Keywords pipeline steel, microstructure, ferrite/pearlite structure, hydrogen diffusion, finite element modelling

2022-12-15 收到第 1 稿, 2023-01-31 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金(51905026)和中国石油化工股份有限公司科研课题(322120)资助项目。

2) 王晓霖, 正高级工程师, 研究方向为油气储运系统安全。E-mail: wangxiaolin.fshy@sinopec.com

引用格式: 王晓霖, 程光, 李世瀚等. 铁素体/珠光体组织对管线钢中氢扩散行为的影响. 力学与实践, 2023, 45(2): 305-313

Wang Xiaolin, Cheng Guang, Li Shihan, et al. Effects of ferrite/pearlite structure on hydrogen diffusion in pipeline steels. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(2): 305-313

随着我国氢能产业的快速发展,管道输氢将成为未来氢能大规模储运的重要方式,由于我国东、西部能源结构的差异,未来将要面临并解决氢能运输空间跨度广、运输效率低的问题^[1]。我国天然气管道分布广、距离长、运输成本低、可靠性高,利用现有的天然气管道掺混输氢,是实现氢能大规模运输的重要途径^[2]。在管道输氢过程中,氢在材料内部的扩散和局部聚集,会导致材料的力学性能下降,在较大外力作用下会出现脆性断裂,影响输氢管道的本质安全^[3]。因此,针对现有天然气管道输氢,解决管线钢与氢的相容性问题,研究氢在管线钢内的扩散行为,提高材料的抗氢脆性能,对氢能源的安全运输有着重要意义。

研究表明氢陷阱及钢中微观组织结构是影响氢扩散和富集的重要因素^[4-5]。大多数管线钢的显微结构主要由铁素体/珠光体交替组成,这种条带状的组织结构会影响氢在材料中的溶解度和扩散系数。Haq等^[6]通过电化学渗氢法对X70钢进行了氢扩散研究,结果表明粗大的铁素体氢扩散系数最大,轧制过的细长铁素体则更低。Chan等^[7]研究不同碳含量钢中的微观结构对氢扩散的影响,发现氢扩散速率通常会随着晶界面积的增大而增大,同时氢在珠光体中的扩散速度明显大于未经回火的马氏体,马氏体具有最低的氢扩散率和最高的溶解度。Tau等^[8]发现AISI 4130钢的扩散系数与带状铁素体/珠光体的方向呈现高度各向异性,并将这种原因归结为珠光体可以阻碍氢的扩散。李智丽^[9]研究发现,在室温下,铁素体/珠光体结构中氢扩散的主要路径是沿着铁素体或铁素体和珠光体之间的晶界,而珠光体群可作为氢扩散的有效屏障。上述研究从试验角度分析并验证了管线钢中铁素体/珠光体组织对氢扩散的作用。但是在实际工程选用中,存在不同规格以及同规格不同显微结构的管线钢,尤其是珠光体的结构存在显著差异,具体的显微结构对于氢扩散和富集的影响仍需要探索。

近年来,采用有限元模拟方法研究夹杂物等组织结构对氢扩散的影响,能够很好地解决微观结构难以量化的问题,实现更为精准的分析。任学冲等^[10]通过有限元模拟氢在不同取向和夹杂物钢中的扩散行为发现,对于具有扩散通道效应和

陷阱效应的第二相,它对氢扩散的影响取决于扩散通道效应和陷阱效应的强弱以及第二相的形状、数量和取向。在其研究基础上,钟振前等^[11]通过有限元方法研究条状夹杂物对氢扩散过程影响发现,当氢渗透方向与条状夹杂物垂直时,夹杂物可以发挥陷阱效应,氢的扩散系数降低;当氢渗透方向与条状夹杂物平行时,夹杂物发挥通道效应,氢的扩散系数增大。现有模拟研究多针对钢中夹杂物,而对管线钢中的主要组成铁素体/珠光体组织的研究较少。此外,多数模拟分析是基于理想模型完成的。鉴于真实材料微观组织结构复杂,且有不同的珠光体形态,真实微观结构对氢扩散的影响,仍需进一步研究。

因此,本研究结合目前主流的管线钢(X52, X65, X70)微观组织结构,利用有限元模拟,建立氢扩散模型,分析不同扩散方向下,条带状珠光体结构和随机分布的珠光体结构对管线钢中氢的扩散和富集行为影响。

1 氢扩散理论

图1为氢在管线钢中的扩散示意图,氢扩散有限元模拟符合质量守恒方程,即进入金属内增加的氢量等于通过表面进入的氢量,数学表达参见式(1)^[12]。

$$\int_V \frac{dc}{dt} dV + \int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{J} dS = 0 \quad (1)$$

式中, V 为体积, μm^3 ; c 为浓度, 10^{-6} ; t 为扩散时间,s; S 为体积 V 的表面积, μm^2 ; \mathbf{n} 为向量,指向曲面外法线方向; \mathbf{J} 表示氢的扩散通量, $10^{-6}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

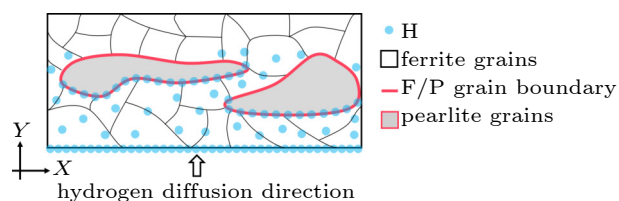


图1 氢在管线钢中的扩散示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of hydrogen diffusion in pipeline steels

应用高斯散度定理,可得

$$\int_V \left(\frac{dc}{dt} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J} \right) dV = 0 \quad (2)$$

引入“活度” $\varphi = c/s$, s 表示物质的溶解度,

10^{-6} 。可以得到氢扩散的控制方程为

$$\int_V \left[\delta\varphi \left(\frac{dc}{dt} \right) - \frac{\partial \delta\varphi}{\partial x} \cdot \mathbf{J} \right] dV + \int_S \delta\varphi \mathbf{n} \cdot \mathbf{J} dS = 0 \quad (3)$$

氢扩散可受氢浓度梯度、静水应力、温度梯度的驱动。针对组织结构对氢扩散的影响, 暂不考虑温度梯度带来的影响, 由广义扩散定律可得氢扩散的简化本构方程

$$\mathbf{J} = -sD \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} \quad (4)$$

式中, D 表示扩散系数, $\mu\text{m/s}$ 。

2 有限元扩散模拟

2.1 模型建立

收集 X52, X65, X70 三种钢级的管线钢, 共计 22 种^[13-34] 材料的微观金相图, 用于有限元模型搭建。材料的金相组织均为铁素体与珠光体, 不同牌号管线钢的珠光体含量不同, 如表 1 所示, 并形成了差异显著的结构分布。为探究此类结构分布上的差异是否对氢扩散存在影响, 搭建了一系列微观尺度的氢扩散模型, 并在二维扩散模型中包含了与真实组织相对应的铁素体与珠光体。此外, 铁素体与珠光体两相之间的晶界对氢扩散同样存在阻碍作用, 相关研究表明氢扩散在晶界处需要克服两相间的能量势垒^[35]。为模拟晶界结

构, 模型中在铁素体与珠光体之间设置了一层单元作为晶界结构。所有氢扩散模型的晶粒结构均参考真实金相组织, 对金相图片进行一系列图像处理, 将二维模型中的单元与图像进行一一对应, 搭建真实微观结构的氢扩散模型。

为搭建有限元扩散模型, 使用数字图像技术对金相图片进行降噪处理, 并将图片二值化, 将铁素体部分处理为白色, 珠光体部分处理为黑色, 同时对珠光体部分进行了边缘检测以提取晶界特征。以 X65-3 管线钢为例, 金相图片的处理流程如图 2 所示。图 2(a) 为材料的金相图片, 经过二值化之后得到图 2(b) 的铁素体与珠光体结构的二值化图像, 随后通过特征提取得到图 2(c) 的晶界结构。氢扩散模型的尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, 在金相图片中截取了相同尺寸的区域模型输入区域。在有限元模型中采用正方形单元, 单元边长为 1, 代表真实微观结构中的 $1 \mu\text{m}$ 。模型中包含有 40000 个单元。最终搭建的模型示例如图 2(d) 所示, 绿色单元代表珠光体相, 灰色单元代表铁素体相, 红色单元代表珠光体-铁素体晶界。图 3 为处理后 22 种管线钢的有限元结构模型, 其中, 图 3(a)~图 3(j) 为 10 种 X52 钢^[13-22], 图 3(k)~图 3(p) 为 6 种 X65 钢^[23-28], 图 3(q)~图 3(v) 为 6 种 X70 钢^[29-34]。每种管线钢以“牌号- x ”命名, 其中 x 表示编号。

表 1 模型中 X52, X65 和 X70 管线钢中铁素体、珠光体和晶界的比例

Table 1 Phase and grain boundaries percentages of X52, X65, and X70 pipeline steels in model

	Ferrite/%	Pearlite/%	Grain boundaries/%		Ferrite/%	Pearlite/%	Grain boundaries/%
X52-1 ^[13]	76.0	17.9	6.1	X65-2 ^[24]	78.2	15.8	6.0
X52-2 ^[14]	55.8	30.7	13.5	X65-3 ^[25]	81.0	14.1	4.9
X52-3 ^[15]	67.6	19.2	13.2	X65-4 ^[26]	83.2	11.5	5.3
X52-4 ^[16]	86.8	8.4	4.8	X65-5 ^[27]	87.1	6.2	6.7
X52-5 ^[17]	85.3	8.2	6.5	X65-6 ^[28]	81.1	14.1	4.8
X52-6 ^[18]	77.6	16.2	6.2	X70-1 ^[29]	67.1	24.8	8.1
X52-7 ^[19]	82.0	13.5	4.5	X70-2 ^[30]	73.7	16.5	9.8
X52-8 ^[20]	72.9	19.5	7.6	X70-3 ^[31]	55.2	30.3	14.5
X52-9 ^[21]	69.8	22.1	8.1	X70-4 ^[32]	81.0	11.2	7.8
X52-10 ^[22]	63.5	24.4	12.1	X70-5 ^[33]	81.1	10.4	8.5
X65-1 ^[23]	72.7	21.4	5.9	X70-6 ^[34]	81.1	11.3	7.6

2.2 模型假设

为保证模型精度以及计算效率, 重点考虑晶

界对氢扩散的影响, 做出如下假设: (1) 将氢扩散模型处理为二维扩散问题, 认为模型的氢浓

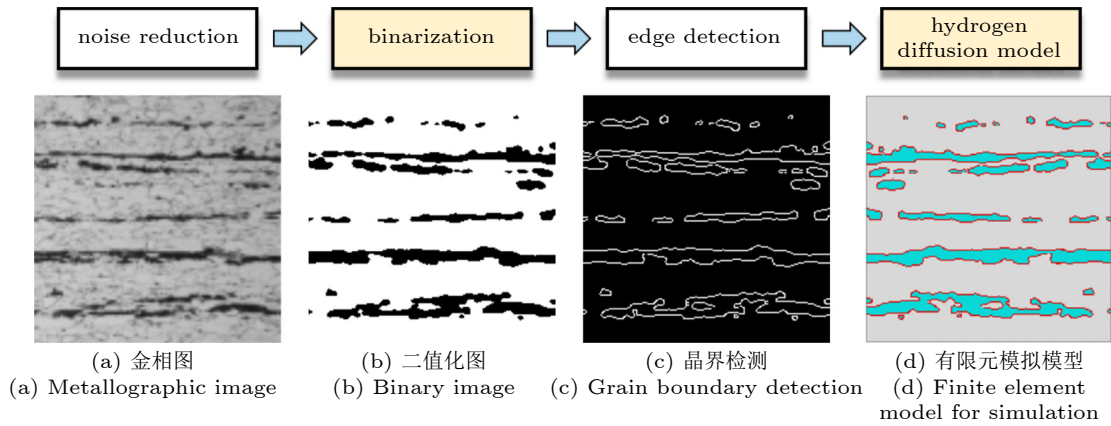


图2 金相图片处理流程示意图

Fig. 2 Diagram of metallographic image processing flow

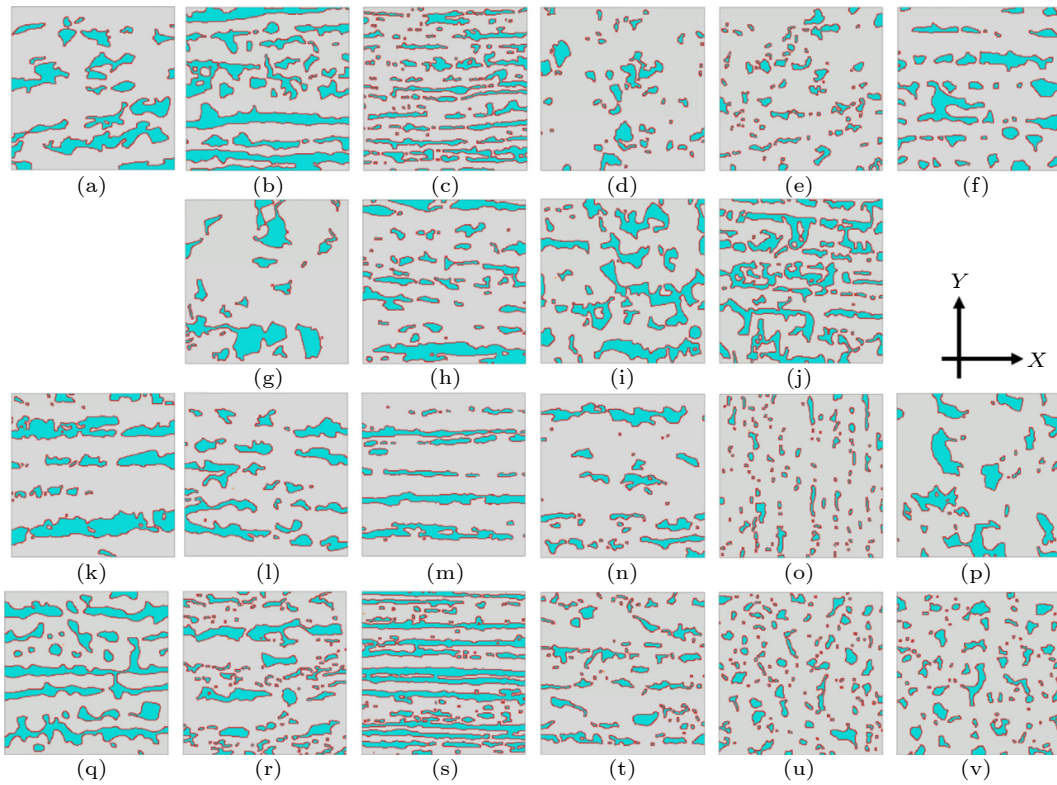


图3 氢扩散有限元模型: (a)~(j) X52 钢 1 到 10 号; (k)~(p) X65 钢 1 到 6 号; (q)~(v) X70 钢 1 到 6 号

Fig. 3 Hydrogen diffusion models: (a)~(j) X52 steel #1 to #10; (k)~(p) X65 steel #1 to #6; and (q)~(v) X70 steel #1 to #6

度沿厚度方向均匀分布, 只考虑氢浓度在二维方向的变化; (2) 管线钢内其他组织结构如微孔洞、夹杂物等氢陷阱含量较少, 且影响范围较小, 因此除铁素体与珠光体二者之间的晶界外, 不考虑其他氢陷阱; (3) 模型中各组织结构的材料性质相同且均匀分布。

2.3 材料属性和边界条件

氢扩散模型中管线钢各组织结构材料属性如表2所示。铁素体、珠光体以及晶界三部分中,

铁素体氢扩散系数最大, 溶解度最小; 晶界的氢扩散系数最小而溶解度最大; 珠光体的材料属性则在二者之间。氢扩散分析过程中, 使用氢活度

表2 管线钢中铁素体、珠光体和晶界的扩散特性
Table 2 Diffusion properties of ferrite, pearlite and grain boundaries in pipeline steel

	Ferrite	Pearlite	Grain boundaries
$D/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	128	64.3	10
$s/10^{-6}\text{atm}^{-1/2}$	5	10	30

(Note: 1 atm = 0.1 MPa)

定义边界条件，模型与输氢介质接触的表面，氢原子浓度较大，根据实验结果，取 $c = 0.8 \text{ ppm}$ ($1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg/L}$) 为内壁边界条件^[36-37]，外壁边界氢原子浓度假定为 0，对两界面处分别添加相应活度。

3 结果分析

3.1 珠光体分布对氢扩散的影响

本文中，对三种等级的 22 种管线钢均进行了基于真实金相结构的有限元分析，选取 9 种代表性结构进行氢扩散速率模拟的结果展示，以质量流率 (mass flow rate, MFR) 表征，如图 4 所示。当下边界为充氢边界时，氢扩散主要发生在铁素体中，条带状珠光体群对氢扩散有显著的阻碍作用。当条带状珠光体分布不连续时 (图 3(a) 与图 3(m))，结合图 4(a) 与图 4(f) 的结果可以发现，X52-1 与 X65-3 材料中不连续处的珠光体缺口成为了氢扩散的主要路径，缺口处的氢扩散速率远高于有珠光体与晶界阻碍的区域。当条带状珠光体群连续分布时 (图 3(k))，由图 4(d) 的结果可以发现，X65-1 材料中带状珠光体只存在微小缝隙，珠光体与两相间晶界几乎完全阻止了管线钢中的氢扩散，氢扩散通量在该缝隙处达到最大。如图 4(h) 所示，X70-2 材料中珠光体分布较为分散，这为氢提供了多个较易通过的扩散通道，氢扩散作用明显。如图 4(i) 所示，X70-3 材料中存在多个条带状珠光体群，氢很难突破珠

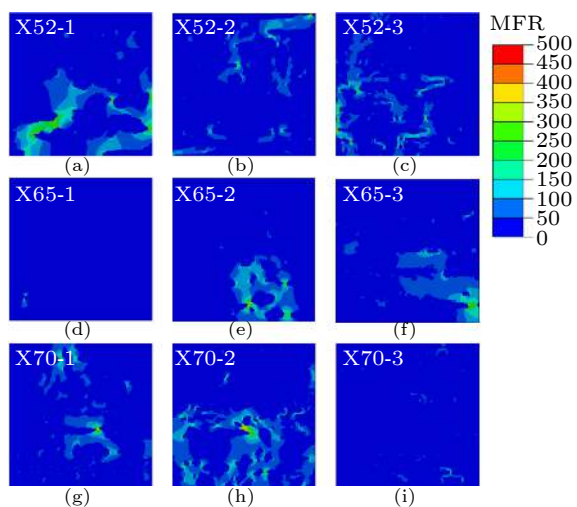


图 4 氢扩散通量模拟结果

Fig. 4 The simulation results of hydrogen diffusion flux

光体与晶界的阻碍，氢扩散作用并不明显。从氢扩散速率的分析结果可以发现，当氢在管线钢内扩散时，很难穿过珠光体层，这显著阻碍了氢的扩散作用，连续的铁素体则成为了氢扩散的高速通道。铁素体与珠光体间的晶界在作为氢陷阱捕获氢的同时，还可以作为氢扩散的通道加速氢的扩散，可认为晶界对氢扩散的影响是扩散通道效应和陷阱效应共同作用的结果。

对应图 4 的 9 种材料，图 5 为稳态氢浓度模拟结果，以质量浓度 (concentration, CONC) 表征。珠光体缺口处的氢扩散程度更深，而晶界作为氢陷阱起吸附作用，使得氢在晶界处出现富集现象。如图 5(h) 所示，对于珠光体晶粒分布较为均匀的显微结构，管线钢内部晶界对于游离氢的捕获能力更强，更容易在金属内部发生富集，促进氢鼓泡的形成，加剧材料的氢脆^[38]。如图 5(i) 所示，由于条带状珠光体结构对于氢扩散的阻碍作用，以及晶界对于氢的陷阱作用，管线钢内部的氢浓度分布主要与充氢边界距离有关，距离充氢边界较远的晶界内氢浓度明显低于临氢侧的浓度。当珠光体群交替出现时，氢更容易在临氢侧出现富集。因此对于轧制后 X52, X65 和 X70 管线钢中的氢扩散差异，主要取决于钢中珠光体相的排列方式。

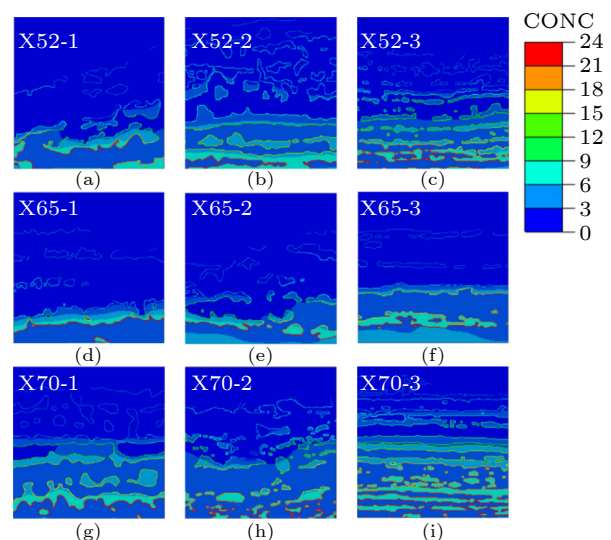


图 5 氢质量浓度模拟结果

Fig. 5 The simulation results of hydrogen mass concentration

3.2 扩散方向对氢扩散的影响

先选用氢扩散方向与图 3 中 Y 方向一致，与存

在的条带状珠光体结构垂直,如图6(a)所示。氢在管线钢中充分扩散,氢浓度趋于稳态后,计算模型中心截面处的平均氢扩散通量,即图6(a)中黑色箭头所示区域平均浓度。不同珠光体含量的22种管线钢氢扩散模型的扩散通量计算结果汇总于图6(b)。材料的扩散通量在 $(25\sim 270)\times 10^{-6}\mu\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,总体而言,随着珠光体含量增大,氢扩散通量的分布范围逐渐缩小,管线钢中氢扩散的难度更高,这也验证了条带状珠光体群对氢扩散的阻碍作用。然而对于某一特定钢级,规律并不明显。这是由于其微观组织结构存在差异,尤其是珠光体分布不同导致。如X70钢中的X70-4, X70-5与X70-6三种材料,尽管其珠光体含量均在11%左右,但是这三种材料的氢的扩散通量的差距达到2倍。

氢扩散方向与多数条状珠光体平行时,微观结构对扩散行为的影响,如图7(a)所示,氢边界设置为右侧边界,扩散方向与图3中X方向一致。在材料充分扩散后计算图示中黑色箭头所代表的中心截面平均扩散通量。对比图6(a)的结果可以发现,当扩散方向变化 90° 之后,铁素体成为扩散通路,整个材料的扩散通量急剧升高。氢扩散通量计算结果如图7(b)所示,不同珠光体含量的22种材料氢扩散通量在 $(60\sim 270)\times 10^{-6}\mu\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。相较于前述图6(b)中结果,虽然整体上也存在氢扩散通量随珠光体含量增加而下降的趋势。但是铁素体/珠光体的分布结构对于扩散通量的影响更加显著,因此结果更加分散。此外,对于X70-5与X70-6两种材料,从金相结构中难以直接观察到明显方向性,但在实际计算中,两个方

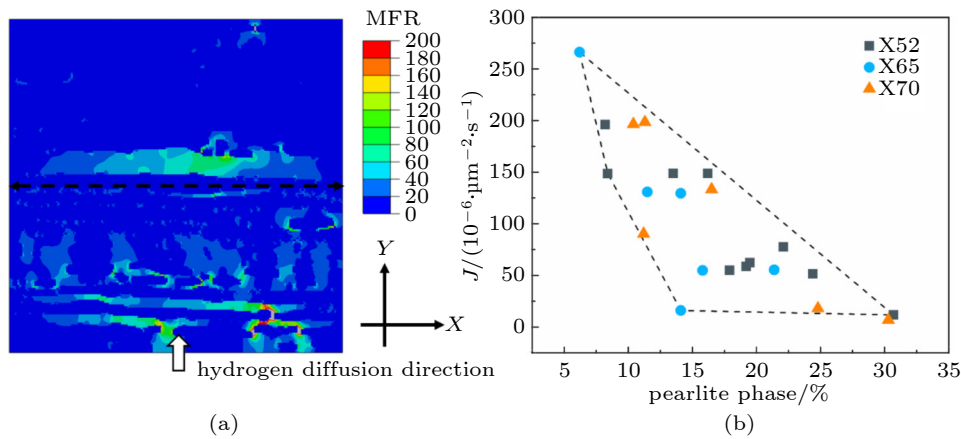


图6 (a) X70-3 管线钢在扩散方向与条带珠光体垂直时氢扩散通量; (b) 不同珠光体含量的22种管线钢氢扩散通量
Fig. 6 (a) The J of X70-3 steel with diffusion direction vertical to banded pearlite; (b) the J values of 22 types pipeline steels with different pearlite content

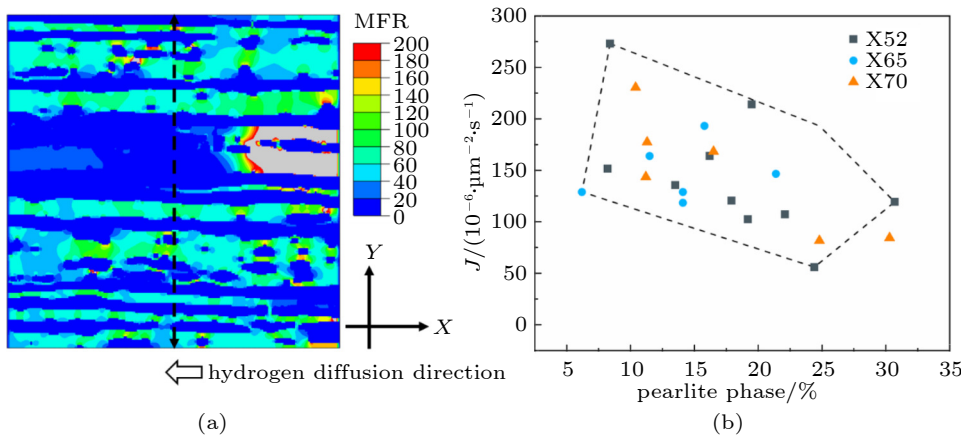


图7 (a) X70-3 管线钢在扩散方向与条带珠光体平行时氢扩散通量; (b) 不同珠光体含量的22种管线钢氢扩散通量
Fig. 7 (a) The J of X70-3 steel with diffusion direction parallel banded pearlite; (b) the J values of 22 types pipeline steels with different pearlite content

向的氢扩散通量存在显著差异, 表明对于晶粒尺寸较为均匀的金相结构, 晶粒排布规律对其方向性产生影响。

将图 6(b) 与图 7(b) 中珠光体相比例-氢扩散通量区域叠放, 如图 8 所示。氢的扩散方向(铁素体/珠光体结构取向)对于扩散行为有很大影响: 当氢扩散方向与条带珠光体结构平行时, 氢扩散通量整体高于垂直时所预测的结果。尤其是 X65-3, X70-1 与 X70-3 三种管线钢的微观结构, 珠光体晶粒均以条带状分布, 珠光体相互连接且取向一致, 存在显著的扩散各向异性。当铁素体/珠光体取向与氢扩散方向平行时, 珠光体对于氢扩散的阻碍作用变小, 此时晶界主要起氢扩散通道作用, 因此扩散通量较大; 当条带状珠光体与氢扩散方向垂直时, 珠光体群对氢扩散有显著的阻碍作用, 晶界对于氢扩散主要起陷阱作用, 吸附更多的氢, 阻止了氢扩散, 因此扩散通量较小。对于 X52-7, X52-10 与 X70-2 三种材料, 珠光体以单独的晶粒存在, 而且晶粒接近于规整的多边形结构, 在这种情况下, 扩散行为受到微观结构的影响较小, 扩散的各向异性也就不显著。在生产过程中, 通过优化轧制过程中的粗轧温度、精轧温度、卷曲温度以及冷却速度等工艺参数^[39-40], 促使珠光体晶粒生长与拉长, 在金相结构中出现条状珠光体以达到对氢扩散的阻碍作用。

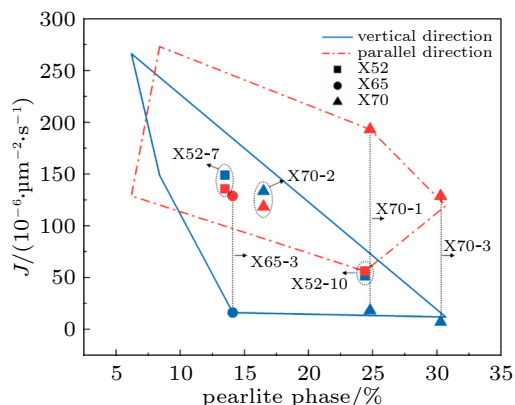


图 8 扩散方向对不同珠光体含量管线钢氢扩散通量的影响
Fig. 8 Effects of diffusion direction on the hydrogen diffusion flux with different pearlite content

4 结论

(1) 当氢扩散方向与铁素体/珠光体晶界方向垂直时, 条带状珠光体对氢扩散起阻碍作用。

晶界作为氢陷阱起吸附作用, 氢在晶界处发生富集现象。在选用输氢管线钢时, 应尽量使钢中铁素体/珠光体呈条带状交替分布, 且结构方向与氢扩散方向垂直, 降低氢在钢体内部的富集。

(2) 对于具有随机铁素体/珠光体结构的管线钢, 氢更容易在其内部出现富集; 对于具有条带状铁素体/珠光体结构的管线钢, 氢更容易在临氢侧出现富集。

(3) 氢扩散方向(铁素体/珠光体结构取向)对氢扩散通量 J 有影响: 含有条带状珠光体结构的材料其扩散通量有显著的各向异性, 而随机铁素体/珠光体结构的扩散通量各向异性较小。

参 考 文 献

- 1 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. *力学与实践*, 2022, 44(3): 503-518
Chen Lin, Dong Shaohua, Li Feng, et al. Some advances in studies of material compatibility of pressure vessels and pipelines in hydrogen atmosphere. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(3): 503-518 (in Chinese)
- 2 李为卫, 刘炜辰, 李嘉良等. 输氢管道采用 X80 管线钢的设计建议. *焊管*, 2022, 45(7): 57-63
Li Weiwei, Liu Weichen, Li Jialiang, et al. Recommendations on X80 steel for the design of hydrogen gas transmission pipelines. *Welded Pipe and Tube*, 2022, 45(7): 57-63 (in Chinese)
- 3 于子龙, 张立业, 宁晨等. 天然气掺氢管道运输及终端应用. *力学与实践*, 2022, 44(3): 491-502
Yu Zilong, Zhang Liye, Ning Chen, et al. Natural gas hydrogen mixing pipeline transportation and terminal application. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(3): 491-502 (in Chinese)
- 4 徐涛龙, 何恭震, 张毅等. 氢原子渗透对管线钢微裂纹扩展的影响研究. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(6): 54-61
Xu Taolong, He Gongzhen, Zhang Yi, et al. Effect of hydrogen atom permeation on microcrack propagation of pipeline steel. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2021, 43(6): 54-61 (in Chinese)
- 5 Song HY, Zhang L, Xiao MX. Molecular dynamics simulation of effect of hydrogen atoms on crack propagation behavior of α -Fe. *Physics Letters A*, 2016, 380(48): 4049-4056
- 6 Haq AJ, Muzaka K, Dunne DP, et al. Effect of microstructure and composition on hydrogen permeation in X70 pipeline steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(5): 2544-2556
- 7 Chan SLI. Hydrogen trapping ability of steels with different microstructures. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 1999, 22(1): 43-53

- 8 Tau L, Chan SLI. Effects of ferrite/pearlite alignment on the hydrogen permeation in a AISI 4130 steel. *Materials Letters*, 1996, 29(1): 143-147
- 9 李智丽. 碳钢中渗碳体: 铁素体界面对氢扩散的作用. 冶金译丛, 1996, 20(2): 84-89
Li Zhili. Cementite in carbon steel: effect of ferrite interface on hydrogen diffusion. *Metallurgical Translation*, 1996, 20(2): 84-89 (in Chinese)
- 10 任学冲, 褚武扬, 李金许等. MnS夹杂对钢中氢扩散行为的影响. 北京科技大学学报, 2007, 3(2): 232-236
Ren Xuechong, Chu Wuyang, Li Jinxu, et al. Effect of MnS inclusions on hydrogen diffusion in steel. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 3(2): 232-236 (in Chinese)
- 11 钟振前, 田志凌, 唐树平等. 0Cr16Ni5Mo钢中条状夹杂物对氢扩散过程的影响. 材料热处理学报, 2016, 37(2): 84-89
Zhong Zhenqian, Tian Zhiling, Tang Shuping, et al. Effect of strip inclusion on hydrogen diffusion in 0Cr16Ni5Mo steel. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(2): 84-89 (in Chinese)
- 12 Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. New York: Oxford University Press, 1979
- 13 Alhussein A, Capelle J, Gilgert J, et al. Influence of sand movement in the Sahara on the erosion of pipeline network. *EPJ Web of Conferences*, 2010, 6(4): 42-54
- 14 Alhussein A, Capelle J, Gilgert J, et al. Influence of sand-blasting and hydrogen on tensile and fatigue properties of pipeline API 5L X52 steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3): 2291-2301
- 15 Serrano KJH, Nava JGC, Cabral JA, et al. Susceptibility evaluation to the stress corrosion cracking in biofuels. *ECS Transactions*, 2017, 76(1): 79-82
- 16 Liu M, Wang J, Ke W. Corrosion behaviour of X52 pipeline steel in high H₂S concentration solutions at temperatures ranging from 25°C to 140°C. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 2013, 48(5): 380-387
- 17 Abedi SS. Failure investigation of a defective weldment of an oil product transmission pipeline. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2017, 17(1): 30-37
- 18 Chatzidouros EV, Papazoglou VJ, Pantelis DI. Hydrogen effect on a low carbon ferritic-bainitic pipeline steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(32): 18498-18505
- 19 Ranjbar K, Alavi Zaree SR. Longitudinal fracture and water accumulation at 6 o'clock position of an API 5L X52 oil pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 129(4): 105-107
- 20 Grossinger R, Keplinger F, Mehmood N, et al. Magnetic and microstructural investigations of pipeline steels. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(11): 3277-3280
- 21 Contreras A, Salazar M, Carmona A, et al. Electrochemical noise for detection of stress corrosion cracking of low carbon steel exposed to synthetic soil solution. *Materials Research*, 2017, 20(5): 1201-1210
- 22 Wang SG, Dong GP, Ma QH. Welding of duplex stainless steel composite plate: influence on microstructural development. *Materials and Manufacturing Processes*, 2009, 24(12): 1383-1388
- 23 Ronevich JA, Somerday BP, San Marchi CW. Effects of microstructure banding on hydrogen assisted fatigue crack growth in X65 pipeline steels. *International Journal of Fatigue*, 2016, 82(2): 497-504
- 24 Buzzatti DT, Buzzatti JT, Lemos GVB, et al. Towards friction welding to API grade B steel pipes. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2020, 2(3): 100-126
- 25 Henriquez M, Pèbère N, Ochoa N, et al. Electrochemical investigation of the corrosion behavior of API 5L-X65 carbon steel in carbon dioxide medium. *Corrosion*, 2013, 69(12): 1171-1179
- 26 Zhang H, Li S, Hao N, et al. Effect of controlled rolling and cooling process on microstructure and properties of X65 pipeline steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 563(2): 22-53
- 27 Kim YP, Kim CM, Kim WS, et al. Near-threshold fatigue crack growth behavior and crack closure of natural gas pipeline steels. *Procedia Engineering*, 2011, 10(4): 813-820
- 28 Onyeji L, Mohammed S, Kale G. Electrochemical response of micro-alloyed steel under potentiostatic polarization in CO₂ saturated brine. *Corrosion Science*, 2018, 138(4): 146-153
- 29 Liu Z, Du C, Zhang X, et al. Effect of pH value on stress corrosion cracking of X70 pipeline steel in acidic soil environment. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2013, 26(4): 489-496
- 30 Capelle J, Gilgert J, Dmytrakh I, et al. The effect of hydrogen concentration on fracture of pipeline steels in presence of a notch. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(2): 364-373
- 31 Nasibullina OA, Tyusenkov AS. The study of cracks of X70 steel sample selected from the focal zone of destruction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 537(2): 22-58
- 32 Hejazi D, Haq AJ, Yazdipour N, et al. Effect of manganese content and microstructure on the susceptibility of X70 pipeline steel to hydrogen cracking. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 551(4): 40-49
- 33 Rybkina A, Gladkikh N, Marshakov A, et al. Effect of sign-alternating cyclic polarisation and hydrogen uptake on the localised corrosion of X70 pipeline steel in near-neutral solutions. *Metals*, 2020, 10(2): 245-250
- 34 Tian P, Xu K, Lu GP, et al. Low-cycle fatigue properties of the X70 high-frequency electric-resistant welded pipes. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(4): 1-10
- 35 姚大平, 陈文绣. 晶界在氢扩散和捕集中的作用. 中国机械工程学会金属材料晶界问题学术研讨会, 安徽马鞍山, 1987
- 36 彭志贤. 管线钢中夹杂物与氢作用机理及其对HIC敏感性的影响. [博士论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2021
Peng Zhixian. Interaction between inclusions and hydrogen in pipeline steel and its effect on HIC sensitivity. [PhD Thesis]. WuHan: Wuhan University of Science and Techno-

- logy, 2021 (in Chinese)
- 37 Cui Q, Wu J. Effect of nanosized NbC precipitates on hydrogen diffusion in X80 pipeline steel. *Materials*, 2017, 10(7): 721-728
- 38 任学冲, 周庆军, 褚武扬等. 金属中氢鼓泡形核的机理. *科学通报*, 2007, 2(6): 725-729
Ren Xuechong, Zhou Qingjun, Chu Wuyang, et al. Mechanism of hydrogen bubble nucleation in metals. *Scientific bulletin*, 2007, 2(6): 725-729 (in Chinese)
- 39 Kalhor A, Soleimani M, Mirzadeh H, et al. A review of recent progress in mechanical and corrosion properties of dual phase steels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20(3): 85-87
- 40 夏小明, 裴新华, 徐国利等. IF钢铁素体轧制关键工艺参数的确定及实践. *轧钢*, 2022, 39(5): 93-98
Xia Xiaoming, Pei Xinhua, Xu Guoli, et al. Determination and practice of the key process parameters for ferrite-rolled IF steel. *Steel Rolling*, 2022, 39(5): 93-98 (in Chinese)

(责任编辑: 胡 漫)