

DOI:10.11784/tdxbz202310028

## 二氧化铈对熔敷金属氢致塑性损失的影响及其机理研究

利成宁<sup>1,2</sup>, 王敬松<sup>1</sup>, 戴联双<sup>3</sup>, 王策<sup>1</sup>, 崔绍华<sup>3</sup>, 邸新杰<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350;  
3. 国家石油天然气管网集团有限公司, 北京 100020)

**摘要:** 针对 X80 管线钢, 设计了金属粉型药芯焊丝的药粉成分, 在金属粉中加入了二氧化铈, 进行熔敷金属堆焊试验和电化学充氢后的拉伸试验, 研究焊材中加入二氧化铈对熔敷金属抗氢脆性能的影响, 同时通过氢渗透试验研究了二氧化铈的添加对氢在熔敷金属中扩散的影响。结果表明, 熔敷金属的显微组织主要由针状铁素体和晶界铁素体构成。二氧化铈的添加对熔敷金属的夹杂物有显著影响, 导致其平均尺寸减小、数量密度增加。加入 2% 的二氧化铈后, 夹杂物的平均尺寸由 0.349  $\mu\text{m}$  减小至 0.258  $\mu\text{m}$ , 夹杂物数量密度由 21 429  $\text{mm}^{-2}$  增加至 32 254  $\text{mm}^{-2}$ 。氢渗透试验结果表明, 添加二氧化铈可增加熔敷金属的氢陷阱数目, 阻碍氢在熔敷金属中的扩散, 这导致熔敷金属抗氢脆性能的提升。因此, 熔敷金属的氢致塑性损失率由 72% 降低至 50%。对于充氢拉伸断口形貌, 未加入二氧化铈的断口为河流花样的准解理断裂样貌, 属于典型的脆性断裂特征。加入二氧化铈的断口有大量韧窝, 具有韧性断口特征, 但出现明显的鱼眼区。鱼眼区内的源区存在夹杂物或气孔, 放射区则呈现准解理断裂。

**关键词:** 氢脆; 熔敷金属; 二氧化铈; 氢扩散

中图分类号: TG424

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)10-1062-08

## Effect of Cerium Dioxide on Plastic Loss Caused by Hydrogen in Deposited Metal and Its Mechanism

Li Chengning<sup>1,2</sup>, Wang Jingsong<sup>1</sup>, Dai Lianshuang<sup>3</sup>, Wang Ce<sup>1</sup>, Cui Shaohua<sup>3</sup>, Di Xinjie<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China;

3. China Oil & Gas Piping Network Corporation, Beijing 100020, China)

**Abstract:** For X80 pipeline steel, the powder composition of metal powder flux-cored welding wire was designed, and cerium dioxide was added to the metal powder. The welding of deposited metal and the tensile test after electrochemical hydrogen charging were performed. The effect of cerium dioxide on the hydrogen embrittlement resistance of deposited metal was studied. Furthermore, the influencing mechanism of cerium dioxide on the diffusion of hydrogen was discussed based on a hydrogen permeation test. The results showed that the microstructure of the deposited metal was mainly composed of acicular ferrite and grain boundary ferrite. The addition of cerium oxide had significant effect on the inclusions of the deposited metal, leading to the decrease in the average size and increase in the number density. When 2% cerium dioxide was added, the average size of inclusions decreased from 0.349  $\mu\text{m}$  to 0.258  $\mu\text{m}$ , and the number density of inclusions increased from 21 429  $\text{mm}^{-2}$  to 32 254  $\text{mm}^{-2}$ . The results of hydrogen permeation test showed that the addition of cerium dioxide increased the number of hydrogen traps and inhibited the diffusion of hydrogen in the deposited metal, which led to the improvement of the hydrogen embrittlement resistance of the deposited metal. Therefore, the plastic loss rate induced by hydrogen decreased from 72% to 50%. In terms of hydrogen charging tensile fracture morphology, the fracture without adding cerium dioxide were the quasi-cleavage fracture

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-12-11.

作者简介: 利成宁 (1986—), 男, 博士, 副教授, licn@tju.edu.cn.

通信作者: 邸新杰, dixinjie@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274391); 国家管网集团重大科技专项项目 (WZXGL202105).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52274391), the Major Science and Technology Projects of China Oil & Gas Piping Network Corporation (No. WZXGL202105).

appearance of river pattern, which were the typical brittle fracture characteristics. The fracture with the addition of cerium dioxide had a large number of dimples, which was a typical ductile fracture feature. However, there was an obvious fish-eye region. In the fish-eye region, the source region had inclusions or pores, and the radial region showed quasi-cleavage fracture.

**Keywords:** hydrogen embrittlement; deposited metal; cerium dioxide; hydrogen diffusion

在能源转型和双碳目标的时代大背景下,中国可再生能源的比例逐年提高,国家发展与改革委员会在《能源技术革命创新行动计划》中明确指出要在2030年建设低碳清洁、安全高效的现代能源体系<sup>[1]</sup>.氢能作为一种重要的可再生二次能源,在综合能源系统中能够发挥枢纽功能,助力加快实现能源高效利用.氢能的储运是目前研究的热点.利用管道运输掺氢天然气具有较高的效率和极高的经济价值<sup>[2]</sup>.但是,管道输氢时会出现氢脆的现象,如何防止管道输氢时发生氢脆而导致管道失效成为目前亟待解决的问题<sup>[3]</sup>.

焊接是管道实际应用中不可或缺的一环,焊接接头则是整个管道性能较为薄弱的环节,失效常常在焊接接头处发生<sup>[4]</sup>.现有的氢脆理论有氢致压力理论(HP)、氢促进局部塑性理论(HELP)和氢降低原子间键结合力理论(HEDE),这些理论都与氢在金属中的扩散有关<sup>[5-8]</sup>.焊缝组织中的非金属夹杂物是一种典型的不可逆氢陷阱<sup>[9]</sup>,显著影响氢在焊缝金属中的扩散行为,而稀土元素有着细化和改性夹杂物的作用<sup>[10]</sup>.本文通过设计焊丝的成分,在金属粉型药芯焊丝中加入不同含量的二氧化铈粉末,通过熔敷金属的抗氢脆性能试验,研究二氧化铈对焊缝金属抗氢脆性能的影响机理.

## 1 试验方法

### 1.1 熔敷金属试验

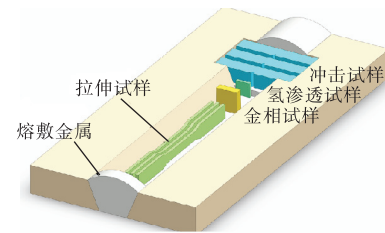
本文设计了3种直径为1.2 mm的金属粉型药芯焊丝,药粉中添加的二氧化铈粉末分别占药粉总质量的0%、2%和4%,而且焊丝的填充率为15%.熔敷金属试验根据AWS A5.28/A5.28 M-2022标准<sup>[11]</sup>进行,其中母材为Q235钢板,开45°的V型坡口,采用配备行走机构的Miller XMT350全自动焊机进行熔敷金属焊接.焊前清理坡口与垫板内的铁锈、油污等,保护气体为80% Ar和20% CO<sub>2</sub>的混合气,气体流量为1.5 L/min,焊接电流为200~220 A,焊接电压为28~30 V,焊接速度为3.5 mm/s,层间温度为80~100 °C.采用直读光谱仪测试熔敷金属的化学成分,含0%、2%和4%二氧化铈焊丝对应的熔敷金属分别用试样1、试样2和试样3表示,其化学成分如表1

所示.由于铈的含量较少,需使用电感耦合等离子光谱发生仪(ICP)测量熔敷金属中的铈含量.从熔敷金属中切取拉伸、冲击、金相、氢渗透试样,取样示意如图1所示.拉伸试样为平行段长度为30 mm、厚度为2 mm的矩形拉伸试样,冲击试样采用的是10 mm×10 mm×55 mm的标准夏比冲击V型缺口试样,氢渗透试样则为10 mm×10 mm×2 mm的薄片试样.

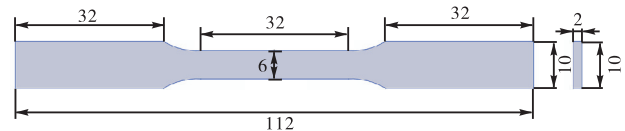
表1 熔敷金属的化学成分

Tab.1 Chemical composition of deposited metal

熔敷金属	w <sub>C</sub>	w <sub>Si</sub>	w <sub>Mn</sub>	w <sub>Ni</sub>	w <sub>Cr</sub>	w <sub>Mo</sub>	w <sub>Ce</sub>
试样1	0.053	0.43	1.27	0.50	0.22	0.17	
试样2	0.045	0.42	1.26	0.49	0.20	0.17	0.005
试样3	0.056	0.49	1.33	0.52	0.22	0.18	0.014



(a) 熔敷金属取样示意



(b) 拉伸试样尺寸(单位:mm)

图1 熔敷金属取样示意及拉伸试样尺寸

Fig.1 Schematic of samples taken from deposited metal and size of tensile specimen

### 1.2 显微组织观察与性能试验

本文使用电化学充氢后拉伸试样的塑性损失来表示熔敷金属的抗氢脆性能.氢在熔敷金属中的扩散能力则通过氢渗透试验测量<sup>[12]</sup>.电化学充氢试验采用0.5 mol/L的硫酸和3 g/L的硫脲的混合溶液作为电解液,拉伸试样作为阴极,阳极采用薄片铂电极,在直流恒流电源的作用下进行试验.本文采用的充氢电流为50 mA/mm<sup>2</sup>,充氢1 h.用酒精清洗掉残余的电解液后在5 min内采用MTS拉伸试验机进行拉伸试验,拉伸速度为0.375 mm/min.需要注意的是,充氢前先将拉伸试样表面打磨光滑,以降低试样表面加工质量对氢扩散的影响.熔敷金属的金相组织试

样在盖面层取样,使用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,采用 Axio Vert.A1 光学显微镜和 JEOL-7800 热场发射电子扫描电镜观察金相组织. 使用双电解池进行氢渗透试验,阴极侧为充氢侧,溶液与电化学充氢试验相同,阳极侧溶液采用 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液,示意如图 2 所示. 电化学氢渗透试样在实验前需要双面打磨并抛光<sup>[13]</sup>,放置在双电解池中后,先接通放氢侧的电化学工作站,当背底电流降低至 1  $\mu$ A 以下后,再接通直流电源进行充氢,记录稳态电流和达到稳态电流所需时间.

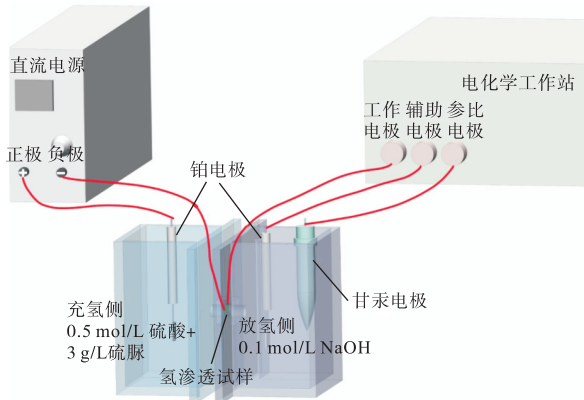


图 2 氢渗透试验示意

Fig.2 Schematic diagram of the hydrogen permeation test

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 二氧化铈对显微组织的影响

在光镜和扫描电镜下观察不同熔敷金属的金相组织发现,二氧化铈对熔敷金属显微组织的影响不明显,均主要由晶界上长条状的晶界铁素体、晶内均匀分布的针状铁素体以及少量的粒状贝氏体构成,如图 3 和图 4 所示.

二氧化铈在高温下可分解为铈原子和氧原子. 在焊接过程中,电弧的高温会使得二氧化铈发生分解,导致电弧氛围中出现稀土铈原子并过渡到熔池中. 由于稀土元素非常活泼,极易与氧发生反应,因此过渡到熔池中的稀土铈原子数量很少<sup>[14]</sup>. 进入熔池中的稀土铈原子可参与脱氧、脱硫反应,生成稀土氧化物、稀土硫化物、稀土复合氧化物等,一部分生成物会进入熔渣,另一部分则会以夹杂物的形式保留在焊缝中. 因此,二氧化铈的加入主要对焊缝中的夹杂物产生影响,可以对夹杂物进行改性并使其得到细化和球化,起到改变夹杂物的尺寸与分布状态的作用. 图 5 为在扫描电镜的背散射模式下熔敷金属中的夹杂物分布形貌.

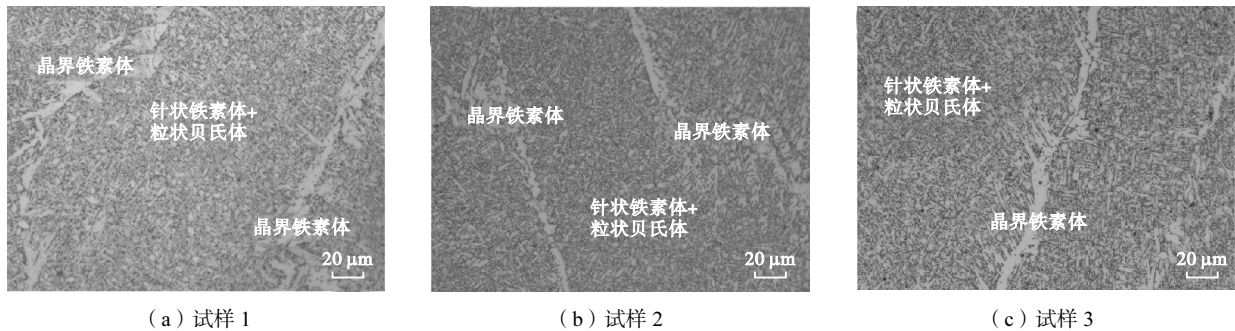


图 3 熔敷金属光镜下的显微组织

Fig.3 OM microstructures of deposited metal

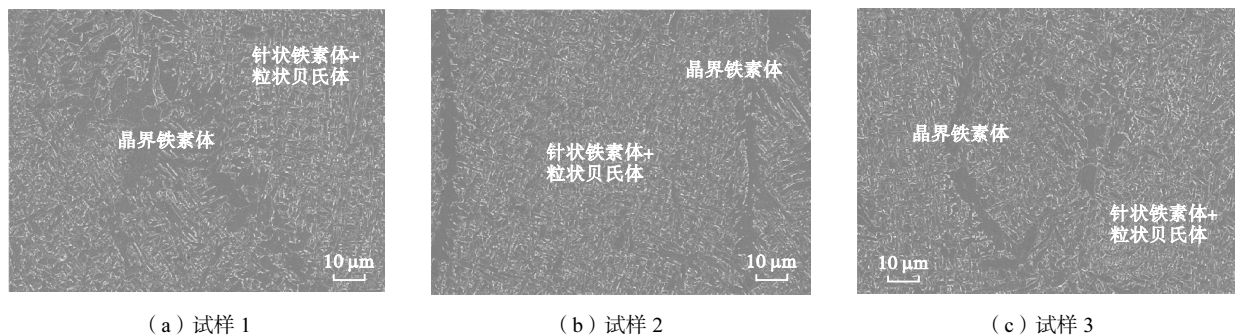


图 4 熔敷金属扫描电镜下的显微组织

Fig.4 SEM microstructures of deposited metal

利用 Image Pro Plus 统计夹杂物中的夹杂物尺寸及数目,统计结果如图 6 所示. 当加入 2% 二氧化铈

后,熔敷金属中的夹杂物平均尺寸减小,由 0.349  $\mu$ m 降低至 0.258  $\mu$ m,当二氧化铈含量为 4% 时,夹杂物

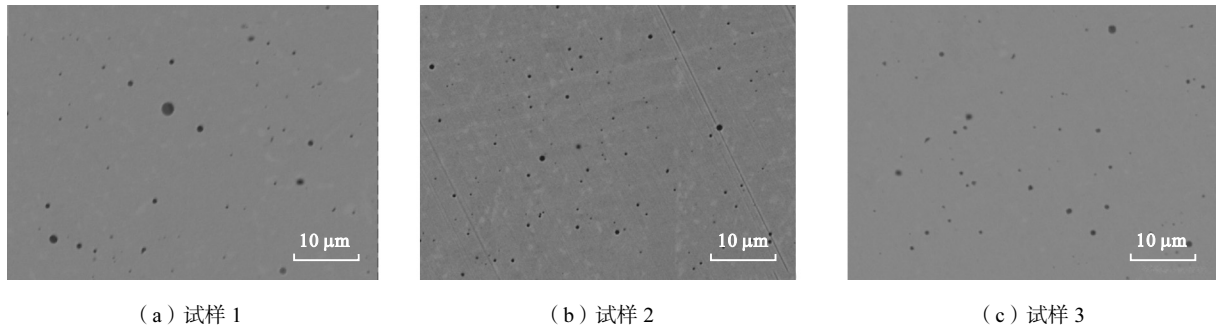


图 5 熔敷金属中夹杂物的分布形态

Fig.5 Distribution morphology of inclusions in deposited metal

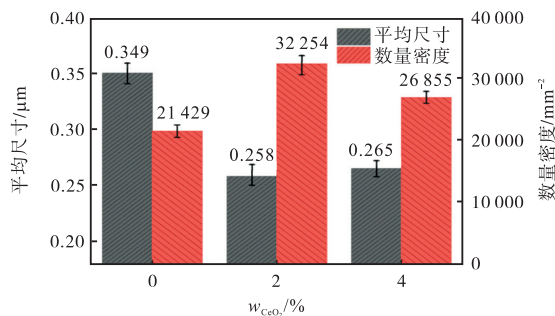


图 6 夹杂物的尺寸和数量密度

Fig.6 Size and number density of inclusions

平均尺寸略有增大,为 0.265  $\mu m$ . 夹杂物的数量密度变化则与夹杂物尺寸变化规律相反,加入 2% 二氧化铈的熔敷金属中夹杂物数量密度由 21 429  $mm^{-2}$  增加至 32 254  $mm^{-2}$ , 而由 4% 二氧化铈含量的金属粉芯焊丝制成的熔敷金属中,夹杂物数量密度为 26 855  $mm^{-2}$ .

2.2 二氧化铈对熔敷金属氢致塑性损失的影响

图 7 为未进行电化学充氢的熔敷金属的拉伸曲线. 3 种熔敷金属的拉伸曲线形状相似,都具有较为明显的屈服平台. 具体的拉伸性能如表 2 所示,随着二氧化铈含量的增加,熔敷金属的屈服强度、抗拉强度有所上升,加入 4% 二氧化铈的熔敷金属强度最高,屈服强度由 557 MPa 上升至 596 MPa,抗拉强度

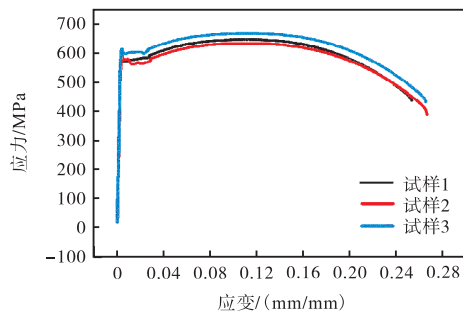


图 7 熔敷金属的拉伸曲线(未电化学充氢)

Fig.7 Tensile curves of deposited metal (without electrochemical hydrogen charging)

表 2 熔敷金属的拉伸性能

Tab.2 Tensile properties of deposited metal

熔敷金属	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
试样 1	557	647	25
试样 2	580	658	26
试样 3	596	666	25

则由 647 MPa 增加至 666 MPa. 3 种熔敷金属的断后伸长率则较为接近,均为 25% 左右. 从拉伸性能可以看出,所有这些熔敷金属均满足 X80 管线钢标准(屈服强度大于 555 MPa),并且都具有较好的延伸率.

电化学充氢 1 h 后,3 种熔敷金属的拉伸试验曲线如图 8 所示,拉伸性能的具体数据如表 3 所示. 从拉伸数据可以看出,充氢后的熔敷金属的屈服强度和抗拉强度变化不大,但是断后伸长率明显降低,这表明电化学充氢再进行拉伸加载会出现明显的氢脆特征,断后伸长率大幅度降低. 但是,加入二氧化铈的熔敷金属断后伸长率降低的幅度较小,表明二氧化铈的加入有利于减少充氢后的塑性损失.

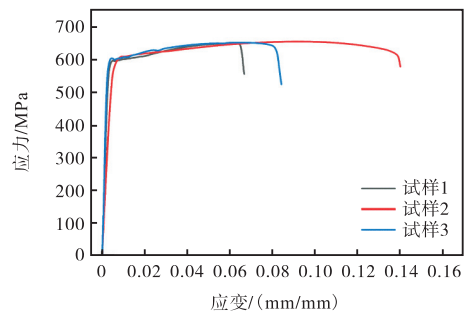


图 8 熔敷金属的拉伸曲线(电化学充氢)

Fig.8 Tensile curves of deposited metal (with electrochemical hydrogen charging)

充氢后的塑性损失率( $P$ ) 计算式为

$$P = \frac{\delta_0 - \delta_H}{\delta_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中  $\delta_0$  和  $\delta_H$  分别表示未充氢和充氢后的断后伸长率. 可以看出,焊材中适量二氧化铈的添加有利于改

表 3 熔敷金属电化学充氢后的拉伸性能

Tab.3 Tensile properties of deposited metal with electrochemical hydrogen charging

熔敷金属	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断后 伸长率/%	塑性 损失率/%
试样 1	582	652	7	72
试样 2	590	656	13	50
试样 3	590	658	10	60

善熔敷金属的抗氢脆性能,当二氧化铈含量为 2% 时,充氢后的拉伸试样塑性损失率为 50%,与未加二氧化铈的拉伸试样相比,塑性损失率有所减少.当二氧化铈的含量为 4% 时,塑性损失率反而增加至 60%.由此可见,添加适当含量的二氧化铈有助于提高熔敷金属的抗氢脆性能.

将拉伸试样的断口在超景深显微镜下观察,断口

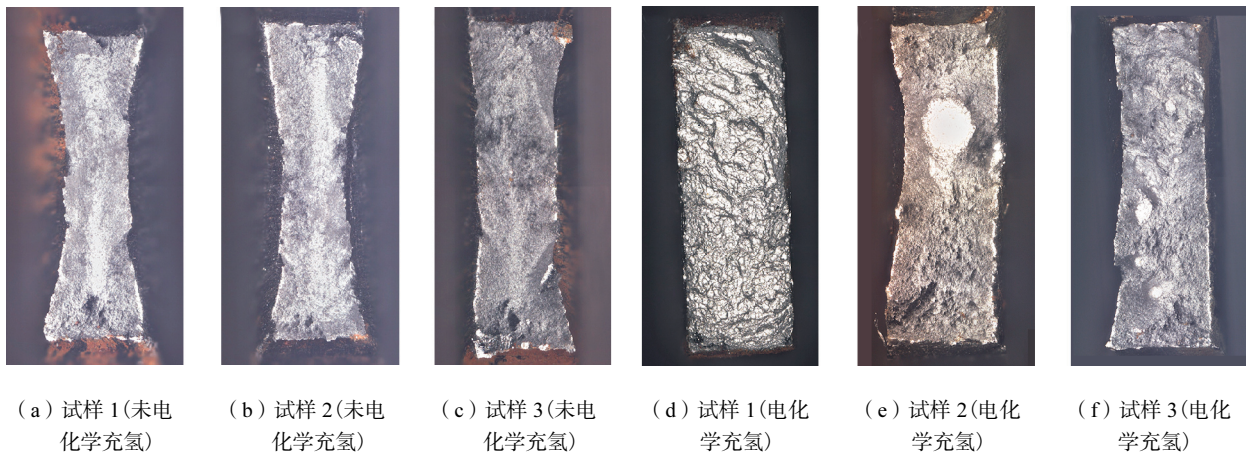


图 9 拉伸试样断口的超景深形貌

Fig.9 Ultradepth morphologies of fractures of tensile samples

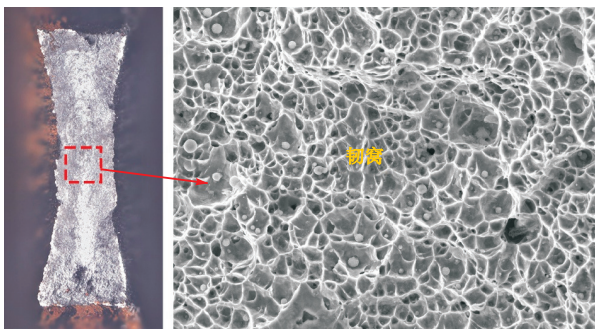


图 10 未电化学充氢的拉伸断口形貌(试样 1)

Fig.10 Tensile fracture morphologies without electrochemical hydrogen charging (sample 1)

但是,加入二氧化铈的电化学充氢拉伸断口则有所不同,如图 12 所示.在超景深图片中可以看到断口有一定的颈缩,还存在很明显的亮点.在扫描电镜下观察到亮点处呈明显的鱼眼特征<sup>[15]</sup>,这一特征属于典型的氢损伤缺陷,鱼眼分为源区和放射区两部分.源区有夹杂等缺陷,而放射区则为准解理形貌.

形貌如图 9 所示,未充氢时的拉伸试样均发生较为明显的颈缩,试样发生断裂前均产生较大的塑性变形,而电化学充氢后,拉伸试样在断裂前发生的颈缩程度较小,塑性变形程度较低.

使用扫描电子显微镜进一步观察断口可以发现,充氢前断口显微组织呈现以韧窝为主的微孔聚集型(micro-void coalescence, MVC)断裂特征,如图 10 所示.充氢后拉伸的试样断口形貌则较为复杂,二氧化铈的添加对拉伸试样充氢拉伸断口形貌影响较大.如图 11 所示,未添加二氧化铈时(试样 1),充氢拉伸断口整体较为平齐,没有发生明显的颈缩.通过扫描电镜进一步观察则发现,断口处既能观察到准解理(quasi-cleavage, QC)断裂特征形貌,又能观察到韧窝类型的 MVC 断裂形貌,并且准解理断裂占绝大部分.

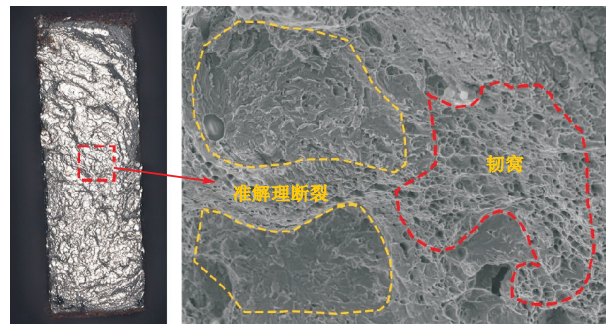


图 11 电化学充氢后的拉伸断口形貌(试样 1)

Fig.11 Tensile fracture morphologies with electrochemical hydrogen charging (sample 1)

鱼眼周围则是韧窝类型的 MVC 断裂形貌.加入 2% 二氧化铈时鱼眼缺陷最少,此时的塑性损失也最小.

### 2.3 氢在熔敷金属中的扩散及对塑性的影响机理

本文利用氢渗透试验测量氢在各熔敷金属中的扩散参数.图 13 为电化学工作站测得的电流随时间变化的曲线,表 4 为氢渗透试验计算得到的氢在熔敷

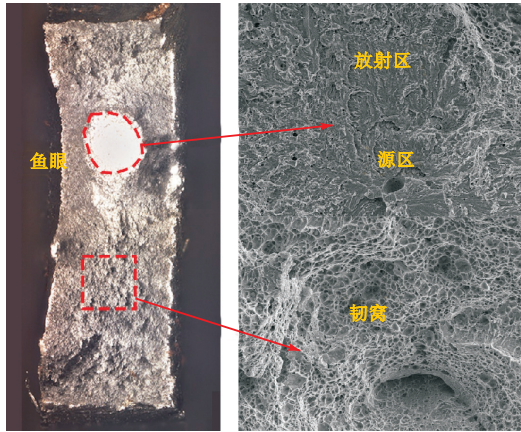


图 12 电化学充氢后的拉伸断口形貌 (试样 2)

Fig.12 Tensile fracture morphologies with electrochemical hydrogen charging (sample 2)

金属中扩散的相关参数, 这些参数计算式分别为

$$D_{\text{eff}} = \frac{L^2}{6 t_{0.63}} \quad (2)$$

$$J = \frac{I}{nF} \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{JL}{D_{\text{eff}}} \quad (4)$$

$$N_t = \frac{N_A C_0}{3} \left( \frac{D_L}{D_{\text{eff}}} - 1 \right) \quad (5)$$

式中:  $D_{\text{eff}}$  为氢在熔敷金属中的扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $L$  为氢渗透试样的厚度, 这里  $L = 2 \text{ mm}$ ;  $J$  为氢在熔敷金属中的渗透率,  $\text{mol}/(\text{cm}^2/\text{s})$ ;  $I$  为氢渗透试验测得的稳态电流值,  $\mu\text{A}$ ;  $t_{0.63}$  为达到 0.63 倍稳态电流值所需的时间,  $\text{s}$ ;  $n$  为转移电子数, 这里  $n = 1$ ;  $F$  为法拉第常数,  $F = 96483.33 \text{ C/mol}$ ;  $C_0$  为熔敷金属中的氢的溶解度,  $\text{mol}/\text{cm}^3$ ;  $N_t$  为熔敷金属中的氢陷阱数目,  $\text{cm}^{-3}$ , 包含可逆氢陷阱与不可逆氢陷阱;  $N_A$  为阿伏加德罗常数,  $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ;  $D_L$  为氢在纯铁素体中的扩散系数, 这里  $D_L = 1.28 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  [16].

从氢渗透试验的结果可以看出, 随着金属粉中二氧化铈含量的增加, 氢在熔敷金属中的扩散速度先减

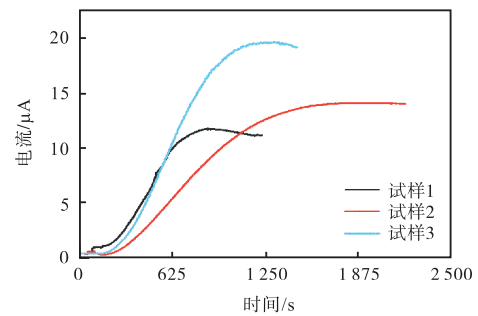


图 13 熔敷金属的氢渗透曲线

Fig.13 Hydrogen permeation curves of deposited metal

表 4 熔敷金属的氢扩散参数

Tab.4 Hydrogen diffusion parameters of deposited metal

熔敷金属	稳态电流 $I/\mu\text{A}$	时间 $t_{0.63}/\text{s}$	氢扩散系数 $D_{\text{eff}}/$ $(10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s})$	氢渗透率 $J/$ $(\text{mol}/(\text{cm}^2/\text{s}))$	氢溶解度 $C_0/$ $(\text{mol}/\text{cm}^3)$	氢陷阱数目 $N_t/$ $\text{cm}^{-3}$
试样 1	11.3	498	13.39	$1.17 \times 10^{-10}$	$1.75 \times 10^{-6}$	$3.35 \times 10^{20}$
试样 2	14.1	866	7.70	$1.46 \times 10^{-10}$	$3.80 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{21}$
试样 3	19.5	686	9.72	$2.02 \times 10^{-10}$	$4.16 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{21}$

小后增加, 当二氧化铈的含量为 2% 时, 熔敷金属的氢扩散速度最慢. 氢陷阱的变化规律则相反, 随着金属粉中二氧化铈含量的增加, 氢陷阱数目  $N_t$  先增加后减少, 当二氧化铈的含量为 2% 时, 熔敷金属氢陷阱的数目最多. 氢压理论 (HP) 认为, 金属中的孔洞、晶界、相界、位错、夹杂物、析出物等缺陷都是氢陷阱, 氢陷阱捕获的氢原子两两结合进一步形成氢分子, 从而产生氢压. 当氢压超过材料所能承受的极限时, 氢致裂纹便会萌生. Maroef 等 [17] 提出可以通过控制氢在焊缝金属中的分布来降低焊缝金属的氢脆敏感性. 焊缝中的夹杂物是一种典型的不可逆氢陷阱, 利用均匀分布的夹杂物对氢的捕获作用可以有效降低氢在焊缝金属中的局部集中从而降低氢脆敏感性. 当在焊材中加入 2% 二氧化铈后, 熔敷金属的夹杂物平均尺寸由  $0.349 \mu\text{m}$  减小至  $0.258 \mu\text{m}$ , 夹杂物

的数量密度则由  $21429 \text{ mm}^{-2}$  增加至  $32254 \text{ mm}^{-2}$ , 氢陷阱数目由  $3.35 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  增加至  $1.27 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 氢在熔敷金属中的扩散系数由  $13.39 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$  降低至  $7.70 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 氢致塑性损失率由 72% 降低至 50%. 这说明二氧化铈的添加可以有效细化夹杂物. 夹杂物可以起到捕获氢原子的作用, 因此熔敷金属中的氢陷阱密度明显提高, 氢在熔敷金属中的扩散受到阻碍, 氢原子发生聚集的程度更小, 氢致塑性损失率有所降低, 氢脆敏感性降低. 因此, 在焊材中加入二氧化铈, 可以提高熔敷金属的抗氢脆性能. 但是, 当二氧化铈含量达到 4% 时, 夹杂物数量密度有所下降 (图 6), 为  $26855 \text{ mm}^{-2}$ , 氢陷阱数目也降低至  $1.10 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 氢扩散系数增加至  $9.72 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$  (图 14), 氢致塑性损失率增加至 60%, 抗氢脆性能反而降低.

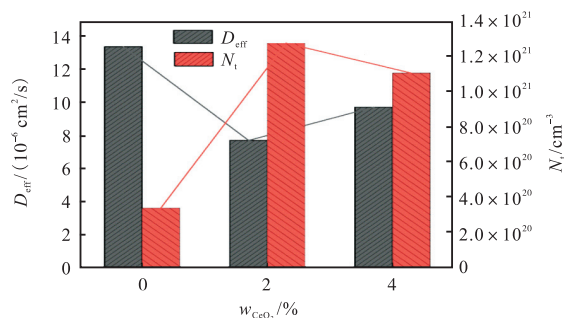


图 14 不同熔敷金属中的氢扩散系数  $D_{\text{eff}}$  和氢陷阱数目  $N_t$   
Fig.14  $D_{\text{eff}}$  and  $N_t$  in different deposited metals

### 3 结 论

本文设计了 3 种不同二氧化铈含量的 X80 管线钢金属粉型药芯焊丝,研究了二氧化铈含量对熔敷金属显微组织、力学性能和抗氢脆性能的影响,得出以下结论。

(1) 加入二氧化铈可以显著提升熔敷金属的抗氢脆性能。当二氧化铈的含量为 2% 时,熔敷金属的氢致塑性损失率由 72% 下降至 50%。

(2) 二氧化铈的添加主要对熔敷金属中夹杂物的尺寸和数目产生影响,显著细化夹杂物,使得夹杂物平均尺寸减小,数量密度增加。

(3) 二氧化铈加入后熔敷金属抗氢脆性能得到提升的主要原因是增加了氢陷阱数目,抑制了氢在熔敷金属中的扩散。

(4) 当二氧化铈含量达到 4% 时,熔敷金属抗氢脆性能的提升效果反而有所下降。这是因为夹杂物的数量密度相较于加入 2% 二氧化铈的熔敷金属有所降低,氢陷阱数目也有所减少。

#### 参考文献:

- [1] 何雅玲, 李印实. 氢能技术科技前沿与挑战[J]. 科学通报, 2022, 67(19): 2113-2114.  
He Yaling, Li Yinshi. Frontiers and challenges in hydrogen energy[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(19): 2113-2114 (in Chinese).
- [2] 王仪康, 潘家华, 杨柯, 等. 高性能输送管线钢[J]. 焊管, 2007(2): 13-18.  
Wang Yikang, Pan Jiahua, Yang Ke, et al. High performance pipeline steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2007(2): 13-18 (in Chinese).
- [3] 孙颖昊, 程玉峰. 高强管线钢焊缝区氢损伤研究与展望[J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(6): 1-13.

Sun Yinghao, Cheng Yufeng. A review on hydrogen damage at welds of high-strength steel[J]. Pipelines Petroleum Tubular Goods and Instruments, 2021, 7(6): 1-13 (in Chinese).

- [4] 程玉峰, 孙颖昊, 张引弟. 氢气管道发展与管线钢氢脆挑战[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 54-69.  
Cheng Yufeng, Sun Yinghao, Zhang Yindi. Development of hydrogen pipelines and hydrogen embrittlement challenges of pipeline steel[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2022, 19(1): 54-69 (in Chinese).
- [5] Tetelman A, Robertson W D. The mechanism of hydrogen embrittlement observed in iron-silicon single crystals[J]. Transactions of the AIME, 1961, 224(4): 775-783.
- [6] Chen L, Xiong X L, Tao X, et al. Effect of dislocation cell walls on hydrogen adsorption, hydrogen trapping and hydrogen embrittlement resistance[J]. Corrosion Science, 2020, 166: 108428.
- [7] Cheng X Y, Zhang H X. A new perspective on hydrogen diffusion and hydrogen embrittlement in low-alloy high strength steel[J]. Corrosion Science, 2020, 174: 108800.
- [8] Troiano A R. The role of hydrogen and other interstitials in the mechanical behavior of metals[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2016, 5: 557-569.
- [9] Pressouyre G M, Berustein I M. An example of the effect of hydrogen trapping on hydrogen embrittlement[J]. Metallurgical Transactions A, 1981, 12: 835-844.
- [10] 栗卓新, 温培银. 稀土元素 Ce 对 X90 金属芯埋弧焊丝熔敷金属冲击韧性的影响[C]// 第二十次全国焊接学术会议论文集. 兰州, 中国, 2015: 759-762.  
Li Zhuoxin, Wen Peiyin. Effect of rare earth element Ce on impact toughness of metal deposited in X90 metal core submerged arc welding wire[C]// Proceedings of the 20th National Welding Academic Conference. Lanzhou, China, 2015: 759-762 (in Chinese).
- [11] American Welding Society(AWS) A5 Committee on Filler Metals and Allied Materials. AWS A5.28/A5.28 M-2022 Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding[S]. USA: American

- Welding Society, 2022.
- [12] Jiang Y B, Li C N, Wang D P, et al. Effect of cyclic plastic deformation on hydrogen diffusion behavior and embrittlement susceptibility of reeling-pipeline steel weldments[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(58): 30158-30172.
- [13] 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[D]. 武汉: 武汉科技大学材料科学与工程学院, 2021.
- Peng Zhixian. Interaction Between Inclusions and Hydrogen in Pipeline Steel and Its Effect on HIC Sensitivity[D]. Wuhan: School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, 2021 (in Chinese).
- [14] 薛海涛, 李建国, 李俊岳, 等. 焊条药皮中稀土氧化物向焊缝中过渡机制的研究[J]. *中国稀土学报*, 2003, 21(5): 580-583.
- Xue Haitao, Li Jianguo, Li Junyue, et al. Mechanism of rare earth oxide transferring from coated electrode to welding pool[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2003, 21(5): 580-583 (in Chinese).
- [15] 宁 玫, 张 冰, 张志远, 等. 氢损伤缺陷分析研究 [C]//第八届(2011)中国钢铁年会. 北京, 中国, 2011: 3713-3718.
- Ning Mei, Zhang Bing, Zhang Zhiyuan, et al. Analysis and reserch of hydrogen damage defact [C]//The 8th(2011)China Iron and Steel Annual Conference. Beijing, China, 2011: 3713-3718(in Chinese).
- [16] Dong C F, Li X G, Liu Z Y, et al. Hydrogen-induced cracking and healing behaviour of X70 steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 484(1): 966-972.
- [17] Maroef I, Olson D L, Eberhart M, et al. Hydrogen trapping in ferritic steel weld metal[J]. *International Materials Reviews*, 2013, 47(4): 191-223.

(责任编辑: 田 军)