



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.13

热处理工艺对 S355 钢氢致开裂敏感性的影响

周凌川, 严春妍*, 黄夏蕊, 梁基剑, 张盛林, 王欣童, 张可召, 张根元

河海大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213022

摘要: 为揭示热处理工艺对 S355 低合金高强度结构钢氢致开裂 (HIC) 敏感性的影响, 采用水冷、油冷、空冷、炉冷四种冷却方式对 S355 钢进行 1 050 °C 保温 40 min 热处理, 通过硬度试验、拉伸试验、氢渗透试验和慢应变速率拉伸试验研究了不同冷却方式下的 S355 钢硬度、强度、氢渗透行为以及氢致开裂敏感性。结果表明, 冷却速率显著改变 S355 钢显微组织, 水冷试样显微组织主要为板条马氏体, 油冷试样显微组织主要为条状贝氏体和粒状贝氏体, 空冷和炉冷试样中显微组织为铁素体+珠光体, 且炉冷组织更为粗大。随冷却速度提升, 钢材硬度与抗拉强度逐步升高。氢渗透试验结果表明, 氢扩散系数随冷却速率增大而降低, 水冷试样的氢扩散系数最小, 炉冷试样的氢扩散系数最大。慢应变速率拉伸试验结果表明, 水冷试样的氢脆指数最大, 油冷、空冷试样的氢脆指数次之, 炉冷试样的氢脆指数最小。HIC 敏感性由高到低的排序为: 水冷、油冷、空冷、炉冷。马氏体与贝氏体组织因高密度氢陷阱能强效捕获氢原子, 显著提升氢脆与开裂风险; 铁素体+珠光体组织氢陷阱少、氢扩散快, 抗氢致开裂性能更优。研究结果为 S355 钢在含氢环境下的热处理工艺优化与安全服役提供数据支撑。

关键词: S355 钢; 热处理工艺; 显微组织; 氢渗透; 氢致开裂

中图分类号: TG156.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)04-0105-07

Influence of Heat Treatment on Hydrogen Induced Cracking Susceptibility of S355 Steel

ZHOU Lingchuan, YAN Chunyan*, HUANG Xiarui, LIANG Jijian, ZHANG Shenglin,
WANG Xintong, ZHANG Kezhao, Zhang Genyuan

College of Materials Science and Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China

Abstract: To reveal the effect of heat treatment on hydrogen induced cracking (HIC) susceptibility of S355 low-alloy high-strength structural steel, four cooling modes, namely water cooling, oil cooling, air cooling and furnace cooling, were adopted to conduct heat treatment on S355 steel at 1050 °C for 40 min. The hardness, strength, hydrogen permeation behavior and HIC susceptibility of S355 steel under different cooling modes were investigated by hardness test, tensile test, hydrogen permeation test and slow strain rate tensile (SSRT) test. The results show that the cooling rate significantly changes the microstructure of S355 steel. The microstructure of water-cooled specimen is mainly lath martensite, that of oil-cooled specimen is mainly lath bainite and granular bainite, and those of air-cooled and furnace-cooled specimens are ferrite + pearlite, with the furnace-cooled microstructure being coarser. The hardness and tensile strength of the steel increase gradually with

收稿日期: 2025-11-18 修回日期: 2026-03-03

基金项目: 江苏省研究生科研创新计划项目 (KYCX25_0909); 河海大学大学生创新创业训练计划项目 (202510294866, 2024102941222, 202410294009Z)

作者简介: 周凌川 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属材料激光电弧复合焊接及氢致开裂性能的研究。

通讯作者: 严春妍, 博士, 副教授, 主要金属材料高效焊接技术、增材制造及数值模拟技术的研究。E-mail: yancy_hhu@163.com。

the increase of cooling rate. Hydrogen permeation test results indicate that the hydrogen diffusion coefficient decreases with the increase of cooling rate; the hydrogen diffusion coefficient of water-cooled specimen is the minimum, while that of furnace-cooled specimen is the maximum. SSRT test results demonstrate that the hydrogen embrittlement index of water-cooled specimen is the highest, followed by oil-cooled and air-cooled specimens, and that of furnace-cooled specimen is the lowest. The HIC susceptibility in descending order is water cooling, oil cooling, air cooling and furnace cooling. Martensite and bainite microstructures can strongly trap hydrogen atoms due to high-density hydrogen traps, which significantly increases the risk of hydrogen embrittlement and cracking. In contrast, ferrite + pearlite microstructure has fewer hydrogen traps and faster hydrogen diffusion, exhibiting better resistance to HIC. The research results provide data support for the heat treatment process optimization and safe service of S355 steel in hydrogen-containing environments.

Keywords: S355 steel; heat treatment; microstructure; hydrogen permeation; hydrogen-induced cracking

引用格式:周凌川,严春妍,黄夏蕊,等. 热处理工艺对S355钢氢致开裂敏感性的影响[J]. 电焊机, 2026, 56(4): 105-111.

Citation: ZHOU Lingchuan, YAN Chunyan, HUANG Xiarui, et al. Influence of Heat Treatment on Hydrogen Induced Cracking Susceptibility of S355 Steel[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 105-111.

0 引言

低合金高强度结构钢是在碳素钢基础上添加总质量分数不超过5%的合金元素制备而成的工程结构材料,可显著提升钢的强度、韧性、耐热性、耐腐蚀性和焊接性或其他性能,已在桥梁、船舶、压力容器、管道、核动力设备、车辆、工程机械、建筑和海洋结构等领域得到大规模应用^[1-3]。S355钢作为一种典型的低合金高强度结构钢,凭借良好的机械性能和焊接性能,成为建筑结构、桥梁工程、压力容器及石化装备等领域许多重要设备的理想材料^[4-6]。在石油与化工行业的生产和服役过程中,S355钢构件不可避免地会接触H₂S及各类酸性物质,易诱发氢致开裂(hydrogen induced cracking, HIC)失效,导致结构承载性能退化、服役寿命大幅缩短,进而引发设备故障与重大经济损失。

金属材料氢致开裂受环境因素、力学因素和材料因素共同影响,其中材料自身的显微组织、化学成分和夹杂等因素是影响材料发生HIC现象的主要因素^[7]。提升低合金高强钢性能的方法通常有两种:一是通过添加Cr、Ni、Mo、Cu、Ti、Nb、V等合金元素来获得更高的强度、优良的韧性以及其他性能;二是对材料进行一定的热处理^[8]。在合金化的基础上,对材料进行热处理可以获得不同的显微组织,从而可以改善其机械性能、耐腐蚀性能、焊接性能和抗HIC性能等。Wu等^[9]探究了热处理工艺对X80管线钢显微组织和HIC敏感性的影响规律,指

出水冷试样主要组织为条状贝氏体,其氢脆指数最高。Cheng等^[10]研究了回火温度对低合金高强钢的氢脆敏感性,发现塑性应力可以改变稳态氢扩散通量,提高回火温度能够有效降低氢脆敏感性。Sun等^[11]针对回火态4130钢的研究表明,在500~600℃回火温度范围内,随着回火温度升高,材料晶界密度下降,HIC裂纹形核位置减少,氢脆敏感性下降。

综合现有文献可知,针对S355钢在不同热处理工艺下的显微组织演化、氢渗透行为及HIC敏感性的系统研究仍相对不足。基于此,本研究采用水冷、油冷、空冷、炉冷四种典型冷却方式对S355钢进行热处理,结合硬度测试、常规拉伸、氢渗透试验与慢应变速率拉伸试验,系统揭示不同冷却工艺对S355钢组织、力学性能、氢扩散特性及氢致开裂敏感性的影响,阐明组织与氢陷阱对HIC行为的调控机理,研究了不同热处理参数下S355钢的氢致开裂性能,为其实际应用提供数据支撑。

1 试验材料和方法

试验材料选用热轧态S355钢板,规格为300 mm×80 mm×18 mm,其主要化学成分如表1所示。采用线切割将板材加工为4组尺寸均为50 mm×18 mm×15 mm的试样,在箱式电阻炉加热至1 050℃并保温40 min,随后分别进行水冷、油冷、空冷和炉冷处理。热处理工艺曲线如图1所示。

将热处理后的试样经打磨、抛光后,采用体积

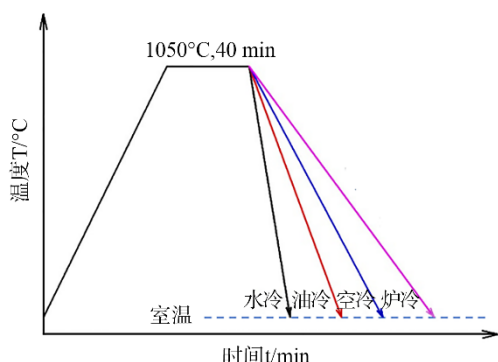


图1 S355钢热处理工艺

Fig. 1 Heat treatment processes for S355 steel

表1 S355钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of S355 steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.129	0.396	1.169	0.018	0.002	0.422
Ni	Cu	V	Ti	Mo	Fe
0.220	0.329	0.045	0.006	0.003	余量

分数4%硝酸酒精溶液进行腐蚀,利用蔡司Ax-iocam 105 color显微镜进行组织观察。依据GB/T 4340.1—2024《金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法》,采用华银HV-1000显微硬度计开展硬度测试,试验载荷1 000 N,保载时间为10 s,在表面选5个点测试并取平均值作为最终硬度值。

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》进行拉伸试验和慢应变速率拉伸(slow strain rate tension, SSRT)试验,两个试验中拉伸试样尺寸如图2所示。采用武汉科斯特CS1002恒电位/恒电流仪对试样进行预充氢,充氢溶液采用0.5 mol/L H_2SO_4 +0.5 g/L 硫脲混合溶液,充氢电流密度为50 mA/cm²,充氢时间4 h。充氢完成后,利用西安力创L100-09材料微机控制慢应变速率腐蚀试验机进行SSRT试验,拉伸速率为0.006 6 mm/min。根据试验结果计算氢脆指数,用以定量表征HIC敏感性,HIC敏感性与氢脆指数成正比。

为开展氢渗透测试,将其加工为18 mm×13 mm×1 mm的片状试样,依次采用240#到2000#砂纸对试样两面打磨并机械抛光。采用科斯特CS2350电化学工作站对试样单面进行镀镍处理,镀镍溶液为瓦特电镀液(240 g/L NiSO_4 +45 g/L NiCl_2 +40 g/L H_3BO_3),镀镍电流密度为4 mA/cm²,时间360 s。基于Devanathan-Stachurski双电解池原理开展氢渗透

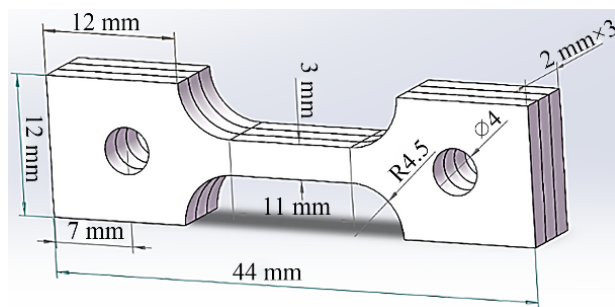


图2 拉伸试样尺寸(单位mm)

Fig. 2 Dimensional drawing of tensile specimen

试验,试验装置同样采用科斯特CS2350电化学工作站;其中,左侧阴极室(充氢侧)溶液为0.5 mol/L H_2SO_4 和0.5 g/L 硫脲,右侧阳极室(析氢侧)溶液为0.2 mol/L NaOH,试验装置示意如图3所示。通过计算有效氢扩散系数、氢通量、氢浓度及氢陷阱密度等各项参数,对比不同冷却速率下试样的氢陷阱捕获能力,以此来验证HIC敏感性的大小。

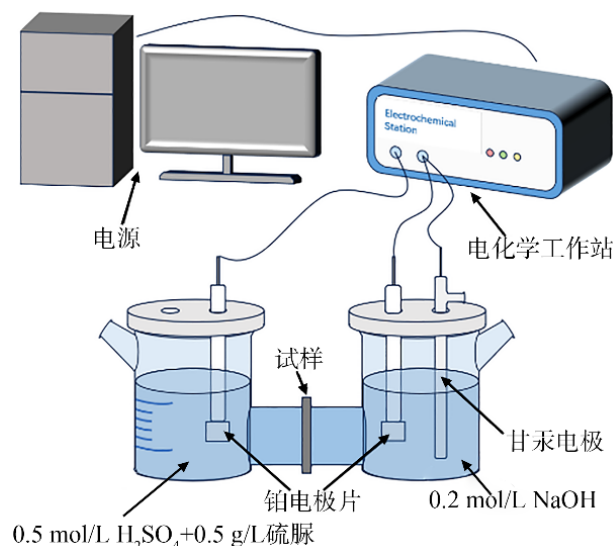


图3 双电解池氢扩散示意

Fig. 3 Schematic diagram of hydrogen diffusion in the double electrolytic cell device

2 结果与讨论

2.1 显微组织

S355钢母材和经不同热处理工艺处理后的显微组织如图4所示。由图可知,S355钢母材组织为带状珠光体(pearlite, P)及铁素体(ferrite, F)组成。图4b~4e为不同冷却工艺下的显微组织,冷却速率

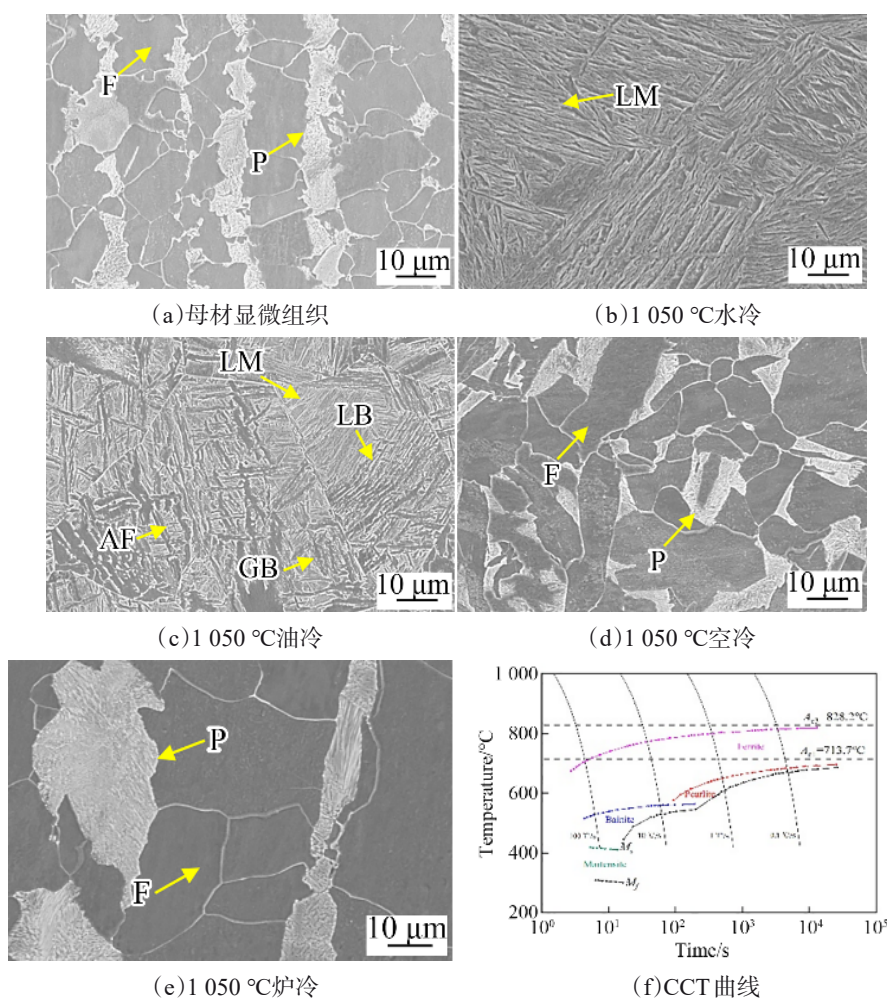


图4 S355钢不同热处理工艺后显微组织及CCT曲线

Fig. 4 Microstructure of S355 steel with different heat treatment processes and CCT diagram

为水冷>油冷>空冷>炉冷,可以看出冷却速率降低,显微组织类型发生了明显改变。水冷时冷却速率最快,组织以板条马氏体(lath martensite, LM)为主;油冷速率次之,组织主要为条状贝氏体(lath bainite, LB)和粒状贝氏体(granular bainite, GB),并含有少量的LM和针状铁素体(acicular ferrite, AF);采用空冷和炉冷时,冷却速率进一步减缓,显微组织为均匀分布的P和F,相比之下炉冷条件下组织更加粗大。

2.2 硬度和强度

不同冷却方式下S355钢的硬度与抗拉强度如图5所示。随冷却速率降低,材料硬度与抗拉强度均呈单调下降趋势。保温温度为1 050 °C时,水冷试样表面硬度最高,为412.1 HV;油冷次之,为320.2 HV;空冷和炉冷试样的硬度分别降至167.3 HV和127.3 HV。抗拉强度变化规律与硬度一致:水冷试样抗拉强度最

大,为1 284.6 MPa;炉冷试样最低,仅为477 MPa。上述变化由显微组织差异决定:水冷态以高硬度马氏体为主,油冷态以贝氏体为主,空冷与炉冷态为铁素体+珠光体复相组织,组织强度与硬度逐级降低。

2.3 SSRT试验结果

不同冷却工艺试样的慢应变速率拉伸应力-应变曲线及充氢后断口形貌分别如图6、图7所示。依据断面收缩率计算氢脆指数 I_z ^[6,9],表达式为:

$$I_z = \frac{Z_0 - Z_B}{Z_B} \quad (1)$$

式中 Z_0 为未充氢拉伸试样的断面收缩率; Z_B 为充氢拉伸试样的断面收缩率。

按参考文献[6]计算抗拉强度损失率 R_{mloss} 和延伸率损失率 A_{loss} ,充氢前后拉伸性能数据如表2所示。由表可知,水冷试样氢脆指数最高,达66.81%,

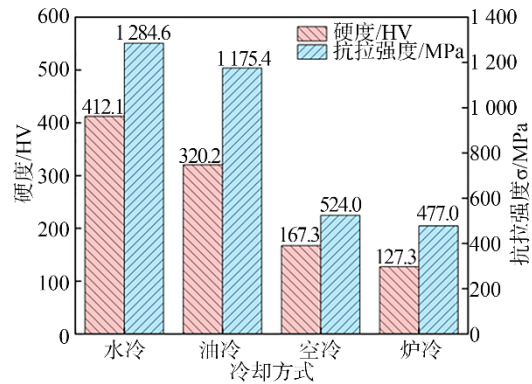


图5 不同冷却方式下 S355 钢硬度和抗拉强度

Fig. 5 Hardness and tensile strength of S355 steel with different cooling processes

强度和塑性损失率也最大, HIC 敏感性大; 炉冷试样的氢脆指数最低, 仅 12.22%, 强度和塑性的损失率较小, HIC 敏感性要小于其他冷却方式。HIC 敏感性由高到低依次为: 水冷>油冷>空冷>炉冷。由图 7 可以看出, 水冷试样近表面断口形貌出现较多的裂纹, 油冷试样断口呈现出准解理断裂特征, 空冷试样断口呈部分准解理+少量韧窝形貌, 炉冷试样断口形貌主要为韧窝, 断口形貌的变化规律也符合 HIC 敏感性水冷>油冷>空冷>炉冷的规律。

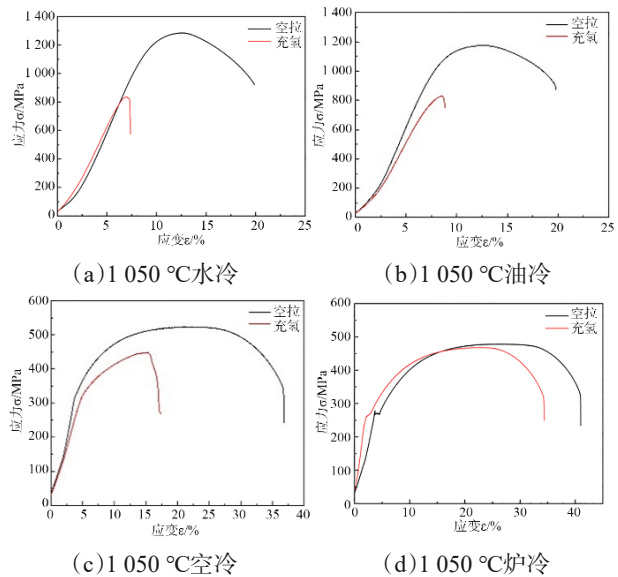


图6 不同冷却方式下的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of different cooling rates

2.4 氢渗透试验结果

图 8 为 S355 钢在不同冷却条件下的二次循环氢渗透试验曲线。根据氢渗透曲线的充氢段电流密度时间曲线及公式, 参考文献[6-7]中饱和阳极

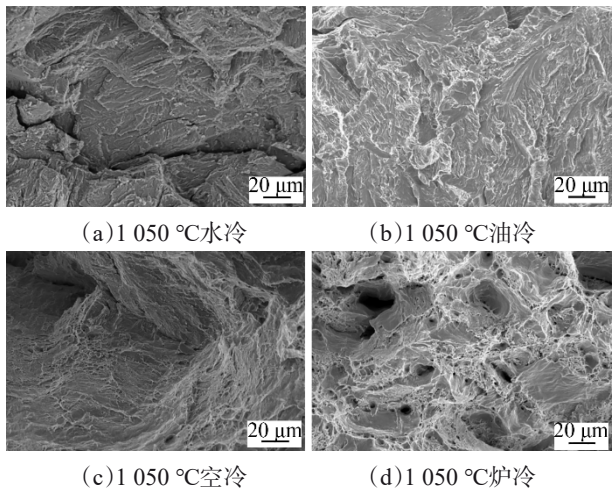


图7 不同冷却方式下充氢后 SSRT 拉伸试样的断口形貌

Fig. 7 Fracture morphologies of hydrogen-charged SSRT tensile samples with different cooling processes

表 2 充氢前后拉伸性能数据

Table 2 Tensile properties before and after hydrogen charging

冷却方式	抗拉强度损失 $R_{mloss}/\%$	延伸率损失 $A_{loss}/\%$	氢脆指数 $I_z/\%$
水冷	34.94	62.82	66.81
油冷	29.61	55.70	57.32
空冷	14.43	52.88	44.22
炉冷	1.95	16.10	12.22

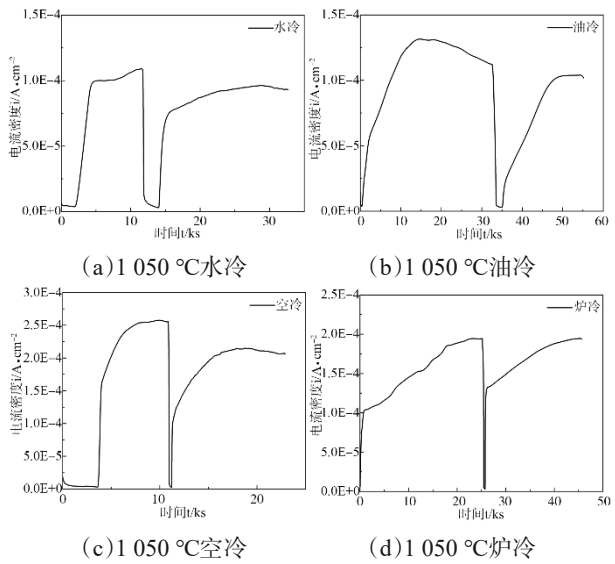


图8 不同冷却方式下的氢扩散曲线

Fig. 8 Hydrogen diffusion curves of different cooling processes

电流 I_{∞} 、氢扩散通量 J_{∞} 、有效扩散系数 D_{eff} 、阴极侧的氢浓度 C_0 、氢陷阱密度 N_T 、可逆氢陷阱密度 N_r 、不可逆氢陷阱密度 N_{ir} 计算公式, 分别计算氢渗透参数, 计算结果如表 3 所示。由表 3 数据可以看出, 氢扩

表3 氢扩散参数

Table 3 Hydrogen diffusion parameters

冷却方式	$D_{\text{eff}}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$J_{\text{H}}/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$C_0/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-3}$	$N_{\text{T}}/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-3}$	$N_{\text{I}}/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-3}$	$N_{\text{P}}/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-3}$
水冷	8.00×10^{-7}	1.33×10^{-9}	1.66×10^{-3}	8.81×10^{-2}	4.58×10^{-2}	4.23×10^{-2}
油冷	9.15×10^{-7}	1.27×10^{-9}	1.19×10^{-3}	6.31×10^{-2}	2.22×10^{-2}	4.09×10^{-2}
空冷	1.09×10^{-6}	1.16×10^{-9}	1.06×10^{-3}	4.13×10^{-2}	8.87×10^{-3}	3.24×10^{-2}
炉冷	1.21×10^{-6}	1.24×10^{-9}	1.02×10^{-3}	3.58×10^{-2}	3.59×10^{-3}	3.22×10^{-2}

散系数 D_{eff} 的大小顺序是水冷<油冷<空冷<炉冷, 阴极侧氢浓度 C_0 大小顺序是水冷>油冷>空冷>炉冷。水冷条件下氢扩散系数 ($8.00\times 10^{-7} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$), 而阴极侧氢浓度 ($1.66\times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$) 最大, 氢陷阱密度 ($8.81\times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$)、可逆氢陷阱密度 ($4.58\times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$) 和不可逆氢陷阱密度 ($4.23\times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$) 也最大, 说明氢原子在水冷试样中扩散最慢, 内部陷阱氢捕获能力最强。同时炉冷条件下氢扩散系数 ($1.21\times 10^{-6} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$) 最大, 阴极侧氢浓度 C_0 ($1.02\times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$) 最小, 氢陷阱密度 ($3.58\times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$)、可逆氢陷阱密度 ($3.59\times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$) 和不可逆氢陷阱密度 ($3.22\times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$) 也最小, 说明炉冷试样中氢原子扩散较快, 内部陷阱氢捕获能力较弱。

2.5 讨论

不同的冷却速率下显微组织类型不同, 不同组织的氢捕获能力不同, 材料的 HIC 敏感性也不同。对于体心立方晶格的钢种, 铁素体、珠光体、贝氏体、马氏体的氢捕获效率依次增加^[12]。水冷试样 HIC 敏感性最高, 这是因为水冷试样中显微组织主要为 LM, 马氏体组织 HIC 敏感性很高^[13], 且其内部氢扩散系数最小, 氢陷阱密度最大, 氢捕获效率最高。LM 中氢扩散系数较小, 和马氏体板条内部大量的位错和界面等陷阱有关, 它们具有很强的捕氢能力, 可以有效地捕获氢, 导致扩散系数较低。其中, 马氏体界面具有很高的结合能 ($\sim 60 \text{ kJ/mol}$), 为不可逆氢陷阱^[6,14], 故氢不易从马氏体中逃脱。油冷试样的组织为 LB、GB、LM 和 AF, LM 和 LB 的 HIC 敏感性高于 GB, 且马氏体和贝氏体内部的马氏体/奥氏体 (martensite-austenite, MA) 组元具有较高的位错密度^[7,9], 为较强的氢陷阱, 具有很强的捕氢能力, 因此氢扩散系数也较小。空冷和炉冷试样的 HIC 敏感性低于水冷和油冷试样, 这是因为其组织类型均为 F+P, 而 F/P 组织的 HIC 敏感性低于马氏体和贝氏体组织^[7,15]。由表 2、表 3 数据可见, 空冷试

样 HIC 敏感性大于炉冷试样, 氢扩散系数小于炉冷试样, 这是因为空冷试样中珠光体数量更多一些、晶粒更细, 氢陷阱密度大于炉冷试样。珠光体组织比铁素体更易于产生 HIC 现象, 硬度更高、脆性更大, 层片珠光体中铁素体/渗碳体界面、珠光体边界为主要的氢陷阱, 可以妨碍氢扩散, 降低氢扩散系数。另外, 空冷试样中晶粒较细, 单位体积中晶界面积增加, 氢陷阱数量更多^[6-7], 也可以降低氢扩散系数。

3 结论

为明确冷却方式对 S355 钢显微组织和 HIC 敏感性的影响, 采用水冷、油冷、空冷、炉冷四种工艺对 S355 钢进行 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 保温 40 min 热处理, 得出主要结论如下:

(1) 冷却速率显著决定 S355 钢显微组织类型。水冷组织以板条马氏体为主; 油冷组织主要为条状贝氏体与粒状贝氏体, 并含有少量马氏体和针状铁素体; 空冷和炉冷组织均为铁素体+珠光体, 且炉冷晶粒更为粗大。

(2) 冷却速度越快, 组织的淬硬性增加, 材料的硬度和抗拉强度越高。相同的保温温度下, 硬度和抗拉强度的高低顺序为水冷>油冷>空冷>炉冷。

(3) 水冷、油冷、空冷、炉冷试样氢脆指数分别为 66.81%、57.32%、44.22%、12.22%, 因为 HIC 敏感性与氢脆指数成正比, 所以 HIC 敏感性高低顺序为水冷>油冷>空冷>炉冷。水冷试样组织为较粗大的板条马氏体, 氢扩散系数 ($8.00\times 10^{-7} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$) 最小, 而阴极侧氢浓度、氢陷阱密度和不可逆氢陷阱密度也最大, 故 HIC 敏感性最高。水冷试样断口出现较多裂纹, 近表面断口形貌为典型的准解理特征。炉冷试样组织为 F+P, HIC 敏感性最低, 氢扩散系数 ($1.21\times 10^{-6} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$) 最大, 氢陷阱密度和不可逆氢陷

阱密度也较小,断口形貌为韧窝形貌。

(4)在含硫化氢、酸性介质等氢致开裂敏感环境中,S355钢构件应优先采用空冷或炉冷等缓冷工艺,避免快速淬火处理,以降低氢脆与氢致开裂失效风险。

参考文献:

- [1] Mo C Q, Wang B, Wang L, et al. Effect of rolling process parameters on transverse cracks on the surface of Q345 Steel[J]. Steel Research International, 2025, 96: 2400577.
- [2] Chen J, Shi Z R, Luo X B, et al. Micro-alloying effects on microstructure and weldability of high-strength low-alloy steel: a review[J]. Materials, 2025, 18(5): 1036.
- [3] Ma G Q, Gao B, Chen Z, et al. High-strength low-alloy steels for automobiles: microstructure and mechanical properties[J]. Materials 2025, 18(20):4660.
- [4] Zhang C T, Jia B, Wang J J. Influence of artificial cooling methods on post-fire mechanical properties of Q355 structural steel [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252(20): 119092.
- [5] Zurnadzhy V, Stavrovskaya V, Chabak Y, et al. Enhancing the tensile properties and ductile-brittle transition behavior of the EN S355 grade rolled steel via cost-saving processing routes [J]. Materials, 2025, 17(9): 1958.
- [6] Yan C Y, Zhang S L, Zhou L C, et al. Effect of quenching temperature on microstructure and hydrogen-induced cracking susceptibility in S355 steel[J]. Materials, 2025, 18(5):1161.
- [7] 严春妍,周倩雯,张浩,等. X90管线钢焊接接头氢致开裂敏感性研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(24): 83-94.
YAN C Y, ZHOU Q W, ZHANG H, et al. Investigation of Hydrogen-induced Cracking Susceptibility of X90 Pipeline Steel Welded Joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(24):83-94.
- [8] Zhu W T, Cui J J, Chen Z Y, et al. Correlation of microstructure feature with impact fracture behavior in a TMCP processed high strength low alloy construction steel [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(4):527-536.
- [9] Wu C, Yan C Y, Zhang S L, et al. Induced cracking sensitivity of X80 pipeline steel under different heat treatments[J]. Materials, 2024, 17(9):1953.
- [10] Cheng X Y, Zhang X Y. Effect of tempering temperature on stress-assisted hydrogen diffusion and hydrogen induced embrittlement in a high strength low alloy steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2023, 873:144948.
- [11] Sun Y M, Ding W H, Li M Q, et al. Investigations of hydrogen diffusion and embrittlement behavior in tempered high-strength carbon steel AISI 4130[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2025, 214:105447.
- [12] Thorsten M, Joerg N. Microstructural aspects upon hydrogen environment embrittlement of various bcc steels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(2):821-832.
- [13] Mohtadi-Bonab M, Szpunar J A, Collins L, et al. Evaluation of hydrogen induced cracking behavior of API X70 pipeline steel at different heat treatments[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(11):6076-6088.
- [14] Lee Y W, Gangloff R P. Measurement and modeling of hydrogen environment-assisted cracking of ultra-high-strength steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2007, 38A(13):2174-2190.
- [15] Mohtadi-Bonab M A, Masoumi M. Different aspects of hydrogen diffusion behavior in pipeline steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 4762-4783.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>