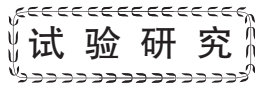


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2024.06.003



焊后消氢处理对核电承压设备用022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢组织及性能的影响

张瀚宁^{1,2}, 管吉春³, 李黎明⁴, 王 勇^{1,2}, 颜秉宇^{1,2}(1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁鞍山 114009; 2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁鞍山 114009;
3. 鞍钢股份有限公司, 辽宁鞍山 114009; 4. 鞍钢集团有限公司, 辽宁鞍山 114009)

摘要: 为了研究经过焊后消氢处理的承压设备用022Cr23Ni5Mo3N双相不锈钢组织及性能变化规律, 对该双相不锈钢进行300~400℃焊后消氢处理, 采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM), 分析在不同焊后消氢处理温度对材料组织的影响作用, 并对焊后消氢处理样品进行力学性能和耐蚀性能测试。研究结果表明, 析出相以富Cr的 α' 相为主, 且主要由铁素体组织产生, 在相同保温时间, 随着焊后消氢热处理温度的提高, 组织析出物逐渐增多。由于析出相在晶界处的钉扎作用导致材料的强度提高, 韧性明显下降, 但022Cr23Ni5Mo3N双相不锈钢仍具有良好的耐蚀性能。

关键词: 承压设备; 双相不锈钢; 焊后消氢处理; 显微组织; 析出相

中图分类号: TH49; TG142.71

文献标志码: A

Effect of post-weld hydrogen relief treatment on microstructure and properties of 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel in nuclear power pressure equipment

ZHANG Hanning^{1,2}, GUAN Jichun³, LI Liming⁴, WANG Yong^{1,2}, YAN Bingyu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, China;

2. Iron & Steel Research Institute of Angang Group, Anshan 114009, China;

3. Angang Steel Company Limited, Anshan 114009, China; 4. Ansteel Group Corporation Limited, Anshan 114009, China)

Abstract: Post-weld hydrogen relief treatment was conducted on 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel for pressure equipment at 300~400℃ in order to study the changes of microstructure and properties of that duplex stainless steel, and the effects of different post-weld hydrogen relief treatment temperatures on the microstructure of the materials were analyzed by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM), and the mechanical properties and corrosion resistance of the stabilized samples were tested. The research results show that the precipitation phase is dominated by Cr-rich α' phase, which is mainly produced by ferrite structure. At the same holding time, with the increase of post-weld hydrogen relief treatment temperature, the precipitation of the structure gradually increases. Due to the pinning effect of precipitated phase on grain boundary, the strength of the material is increased, the toughness is obviously decreased, but it still maintains good corrosion resistance.

Key words: pressure equipment; duplex stainless steel; postweld hydrogen relief treatment; microstructure; precipitated phase

0 引言

022Cr23Ni5Mo3N双相不锈钢具有综合力学性能良好、耐腐蚀优异及焊接性较好等特点, 广泛

应用于石油化工、海工造船、核电及压力容器行业^[1-6]。022Cr23Ni5Mo3N双相不锈钢通常由奥氏体不锈钢铁素体和奥氏体组成, 两相比比例接近50%, 其兼具铁素体型和奥氏体型不锈钢的

优点;同时,在钢种加入的 N 元素可替代 Ni 元素起到稳定奥氏体组织、提高力学性能和耐蚀性的作用,故双相不锈钢也具有更好的经济性。022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢在焊接过程中,材料经受非均匀加热导致体积膨胀而产生热应力;同时由于焊接是快速熔化和凝固的过程,氢在高温时的溶解度远高于室温,因此在焊后冷却的过程中,如果焊材及母材中的氢没有及时排出,会导致在焊接接头部分聚集析出,产生氢致裂纹,严重影响设备的使用寿命。为减少氢致开裂的影响,在制造过程中通常在焊后对设备局部或整体进行 300~400 °C 低温热处理(即焊后消氢处理,以下简称消氢处理),减缓焊后的冷却速度,以利于焊缝中扩散氢的逸出,降低产生氢致裂纹的可能性;同时有效地减小焊缝和热影响区的淬硬程度,提高焊接接头的抗裂性能。目前,国内外对双相不锈钢时效处理及模拟焊后热处理工艺开展了大量的研究^[7-17],但对于 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈

钢消氢处理工艺的报道较少。因此,为了研究不同消氢处理温度对母材组织和性能的影响,试验模拟对 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢进行消氢处理工艺(即在 300~400 °C 条件下、保温 240 min),分析消氢处理后对母材力学性能和耐蚀性能的影响,并对微观组织进行分析,为消氢处理工艺在双相不锈钢制造中的应用提供更全面的理论支撑。

1 试验材料与方法

试验材料采用某公司生产的双相不锈钢,通过电炉(EAF)→氩氧精炼炉(AOD)→真空脱碳炉(VOD)→钢包炉(LF)→连铸的工艺过程,生产厚度为 200 mm 连铸坯,采用热轧方式轧制成厚度 16 mm 的成品钢板。钢板化学成分(见表 1)满足 GB/T 24511—2017《承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带》的要求。随后对钢板进行固溶处理,固溶处理工艺为 1 050 °C、净保温 25 min,保温足够时间后,在水中迅速冷却至室温。

表 1 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Mo	Als	Fe
数值	0.018	0.470	1.180	0.030	0.001	5.200	22.500	0.171	3.090	0.006	余量

从完成固溶处理的成品钢板上取相同规格(16 mm×200 mm×400 mm)的钢样,在 SNIJSTAAL 空气循环炉中进行焊后消氢处理,加热温度分别设定为 300,350,400 °C,保温时间均为 240 min,随后出炉空冷至室温。按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》、GB/T 228.2—2015《金属材料 拉伸试验 第 2 部分:高温试验方法》和 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》的要求,对固溶和消氢处理后的钢样进行加工,加工直径为 12.0 mm 的圆形拉伸试样和 10 mm×10 mm×55 mm 夏比冲击 V 型缺口试样。

按照规定的试验方法,在 Zwick 600 全自动电子拉伸试验机上进行室温拉伸和高温拉伸试验。将试样放入循环式冷却槽中冷却至规定温度,到温后保持 30 min;随后在 ZBC 2602 全自动冲击试验机上进行冲击试验,采用游标卡尺测量断后试样的侧膨胀值。制备金相样品,并将样品放入配制好的溶液(4 g 硫酸铜 +20 mL 盐酸 +20 mL 水)中浸蚀,对制备好的样品进行光学显微镜进行组织观察。使用 Axio Observer7 光学显微镜

(OM)对固溶及焊后消氢处理后的试样进行组织观察。采用 SUPRA55 场发射扫描电镜(SEM)和 Tecnai G2 20 透射电子显微镜(TEM)观察冲击断口形貌及析出相形貌。分别在固溶处理及消氢处理钢板上下表面取样制备晶间腐蚀试样,试样尺寸为 6 mm×10 mm×100 mm,按照 ISO 3651-2《不锈钢耐晶间腐蚀的测定 第 2 部分:奥氏体、铁素体-奥氏体(二相)不锈钢》方法 A 的要求,按照 T1 制度进行敏化处理,经敏化处理后的样品放入装有腐蚀溶液(16% 硫酸 / 硫酸铜)的锥形瓶中加热至沸腾,保持 20 h;随后进行弯曲试验,弯曲角度为 90°,弯心半径等于试样厚度。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 示出 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢经过固溶处理和消氢处理后的金相组织,图 2 示出经过固溶和消氢处理后 δ 铁素体和 γ 奥氏体两相组织分布形态背散射形貌。经过热轧后,两相组织均随着轧制方向发生形变,由于面心立方结构的奥氏体层错能较低,在加热的过程中易产生再结

晶及退火孪晶。经过固溶处理后组织呈现典型的轧态双相钢特性。奥氏体组织呈岛状沿热轧方向分布在铁素体组织基体上。同时,在奥氏体晶粒中出现垂直于轧制方向的奥氏体孪晶,如图2(a)所示。消氢处理温度为300℃时(见图2(b)),铁素体组织内部出现少量白色的点状组织并沿着热轧方向平行排列,两相界面相较于固溶组织变得模糊,呈现锯齿状。当消氢处理温度升高至

350℃并保温240 min后(见图2(c)),可观察到铁素体、奥氏体界面出现细小的粒状组织,并向铁素体内部延伸。随着消氢处理温度提高至400℃(见图2(d)),结合图1和图2两相组织形貌分析,铁素体内部粒状组织明显增多,晶粒开始长大并形成等轴的细小晶粒,宏观形貌呈现网状组织,并均匀分布于铁素体基体;奥氏体则随着两相界面在消氢处理温度的提高,呈现碎化趋势。

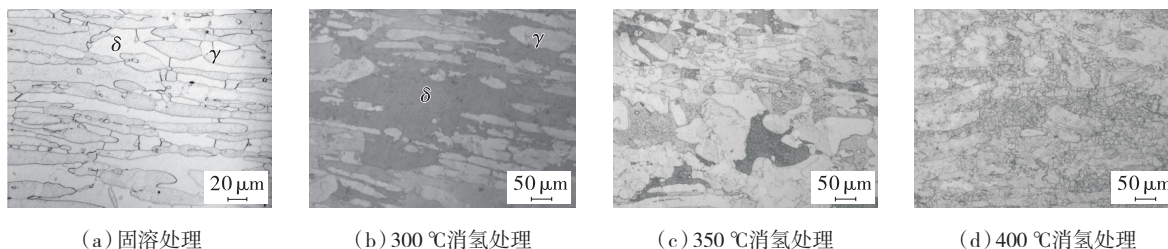


图1 经固溶和消氢处理后022Cr23Ni5Mo3N双相不锈钢光学显微组织

Fig.1 OM image of 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel after solution and hydrogen relief heat treatment

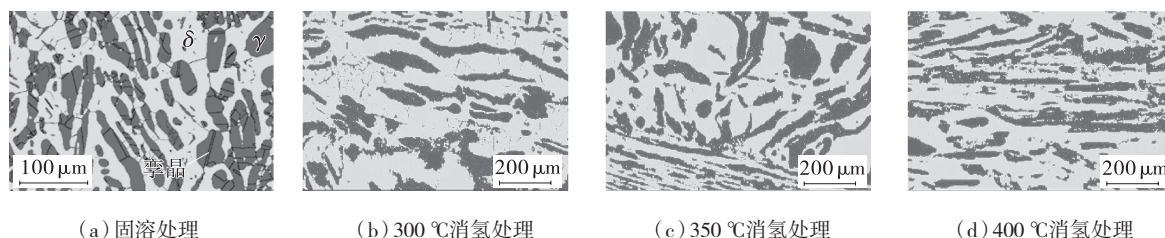


图2 经固溶和消氢处理后022Cr23Ni5Mo3N双相不锈钢背散射形貌

Fig.2 EBSD image of 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel after solution and hydrogen relief heat treatment

经消氢处理后组织的SEM图像如图3所示,铁素体组织呈现凸起状,奥氏体组织略微凹陷,两相交界处存在明显的白色析出相。通过能谱分析,两相交界处Cr含量较高,铁素体中Cr略低于两相界面,奥氏体中Cr含量较小,Mo元素基本一致,而Ni含量恰好相反。结合光学显微镜和EBSD图像分析,随着温度从300℃升高至400℃,铁素体内部细小的网状组织逐渐增多,由两相晶界处起始向铁素体晶粒内部延伸,最终充满整个铁素体组织内部。图4示出透射电子显微镜下铁素体晶粒内部和晶界处析出相形貌,铁素体内部析出相呈网状弥散分布,两相交界处的析出相仍呈现网状,通过能谱分析,析出相主要由Fe-Cr化合物构成,随着温度的升高,析出相明显增多。022Cr23Ni5Mo3N双相不锈钢经过1050℃固溶处理后,由于高温引起的热激活能迅速提高,原子的扩散速度显著提高,如 σ 相、 χ 相等第二相逐渐溶解于基体中^[18],Ni、N等奥氏体形成元素固溶于奥氏体晶粒,产生固溶强化,稳定奥氏体组

织。Cr、Mo等铁素体形成元素则在铁素体组织内部富集,经过快速冷却后,形成亚稳态过饱和固体。研究^[19-22]发现,双相不锈钢在600~900℃下长期保温,组织析出相主要由 σ 相和R相中间相组成,其组织演变行为主要由Mo、Cr原子扩散行为造成。而在300~500℃长期保温,其析出行为主要由Cr原子的扩散主导,此时铁素体组织内部发生调幅分解,其分解反应为 $\delta \rightarrow \alpha + \alpha'$,铁素体组织形成富Fe的 α 相和富Cr的 α' 相,形成网状组织,而奥氏体组织基本不发生变化,如图4(b)所示。 α' 相与 α 相形成共格关系,引起晶格畸变,对位错运动产生强烈的阻碍作用,使材料的强度提高并显著降低材料的低温韧性。因此,消氢处理对022Cr23Ni5Mo3N双相不锈钢中铁素体组织析出相有明显的促进作用,在300~400℃下保温进行消氢处理会促进铁素体分解形成 α' 相。 α' 相首先在铁素体和奥氏体相界面处形成,随着温度的提高,为析出相的生长提供驱动力,析出程度也随之增大,析出物向铁素体组织内部延伸,最

终扩散至整个铁素体组织。此外,经过消氢处理后的奥氏体组织几乎不发生变化,消氢处理主要

影响022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢中铁素体的析出行为。

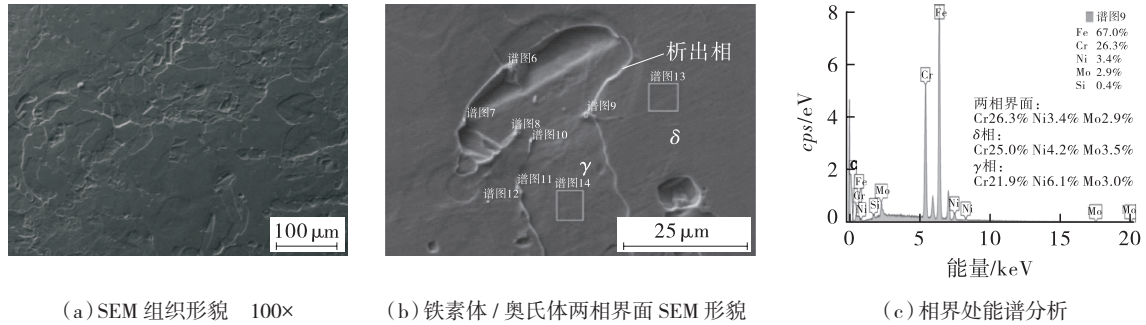


图3 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢经消氢处理后扫描电子显微镜表面组织形貌

Fig.3 SEM image of 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel after hydrogen relief heat treatment

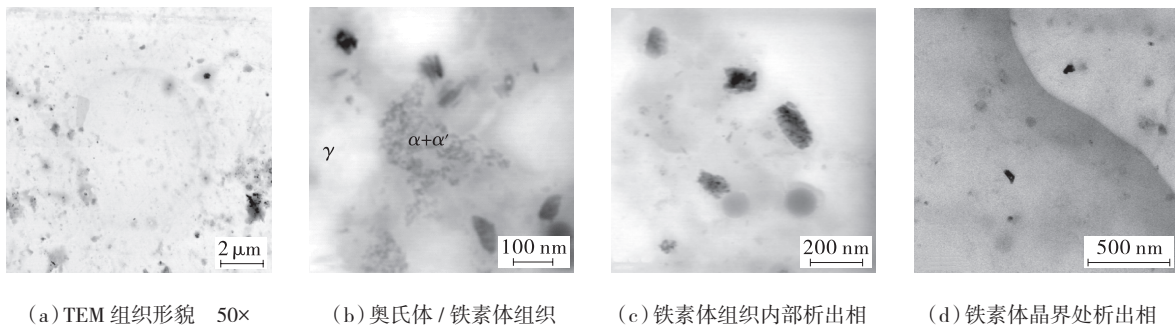


图4 消氢处理022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢透射电镜形貌分析

Fig.4 TEM image of 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel after hydrogen relief heat treatment

2.2 力学性能

固溶处理和消氢处理022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢板室温拉伸和高温拉伸性能如表2所示。可以看出,随着温度的提高,室温条件下规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 值逐渐增大,断后伸长率 A_{50} 和断面收缩率 Z 逐渐减小,由此可见,消氢处理会提高022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢的强度,而降低钢的塑性。如第2.1节所述,对022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢进行300~400 °C消氢处理促进铁素体中 α' 相的析出,并逐渐向奥氏体/铁素体相界面扩散并富集,粒状的析出相对位错的运动产生钉扎作用,阻碍位错的相对运动,

导致强度提高、塑性下降。温度越高,对第二相的析出促进作用随之增强,因此在形变过程中,对晶界的移动产生阻碍作用越大,从而导致 $R_{p0.2}$ 、 R_m 值逐渐增大。在高温条件下,由于温度的升高会提高位错和晶界的能量,减弱钉扎作用,促进晶界的相对滑动,因此在350 °C下高温拉伸,消氢处理后的022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢与只经过固溶处理相比,强度增强、塑性降低,但在350 °C下经过消氢处理后的样品随温度的提高,未受消氢处理析出相影响的奥氏体软化起主导作用,因此其强度变化不明显,这与第2.1节所分析的消氢处理与组织的变化规律相符合。

表2 固溶处理和消氢处理022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢的力学性能试验

Tab.2 Mechanical properties of 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel after solution and hydrogen relief heat treatment

项目	室温拉伸试验				350 °C高温拉伸试验			
	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A_{50}(\%)$	$Z(\%)$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A_{50}(\%)$	$Z(\%)$
固溶处理	555	740	37.0	71	389	605	34.0	42
300 °C	568	746	34.5	69	411	684	27.0	33
350 °C	573	758	33.5	66	413	685	28.5	35
400 °C	590	781	33.0	66	416	680	27.5	38
GB/T 24511—2017 要求值	≥ 450	≥ 620	≥ 25	—	≥ 315	≥ 555	—	—

对消氢处理试样进行 $-40 \sim -80 \text{ } ^\circ\text{C}$ KV_8 冲击试验, 冲击吸收能量随消氢处理温度变化的关系曲线如图 5(a) 所示, 冲击侧膨胀值变化如图 5(b) 所示, 试验结果显示, 温度从 $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ 提高至 $400 \text{ } ^\circ\text{C}$, 冲击吸收能量 KV_8 从 186 J 下降至 103 J , 侧膨胀值也随之下降。 $-80 \text{ } ^\circ\text{C}$ 冲击后断口 SEM 形貌如图 6 所示, 试样宏观断口呈平行排列, 可以明显看到 $022\text{Cr}23\text{Ni}5\text{Mo}3\text{N}$ 双相不锈钢的 $-80 \text{ } ^\circ\text{C}$ 冲击断口有两种断面特征, 断面呈现白色

韧窝状为韧性断裂特征; 断面呈现为暗色的平滑状为脆性断裂特征。经 $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ 消氢处理后, 冲击断口以白色的韧窝组织为主, 此时仍呈现韧性断裂特性。随着温度进一步提高, 经 $400 \text{ } ^\circ\text{C}$ 消氢处理后, 白色的韧窝明显减少, 平滑的解理状断口增多, 此时钢板韧性急剧下降, 与冲击吸收能量的变化规律相符。表明消氢处理使组织中析出 α' 相在铁素体大量产生, 并随热处理温度的提高而富集, 低温韧性随之急剧下降。

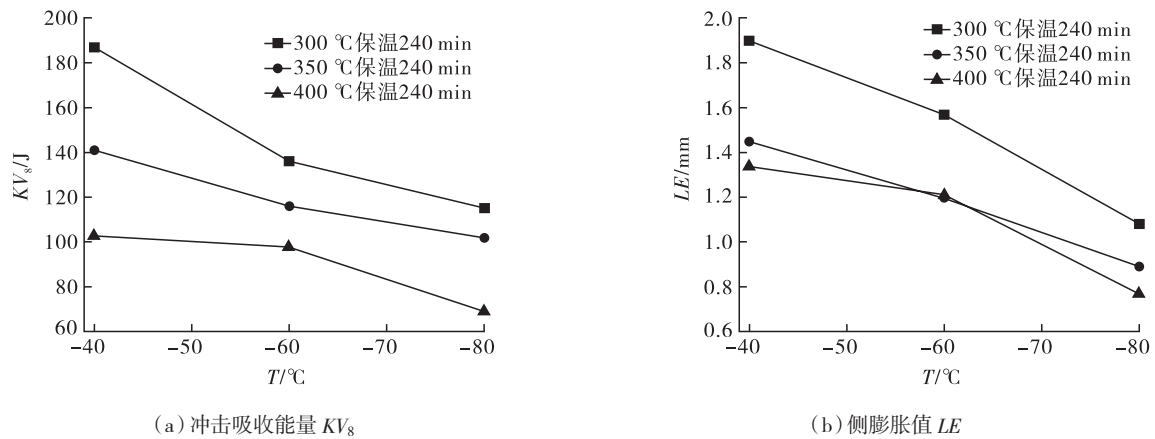


图 5 $022\text{Cr}23\text{Ni}5\text{Mo}3\text{N}$ 双相不锈钢经 240 min 不同温度消氢处理后的冲击性能变化

Fig.5 Impact performance changes of $022\text{Cr}23\text{Ni}5\text{Mo}3\text{N}$ duplex stainless steel after 240 minutes of hydrogen relief heat treatment at different temperatures

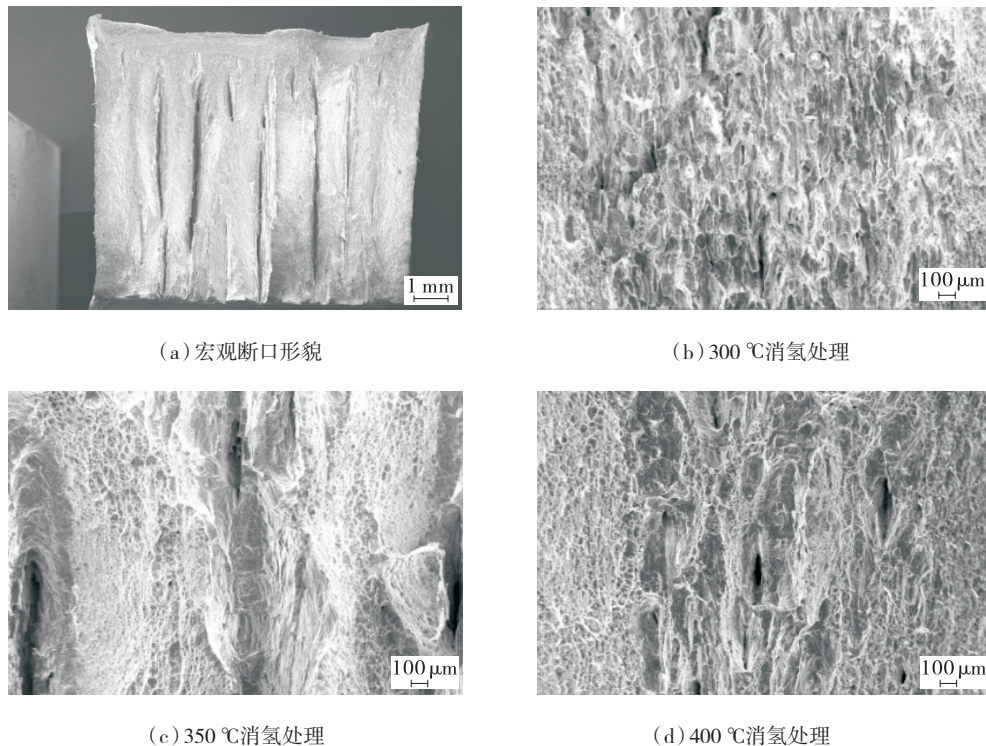


图 6 $-80 \text{ } ^\circ\text{C}$ KV_8 冲击试样断口 SEM 形貌

Fig.6 SEM morphology of KV_8 impact fracture at $-80 \text{ } ^\circ\text{C}$

2.3 耐蚀性能

依据 ISO 3651 - 2 方法 A 对固溶处理及消氢处理后的 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢进行晶间腐蚀试验,经敏化处理腐蚀试验后,对 3 组试样进行弯曲试验,结果显示经过消氢处理后,样品表面平滑,无腐蚀引起裂纹。通过对消氢处理后组织变化行为的分析,022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢在 300~400 °C 消氢处理主要影响铁素体组织演变行为,而使双相不锈钢具有高耐蚀性的奥氏体组织几乎不发生变化,因此经过消氢处理后的 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢仍具有良好的晶间腐蚀性能,在核电承压设备制造中,可满足对于耐蚀性能的设计需求。

3 结论

(1) 经过 300~400 °C 保温 240 min 焊后消氢处理,促进 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢铁素体组织析出 α' 相,并随着热处理温度的提高,析出相逐渐向铁素体晶粒内部扩展,400 °C 焊后消氢处理析出程度最大,而在此温度下焊后消氢处理对奥氏体组织影响不大。

(2) 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢经消氢处理后,随着热处理温度提高,室温屈服强度 $R_{p0.2}$ 从 555 MPa 提高至 590 MPa,抗拉强度 R_m 从 740 MPa 提高至 781 MPa,断后伸长率从 37.0% 下降至 33.0%。-40 °C 冲击吸收能量 KV_8 从 186 J 下降至 103 J。经消氢处理后,铁素体中 α' 相的析出导致韧性下降,仍可满足标准 GB/T 24511—2017 中 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢钢板的力学性能要求。

(3) 经过焊后消氢处理后的 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢仍具有良好的耐蚀性能,满足核电承压设备制造过程中对于耐蚀性能的设计需求。

参考文献:

- [1] 宋志刚,丰涵,吴晓涵等.中国双相不锈钢的发展及研究进展[J].中国冶金,2022,32(6):2-14.
SONG Z G,FENG H,WU X H,et al. Development and research progress of duplex stainless steel in China[J]. China Metallurgy,2022,32(6):2-14.
- [2] 丰涵,周晓玉,刘虎,等.特超级双相不锈钢的发展现状及趋势[J].钢铁研究学报,2015,27(4):1-5.
FENG H,ZHOU X Y,LIU H,et al. Development and trend of hyper duplex stainless steels[J]. Journal of Iron and Steel Research,2015,27(4):1-5.
- [3] SONG Z,FENG H,HU S. Development of Chinese duplex stainless steel in recent years[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2017,24(2):121-130.
- [4] 江来珠,张伟,王治宇.经济型双相不锈钢的研发进展[J].钢铁研究学报,2013,25(4):1-8.
JIANG L Z,ZHANG W,WANG Z Y. Research and development of lean duplex stainless steels[J]. Journal of Iron and Steel Research,2013,25(4):1-8.
- [5] 秦媛媛,秦晓峰,陈占春.厚壁筒内表面平行双轴向裂纹间影响规律研究[J].机电工程,2022,39(2):276-280.
QIN Y Y,QIN X F,CHEN Z C. Factors influence on the interference of parallel biaxial cracks in inner surface of thick-walled pipe[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2022,39(2):276-280.
- [6] 党晓勇,师志峰,刘静.圆柱滚子轴承次表面裂纹区域应力分布规律研究[J].机电工程,2023,40(2):204-210.
DANG X Y,SHI Z F,LIU J. Stress distribution law in subsurface crack region of cylindrical roller bearing[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2023,40(2):204-210.
- [7] 胡昕明,张海明,隋松言,等.模拟焊后热处理对 316H 钢组织和性能的影响[J].压力容器,2022,39(3):34-39.
HU X M,ZHANG H M,SUI S Y,et al. Effect of simulated post-weld heat treatment on microstructure and properties of 316H steel[J]. Pressure Vessel Technology,2022,39(3):34-39.
- [8] 宋晓俊,钟文君,郭旭,等.复合板压力容器 2205 双相钢锻件接管开裂原因分析[J].压力容器,2022,39(12):54-61.
SONG X J,ZHONG W J,GUO X,et al. Analysis on cracking cause of 2205 duplex stainless steel forging nozzles for composite plate pressure vessel[J]. Pressure Vessel Technology,2022,39(12):54-61.
- [9] 陶平,赵晨宇,巩建鸣.2205 双相不锈钢氢致开裂行为的试验分析与模型预测[J].压力容器,2022,39(1):9-18.
TAO P,ZHAO C Y,GONG J M. Experimental analysis and model prediction of the hydrogen assisted cracking behavior of 2205 duplex stainless steel[J]. Pressure Vessel Technology,2022,39(1):9-18.
- [10] 王纯,贾小斌,冯伟,等.热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 特超级双相不锈钢工艺试验研究[J].压力容器,2021,38(5):22-25.
WANG C,JIA X B,FENG W,et al. Experimental research on hot wire TIG overlay welding process of

- UNS S32707 super duplex stainless steel [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38 (5): 22 – 25.
- [11] 谷国超, 李瑞芬, 辛振民, 等. 2507 超级双相不锈钢中第二相的析出行为 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (5): 92 – 98.
- GU G C, LI R F, XIN Z M, et al. Precipitation behavior of second phase in super duplex stainless steel 2507 [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47 (5): 92 – 98.
- [12] 高晓丹, 任学平, 李晶琨, 等. 时效工艺对 2205 双相不锈钢 σ 相析出行为的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (10): 1 – 5.
- GAO X D, REN X P, LI J K, et al. Effect of aging process on σ phase precipitation of 2205 duplex stainless steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (10): 1 – 5.
- [13] 刘燕, 高仁强, 陈兴润, 等. 2205 双相不锈钢中 σ 相析出的影响因素分析 [J]. 金属热处理, 2021, 46 (3): 180 – 183.
- LIU Y, GAO R Q, CHEN X R, et al. Analysis of influencing factors of σ phase precipitation in 2205 duplex stainless steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46 (3): 180 – 183.
- [14] PENHA R, SILVA L B, MENDONCA C S P, et al. Effect of ageing time on microstructure and mechanical properties of SAF 2205 duplex stainless steel [J]. Archives of Materials Science and Engineering, 2018, 91 (1): 23 – 30.
- [15] LIU Z X, XIE Y, ZHANG L X, et al. Effect of aging on the microstructure and properties of ASTM A890 3A duplex stainless steel [J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 106215.
- [16] 晁代义, 徐仁根, 孙有政, 等. 850 °C 时效处理对 2205 双相不锈钢组织与力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33 (增刊 1): 369 – 372.
- CHAO D Y, XU R G, SUN Y Z, et al. Effect of aging treatment at 850 °C on microstructures and mechanical properties in duplex stainless steel 2205 [J]. Materials Reports, 2019, 33 (Sup.1): 369 – 372.
- [17] 那璇, 邹德宁, 沈楚, 等. 时效处理对 Cr22Ni5Mo3 不锈钢力学性能及耐蚀性的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (20): 138 – 141.
- NA X, ZOU D N, SHEN C, et al. Effects of aging treatment on mechanical properties and corrosion resistance of Cr22Ni5Mo3 stainless steel [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (20): 138 – 141.
- [18] 王良, 杨茗凯, 胡议文, 等. 热处理对 2205 双相不锈钢显微组织及性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2024, 45 (2): 120 – 128.
- WANG L, YANG M K, HU Y W, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 2205 duplex stainless steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45 (2): 120 – 128.
- [19] JIANG X, YOSHIMURA T, ISHIKAWA Y, et al. Investigation of alpha prime precipitation in aged duplex stainless steel [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 139 (4): 1001 – 1007.
- [20] 刘晓, 王龙妹, 陈雷, 等. 双相不锈钢 475 °C 脆性及其形成特点对性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2010, 22 (5): 46 – 50.
- LIU X, WANG L M, CHEN L, et al. Characteristic of brittleness at 475 °C and its effects on properties in duplex stainless steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22 (5): 46 – 50.
- [21] 罗永赞. 双相不锈钢的 475 °C 脆性断裂研究 [J]. 金属科学与工艺, 1990, 9 (4): 30 – 36.
- LUO Y Z. Study on the brittle fracture of duplex stainless steel at 475 °C [J]. Materials Science and Technology, 1990, 9 (4): 30 – 36.
- [22] 王良, 张梦瑶, 何晓晗, 等. 时效处理对 S31803 双相不锈钢 σ 相析出及性能的影响 [J]. 压力容器, 2023, 40 (11): 18 – 25.
- WANG L, ZHANG M Y, HE X H, et al. Effect of aging process on σ phase precipitation and properties of S31803 duplex stainless steel [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40 (11): 18 – 25.

本文引用格式:

张瀚宁, 管吉春, 李黎明, 等. 焊后消氢处理对核电承压设备用 022Cr23Ni5Mo3N 双相不锈钢组织及性能的影响 [J]. 压力容器, 2024, 41 (6): 16 – 22.

ZHANG H N, GUAN J C, LI L M, et al. Effect of post-weld hydrogen relief treatment on microstructure and properties of 022Cr23Ni5Mo3N duplex stainless steel in nuclear power pressure equipment [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41 (6): 16 – 22.

作者简介: 张瀚宁 (1992), 男, 工程师, 主要从事核电、压力容器用低合金钢、不锈钢等中厚板的开发工作, 通信地址: 114009 辽宁省鞍山市铁东区五一路 63 号鞍钢集团钢铁研究院, E-mail: 13194257375@163.com。