

固溶温度对 022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢组织和性能的影响

李 宁

(沈阳科金特种材料有限公司, 沈阳 110101)

摘 要 试验研究了 1 000 ℃ 4 h 和 1 060 ℃ 4 h 固溶处理后 022Cr22Ni5Mo3N 钢 Φ75 mm 材的组织 and 力学性能。结果表明, 022Cr22Ni5Mo3N 钢 Φ75 mm 材终锻温度 970 ℃ 空冷的组织 (体积分数) 约为铁素体 31%, 奥氏体 56%, 析出物 13%; 1 000 ℃ 4 h 固溶后为铁素体 38%, 奥氏体 60%, 析出物 2%; 1 060 ℃ 4 h 固溶后铁素体 50%, 奥氏体 50%, 该钢通过采用 1 060 ℃ 固溶后, 拉伸断裂强度 731 MPa, 延伸率 38%, 冲击功 $A_{KV}(-40\text{ }^{\circ}\text{C})$ 76 ~ 81 J, 满足标准要求。

关键词 022Cr22Ni5Mo3N 钢 固溶温度 组织 铁素体 冲击韧性

Effect of Solution Temperature on Structure and Properties of 022Cr22Ni5Mo3N Duplex Stainless Steel

Li Ning

(Shenyang Kejin Special Material Co Ltd, Shenyang 110101)

Abstract The structure and mechanical properties of 022Cr22Ni5Mo3N steel Φ75 mm bar solution treated at 1 000 ℃ for 4 h and 1 060 ℃ for 4 h have been tested and studied. Results show that the structure (volume percentage) in 022Cr22Ni5Mo3N steel Φ75 mm bar end forging temperature at 970 ℃, air cooling is about ferrite 31%, austenite 56% and precipitates 13%, that solution-treated at 1 000 ℃ for 4 h is ferrite 38%, austenite 60% and precipitates 2%, and that solution-treated at 1 060 ℃ for 4 h is ferrite 50% and austenite 50%. The steel solution-treated at 1 060 ℃ has tensile strength 731 MPa, elongation 38% and $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ impact energy A_{KV} 76 ~ 81 J to meet the requirement of standard.

Material Index 022Cr22Ni5Mo3N Steel, Solution Temperature, Structure, Ferrite, Impact Toughness

随着国家对能源的需求日趋强烈, 油气井的勘探和开发面临更多的技术难题, 油井管是石油专用管, 也是油气井最常见的部件之一。油井管长期服役在腐蚀介质和交变载荷的工况下, 为此, 瑞典开发了针对酸性油井井管及管线用材 SAF2205 钢, 我国在 20 世纪 80 年代初研制了与 SAF2205 钢化学成分接近的 022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢^[1]。022Cr22Ni5Mo3N 钢是一种奥氏体-铁素体双相不锈钢, 该钢由铁素体和奥氏体两相按照一定的比例组成、两相共存结构, 兼具铁素体和奥氏体不锈钢的优点, 该钢的合金成分和显微组织特点使得该钢具有力学拉伸强度较高、耐应力腐蚀性强、低温冲击韧性较好等特点, 该钢广泛用于制作石油、化工, 造纸和能源工业等领域^[2-4]。本文采取不同固溶温度对 022Cr22Ni5Mo3N 钢组织微观结构及力学性能进行研究, 分析了热处理固溶温度对材料的微观组织及性能的影响。

1 试验方法和过程

试验用料选择 500 kg 真空感应炉 (ZG-500L) +

真空自耗电极电弧熔炼炉 (VAR) 熔炼成的 Φ200 mm × 800 mm 钢锭, 其钢锭的主要化学成分如表 1 所示, 成分符合 ASTM A240 UNS S32205-2007 相关标准规定^[5]。为控制锻造加热温度过高、保温时间过长引起超量铁素体出现, 必须严格控制坯料热成型加热区间和坯料保温时间。钢锭经 1 150 ~ 1 170 ℃ 加热保温 4 ~ 6 h 后, 使用 750 kg 锻锤锻制而成, 锻锤拔长尺寸为 Φ75 mm × 1 000 mm 试验坯料, 坯料终锻成型温度约 970 ℃, 试验坯料锻后采用空冷冷却。随后对试验坯料进行锯床切分, 首先切取金相试样, 尺寸规格 (mm) 为 15 × 15 × 15, 观察坯料的锻后原始组织状态, 随后对不同的试验坯料采取不同的热处理工艺如表 2 所示。

试验坯料采取不同热处理温度固溶处理后, 从不同试验坯料 A、B 上锯床分别切取测试的试样, 金

表 1 试验用钢 022Cr22Ni5Mo3N 主要化学成分 / %
Table 1 Main chemical composition of test steel 022Cr22Ni5Mo3N / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.021	0.38	0.59	0.012	0.008	21.31	5.32	3.02	0.13

表 2 试验坯料的不同热处理温度

Table 2 Different heat treatment temperatures of experimental billet

试验编号	固溶工艺
A	1 000 °C 4 h, 水冷
B	1 060 °C 4 h, 水冷

相试样为(mm)15×15×15、拉伸试样、冲击试样取样位置为试验圆棒坯料距离热处理表面1/2半径处,方向均为纵向取样。拉伸试样加工直径为10 mm,标距50 mm的标准拉伸试样,冲击试样采用夏氏V型缺口,使用Nikon LV150N型光学显微镜对不同热处理固溶后的金相试样进行微观组织观察,采用WDW-100D双向拉伸试验机和JB-300B摆锤冲击试验机分别进行力学拉伸和冲击韧性测试,并对不同的热处理温度固溶的坯料试样获得的力学性能和组织进行讨论。

2 试验结果及其分析

图1(a,b,c)分别为试验坯料锻后原始态以及坯料A、B热处理固溶后的金相微观组织照片。在图1中,白色部分为奥氏体相,灰色部分为铁素体相。可以看出,试验坯料锻后其组织构成为 α 铁素体+奥氏体+晶界和晶间析出物构成。此时,坯料锻后原始组织中, α 铁素体相约占31%的体积分数,奥氏体相约占56%的体积分数,析出物构成约占13%的体积分数。试验坯料A、B固溶处理后,其微观组织结构均由铁素体+奥氏体两相组织构成,其中坯料A组织中, α 铁素体相约占38%的体积分数,奥氏体相约占60%的体积分数,析出物构成约占2%的体积分数;坯料B固溶后,其组织中, α 铁素体相约占50%的体积分数,奥氏体相约占50%的体积分数。

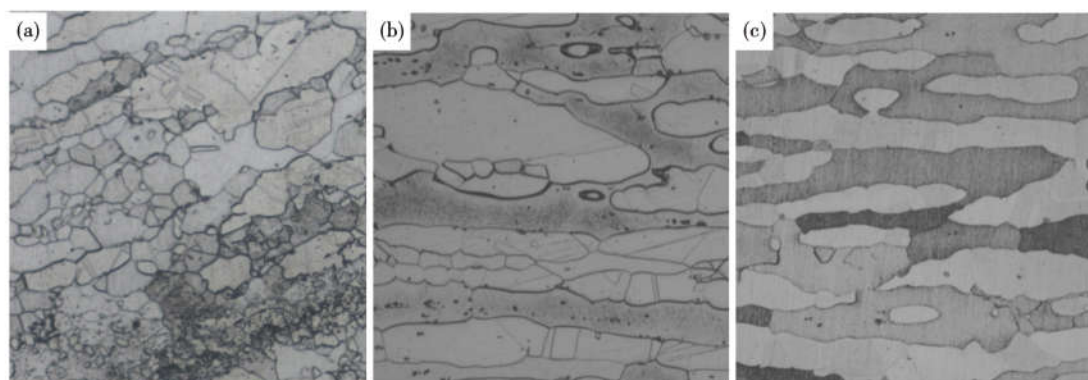


图1 试验 022Cr22Ni5Mo3N 钢 Φ 75 mm 材(a)锻材,(b)1 000 °C 4 h 固溶,水冷和(c)1 060 °C 4 h 固溶,水冷的组织形貌,×100
Fig. 1 Morphology of structure of tested 022Cr22Ni5Mo3N steel Φ 75 mm bar (a) forged bar, (b) 1 000 °C 4 h, solution, water-cooling and (c) 1 060 °C, 4 h, solution, water-cooling, ×100

表 3 022Cr22Ni5Mo3N 钢不同固溶热处理温度固溶后试样力学性能结果对照表

Table 3 Comparison of mechanical properties of 022Cr22Ni5Mo3N steel at different solution heat treatment temperatures

项目	$R_{p0.2}$ / MPa	R_m / MPa	A/%	Z/%	A_{KV} (-40 °C) /J
标准	-	≥700	≥25	-	≥50
1 000 °C 固溶(A)	583	729	21	51	28, 31, 29
1 060 °C 固溶(B)	567	731	38	71	79, 76, 81

表3是022Cr22Ni5Mo3N钢采用不同热处理温度固溶后试样力学性能,对比试样A、B力学性能可以看出,二者测得的力学性能数值存在一定的差异,尤其表现在材料的延伸率、断面收缩率、屈服强度、低温冲击韧性等方面。

对比金相组织图1(b,c)可以看出,试验坯料A

的微观组织结构中奥氏体相含量明显多于坯料B的奥氏体相含量。此外,观察到试验坯料A的微观组织结构中,晶粒内部和沿着铁素体和奥氏体两相晶界处存在着一些黑色的析出物,该析出物主要以连续条状沿晶界以及少量晶内分布,试验坯料B微观组织中晶粒内部和沿着铁素体和奥氏体两相晶界处则未观测到析出物。此外,试样A金相组织中奥氏体和铁素体分布比较杂乱,其中铁素体相界内多以小角度晶界为主,奥氏体相中包含部分孪晶界为主,即其中的铁素体相和奥氏体相均以低能特殊晶界占主导,而试样B金相组织中,奥氏体相与铁素体均以条状分布,对比二者金相组织,试样A组织均匀性明显不如试样B。针对试样A的金相组织中晶界析出物进一步做能谱分析(EDS),能谱分析结

果见表 4, 结果显示, 该析出物富含大量 Cr、Mo 元素, 成分为 $(\text{FeNi})_x(\text{CrMo})_y$, 即 σ 相, 该相主要沿着铁素体和奥氏体两相晶界处和部分铁素体晶内析出, σ 相的析出, 使晶界上杂质浓度进一步增加, 晶界本是材料微观的缺陷聚集区, 杂质浓度的增加使晶界承受能力被削弱。当材料承受应力载荷时, 应力造成材料内部位错滑移运动, 位错运动至 σ 相处塞积, 使其周围形成较大的应力集中^[6], 当晶界处应力集中时, 其晶界阻碍裂纹扩展的阻力进一步被削弱, 这些大量沿晶界析出的 σ 相降低了晶界的承受载荷能力, 提高了晶界处应力敏感度, 导致了材料的低温冲击韧性缺口敏感性增加, 使得测得的试料 A 冲击功较低。此外, 当试料 A 拉伸试验时, 试棒承受拉应力载荷时, 材料会有选择的在微观组织薄弱部位位错滑移, 尤其是 σ 相晶界处形成应力集中、形成微裂纹和裂纹扩展, 当外接载荷超过该材料所能承受的断裂强度时, 形成了拉伸试样破坏性断裂, 进而体现在宏观上的是该材料的延伸率、断面收缩率等数值呈现一定的变化规律。

表 4 022Cr22Ni5Mo3N 钢 1000 °C 4 h 固溶后能谱 EDS 分析结果/%

Table 4 EDS energy spectrum analysis results of 022Cr22Ni5Mo3N steel solution-treated at 1000 °C for 4 h/%

项目	Fe	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
奥氏体	67.13	0.31	1.59	20.31	7.28	1.87
铁素体	67.57	0.68	1.29	23.14	2.73	2.89
析出相	56.47	0.89	1.31	28.91	2.76	8.83

试验坯料 A 微观组织中, 小角度晶界较多, 其包含的孪晶和位错较多, 彼此阻碍相互移动, 错位攀移过程中不断的塞积, 且位错线上偏聚 Cr、Mo 等金属原子, 形成了晶格畸变、位错强化效果, 因此试验坯料 A 测得的屈服强度高于试验坯料 B, 随着固溶温度的提升, 各金属原子活跃度增加, 偏聚在位错线上的 Cr、Mo 等在温度效应下扩散速率加快, 不断的形成了位错的扩展, Cr、Mo 不断溶解于固溶体基体

中, σ 相不断的溶解于固溶体中, 位错密度降低, 孪晶和小角度晶界减少, 当材料受拉应力载荷时, 随着材料位错的扩展、 σ 相不断的减少, 材料的塑性和延展性进一步加强, 因此, 试样 B 的试验数据中延伸率和冲击韧性都远超试样 A。综合以上试验结果, 可以看出, 试样 B 的综合性能明显优于试样 A。

3 结论

022Cr22Ni5Mo3N 钢经过 1000 °C 固溶水冷后, 微观组织中奥氏体和铁素体两相晶界处及晶内析出 σ 有害脆性相, 该相在晶界呈半连续状分布, 影响该材料固溶热处理后材料的延伸率、低温韧性等多项力学性能, 该钢经过 1060 °C 固溶水冷后, 其微观组织均匀, 晶内及铁素体和奥氏体两相晶界处观察不到 σ 相的析出, 其测得该材料的延伸率、低温韧性等多项力学性能得到了不同程度的提升, 材料的拉伸断裂强度、延伸率、冲击功均达到了技术要求的规定, 提高了该材料的拉伸使用性能。

参考文献

- [1] 吴 玖, 姜世振, 韩俊媛, 等. 双相不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [2] Madsen A C, Mueller F O and Geisert R, et al. Duplex Stainless Steel Pipelines and Piping on the North Slope[J]. Materials Performance, 1987, 26(2): 49-55.
- [3] 高 娃, 罗建民, 杨建君. 双相不锈钢的研究进展及其应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2005(3): 61-64.
- [4] 陈彰兵, 宋德琦, 汤晓勇, 等. 双相不锈钢在克拉二气田中德应用[J]. 天然气与石油, 2006, 24(3): 1-6.
- [5] ASTM Standards. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications[S]. West Conshohocken, PA: ASTM international, 2007.
- [6] 张潇潇, 赵子文, 祁庆花, 等. 2205 双相不锈钢锻造失效分析. 锻压技术[J]. 2017(8): 6-11.

李 宁(1981-), 男, 高级工程师, 2006 年长春工业大学(本科)毕业, 金属材料研发。E-mail: lnkokok@126.com

收稿日期: 2021-02-10