

SUS410 半马氏体不锈钢厚壁无缝管内表面裂纹缺陷分析及 工艺改进

唐科^{1,2} 彭俊^{1,2} 付克刚^{1,2} 朱萍^{1,2} 向鑫^{1,2} 廖凯³

(1 大冶特殊钢有限公司; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001;

3 黄石市产品质量监督检验所, 黄石 435000)

摘要 SUS410 半马氏体不锈钢(0.08%~0.15% C, 12.5%~13.5% Cr)在生产热轧厚壁无缝钢管时极易产生内表缺陷。通过对Φ139.7 mm×38.1 mm管内表面裂纹缺陷进行定位分析,结果表明裂纹附近δ-铁素体大量析出造成钢的热塑性下降,在变形过程中,由于两相区变形不协调,最终在奥氏体和δ-铁素体相界出现裂纹。根据Schaeffler相图,对化学成分进行重新设计,将Cr当量/Ni当量比值由原来缺陷管的4.51降至≤3.0,管坯加热温度由1 200~1 300℃降至1 180~1 280℃,内表面裂纹缺陷得到有效解决,超声探伤合格率提高至97.9%。

关键词 SUS410 钢 半马氏体 δ-铁素体 Cr当量/Ni当量

Internal Surface Crack Defect Analysis and Process Improvement of SUS410 Semi-Martensite Stainless Steel Thick Wall Seamless Tube

Tang Ke^{1,2}, Peng Jun^{1,2}, Fu Kegang^{1,2}, Zhu Ping^{1,2}, Xiang Xin^{1,2} and Liao Kai³

(1 Daye Special Steel Co Ltd; 2 Hubei Province Key Laboratory for High Quality Special Steel, Huangshi 435001;

3 Huangshi Product Quality Supervision and Inspection Institute, Huangshi 435000)

Abstract SUS410 half martensitic stainless steel (0.08%~0.15% C, 12.5%~13.5% Cr) is easy to produce inner surface defects in production of hot rolled thick-walled seamless steel tubes. The localization analysis of the crack defects at inner surface of 139.7 mm×38.1 mm tube, the results shows that the thermoplastic decline of steel is caused by the large precipitation of δ-ferrite in steel near crack. During the deformation process, the deformation of the two-phase region is not coordinated, and finally cracks appear at the boundary between austenite and δ-ferrite. According to the Schaeffler phase diagram, the chemical composition of steel is redesigned, the Cr equivalent/Ni equivalent ratio decreases from 4.51 of original defect tube to ≤3.0, the heating temperature of tube bloom decreases from 1 200~1 300℃ to 1 180~1 280℃, the internal surface defects are effectively solved, and the qualified rate of ultrasonic flaw detection increases to 97.9%.

Material Index SUS410 Steel, Semi-Martensitic, δ-Ferrite, Cr Equivalent/Ni Equivalent

SUS410 钢类似于我国1Cr13不锈钢,此材料属于半马氏体型不锈钢,即除马氏体外,组织结构中还有铁素体组织。该钢有较高的韧性和冷变形性,热处理后主要制造要求韧性较高、承受冲击载荷的零件,如汽轮机叶片、水压机阀、紧固件等^[1]。

SUS410 不锈钢由于在高温加热过程中容易析出δ-铁素体,δ-铁素体的存在会影响到钢的热塑性,降低钢的强度并恶化钢的横向韧性和耐蚀性^[2],石油行业通常要求钢中铁素体的含量控制在5%以下。SUS410 不锈钢无缝钢管作为井下工具重要的原材料之一,必须具有良好的内外质量才能在井下恶劣的工况环境中正常安全运行。

1 钢管内表面裂纹缺陷的成因分析

SUS410 钢厚壁无缝钢管的化学成分标准要求如表1所示,规格为Φ139.7 mm×38.1 mm,实际Cr当量为13.99, Ni当量为3.10, Cr当量/Ni当量为

4.51,工艺流程为:Φ190 mm管坯→环形炉加热至1 300℃→二辊斜轧穿孔(毛管规格为Φ190 mm×44 mm)→ASSEL轧管(荒管规格为Φ159 mm×40 mm)→12机架减径(成品规格为Φ139.7 mm×38.1 mm)→超声探伤,在按照ASTM E213标准L2(5%t)级别进行超声探伤时发现内表存在超标缺陷,裂纹深度4.28~7.03 mm,最终整批钢管全部报废,缺陷形貌如图1(a)所示。

切取缺陷试块研磨横截面,采用金相显微镜观察,缝内均未见大型夹杂,缝侧未见高温氧化,如图1(b)所示。经4%硝酸酒精溶液腐蚀后观察,未见

表1 SUS410 钢的化学成分标准要求/%

Table 1 Chemical composition of SUS410 steel standard-required /%

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	N
0.08~0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.005	≤0.020	12.50~13.50	≤0.50	≤0.10

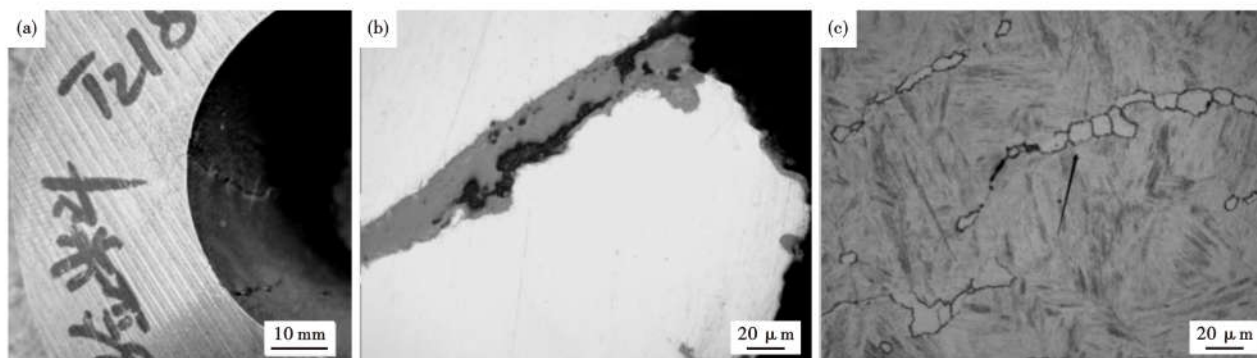


图1 SUS410 钢 $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 38.1 \text{ mm}$ 管内表面裂纹宏观形貌(a), 微观形貌(b) 和裂纹附近 δ -铁素体(含量 17%) (c)
Fig.1 Morphology of macro (a) and micro (b) internal surface crack, and δ -ferrite (δ -content 17%) (c) near crack, $\Phi 139.7 \text{ mm} \times 38.1 \text{ mm}$ tube of SUS410 steel

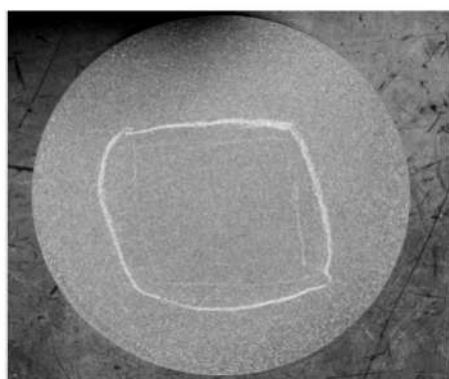


图2 SUS410 钢 $\Phi 190 \text{ mm}$ 管坯低倍组织
Fig.2 Macrostructure of $\Phi 190 \text{ mm}$ tube bloom of SUS410 steel

脱碳, 裂纹附近有 δ -铁素体析出, δ -铁素体含量达到了 17%, 如图 1(c) 所示。

管坯直径为 $\Phi 190 \text{ mm}$, 采用 $\Phi 3.2 \text{ mm}$ 平底孔探伤未发现超标及未超标缺陷, 探伤合格; 采用不锈钢酸液进行酸洗, 酸洗时间为 20 min, 观察横截面未发现裂纹、缩孔等缺陷, 锭型偏析 0.5 级, 如图 2 所示; 采用金相显微镜观察管坯中心 δ -铁素体含量为 0.8%。

结合缺陷定位分析发现大量的 δ -铁素体, 分析认为是管坯在环形炉加热时温度过高, 铁素体含量急剧增加^[3], δ -铁素体含量由 0.8% 析出后达到了 17%。由于 δ -铁素体大量析出造成钢的热塑性下降, 同时降低了钢的强度并恶化钢的横向韧性和耐腐蚀性, 最终在穿孔过程中由于两相区变形不协调在奥氏体和 δ -铁素体相界出现了裂纹。

2 δ -铁素体形成因素分析

直接影响 δ -铁素体形成的因素归结起来主要有两种: (1) 钢中化学元素含量, (2) 加热温度的影响^[2]。

2.1 钢中化学元素对 δ -铁素体的作用

2.1.1 Cr 的影响

Cr 是铁素体的形成元素, 足够量的 Cr 可使钢变成单一的铁素体不锈钢, 热处理不会产生马氏体转变。马氏体铬不锈钢中 Cr 与 C 的交互作用使钢在高温时具有稳定的奥氏体相区或奥氏体 + 铁素体相区。为了使钢在淬火时产生马氏体转变, Cr 与 C 之间存在着一个相互依存的关系。C 使奥氏体相区扩大, 而 C 的溶解极限随 Cr 量的提高而减小^[2]。

2.1.2 C 的作用

马氏体不锈钢中, C 是除 Cr 外的重要元素, 是奥氏体形成元素。对于 Fe-Cr 合金而言, $\geq 12\%$ Cr 含量已使奥氏体相区封闭, 使钢成为单一的铁素体组织, 而不能用热处理产生马氏体转变。为了产生马氏体转变, C 含量一般在 0.1% ~ 1.0% 变动。对低碳 SUS410 钢而言, Cr 含量就不能太高, 也就是说这种钢的 C、Cr 量相对稳定^[2]。

2.1.3 其他元素的作用

在 SUS410 不锈钢中, Mn、Ni、Si 为常存元素, Ni、Mn 都是奥氏体形成元素, Mn 的影响为 Ni 的一半, Ni 的重要作用之一是降低钢中的铁素体含量, 在所有合金元素中效果最好, 在特定的 C 和 Cr 含量的情况下, 这一作用可使钢获得满意的相变效果。Si 为铁素体形成元素, 促使铁素体形成能力强于 Cr^[2]。有研究表明合金元素对 δ -铁素体形成量的作用见表 2^[4]。

表2 合金元素对钢中 δ -铁素体形成量的影响
Table 2 Influence of alloying elements on amount of δ -ferrite formation in steel

合金元素	δ 变化量 / %
0.1% C	-22
0.01% N	-29
1% Ni	-20
1% Mn	-6
1% Mo	+5
1% Cr	+14

2.2 加热温度对 δ -铁素体的影响

SUS410 钢属于半马氏体型钢,钢的组织在马氏体与铁素体的交界附近,主体组织应为马氏体同时含有少量铁素体。除了成分的偏差会导致铁素体析出外,加工车间生产过程中加热温度过高,也会导致高温 δ -铁素体的大量析出,析出的铁素体对机械性能有较大的影响,可导致横向塑性韧性显著下降^[2]。因此,对加热温度的控制也是非常重要的。

3 工艺改进及验证

3.1 理论依据

SUS410 钢作为半马氏体型铬不锈钢,按 Cr 当量和 Ni 当量,用 Schaeffler 相图^[5] 确定钢的最终组织。

$$\text{Cr 当量} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1.5 \times \% \text{Si} + 0.5 \times \text{Nb}\% \text{ [5]}$$

$$\text{Ni 当量} = \% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 \times \% \text{Mn} \text{ [5]}$$

对以往生产的成分进行统计,根据 Schaeffle 相

图,交叉点均会在 M + F 区域,间接的证明了 SUS410 钢属于半马氏体不锈钢,钢的组织在马氏体和铁素体的交界附近。

对 Cr 当量/Ni 当量与超声探伤合格率进行了统计,当 Cr 当量与 Ni 当量的比值越高,钢管探伤合格率越低,当 Cr 当量/Ni 当量超过 3.0 时,钢管的探伤合格率不足 50%。

3.2 工艺改进

针对 δ -铁素体形成因素主要进行了两方面改进:(1)对炼钢过程的成分进行控制;(2)对管坯加热温度进行优化。因此在炼钢过程的成分控制方面,有意提高 C、N、Ni、Mn 对铁素体的形成有抑制作用元素的含量,同时降低 Mo、Cr 促进铁素体形成元素的含量,并引入了 Cr 当量/Ni 当量比值概念,改进后的成分设计如表 3 所示。

对于管坯加热温度,在保证顺利轧制的情况下,降低管坯加热温度有利于控制 δ -铁素体的析出,但

表 3 SUS410 钢原成分和改进成分内控范围 / %
Table 3 Internal control range of SUS410 steel original and improved component / %

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	N	Cr 当量/Ni 当量
原成分	0.08 ~ 0.14	0.10 ~ 0.50	0.10 ~ 0.70	≤0.005	≤0.015	12.60 ~ 13.50	0.10 ~ 0.40	≤0.05	无要求
改进成分	0.09 ~ 0.15	0.10 ~ 0.50	0.40 ~ 1.00	≤0.005	≤0.015	12.50 ~ 13.30	0.20 ~ 0.50	0.02 ~ 0.08	≤3.0
标准要求	0.08 ~ 0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.005	≤0.020	12.50 ~ 13.50	≤0.50	≤0.10	-

如果加热温度过低,随着变形抗力的增大轧制难度也会随之增加,同样会对钢管内表面的质量产生不良影响。综合考虑后将管坯加热温度由原来的 1 200 ~ 1 300 °C 优化为 1 180 ~ 1 280 °C。

3.3 工艺验证

对炼钢成分优化后,冶炼的 SUS410 管坯 Cr 当量/Ni 当量控制在 2.5 ~ 3.0,轧制过程管坯加热温度控制在 1 180 ~ 1 280 °C,轧制过程顺畅,成管后的 δ -铁素体含量经检测不超过 2%。通过以上措施的实施,SUS410 无缝钢管的探伤合格率得到了大幅度提升,探伤 199 支,合格 195 支,超声探伤合格率为 97.9%。

4 结论

根据 SUS410 钢管典型内表面裂纹缺陷分析,查找出了内表面裂纹缺陷产生的原因为 δ -铁素体大量析出在穿孔过程中造成钢的热塑性下降,最终在穿孔过程中由于两相区变形不协调在奥氏体和 δ -铁素体相界出现了裂纹。通过对化学成分优化调整,要求 Cr 当量/Ni 当量控制在 ≤3.0,同时对管坯

加热温度进行控制,将管坯加热温度由 1 200 ~ 1 300 °C 优化为 1 180 ~ 1 280 °C。通过以上措施的实施,无缝钢管超声探伤合格率提高至 97.9%,运行以来质量稳定。

参考文献

- [1] 李海生. 化学成分对 1Cr13 钢种铁素体含量的影响[J]. 特钢技术, 2006, 12(4): 25-27.
- [2] 齐健. 1Cr13 钢 δ -铁素体含量的控制[J]. 特钢技术, 2012, 18(1): 41-43.
- [3] 王宏霞. SUN410S 不锈钢边裂原因分析及工艺研究[J]. 中国重型装备, 2010, 8(1): 23-25.
- [4] 上海机械制造工艺研究所. 全相分析技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.
- [5] 韩进山, 张冰, 李志群, 等. SUP13Cr 无缝钢管的 δ 铁素体[J]. 四川冶金, 2016, 38(3): 41-44.

唐科(1986-),男,工程师,2009年重庆科技学院(本科)毕业,无缝钢管产品开发。E-mail: tangke@citicsteel.com

收稿日期: 2021-03-02