

## TP321 不锈钢无缝钢管晶间腐蚀问题研究

康喜唐<sup>1</sup>, 王伯文<sup>1</sup>, 聂飞<sup>1</sup>, 梁祥祥<sup>1</sup>, 常旭飞<sup>1</sup>, 方旭东<sup>2</sup>, 张晓文<sup>2</sup>

(1. 山西太钢不锈钢钢管有限公司, 山西 太原 030008; 2. 山西太钢不锈钢股份有限公司, 山西 太原 030003)

**摘要:** 对影响 TP321 不锈钢无缝钢管耐晶间腐蚀性能的因素进行分析, 从化学成分、金相组织、工艺流程、热处理制度等方面研究可能导致耐蚀性降低的原因, 并采取措施消除不利影响。通过控制化学成分、调整热处理制度以及优化脱脂工艺等一系列改进措施, 使 TP321 不锈钢无缝钢管晶间腐蚀试验一次合格率稳定在 95% 以上水平。

**关键词:** 无缝钢管; TP321 不锈钢; 晶间腐蚀; 化学成分; 热处理; 脱脂

**中图分类号:** TG335.7; TG113.1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2014)01-0018-07

## Research on Intergranular Corrosion of TP321 Seamless Stainless Steel Pipe

KANG Xitang<sup>1</sup>, WANG Bowen<sup>1</sup>, NIE Fei<sup>1</sup>, LIANG Xiangxiang<sup>1</sup>, CHANG Xufei<sup>1</sup>, FANG Xudong<sup>2</sup>, ZHANG Xiaowen<sup>2</sup>

(1. Shanxi Taigang Stainless Steel Tubes & Pipes Co., Ltd., Taiyuan 030008, China;

2. Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, China)

**Abstract:** Analyzed here in the article are the factors affecting intergranular corrosion resistance of the TP321 seamless stainless steel pipe, involving such aspects as chemical composition, metallographic structure, process flow, heat treatment schedule, etc. Accordingly, relevant actions are taken to eliminate the negative effects. Thanks to implementation of improvement actions like chemical composition control, adjusting heat treatment schedule, and optimizing the degreasing process, etc., the primary qualification rate of intergranular corrosion test to the TP321 seamless steel pipes has been kept at the level above 95%.

**Key words:** seamless steel pipe; TP321 stainless steel; intergranular corrosion; chemical composition; heat treatment; degreasing

不锈钢的晶间腐蚀是一种腐蚀破坏现象, 表现为晶粒间丧失结合力, 以致材料的强度变差。对于晶间腐蚀的产生原因有许多不同的理论, 如贫铬理论、晶界吸附理论、沉淀相亚稳论、亚稳相溶解理论、应力论、沉淀相形貌论和腐蚀电化学理论等。

贫铬理论是最早提出且又被广泛接受的理论<sup>[1]</sup>。对 18-8 型奥氏体不锈钢, 晶界处的晶格是不完整的, 有利于金属原子的扩散; 在晶界及其邻近区域的 Cr 会由于碳化物  $Cr_{23}C_6$  在晶界的沉淀而发生贫铬现象, 造成晶界周围出现贫铬区, 当 Cr 质量分数降低至 12% 左右时, 在某些腐蚀介质中沿着材

料晶界产生腐蚀, 使晶粒间丧失结合力, 即产生晶间腐蚀现象<sup>[2]</sup>。

TP321 不锈钢(UNS S32168, 在 GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分》中为 06Cr-18Ni11Ti)是在 TP304 不锈钢基础上加入 Ti 元素, 以增强其抗晶间腐蚀能力和耐高温性能, 其原理是形成稳定的 MC 型碳化物 TiC, 以碳化物形成自由焓变化来衡量, TiC 远比碳化铬稳定, 可减少碳化铬的形成。

在欧美等发达地区市场, TP321 不锈钢无缝钢管已逐渐被 TP304L、TP316L 等低碳、超低碳不锈钢无缝钢管替代; 但在我国, TP321 不锈钢无缝钢管的需求量仍然很大, 根据国际不锈钢论坛(ISSF)最新公布的数据显示, 2012 年我国 TP321 不锈钢

康喜唐(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 总工程师, 从事不锈钢钢管生产、技术与质量管理工作。

无缝钢管的表观消费量在 10 万 t 左右。由于生产工艺与检验条件的限制, 目前国内生产的 TP321 不锈钢无缝钢管耐晶间腐蚀性能合格率不高, 一次检验合格率为 80% 左右。山西太钢不锈钢钢管有限公司(简称太钢不锈)自 2009 年投产以来, TP321 不锈钢无缝钢管产量约占总产量的 35%, 晶间腐蚀检验一次合格率在 70% 左右, 远低于其他不锈钢产品的水平(≥95%)。为提高成材率, 更好地满足用户需要, 针对 TP321 不锈钢无缝钢管耐晶间腐蚀性能进行了技术攻关, 目标为将一次检验合格率提高至 95% 以上, 达到日本住友金属公司(SUMITOMO)等国外先进制造商的水平。

## 1 TP321 不锈钢无缝钢管晶间腐蚀原理分析

### 1.1 试验方法

根据 ASTM 标准<sup>[3]</sup>, 检验金属材料晶间腐蚀性能有 6 种方法, 其中应用最广泛的为 65% HNO<sub>3</sub> 法和 CuSO<sub>4</sub>-16% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 法。65% HNO<sub>3</sub> 法适用于评价氧化性介质中金属晶间腐蚀倾向, 但强氧化性介质中 TiC 会被溶解而导致产生另一种腐蚀形式——刀线腐蚀, 不适用于 TP321 钢种的检验; CuSO<sub>4</sub>-16% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 法适于检验贫铬引起的不锈钢晶间腐蚀, 检验结果具有更好的代表性。本文讨论的所有检验结果均基于 CuSO<sub>4</sub>-16% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 法。

试验方法为: 试样经敏化处理(675 °C 保温 2 h, 空冷), 在加铜屑的 CuSO<sub>4</sub>-16% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 中煮沸 16 h, 弯曲 180°, 在低倍显微镜下观察有无龟裂或裂纹。

### 1.2 化学成分分析

#### 1.2.1 合金元素的影响

由 TiC 的化学式可知: 在满足 Ti 和 C 含量比值为 3.99 的条件下, 钢中的 Ti 能使 C 全部被结合固定。但事实上, 由于化学平衡及热处理条件等因素影响, 纯理论的计算并不能达到全部固定 C 的要求。根据文献[4]的研究结果, 避免晶间腐蚀所需的 Ti 含量应为:

$$w(\text{Ti}) > 4w(\text{C}) + 3.42w(\text{N}) - 0.001 \quad (1)$$

根据西班牙 Complutence 大学人员的研究结

果, 对 TP321 钢种而言, C 含量降低到 0.03% 以下会降低不锈钢的晶间腐蚀敏感性, 其效果优于提高 Ti 含量的影响。

Cr 与 C 形成 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 时, 依据反应式 23Cr+6C=Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, 应满足下述平衡关系:

$$K = 1 / [(r_{\text{Cr}} X_{\text{Cr}})^{23} (r_{\text{C}} X_{\text{C}})^6] \quad (2)$$

式中 K —— 平衡常数;

r<sub>Cr</sub>、r<sub>C</sub> —— Cr 和 C 的活度系数, 碳化物的活度系数为 1;

X<sub>Cr</sub>、X<sub>C</sub> —— 平衡态下 Cr 和 C 的质量分数。

平衡常数 K 实际就是 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 的生成自由焓, 提高 Cr 含量可使 r<sub>C</sub> 和 r<sub>Cr</sub> 减小, 因此由式(2)可知, 提高钢中的 Cr 含量, 就能使晶间贫铬区的平衡 Cr 含量提高, 有利于减弱不锈钢的晶间腐蚀倾向。

Ni 可提高 C 的活度系数 r<sub>C</sub>, 因此由式(2)可知, 在其他因子不变的情况下, X<sub>Cr</sub> 将随 Ni 含量的增加而变小; 另一方面, 增加 Ni 含量会减少 C 在奥氏体中的溶解度, 所以, 增加 Ni 含量会使 C 在晶界形成 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 沉淀并导致晶间严重贫铬, 不利于不锈钢的耐晶间腐蚀性能。

为提高低碳不锈钢[w(C) ≤ 0.03%]的机械性能, 在冶炼时加入少量的 N, 即可使屈服强度提高到 0.08%w(C) 的水平。N 与 C 类似, 可形成 MC 型化合物 TiN, 削弱 Ti 固碳的作用, 对耐晶间腐蚀性能是不利的。

由于晶界吸附现象<sup>[5]</sup>, 杂质元素 P 和 S 易在晶界偏析, 增加不锈钢的晶间腐蚀倾向。

#### 1.2.2 敏化时间

太钢不锈在冶炼 TP321 钢种时采用铁水预处理+转炉+VOD(真空吹氧脱碳)的工艺, TP321 不锈钢无缝钢管成品 C 含量可控制在超低的水平; Ni 含量较低以提高不产生晶间腐蚀所能容许的 C 含量; P、S 含量控制在较低的范围(表 1)。根据温度-时间-敏化曲线<sup>[6]</sup>和晶间腐蚀经验方程<sup>[7]</sup>, 开始发生晶间腐蚀(≥0.025 cm/a)时的敏化时间 t<sub>c</sub> 为:

$$t_c = 63.5w(\text{Cr}) - 50.5w(\text{Ni}) - 6820w(\text{C}) - 1037w(\text{N}) - 178 \quad (3)$$

表 1 TP321 不锈钢无缝钢管化学成分要求及太钢不锈 TP321 不锈钢钢管的化学成分(质量分数) %

项目	C	Cr	Ni	Cu	Ti	N	P	S
ASTM A 312—2009(TP321)	≤0.08	17.0~19.0	9.0~12.0	-	5%w(C)-0.70	≤0.10	≤0.045	≤0.030
GB/T 14976—2012(06Cr18Ni11Ti)	≤0.08	17.0~19.0	9.0~12.0	-	5%w(C)-0.70	-	≤0.035	≤0.030
太钢不锈 TP321	0.02~0.03	17.1~17.5	9.0~9.5	0.01~0.15	0.18~0.30	0.05~0.06	0.015~0.030	0.001~0.002

根据表 1 和式(3)得出的太钢不锈 TP321 不锈 钢敏化时间为 161.3~290.5 s; 根据 ASTM A 262— 02a E 法和 GB/T 4334.5—2000《不锈钢硫酸-硫酸 铜腐蚀试验方法》, TP321 不锈钢无缝钢管应在敏 化处理(675 ℃)1~2 h 后进行晶间腐蚀试验。故理 论上太钢不锈 TP321 不锈钢的化学成分不能完全 保证通过晶间腐蚀试验。

### 1.3 组织分析

对晶间腐蚀试验结果不同的 TP321 不锈钢无 缝钢管试样进行表面显微硬度分析, 不合格的试样 表面硬度明显较高(图 1)。文献[8]认为, 不锈钢 在氧化气氛中退火时, 会使表面层贫铬, 降低耐蚀 性。但对以上试样表面进行 X 射线能谱分析 (EDX), 未发现 Cr 元素含量有明显变化。观察不合 格试样金相组织, 可发现晶粒粗大、不均匀且在整 个截面的晶界处有密集的碳化物析出(图 2)。

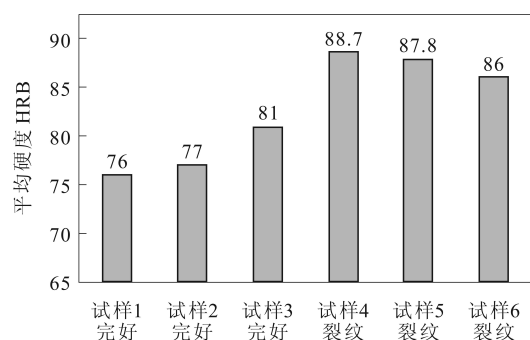


图 1 TP321 不锈钢无缝钢管试样表面显微硬度分析结果

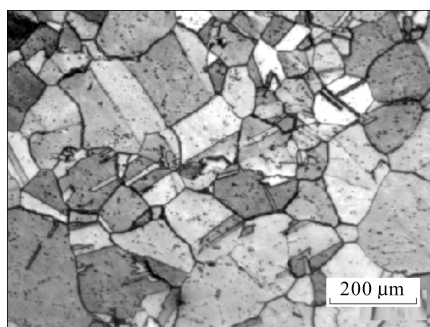


图 2 TP321 不锈钢无缝钢管试样敏化腐蚀后的金相组织

热处理温度过高将会引起晶粒粗化, 使晶界的 表面积之和减少, 晶界上的  $Cr_{23}C_6$  析出密度增高, 降低钢的耐晶间腐蚀性。

综上所述可以认为: 热处理过程中温度较高、冷却 不均匀、表面增碳, 是影响 TP321 不锈钢无缝钢

管耐晶间腐蚀性能的因素。

### 1.4 工艺流程分析

目前国内 TP321 不锈钢无缝钢管的生产大都 采用穿孔→冷轧(拔)→热处理→矫直→酸洗→检验→ 包装的生产方式。钢管在冷变形后, 采用固溶热处 理消除变形应力和改善组织, 即把钢管加热至奥氏 体碳饱和和曲线以上温度保温, 使碳化物充分溶解到 固溶体中再快速冷却, 将高温组织在室温下固定下 来, 获得碳的过饱和固溶体。对生产流程进行分析, 得到可能影响钢管耐晶间腐蚀性能的因素如下。

(1) 还原性热处理气氛导致表面增碳。钢管采 用辊底式热处理炉进行退火处理, 根据热处理炉所 用燃气成分计算炉内气氛, 辊底式热处理炉所用燃 气成分见表 2。

表 2 辊底式热处理炉所用燃气成分(体积分数) %

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
95.816 0	0.671 7	0.105 0	0.017 0	0.019 2	0.003 3
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
0.002 7	0.008 5	0.006 3	1.885 5	1.464 5	0.000 3

以空气中 O<sub>2</sub> 含量 21%, N<sub>2</sub> 含量 78% 计算, 理 论上 1 m<sup>3</sup> 燃气完全燃烧消耗的空气体积 L<sub>0</sub> 为:

$$L_0 = (2V_{CH_4} + 3.5V_{C_2H_6} + 5V_{C_3H_8} + 6.5V_{C_4H_{10}} + 6V_{C_4H_8} + 8V_{C_5H_{12}} + 7.5V_{C_5H_{10}} + 9.5V_{C_6H_{14}} + 11V_{C_7H_{16}} + 1.5V_{H_2S}) / 21\% = 9.279 (m^3)$$

在实验中设置空燃比为 12:1, 即 1 m<sup>3</sup> 燃气混 合空气量 L<sub>n</sub> = 12 m<sup>3</sup>, 则空气消耗系数  $\alpha = L_n / L_0 = 12 / 9.279 = 1.293 24$ 。

1 m<sup>3</sup> 燃气完全燃烧生成废气体积分别为:

$$V_{CO_2}' = V_{CO_2} + V_{CH_4} + 2V_{C_2H_6} + 3V_{C_3H_8} + 4V_{C_4H_{10}} + 4V_{C_4H_8} + 5V_{C_5H_{12}} + 5V_{C_5H_{10}} + 6V_{C_6H_{14}} + 7V_{C_7H_{16}} = 0.996 3 (m^3)$$

$$V_{SO_2}' = 0.01 \times V_{H_2S} = 3 \times 10^{-6} (m^3)$$

$$V_{H_2O}' = 2V_{CH_4} + 3V_{C_2H_6} + 4V_{C_3H_8} + 5V_{C_4H_{10}} + 4V_{C_4H_8} + 6V_{C_5H_{12}} + 5V_{C_5H_{10}} + 7V_{C_6H_{14}} + 8V_{C_7H_{16}} + V_{H_2S} = 1.943 7 (m^3)$$

$$V_{N_2}' = 0.78 L_n + V_{N_2} = 9.494 6 (m^3)$$

$$V_{O_2}' = 0.21(\alpha - 1)L_0 = 0.571 4 (m^3)$$

废气中 O<sub>2</sub> 体积百分比 V(O<sub>2</sub>) 为:

$$V(O_2) = V_{O_2}' / [V_{CO_2}' + V_{SO_2}' + V_{H_2O}' + V_{N_2}' + V_{O_2}'] \times 100\% = 4.39\%$$

采用氧分析仪测得实际废气中 O<sub>2</sub> 体积百分比为 5%，与计算值基本吻合，即炉内为氧化性气氛。

之前热处理采用还原性气氛，空燃比 9.5:1.0。还原性气氛可减少表面氧化铁皮生成，提高表面质量；但在还原性气氛下天然气分解生成的不饱和碳氢化合物易造成钢管表面增碳效果<sup>[9]</sup>。

采用较高的空燃比可排除还原性气氛造成表面渗碳的可能性，但氧含量高会造成钢管表面局部过氧化现象，表现为氧化铁皮酸洗后出现“花斑”，影响产品耐蚀性和外观形象(图 3)。



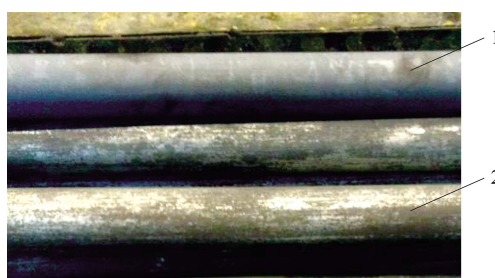
图 3 氧化性气氛导致的钢管表面“花斑”

(2) 残留轧制油燃烧导致增碳。不锈钢无缝钢管冷轧过程中采用轧制油(主要成分为氯化石蜡, C<sub>24</sub>H<sub>29</sub>Cl<sub>21</sub>)进行润滑和冷却, 在热处理前的脱脂工序将管壁残留的轧制油除去。传统的脱脂方法是将钢管用碱液或废酸浸泡然后热水冲洗。此方法脱脂后, 在钢管表面仍残留薄薄的一层轧制油, 若以此状态进入热处理炉, 轧制油将在高温下燃烧, 在钢管表面形成碳氧化合物, 产生增碳环境, 如图 4~5 所示。



图 4 冷轧后不锈钢钢管表面残余轧制油形态

(3) 热处理制度影响。热处理所用辊底式连续退火炉共分 7 段, 有 42 组脉冲式烧嘴, 加热时间可通过辊速调整。由于不锈钢较低的热传导系数, 采用分段加热方式, 其中前 3 段为预热段, 中间 2



1 — 正常热处理后 2 — 残余轧制油热处理后

图 5 热处理后不锈钢钢管表面状态对比

段为加热段, 后 2 段为保温段。以 Φ60 mm×4 mm TP321 不锈钢无缝钢管为例, 其固溶热处理制度如图 6 所示。

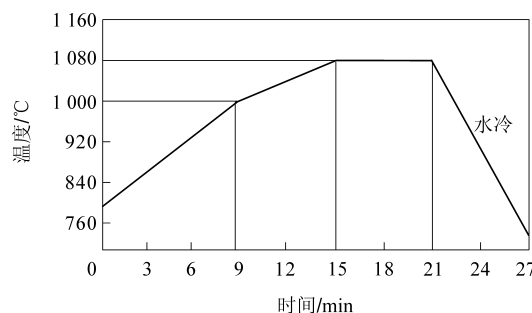


图 6 Φ60 mm×4 mm TP321 不锈钢无缝钢管固溶处理制度

由 18Cr-8Ni 系不锈钢组织相图<sup>[2]</sup>可知: 随着固溶温度的提高, 碳化物的溶解将更加充分, 增大了冷却后固溶体的过饱和程度, 为敏化处理时 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 的选择性脱溶提供了有利的热力学条件, 使晶间腐蚀的倾向增加。

由图 7 及 TiC 在 TP321 不锈钢 γ 相的溶解度曲线可知<sup>[2,10]</sup>: TiC 从 825 °C 开始形成, 直至 900 °C 左右时的形成速度最高, 从 900~1 200 °C 加热, TiC 数量不断减少直至消失, 并且当固溶热处理温度超过 1 100 °C 时, TiC 会大量溶解。为了在固溶组织中保留尽可能多的 TiC, 同时减少 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 生成, 合适的热处理温度应为 1 050~1 100 °C。

## 2 解决方案

### 2.1 化学成分设计

针对影响晶间腐蚀性能的关键元素 C、Cr、Ni、Ti、P、S 进行成分设计, 确定 TP321 不锈钢的化学成分控制如下: ①w(C)由 ≤0.08% 调整至 ≤0.03%,

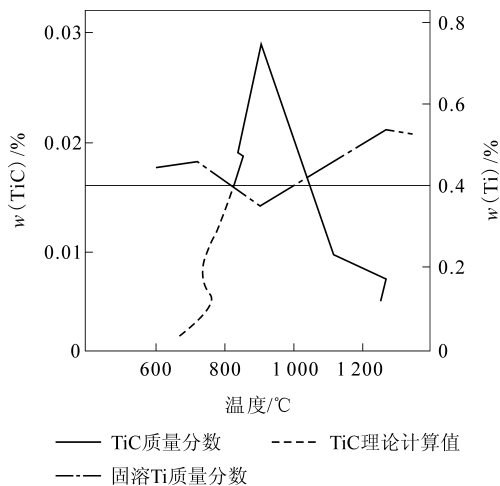


图7 TP321 不锈钢热处理温度对 TiC 形成的影响

消除高碳影响钢管耐蚀性的可能性；② $w(\text{Ni})$ 优化控制在 9.0%~9.2%，增加 C 在奥氏体中的溶解度；③ $w(\text{Cr})$ 相应地控制在 17.1%~17.5%，保证组织完全奥氏体化；④根据式(1)，将  $w(\text{Ti})$ 控制在 0.20%~0.30%；⑤保证不锈钢中的 P、S 含量远低于产品标准上限(表 1)，使其对钢管的耐蚀性影响被控制在极小的范围内。

## 2.2 工艺参数调整

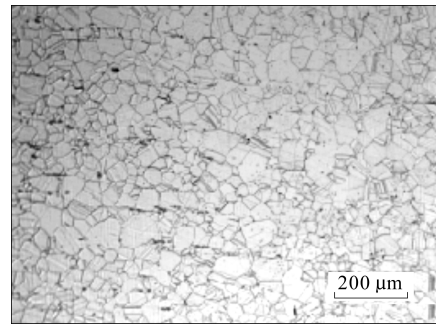
### 2.2.1 调整热处理工艺

通过多批次对比实验，热处理炉废气中残留 O 含量为 0~0.3%时，钢管表面氧化层均匀，计算调整空燃比为 10.1:1.0，保证炉内为微氧化性气氛。与调整前相比，增加了炉内气氛中的 O 含量，使燃气充分燃烧，降低了渗碳倾向，同时降低了燃气消耗，平均每道次热处理成本降低约 150 元。

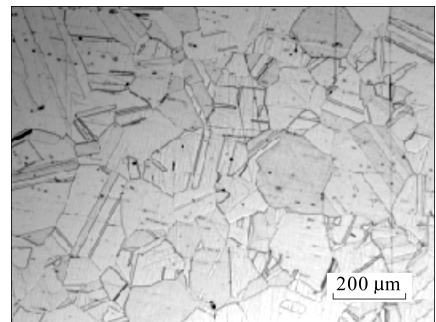
为达到溶解沉淀碳化物的目的，固溶热处理的温度应随 C 含量的增加而提高；由于太钢不锈 TP321 不锈钢无缝钢管化学成分中的 C 含量较低(0.02%~0.03%)，因此可采用较低的固溶温度，结合上述分析，调整固溶处理温度至 1 050 °C。分析试验结果表明：较低的固溶温度抑制了晶粒长大趋势(图 8)，对耐蚀性有好的影响。改进前后  $\Phi 60$  mm $\times$ 4 mm TP321 不锈钢无缝钢管的固溶处理制度如图 9 所示。

### 2.2.2 改进水冷装置

快速均匀的冷却可以有效抑制  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  析出。热处理炉原有的喷淋水冷装置采用 6 排每排 4 个喷嘴，改进后采用 6 排每排 8 个喷嘴，同时将喷淋水压由 5 MPa 增大至 10 MPa，提高冷却效率，TP321



(a) 1 050 °C, 30 min



(b) 1 150 °C, 30 min

图8 不同温度固溶处理后 TP321 不锈钢无缝钢管试样金相组织

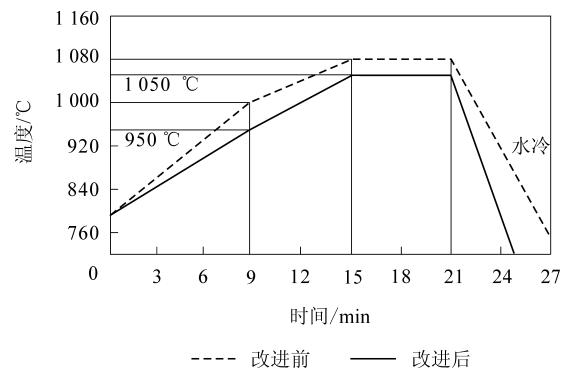


图9 改进前后  $\Phi 60$  mm $\times$ 4 mm TP321 不锈钢无缝钢管固溶处理制度

不锈钢无缝钢管固溶处理后的弯曲度显著改善(图 10)，说明冷却均匀性有了明显提高。实测钢管由固溶温度( $>1\ 000$  °C)冷却至 $<500$  °C的时间由 25 s 降低至 10 s。

### 2.2.3 稳定化处理

如 TP321 不锈钢无缝钢管的工况温度在 450~900 °C，且存在强烈腐蚀介质，极易发生晶间腐蚀的环境下，可采用稳定化处理，也就是将温度提高



(a) 冷却装置改进前



(b) 冷却装置改进后

图 10 TP321 不锈钢无缝钢管固溶处理后的形态对比

到既高于  $Cr_{23}C_6$  的溶解温度，又是 TiC 强烈析出的温度(850~930 °C)，将碳原子转移到 TiC 中，形成稳定的 TiC，将  $\gamma$  相中的 C 含量降低至 0.01% 以下，可有效降低 TP321 不锈钢的晶间腐蚀趋势<sup>[11-12]</sup>。稳定化处理温度对 TP321 不锈钢晶间腐蚀速率的影响如图 11 所示。

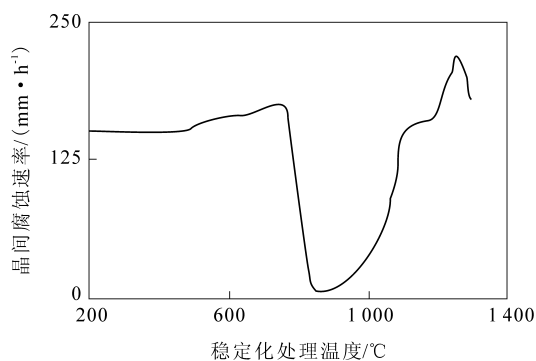


图 11 稳定化处理温度对 TP321 不锈钢晶间腐蚀速率的影响

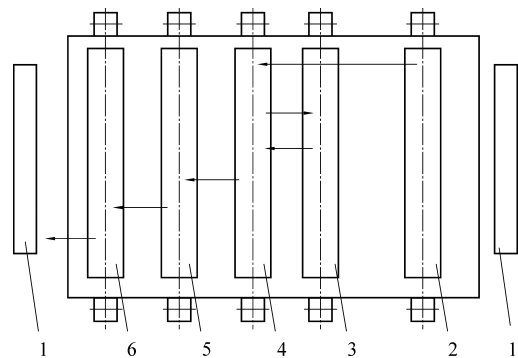
工艺制度为：固溶处理后加热至 900 °C±10 °C，保温 2 h，随炉冷至 ≤500 °C 出炉空冷。冷却速度

缓慢，以利于奥氏体组织弥散析出 TiC。

### 2.2.4 改进脱脂工艺

传统的冷轧后脱脂工艺为：碱性脱脂剂浸泡→2~3 次水清洗，碱性脱脂剂主要成分为 NaOH、NaPO<sub>3</sub> 等；国内较先进的酸碱复合脱脂工艺为：碱液浸泡→酸液清洗→2~3 次水清洗。

经过对比试验，太钢不锈钢采用改进后的酸碱复合脱脂工艺，具体为：碱液超声波脱脂→一级水清洗→酸液清洗→一级水清洗→二级超声波水清洗→三级水清洗。脱脂设备布置如图 12 所示。碱液槽和酸液槽采用蒸汽加热至 50 °C，以提高脱脂效率。实际效果表明：改进后的脱脂方法可有效去除钢管表面残留轧制油，固溶处理后钢管表面均匀一致，消除了增碳的因素。



1 — 料架 2 — 碱液超声波脱脂槽 3 — 酸洗槽  
4 — 一级水清洗槽 5 — 二级超声波清洗槽 6 — 三级水清洗槽

图 12 脱脂设备布置示意

### 3 改进效果

通过化学成分控制、热处理制度调整、脱脂工艺优化等措施，TP321 不锈钢无缝钢管晶间腐蚀一次检验合格率稳定在 95% 以上，相比改进前有了明显提高(表 3~4)，达到设计目标。

### 4 结论

(1) 通过化学成分设计，调整 C、Cr、Ni、Ti 等元素比例，可优化 TP321 不锈钢无缝钢管耐晶间腐蚀性能。

(2) TP321 不锈钢无缝钢管进行固溶热处理时，炉内还原性气氛易造成钢管表面增碳；弱氧化性气氛(残余 O 含量 0~0.3%)对钢管表面质量较好，消除了增碳因素，且节约能源。

(3) TP321 不锈钢无缝钢管冷轧后脱脂不净，

表3 改进前(2012年1—6月)TP321 不锈钢  
无缝钢管晶间腐蚀一次检验合格率

月份	检验批次	合格批次	合格率/%
1	8	6	75.00
2	25	20	80.00
3	35	22	62.86
4	57	44	77.19
5	20	15	75.00
6	30	20	66.67

表4 改进后(2012年9—11月)TP321 不锈钢  
无缝钢管晶间腐蚀一次检验合格率

月份	检验批次	合格批次	合格率/%
9	37	33	95.19
10	41	38	96.68
11	25	24	97.00

对热处理后钢管表面质量影响较大,对耐蚀性能也有不良影响;通过改进脱脂方法,可有效改善钢管耐晶间腐蚀性能。

(4) 固溶热处理保温温度设为 1 050 ℃,对 TP321 不锈钢无缝钢管的耐晶间腐蚀性能有利。

(5) 若 TP321 不锈钢无缝钢管在敏感温度区间(450~900 ℃)内使用且环境存在强腐蚀介质,应对钢管进行稳定化处理。

## 5 参考文献

[1] 罗宏, 龚敏. 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(5): 357-360.

[2] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 168, 61-72, 171-173.

[3] American Society for Testing Materials. ASTM A262-02a Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels[S]. 2002.

[4] Kenjiro K. Failure analysis and prevention in SCC and corrosion fatigue cases[J]. Int J Fatigue, 1998, 20(2): 145-154.

[5] 王荣滨. 18-8 型奥氏体不锈钢的晶间腐蚀[J]. 上海钢研, 2003(2): 19-21.

[6] 李神速, Kilian R. 对 Cr18Ni9 型不锈钢的时间-温度-敏化-稳定度关系图的修正[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(6): 41-47.

[7] 秦丽雁, 张寿禄. 典型不锈钢晶间腐蚀敏化温度的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(1): 1-5.

[8] American Society for Testing Materials. Advances in the technology of stainless steels and related alloys[M]. 1988: 568.

[9] 陈蜀. 天然气直接渗碳[J]. 大型铸锻件, 1984(2): 48-55.

[10] 汪红晓. 热处理工艺对 1Cr18Ni9Ti 冷轧带钢晶间腐蚀敏感性的影响[J]. 四川冶金, 2002(6): 32-34.

[11] 郑海生. 奥氏体不锈钢晶间腐蚀问题的研究及防止[J]. 机电工程技术, 2004, 33(1): 46-47.

[12] 管根笙, 译. 奥氏体不锈钢的晶界偏析及其对晶间腐蚀和应力腐蚀开裂的影响[J]. 国外金属热处理, 1990, 11(5): 52-60.

(收稿日期: 2013-06-21; 修定日期: 2014-01-09)

## ● 信息

### 攀钢集团江油长城特殊钢有限公司首次成功生产出 4J36 铁镍合金管材

攀钢集团江油长城特殊钢有限公司(简称攀长特公司)利用 3 个月时间,成功生产出 4J36 铁镍合金管材,产品包括 Φ168 mm×13 mm、Φ95 mm×8 mm 两个规格共计 3 t,现已交付用户使用,使用状况良好。

此批 4J36 铁镍合金管属船用管材,是攀长特公司首次生产的钢管品种。在 2013 年 10 月接到订货合同后,攀长特公司高度重视此批生产任务,在合同规定的 3 个月生产周期内,通过优化冶炼工艺,调整锻造加工工艺路线,采用“非真空感应炉冶炼—锻造轧制—挤压成管”的生产工艺,成功解决了 4J36 铁镍合金管材在热加工过程中容易开裂等技术难题。2013 年 12 月底提前完成生产合同,并完成全部订单交货。经过检验,此批 4J36 铁镍合金管材产品的各项性能指标均达到用户要求,为今后攀长特公司与 4J36 铁镍合金管材用户进一步合作奠定了坚实基础。

(攀钢集团江油长城特殊钢有限公司 朱道明)