

# 固溶温度对超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 组织和性能的影响

吴忠忠<sup>1,2</sup> 宋志刚<sup>2</sup> 郑文杰<sup>2</sup> 陈斌<sup>2</sup> 陆建生<sup>1</sup>

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

**摘要** 试验和测试了 900~1300 °C 固溶处理时双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 的相组成、冲击能  $A_{KV}$  和硬度(HRC)值。试验结果表明,在 900~1020 °C 固溶处理时,双相不锈钢中有 16.97%~3.22%  $\sigma$  相析出,使钢的冲击能  $A_{KV}$  值从 1040~1250 °C 处理的 224~280 J 降至 3~44 J。该双相不锈钢的热加工温度应大于 1040 °C,其最佳固溶处理温度为 1040~1100 °C。

**关键词** 超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 固溶处理  $\sigma$ -相 冲击能

## Influence of Solution Temperature on Structure and Properties of Super Duplex Stainless Steel 00Cr25Ni7Mo4N

Wu Zhongzhong<sup>1,2</sup>, Song Zhigang<sup>2</sup>, Zheng Wenjie<sup>2</sup>, Chen Bin<sup>2</sup> and Lu Jiansheng<sup>1</sup>

(1 Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Center Iron and Steel Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The phase composition, impact energy  $A_{KV}$  and hardness HRC value of duplex stainless steel 00Cr25Ni7Mo4N solution treated at 900~1300 °C have been studied and examined. The results showed that 16.97%~3.22%  $\sigma$ - phase precipitated in duplex stainless steel during solution treatment at 900~1020 °C led to the impact energy  $A_{KV}$  value of steel decreasing to 3~44 J from 224~280 J while steel treated at 1040~1250 °C. The hot work temperature of the duplex stainless steel should be higher than 1040 °C and its optimum solution treatment temperature is 1040~1100 °C.

**Material Index** Super Duplex Stainless Steel 00Cr25Ni7Mo4N, Solution Treatment,  $\sigma$ - Phase, Impact Energy

双相不锈钢(DSS)是铁、铬、镍的合金,其室温组织由铁素体和奥氏体双相组成<sup>[1-3]</sup>。中国的双相不锈钢还处于国外第 2 代的水平,钢中的含氮量在 0.20% 以下,而含氮在 0.25%~0.35% 的超级双相不锈钢(SDSS)已在发达国家普遍生产使用<sup>[1]</sup>。本试验研究了固溶温度对锻态 00Cr25Ni7Mo4N 组织和力学性能的影响,并根据欧洲热力学数据库(SGTE)进行热力学计算得出的奥氏体线解方程式,计算奥氏体相百分数。同时把实验数据与运用瑞典 Thermo-Calc 热力学软件 TCW3.0 中的 TCFE3 数据库计算并绘制出的 00Cr25Ni7Mo4N 相图进行对比分析<sup>[4]</sup>,分析  $\sigma$  相成因及处理方法,期望能对 00Cr25Ni7Mo4N 的实际生产加工过程提供参考。

### 1 试验材料与方法

#### 1.1 试验材料

超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 经 EAF-18 t 的 AOD 冶炼,锻造成  $\Phi 80$  mm 的原坯料(表 1)。试验用钢是把原坯料加热到 1130 °C 保温 1 h,多次改锻成  $\Phi 16$  mm 圆棒。

#### 1.2 试验方法

试样固溶处理时保温 40 min,水淬。金相浸蚀溶液为 10% 的氢氧化钾、30% 的铁氰化钾。相比比例使用北京中科科仪计算技术有限责任公司(SISC)的 IAS 图像分析仪软件 8.0 版测定,按 GB6401-86 和 GB/T13305-91 标准执行,每个试样测量 15 个视场。

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of test steel / %

| 项目   | C      | Cr          | Ni        | Mo        | N           | Mn    | P      | S      | Si    | Cu   | Fe |
|------|--------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------|--------|--------|-------|------|----|
| 分析结果 | 0.019  | 25.29       | 7.10      | 3.73      | 0.253       | 1.03  | 0.025  | 0.004  | 0.54  | 0.21 | 余量 |
| 标准要求 | ≤0.030 | 24.00~26.00 | 6.00~8.00 | 3.00~5.00 | 0.240~0.320 | ≤1.00 | ≤0.035 | ≤0.030 | ≤0.80 | 0.50 | 余量 |

## 2 试验结果及分析讨论

### 2.1 固溶温度对相含量的影响

00Cr25Ni7Mo4N 经过不同固溶温度处理后,显微组织中各相比例如表 2 所示。由表可见,随温度升高,铁素体相比例增加,奥氏体相比例下降,在 1 100 ℃ 以上下降幅度增大。从图 1 中可看出,奥氏体呈长条状连续分布,温度高时,奥氏体呈现小岛状分布在铁素体基体上。铁素体持续增加,奥氏体随固溶温度升高相比例下降,在 1 300 ℃ 时仍有 32.1% 的奥氏体,而 SAF2205 在此温度进行相同时间的固溶处理后,已是单相铁素体组织<sup>[5]</sup>。

表 2 固溶温度对 00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢中相含量的影响

Table 2 Effect of solution treatment temperature on phase content in duplex stainless steel 00Cr25Ni7Mo4N

| 固溶温度/<br>℃ | 相比例/%         |            |            |            |
|------------|---------------|------------|------------|------------|
|            | 计算 $\gamma$ 相 | $\gamma$ 相 | $\alpha$ 相 | $\sigma$ 相 |
| 900        | 67.5          | 61.0       | 22.03      | 16.97      |
| 950        | 63.3          | 59.4       | 28.13      | 12.47      |
| 1 000      | 59.3          | 59.3       | 32.69      | 8.11       |
| 1 020      | 57.7          | 59.1       | 37.78      | 3.22       |
| 1 040      | 56.1          | 58.1       | 41.90      | 0          |
| 1 050      | 55.3          | 57.7       | 42.30      | 0          |
| 1 100      | 51.3          | 55.7       | 44.30      | 0          |
| 1 150      | 47.2          | 49.6       | 50.40      | 0          |
| 1 200      | 43.2          | 41.3       | 58.70      | 0          |
| 1 250      | 39.2          | 34.1       | 65.90      | 0          |
| 1 300      | 35.1          | 32.1       | 67.90      | 0          |

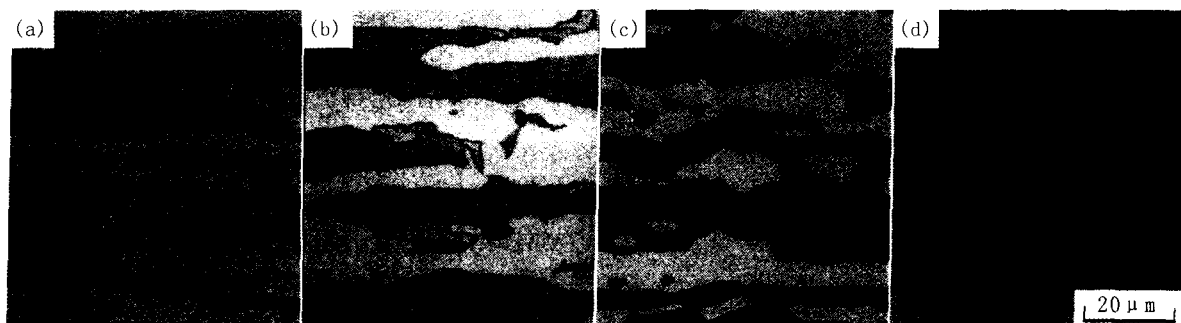


图 1 不同固溶温度的 00Cr25Ni7Mo4N 钢组织,白色- $\gamma$ ,灰色- $\alpha$ ,黑色- $\sigma$ :(a) 900 ℃; (b) 1 020 ℃; (c) 1 040 ℃; (d) 1 300 ℃  
Fig.1 Structure of steel 00Cr25Ni7Mo4N with different solution treatment temperature, white-  $\gamma$ , grey-  $\alpha$ , black-  $\sigma$ : (a) 900 ℃; (b) 1 020 ℃; (c) 1 040 ℃; (d) 1 300 ℃

近年来国外发展利用热力学数据计算合金元素与相平衡的关系,以双相不锈钢的化学成分和热处理温度作为计算奥氏体数量的基础。根据欧洲热力学数据库(SGTE)进行热力学计算得出的奥氏体线解方程式<sup>[3]</sup>,代入实验钢的化学成分和固溶温度,按此方程式即可计算出在不同温度下的奥氏体数量。从表 2 可知,通过热力学计算  $\gamma$  相比例与试验结果基本吻合,但试验结果表明,在 1 100 ℃ 以下变化较为缓慢且保持较高  $\gamma$  相比例。

用 Thermal-Calc 计算的相图<sup>[3,4]</sup>可知,950 ℃ 以下才析出  $\sigma$  相,同时 900 ℃ 以下没有  $\alpha$  相。试验结果表明,1 020 ℃ 时就有 3.22%  $\sigma$  相析出,图 1(b) 黑色包围区域即是  $\sigma$  相,析出  $\sigma$  相主要在  $\alpha$  相和  $\gamma$  相交界处形成,在  $\alpha$  相中长大,并随固溶温度下降迅速增加,且  $\alpha$  相在 900 ℃ 仍占 22.03%。可见实验所得  $\sigma$  相和  $\alpha$  相的实际稳定范围与软件预测的结果不完全一致, $\sigma$  相的实际稳定温度比软件预测的高。

在扫描电镜下对  $\sigma$  相及铁素体和奥氏体相进行能谱分析,结果见表 3。铬、钼等铁素体形成元素在铁素体中富集,而奥氏体形成元素镍则在奥氏体中富集,使奥氏体具有较高的耐蚀性和韧性,析出相中则富含 Cr、Mo、Si、Mn 元素,有利于含有两元素的金属间相在铁素体相中形核,图 2(1- $\sigma$  相,2- $\alpha$  相,3- $\gamma$  相)是用扫描电镜进行的线扫描图,更加直观地显示出 Cr、Mo、Ni 元素在各相中不均匀分布。研究表明,Ni 虽然使  $\sigma$  相平衡相体积分数减少,但促进了  $\sigma$  相沉淀析出动力学过程。

表 3 950 ℃ 固溶处理双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 中各相的显微分析结果

Table 3 Micro-analysis results of each phase in duplex stainless steel 00Cr25Ni7Mo4N solution treated at 950 ℃

| 图 2 位置 | 相别       | 元素的质量分数/% |      |      |       |      |      |
|--------|----------|-----------|------|------|-------|------|------|
|        |          | Cr        | Mo   | Ni   | Fe    | Si   | Mn   |
| 1      | $\sigma$ | 28.71     | 6.20 | 3.54 | 59.54 | 0.80 | 1.22 |
| 2      | $\alpha$ | 26.51     | 2.81 | 4.12 | 65.10 | 0.56 | 0.90 |
| 3      | $\gamma$ | 23.47     | 2.61 | 8.97 | 63.35 | 0.56 | 1.04 |



图2 00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢 950 °C 固溶组织的线扫描图 × 5 000

Fig.2 Linear scan of 950 °C solution structure in duplex stainless steel 00Cr25Ni7Mo4N × 5 000

这是由于 Ni 使铁素体比例降低,导致了 Cr、Mo 等  $\sigma$  相元素在铁素体中的富集<sup>[6]</sup>,这也是引起析出相附近区域贫 Cr、Mo,造成耐蚀性能下降的一个重要原因。

图 1(c)表明在 1 040 °C 固溶处理后两相组织均匀,没有析出相。当温度高于 1 040 °C,奥氏体相数量减少,铁素体相比比例增大,导致铁素体中形成元素(主要是 Cr、Mo)的浓度相对减少,因此  $\sigma$  相的形成也受到抑制。从表 2 可知,在 1 040 ~ 1 100 °C 两相比比例变化小,为保持良好力学性能及耐蚀性,应在此温度范围进行热处理。

## 2.2 固溶温度对力学性能的影响

固溶温度在 900 ~ 1 100 °C 之间时,随固溶温度的提高,钢的洛氏硬度快速下降,使钢在 1 100 °C 固溶处理时钢的洛氏硬度出现了最小值(表 4)。而在 1 100 ~ 1 300 °C 之间,又随固溶温度的提高而增加。与此相对应,固溶温度低于 1 040 °C 时,钢的韧性随温度的降低急剧恶化。当固溶温度低于 1 020 °C 时,钢的冲击韧性差,很容易碎裂,其值只相当于固溶温度为 1 040 ~ 1 300 °C 时的几分之一。00Cr25Ni7Mo4N 在 900 ~ 1 020 °C 固溶处理时处在多相区,钢中析出大量的脆性相  $\sigma$  相,这是导致冲击功变化的主要原因。

当固溶温度在 1 040 ~ 1 300 °C 之间时,钢的韧性变化小,冲击值下降缓慢。原因有两个方面:(1) 由于温度超过了  $\sigma$  相稳定的最高温度, $\sigma$  相可溶于奥氏体中或转变为铁素体<sup>[5]</sup>;(2) 两相组织变化。铁素体相比比例增加,从而稀释有关  $\alpha$  相形成元素,抑制了  $\sigma$  相的形成。虽然在高达 1 300

表 4 固溶温度对双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 力学性能的影响

Table 4 Effect of solution temperature on mechanical properties of duplex stainless steel 00Cr25Ni7Mo4N

| 固溶温度/<br>°C | 力学性能       |     |       |         |      |      |
|-------------|------------|-----|-------|---------|------|------|
|             | $A_{KV}/J$ |     |       | 硬度(HRC) |      |      |
| 900         | 3          | 3   | 3     | 39.9    | 39.2 | 39.7 |
| 950         | 4          | 4   | 4     | 35.0    | 36.2 | 37.3 |
| 1 000       | 10         | 8   | 9     | 29.2    | 32.6 | 30.3 |
| 1 020       | 44         | 35  | 33    | 26.8    | 27.0 | 25.7 |
| 1 040       | 275        | 220 | 265   | 24.5    | 23.1 | 24.1 |
| 1 050       | 280        | 280 | 265   | 26.5    | 25.2 | 23.7 |
| 1 100       | 237        | 279 | > 235 | 24.3    | 22.7 | 23.0 |
| 1 150       | 254        | 236 | 272   | 23.3    | 24.7 | 24.0 |
| 1 200       | 235        | 229 | 235   | 25.4    | 25.7 | 24.2 |
| 1 250       | 235        | 238 | 224   | 25.2    | 26.0 | 25.1 |
| 1 300       | 195        | 217 | 190   | 26.6    | 27.5 | 25.3 |

°C 进行热加工依然保持双相组织,如图 1(d)所示,当加热温度高于此温度将会导致相比比例失调,带来氧化问题及耐点蚀性能的下降<sup>[7]</sup>。

## 3 结论

(1) 根据欧洲热力学数据库(SGTE)进行热力学计算得出的奥氏体线解方程式,计算奥氏体百分数与实验结果吻合较好。

(2) 实验结果与 Thermo-Calc 热力学软件计算结果基本一致,对生产加工有一定的指导意义,但  $\sigma$  相的实际稳定温度比软件预测的高。

(3) 00Cr25Ni7Mo4N 钢应在 1 040 ~ 1 100 °C 进行固溶热处理,以保持良好的力学性能及耐蚀性。

(4) 低于 1 040 °C 加热时,00Cr25Ni7Mo4N 钢中易于析出  $\sigma$  相,使钢容易脆裂,热加工时应避开该温度段,并注意热加工后的快速冷却。

## 参考文献

- 1 Wu Jiu, Han Huaiyue. Current Situation and Development of China Duplex Stainless Steel. Duplex Stainless Steel 2003, Proc. Conf. 2003: 5
- 2 Francis, Byrne. Zeron 100 Super Duplex Stainless Steel Advanced Alloy for Industrial Applications. Duplex Stainless Steel 2003, Proc. Conf. 2003: 135
- 3 吴 玖. 双相不锈钢. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 1
- 4 Thermo-Calc Software AB. The TCW3 Users' Guide of Thermo-Calc Software. Sweden, 2003: 18
- 5 宋志刚, 陈 斌, 郑文杰, 等. 固溶温度对 00Cr22Ni5Mo3N 组织及性能的影响. 钢铁研究学报, 2004, 16(4): 47
- 6 Li Jianchun, Wu Tiyan, Yves Riquier.  $\sigma$  Phase Precipitation and Its Effect on the Mechanical Properties of a Super Duplex Stainless Steel. Materials Science and Engineering, 1994, 174: 149
- 7 Liane Smith, Mario Celant, Antoine Pourbaix. A Guideline to the Successful Use of Duplex Stainless Steels for Flowlines, America Duplex Stainless Steel 2000, Proc. Conf. 2000: 17

吴忠忠(1978-),男,材料学专业,硕士研究生,从事不锈钢研究。

收稿日期: 2006-01-26