

## 固溶处理对 00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢组织和力学性能的影响

王晓峰<sup>1</sup> 陈伟庆<sup>1</sup> 毕洪运<sup>2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 宝山钢铁股份有限公司,上海 201900)

**摘要** 研究了真空感应炉(6.5 kg 锭)熔炼的 00Cr25Ni7Mo4N 钢(%:0.007~0.009C,24.50~24.84Cr,6.92~6.99Ni,3.65~3.72Mo,0.27~0.30N)的相比比例和固溶处理温度对钢的组织和力学性能的影响。结果表明,随固溶温度由1 050 ℃增至1 200 ℃,钢中铁素体含量由48%~50%提高至53%~55%。当固溶温度由1 050 ℃提高至1 100 ℃,钢的强度下降,伸长率和冲击韧性增加,当固溶温度由1 100 ℃提高至1 200 ℃,钢的强度增加,伸长率和韧性降低,该钢最佳固溶温度为1 100 ℃±50 ℃。

**关键词** 00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢 相比比例 固溶温度 力学性能

## Influence of Solution Treatment on Structure and Mechanical Properties of Duplex Stainless Steel 00Cr25Ni7Mo4N

Wang Xiaofeng<sup>1</sup>, Chen Weiqing<sup>1</sup> and Bi Hongyun<sup>2</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;  
2 Baosteel Co Ltd, Shanghai 201900)

**Abstract** Effect of phase proportion and solution temperature on structure and mechanical properties of steel 00Cr25Ni7Mo4N (%:0.007~0.009C,24.50~24.84Cr,6.92~6.99Ni,3.65~3.72Mo,0.27~0.30N) melted by vacuum induction furnace (6.5 kg ingot) has been studied. Results showed that with increasing solution temperature from 1 050 ℃ to 1 200 ℃, ferrite content in steel increased from 48%~50% to 53%~55%; with increasing solution temperature from 1 050 ℃ to 1 100 ℃, the strength of steel decreased while the elongation and impact toughness of steel increased, and with increasing the solution temperature from 1 100 ℃ to 1 200 ℃, the strength of steel increased while the elongation and impact toughness of steel decreased, so optimum temperature of the steel was 1 100 ℃±50 ℃.

**Material Index** Duplex Stainless Steel 00Cr25Ni7Mo4N, Phase Proportion, Solution Temperature, Mechanical Properties

00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢是第3代超级双相不锈钢的代表钢种,兼有奥氏体和铁素体两相组织,具有较好的力学性能,较高的韧性,良好的可焊接性,尤其是非凡的抗点蚀能力<sup>[1-4]</sup>。

然而,00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢在国内某些大型不锈钢生产企业还处于研发阶段,若想顺利在现场批量生产,必须控制其适当的相比比例,并掌握其组织与力学性能之间的关系,组织变化在很大程度上又取决于钢的成分和加热温度<sup>[5]</sup>,本文有针对性地研究了氮含量和固溶温度对其组织和力学性能的影响。

### 1 研究方法

用真空感应炉冶炼6.5 kg的钢锭,冶炼温度为1 580 ℃,等钢液全部溶清后,通过真空感应炉加料装置向钢液加入不同含量的Cr<sub>2</sub>N合金,以控制钢中的氮含量,精炼5 min,待钢液温度、成分均匀后快速浇注,浇注温度为1 540 ℃,浇注后的钢锭锻造成形,钢的化学分析结果如表1所示。

表1 实验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steels /%

炉次	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
DSS1	0.009	0.61	0.91	0.026	0.005	24.50	6.92	3.72	0.27
DSS2	0.007	0.66	1.13	0.023	0.005	24.84	6.99	3.65	0.30

将制备好的实验材料制成金相试样,用赤血盐水溶液经腐蚀着色,用面积统计软件检验铁素体和奥氏体相的面积含量,每个试样检验20个视场,测量结果取其算术平均值。

试样在马弗炉中进行固溶处理,固溶温度分别为1 000、1 050、1 100、1 150 ℃,保温1 h,水淬。

### 2 研究结果及分析

#### 2.1 相比比例

00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢的相比比例与它的化学成分有很大关系,可用铬当量(Cr<sub>eq</sub>)和镍当量(Ni<sub>eq</sub>)的计算公式(1)和(2)表示<sup>[5]</sup>:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5 \times Si + 0.5 \times Nb \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30 \times C + 0.5 \times Mn + 30 \times N \quad (2)$$

由表 2 可以看出,氮含量为 0.27% 的 DSS1 试样和氮含量为 0.30% 的 DSS2 试样,其氮含量对镍当量的贡献都超过一半,分别为 0.51 和 0.54,其中 DSS2 试样其氮含量对镍当量的贡献高于 DSS1 试样。DSS1 比 DSS2 试样的铬镍当量比  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  高。可见,在其它化学成分一定或变化不大的情况下,氮含量的增加导致  $Ni_{eq}$  增加,  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  降低,铁素体相区减少,奥氏体相区增加。

表 2 实验钢的铬当量和镍当量

Table 2 Chromium equivalent and nickel equivalent of test steels

炉次	$Cr_{eq}$	$Ni_{eq}$	$Cr_{eq}/Ni_{eq}$	$30 \times N$	$30 \times N/Ni_{eq}$
DSS1	29.14	15.75	1.85	8.10	0.51
DSS2	29.48	16.77	1.76	9.00	0.54

当化学成分一定时,00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢相比例的变化主要取决于固溶温度。固溶处理后的试样(垂直于锻造方向)经赤血盐溶液侵蚀着色后,用金相显微镜照相,DSS2 试样的金相组织照片如图 1 所示,用面积统计软件检验铁素体相和奥氏体相的面积含量,每个试样检验 20 个视场,测量结果取其算术平均值,实验结果如图 2 所示。

从图 1 可以看出,随着固溶温度的升高,奥氏体和铁素体组织发生了明显的再结晶长大,奥氏体的长宽比明显减少。

从图 2 可以看出,随着固溶温度的升高,DSS1 和 DSS2 试样的铁素体含量增加,奥氏体含量减少,基本呈线性关系;对应于同一固溶温度,氮含量高的 DSS2 试样其铁素体含量均低于氮含量低的 DSS1 试样,在本实验条件下,固溶温度为 1050 ~ 1200 °C 时,氮含量为 0.27% 的 DSS1 试样,其铁素体含量在 50% ~ 55% 波动;氮含量为 0.30% 的 DSS2 试样,其铁素体含量在 48% ~ 53% 波动。由此可见,对应于

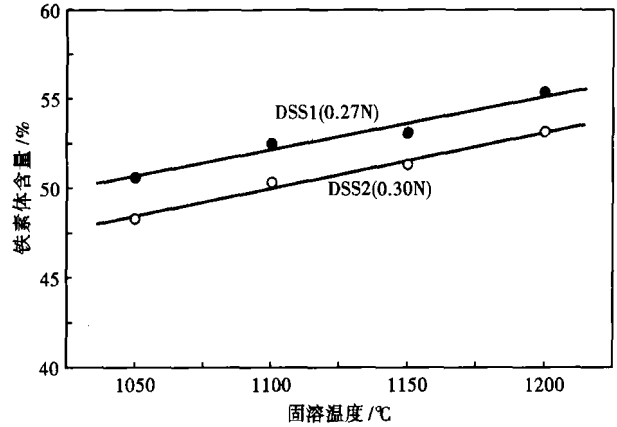


图 2 固溶温度对试验钢铁素体含量的影响

Fig. 2 Effect of solution temperature on ferrite content in test steels

同一固溶温度,随着氮含量的增加,奥氏体含量逐渐增加,铁素体含量逐渐降低。

### 2.2 力学性能

实验所测得的力学性能如图 3 所示,图中各固溶温度下的力学性能值为实验所测两组数据的平均值,对比 UNS S32750 牌号的力学性能-  $\sigma_{0.2} \geq 550$  MPa,  $\sigma_b$  800 ~ 1000 MPa,  $\delta_5 \geq 25\%$ ,  $A_K \geq 230$  J<sup>[5]</sup>,可以看出,在本实验条件下所测得的各项力学性能指标均符合 00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢典型力学性能的要求。

从图 3 可以看出,对应于同一固溶温度,氮含量为 0.30% 的 DSS2 试样其屈服强度、抗拉强度、硬度均高于氮含量为 0.27% 的 DSS1 试样,而伸长率、冲击功正好相反,变化幅度不大。

氮含量对双相不锈钢力学性能的影响有两方面因素:

(1) 组织转变因素。氮是强烈形成和稳定、扩大奥氏体相区的元素,其能力远远超过镍元素,约为镍元素的 30 倍<sup>[5]</sup>,随着钢中氮含量的提高,钢中的奥氏体相增加,铁素体相降低。在钢铁材料中,奥氏体相是面心立方结构,其塑性因该结构易于通过滑移进行塑性变形而高于具有体心立方结构的铁素体组织,而铁素体的强度则高于奥氏体,所以氮含量的提高使钢的强度下降而塑性上升。

(2) 固溶强化因素。氮的原子半径很小,大约只有 0.071 nm,在双相不锈钢中,氮主要以间隙形式固溶于具有面心立方结构的奥氏体组

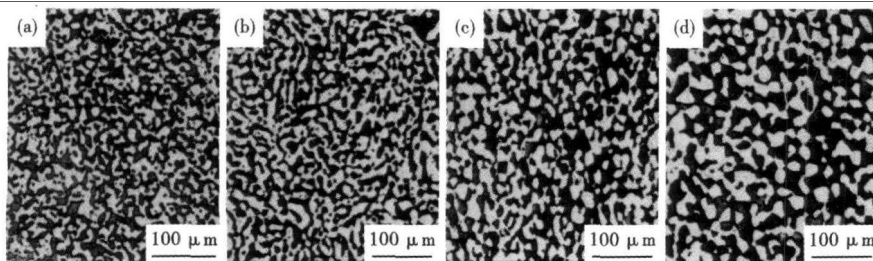


图 1 固溶温度对 DSS2 组织的影响:(a) 1050 °C; (b) 1100 °C; (c) 1150 °C; (d) 1200 °C  
Fig. 1 Effect of solution temperature on structure of DSS2 heat: (a) 1050 °C; (b) 1100 °C; (c) 1150 °C; (d) 1200 °C

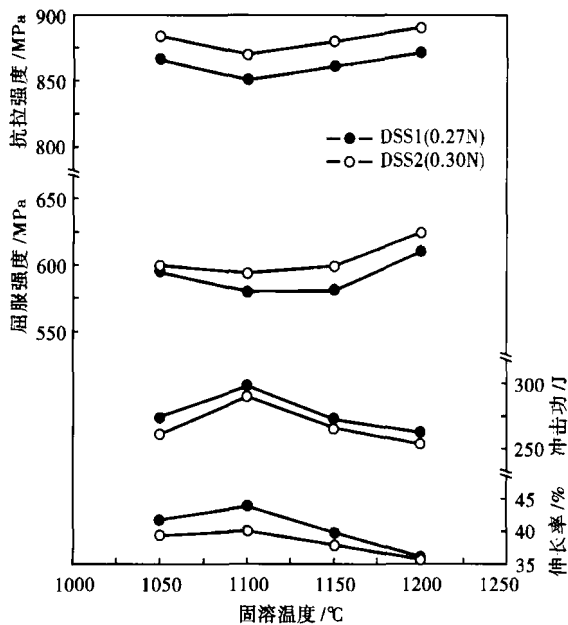


图 3 固溶温度对试验钢力学性能的影响

Fig. 3 Effect of solution temperature on mechanical properties of test steels

织中,对奥氏体起到固溶强化的作用,在固溶后的双相不锈钢中,氮元素在铁素体相和奥氏体相中的分配系数只有 0.1 左右,氮元素可以通过强化强度较低的奥氏体相而使钢的整体强度提高。

从实验结果看出,随固溶温度的提高,该钢的力学性能呈曲线变化;固溶温度在 1 050 ~ 1 100 °C 时,随着固溶温度的提高,钢的屈服强度、抗拉强度和硬度(HRC)逐渐下降,伸长率和冲击韧性逐渐增加;而当固溶温度在 1 100 ~ 1 200 °C 时,钢的屈服强度、抗拉强度和硬度又随固溶温度的提高而增加,伸长率和冲击韧性逐渐降低,使钢在 1 100 °C 固溶处理时其强度和硬度出现了最小值,而伸长率和冲击韧性出现了最大值。由图 3 可知,固溶温度为 1 050 ~ 1 150 °C,00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢的强度和韧性波动较小,力学性能比较稳定,为该钢种最佳固溶温度范围,其中 1 100 °C 为该钢种最佳固溶温度,此固溶温度下钢的屈服强度和抗拉强度都达到标准要求,而塑性和冲击韧性达到最高值。

固溶处理对 00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢力学性能的影响主要有两个因素<sup>[6,7]</sup>:

(1)组织再结晶的完全程度。随着固溶温度的提高,钢的组织再结晶完全程度逐渐提高,其组成相逐渐长大,因而,随着固溶温度的提高,钢的强度逐渐降低。

(2)两相组织的转变。随着固溶温度的提高,钢中还发生两相组织的转变,即随着固溶温度的提高,钢中的铁素体逐渐增多,而奥氏体逐渐减少。而

晶体结构为体心立方的铁素体组织的强度在室温下高于晶体结构为面心立方的奥氏体组织,因而,随着固溶温度的提高而发生的两相组织转变将使钢的强度逐渐增加。

正是以上两种因素的共同作用才使钢的强度随固溶温度的提高呈现出曲线变化,即当固溶温度在 1 050 ~ 1 100 °C 时,随着固溶温度的提高,组织的再结晶起主导作用,因而钢的强度和硬度逐渐下降,伸长率和冲击韧性逐渐增加;当固溶温度在 1 100 ~ 1 200 °C 时,随着固溶温度的提高,两相组织的转变起主导作用,因而钢的强度和硬度逐渐增加,伸长率和冲击韧性逐渐降低。

### 3 结论

(1)随着固溶温度的升高(固溶温度为 1 050 ~ 1 200 °C,温度间隔 50 °C),00Cr25Ni7Mo4N 钢不同氮含量的试样中铁素体含量均增加,奥氏体含量减少。

(2)在同一固溶温度下,随着氮含量的升高,钢的强度和硬度增加,韧性降低。

(3)当固溶温度在 1 050 ~ 1 100 °C 内,随着固溶温度的提高,组织的再结晶起主导作用,因而钢的强度和硬度逐渐下降,伸长率和冲击韧性逐渐增加;当固溶温度在 1 100 ~ 1 200 °C 时,随着固溶温度的提高,两相组织的转变起主导作用,因而钢的强度和硬度逐渐增加,伸长率和冲击韧性逐渐降低。

(4)00Cr25Ni7Mo4N 双相不锈钢最佳固溶温度范围为 1 050 ~ 1 150 °C,此时,钢的强度和韧性波动较小,力学性能比较稳定,其中,1 100 °C 为该钢种最佳固溶温度,此固溶温度下,钢的屈服强度和抗拉强度都达到标准要求,而塑性和冲击韧性达到最高值。

### 参考文献

- 1 Iza Mendia A, Pinol Juea A, Urcola J J, et al. Microstructural and Mechanical Behavior of a Duplex Stainless Steel Under Hot Working Conditions. Metallurgical and Materials Transactions, 1998, 29A: 2975
- 2 Yasuhiro, Maehara. Superplastic Deformation Mechanism of  $\alpha/\gamma$  Duplex Stainless Steels. Transaction ISIJ, 1987, 27: 705
- 3 Hutchinson W H, Ushioda K, Runnsj G. Anisotropy of Tensile Behavior in a Duplex Stainless Steel Sheet. Materials Science and Technology, 1985(1): 728
- 4 Wolfgang Reick, Michael Pohl. Recrystallization Transformation Combined Reactions during Annealing of a Cold Rolled Ferritic Austenitic Duplex Stainless Steel. ISIJ International, 1998, 38(6): 567
- 5 吴 玖. 双相不锈钢. 北京:冶金工业出版社, 2000
- 6 宋维锡. 金属学. 北京:冶金工业出版社, 1980
- 7 宋志刚, 陈 斌, 郑文杰. 固溶温度对 00Cr22Ni5Mo3N 钢组织及力学性能的影响. 钢铁研究学报, 2004, 16(6): 47

王晓峰(1979-),男,博士研究生,钢的质量研究与品种开发。

收稿日期:2008-11-15