

· 工艺材料进展 ·

## 核电站设备制造中双相不锈钢的应用

孙海涛<sup>1</sup> 王建勇<sup>2</sup>

(1 环境保护部核与辐射安全中心,北京 100082; 2 永兴特种不锈钢股份有限公司,湖州 313005)

**摘 要** 奥氏体-铁素体双相不锈钢中稳定存在奥氏体相和铁素体相,该钢具有较高的机械性能和优异的耐点蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀性能,在核电站设备制备中被广泛应用。一般双相不锈钢铸件中铁素体相的体积分数  $\leq 20\%$ ,服役温度  $\leq 425\text{ }^\circ\text{C}$ ,双相不锈钢锻件中铁素体相约占  $50\%$ ,服役温度  $\leq 250\text{ }^\circ\text{C}$ 。文中介绍了核电站设备中应用的双相不锈钢铸、锻件的化学成分、制造和焊接工艺要求及组织和性能。

**关键词** 核电站设备 双相不锈钢 铸件 锻件 应用

## Application of Duplex Stainless Steels in Manufacture of Equipment for Nuclear Power Station

Sun Haitao<sup>1</sup> and Wang Jianyong<sup>2</sup>

(1 Nuclear and Radiation Safety Center, SEPA, Beijing 100082; 2 Yongxing Special Stainless Steel Co Ltd, Huzhou 313005)

**Abstract** The austenite-ferrite duplex stainless steels have stable austenite phase and ferrite phase structure that have higher mechanical properties and excellent pitting, intergranular corrosion and stress corrosion resistance, therefore the steels are wide applied in manufacture of equipment for nuclear power station. In general the volume fraction of ferrite phase in casting of duplex stainless steels is  $\leq 20\%$  with service temperature less than  $425\text{ }^\circ\text{C}$ , and the volume fraction of ferrite phase in forgings of duplex stainless steel is about  $50\%$  with service temperature less than  $250\text{ }^\circ\text{C}$ . The chemical composition, manufacture and welding process, and structure and properties of casting and forgings of duplex stainless steels applied in equipment for nuclear power station are presented in this article.

**Material Index** Equipment for Nuclear Power Station, Duplex Stainless Steel, Casting, Forging, Application

核电站机械设备与部件的选材要求材料结构性能的同时,必须考虑材料与服役介质的相容性,即材料应保证具有一定的耐腐蚀性能。而核电站腐蚀除了通常所指的均匀腐蚀外,还应充分考虑点蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀等。因此核电站与冷却剂相接触的材料主要选用不锈钢,包括双相不锈钢铸件和锻件。

双相不锈钢是指在常温下具有独立稳定存在奥氏体相和铁素体相的不锈钢。铁素体相可提供较高的屈服强度和耐氯化物应力腐蚀的性能;奥氏体相提供良好韧性及良好的抗均匀腐蚀的性能,同时兼具铁素体钢和奥氏体钢的优点,该钢在核电站设备与部件选材中被广泛使用。

### 1 双相不锈钢铸、锻件的化学成分与性能

#### 1.1 双相不锈钢铸件

双相不锈钢铸件是指采用铸造的方法得到室温

稳定的奥氏体-铁素体双相不锈钢。通过控制奥氏体相形成元素(Ni、C、Mn)和铁素体相形成元素(Cr、Mo、Si)之间的平衡关系(表1)来调整铁素体相含量和金相组织,双相不锈钢铸件中铁素体相的体积分数一般都在  $20\%$  以下。

双相不锈钢铸件金相组织主要为奥氏体基体上分布着不连续的条带状和岛状铁素体,其室温抗拉强度  $R_m \geq 480\text{ MPa}$ ,屈服强度  $R_{p0.2} \geq 210\text{ MPa}$ ,伸长率  $A \geq 35\%$ , $K_V$  冲击值  $\geq 80\text{ J}$ 。

#### 1.2 双相不锈钢锻件

在室温状态下,双相不锈钢锻件中奥氏体相作为基体,铁素体相含量最高可达  $50\%$ (图1a)。

目前常用的 Cr-Ni 型双相不锈钢可分为:低合金型、中合金型、高合金型双相不锈钢型。其中低合金型钢中不含 Mo,高合金型中 Cr 含量一般超过

表 1 双相不锈钢铸件的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of castings of duplex stainless steels /%

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co
CF3	$\leq 0.03$	$\leq 2.00$	$\leq 1.50$	$\leq 0.040$	$\leq 0.040$	17.00 ~ 21.00	8.00 ~ 12.00	0 ~ 0.50	-	-
Z3CN20-09M	$\leq 0.040$	$\leq 1.50$	$\leq 1.50$	$\leq 0.030$	$\leq 0.015$	18.00 ~ 21.00	8.00 ~ 11.00	-	$\leq 1.00$	$\leq 0.10$

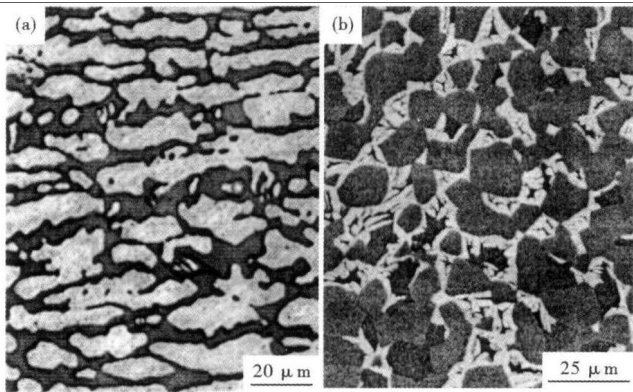


图1 双相不锈钢锻件(a)和服役中析出的 $\sigma$ 相(b)组织形貌  
Fig. 1 Morphology of structure of duplex stainless steel forgings (a) and deposited  $\sigma$ -phase in service (b)

25%。典型节约型双相不锈钢 S32101 的化学成分见表 2,通过添加氮和锰代替贵金属镍,使奥氏体相较稳定,因此其组织稳定性较好,对金属间相的析出不敏感。

S32101 双相不锈钢板在 100 °C 40% CaCl<sub>2</sub> 溶液 500 h 浸泡试验后的 4 点载荷弯曲试验没有发现应力腐蚀裂纹,而 304L 奥氏体不锈钢在 75 ~ 100 h 浸泡试验后发现应力腐蚀裂纹<sup>[1]</sup>。另外双相不锈钢锻件的耐点蚀能力衡量 PRE (Pitting Resistance Equivalent) 值高于奥氏体不锈钢<sup>[2]</sup>,同时其贵金属元素如 Ni、Mo 的含量与同性能奥氏体不锈钢相比大幅降低,因此成本较低。

表 2 S32101 双相不锈钢的化学成分/%  
Table 2 Chemical composition of duplex stainless steel S32101 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Co
≤0.040	≤1.00	4.00 ~ 6.00	≤0.040	≤0.030	21.0 ~ 22.0	1.35 ~ 1.70	0.10 ~ 0.80	0.20 ~ 0.25	0.10 ~ 0.80	≤0.05

## 2 双相不锈钢铸件在核电中的应用

双相不锈钢铸件主要用在反应堆堆内构件、反应堆冷却剂主管道、反应堆冷却剂泵壳和阀门的阀体、阀盖、阀盘等。其制造规范主要依据 ASME A351、RCC-M M3406 和 M3401。

### 2.1 双相不锈钢铸件的制造

核电用双相不锈钢铸件的生产工艺流程:电弧炉冶炼→浇铸→机加工→热处理→检验试验→包装,其中铸造方法包括离心浇铸和静态浇铸,热处理主要采用固溶热处理加水淬。

上述核电设备部件用双相不锈钢铸件在制造过程中,铁素体相含量的控制是一个较关键的项目。通常要求含有 5% ~ 25% 体积百分比的铁素体相以保证材料的强度和耐晶间腐蚀性,如核电站主管道材料 Z3CN20-09M 离心铸造奥氏体-铁素体双相不锈钢铸件应根据 RCC-M MC1290 的 Schaeffler 曲线图对熔炼分析结果进行评定的铁素体含量应为 12% ~ 25%,理想含量为 15% ~ 18%<sup>[3]</sup>。主泵泵壳材料采用不含钼的镍铬奥氏体-铁素体双相不锈钢铸件,应满足 RCC-M M3401 的要求,其铁素体理想含量为 15% ~ 20%;或者满足 ASME SA351 要求的 CF3A 或 CF8A 奥氏体-铁素体双相不锈钢铸件,其铁素体含量应为 7 ~ 20FN(根据 Hull 当量因子计算铁素体含量)<sup>[4]</sup>。

### 2.2 双相不锈钢铸件的焊接

核电双相不锈钢铸件的焊接,如冷却剂主管道

的现场焊接通常先利用 ER316L 焊丝进行背面充氩保护的氩弧焊打底,再用 E316L 药皮焊条电弧手工填充焊。在焊材验收中,应控制焊材(包括焊丝和焊条)的化学成分,尤其是 S、P 含量,以及铁素体含量(一般应控制在 5% ~ 15%)。为了保证焊缝的质量,应在焊接过程中完成焊道根部的液体渗透检查和一定焊缝厚度的阶段射线探伤。

### 2.3 应用中注意的主要问题

首先奥氏体-铁素体双相不锈钢铸件由于热稳定性的原因,其服役温度 ≤ 800 °F (425 °C)。虽然双相不锈钢铸件中有一定数量的铁素体相存在可防止铸造热裂纹,同时提高铸件的强度,但铁素体相的过量存在使在 280 ~ 320 °C 的温度条件下长时间服役的铸件更倾向于沿晶界析出一种脆性  $\sigma$  金属间化合物相(图 1b),从而导致母材脆化,塑性和韧性显著下降,易产生裂纹。

过量的  $\delta$ -铁素体会增加  $\sigma$  相的转变倾向,因此在选择堆焊用焊接材料时,必须严格控制熔敷金属中的铁素体含量。

## 3 双相不锈钢锻件在核电中的应用

双相不锈钢锻件主要应用于核安全 2、3 级设备与部件的制造,国内正在建造的 AP1000 项目核电站乏燃料水池、安全壳内换料水箱、非能动安全壳冷却系统储存箱非承压 C 级设备都采用 ASME SA240 标准 S32101 双相不锈钢制造。

与核电用 300 型(304 或 316)奥氏体不锈钢相

比, S32101 双相不锈钢因高 Cr、N 含量和氮强化而具有更高抗拉强度、屈服强度。通过表 3 可以看出, S32101 双相不锈钢屈服强度是奥氏体不锈钢的 2.5 倍, 因此在保证强度的前提下可以降低部件的重量, 节约材料和成本。

表 3 双相不锈钢 S32101 和超低碳奥氏体不锈钢 316、铁素体不锈钢 430 的物理与力学性能对比表

Table 3 Physical and mechanical properties comparison between duplex stainless steel S32101, ultra-low-carbon austenite stainless steel 316 and ferrite stainless steel 430

钢种	导热系数/ [W·(m·℃) <sup>-1</sup> ]	热膨胀系数 (室温)/ (10 <sup>-6</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	弹性模量/ 10 <sup>6</sup>	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
S32101 (SA-240)	14	12	28.2	≥450	≥650	≥30
SUS 316 (SA-240)	12	16	27.5	≥205	≥515	≥40
SUS 430 (SA-268)	26	11	22.0	≥205	≥450	≥22

这种材料具有与奥氏体不锈钢类似的或更好的抗晶间应力腐蚀性能, 因此也满足设备与冷却剂系统相容性的要求。同时由于比奥氏体不锈钢线性热膨胀系数低(表 3), 与低碳钢接近, 使得 S32101 双相不锈钢较适宜与碳钢进行焊接连接。模块内双相不锈钢钢覆面与碳钢支撑之间的焊接施工, 在 AP1000 的 CA01 和 CA20 等模块施工中得到广泛应用。

### 3.1 双相不锈钢锻件的制造

AP1000 项目乏燃料水池用 S32101 双相不锈钢热轧钢板的生产工艺流程: AOD 精炼→连铸→热轧→热处理→酸洗钝化→检验→包装。目前主要采购自瑞典奥托昆普(OUTO KUMPU)公司, 部分尺寸钢板由国内山西太钢生产。

热轧板的热处理主要采用固溶处理后淬火。检验包括成品钢板的成分分析、力学性能检验、铁素体含量测定和晶间腐蚀试验等, 其中双相不锈钢中的铁素体相含量应控制在 40%~60%。

### 3.2 双相不锈钢锻件的焊接

由于双相不锈钢特殊的合金成分和相结构, 其焊接性兼有奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的优点, 并克服了二者的不足(对热裂纹的敏感性要比奥氏体不锈钢小得多)。因此双相不锈钢锻件可焊性良好, 热裂倾向小, 一般焊前不需预热, 焊后不需热处理, 可与奥氏体不锈钢或碳钢等异种钢焊接。

但在焊接过程中应避免使用过低或过高的焊接热输入, 过低的焊接热输入易使奥氏体相过低、过高

的焊接热输入会使焊缝和热影响区金属晶粒粗大, 从而使韧性下降诱发裂纹产生。

目前 AP1000 项目 S32101 双相不锈钢的焊接, 主要采用与之匹配的双相 E2209 焊条(符合 AWS 标准 A5.4-1992 要求)通过常用的不锈钢焊接方法(如手工电弧焊、钨极气体保护焊、埋弧焊等)进行焊接, 焊接方法依据 AWS D1.6-1999 规范。对于焊材的验收要求熔敷金属铁素体相含量在 35%~65%。

### 3.3 应用中注意的主要问题

(1) 双相不锈钢锻件与奥氏体不锈钢相比, 耐热性较低, 服役温度应控制在 ≤250℃。同时因存在中温脆性区(如 σ 脆性、475℃脆性), 因此应严格控制热处理参数和过程, 以避免有害相的出现影响材料性能。

(2) 为了控制双相不锈钢锻件的服役敏化失效, 在核设备制造和焊接过程中应严格实施防污染控制, 如双相不锈钢在机加工、吊装过程中应严禁与铁素体钢(碳钢或镀锌钢等)接触; 焊接中不允许在双相不锈钢部件上焊接碳钢临时件; 热处理过程中应避免与含硫和卤素物品接触等。

(3) 双相不锈钢因含有较多的合金元素, 焊接过程易于产生碳氮化合物、σ 金属间化合物, 并影响焊接接头的力学和耐腐蚀性能。因此在核电用双相不锈钢焊接过程中, 应控制焊接参数使焊缝金属区和焊接热影响区均保持有适量的铁素体和奥氏体相。

## 4 总结

核电设备制造用双相不锈钢铸件和双相不锈钢锻件, 可通过控制化学成分, 尤其是铁素体相的含量, 得到优异的机械性能和抗腐蚀性能。但应注意加工工艺参数和焊接参数的最佳选择, 以避免有害相和裂纹产生以保证部件的产品质量。

### 参考文献

- 1 S32101 Dimple Jacket Technical Data Sheet. DCI, Inc. www.dciinc.com. 2007
- 2 孙长庆. 双相不锈钢的发展、性能与应用. 化工设备设计, 1998, 35(5): 46
- 3 Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands-RCC-M. AFCEN, 2002
- 4 ASME《锅炉及压力容器规范国际性规范》第 II、III 卷. 北京: 中国石化出版社, 2004

孙海涛(1979-), 男, 硕士, 北京理工大学毕业, 核电站设备材料安全审评。

收稿日期: 2011-10-17