

# Cr/Ni当量比对CAP1400核主泵泵壳用奥氏体不锈钢性能的影响

康秀红 胡小强 郑雷刚 夏立军

(中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室 沈阳 110016)

**摘要** 基于热力学分析,设计了2种不同Cr/Ni当量比的CAP1400核主泵泵壳用奥氏体不锈钢,研究了Cr/Ni当量比和固溶处理温度对这类钢中铁素体的含量及其350℃拉伸性能的影响。结果表明,Cr/Ni当量比较大时,泵壳用奥氏体钢中铁素体含量较多,更为粗大;而且350℃时抗拉强度较高,能满足CAP1400核主泵泵壳的力学性能要求。在1100~1200℃不同温度固溶处理后,随着固溶处理温度的提高泵壳用奥氏体不锈钢中铁素体的含量略有提高,但是对350℃时的拉伸强度影响较小。

**关键词** 金属材料,奥氏体不锈钢,Cr/Ni当量比,固溶处理,铁素体含量,核主泵泵壳

中图分类号 TG171

文章编号 1005-3093(2018)02-0142-07

## Effect of Cr/Ni Equivalent Ratio on Microstructure and Properties of Austenitic Stainless Steel CAP1400 for Reactor Coolant Pump Casing

KANG Xiuhong, HU Xiaoqiang, ZHENG Leigang, XIA Lijun

(Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Correspondent: KANG Xiuhong, Tel: (024)83970108, E-mail: xhkang@imr.ac.cn

Supported by Liaoning Science and Technology Innovation Major Project (No. 201410003)

Manuscript received 2017-10-19; in revised form 2017-11-28

**ABSTRACT** Austenitic stainless steels with different Cr / Ni equivalent ratio for CAP1400 reactor coolant pump casings were designed based on thermodynamics consideration. The effect of Cr/Ni equivalent ratio and solution treatment temperature on the ferrite volume fraction and tensile properties of the steel at 350℃ were investigated by microstructure observation and tensile tests. Results show that with the increase of Cr/Ni equivalent ratio the amount of ferrite-phase in austenitic stainless steel increases and the ferrite-phase is more bulky. The austenitic stainless steel with high Cr/Ni equivalent ratio has a higher tensile strength at 350℃, which can meet the requirements of mechanical properties for CAP1400 pump casing. After solution treatment at different temperatures in the range from 1100~1200℃, the content of ferrite-phase in the studied steel was slightly increased with the raising of solution treatment temperature, but it had little effect on the tensile properties at 350℃.

**KEY WORDS** metallic materials, austenitic stainless steel, Cr/Ni equivalent ratio, solution treatment, ferrite contents, nuclear reactor coolant pump casing

奥氏体不锈钢具有良好的力学性能、加工性能、低温性能和优异的抗高速腐蚀性能,是制造核电领

资助项目 辽宁省科技创新重大专项(201410003)

收稿日期 2017-10-19 定稿日期 2017-11-28

作者简介 康秀红,女,1976年生,博士,副研究员

通讯作者 康秀红, xhkang@imr.ac.cn, 研究方向为核电铸件材料与工艺

DOI 10.11901/1005.3093.2017.625

域泵体和管道等部件的重要选材<sup>[1-4]</sup>。核电泵体用奥氏体不锈钢的微观组织,由奥氏体基体和少量的铁素体组成。但是这少量铁素体相的作用非常重要,其含量决定奥氏体不锈钢的耐蚀性能、热加工性能和力学性能<sup>[5-8]</sup>。研究结果表明<sup>[9]</sup>,奥氏体不锈钢焊缝中一定含量(5%以上)的铁素体有助于降低热裂倾向。但是,含量过高的铁素体损害奥氏体不锈钢

的热加工性,并产生开裂。王亚婷等<sup>[10]</sup>发现,奥氏体焊缝枝晶间呈网状连接的铁素体对奥氏体基体的分割严重,导致焊接接头的韧塑性降低。由此可见,控制奥氏体不锈钢中的铁素体含量对于保证材料的使用性能极为重要。

奥氏体不锈钢中的铁素体相的含量,主要受化学成分的影响。铁素体形成元素(Cr、Mo、Si 和 Nb 等)和奥氏体形成元素(Ni、C、Mn 和 N 等)之间的平衡决定了铁素体相的含量,一般可用 Cr、Ni 当量比(Creq/Nieq)经验公式定性估计奥氏体不锈钢组织中铁素体相形成的可能性和相对含量<sup>[11]</sup>。当 Creq/Nieq>1.47 时,奥氏体不锈钢凝固时为先  $\delta$  铁素体模式;当 1.47>Creq/Nieq>1.24 时为先奥氏体模式,在这两种模式组织中形成一定量的  $\delta$  铁素体相;而当 Creq/Nieq<1.24 时为全奥氏体模式,组织中不会形成  $\delta$  铁素体相<sup>[12]</sup>。另一方面,奥氏体不锈钢中铁素体的含量与其固溶处理温度密切相关。张义帅等<sup>[13]</sup>研究发现,随着固溶处理温度的提高 316LN 奥氏体不锈钢中铁素体的含量逐渐降低,其形貌由骨骼状向光滑的圆点状演变。雷锐戈等<sup>[14]</sup>研究指出,316L 连铸坯热轧前在奥氏体单相区或铁素体+奥氏体双相区加热时,随着加热温度的提高和保温时间的延长铁素体的含量逐渐降低。因此,适当调整铬镍当量、合理选择固溶处理制度是控制奥氏体不锈钢中铁素体含量的有效途径。

CAP1400 核主泵泵壳是主泵的核心承压部件,设计寿命为 60 年,长期在高温、潮湿、辐射等恶劣工作环境中运行,其安全等级要求极高,制造难度极大。CAP1400 核主泵泵壳用奥氏体不锈钢为典型奥氏体+少量铁素体型不锈钢,铁素体的含量应该为

8%~20%,并具有较高的力学性能。但是,CAP1400 核主泵泵壳用奥氏体不锈钢的成分规范较宽,Cr/Ni 当量比(Creq/Nieq)或热处理工艺制度选择不当易造成铁素体的含量不达标,使力学性能不合格。作为核电一级回路的压力边界零件,对核主泵的质量要求极其苛刻。但是,现有针对核主泵泵壳的研究工作多集中在铸造工艺模拟与设计上,很少关注 Creq/Nieq 和固溶处理工艺对铁素体含量及力学性能的影响。鉴于此,本文研究不同的 Creq/Nieq 和热处理制度对 CAP1400 核主泵泵壳用奥氏体不锈钢的组织演变以及 350℃ 拉伸性能的影响。

## 1 实验方法

实验用材料为 CAP1400 核主泵泵壳用奥氏体不锈钢,其化学成分范围和力学性能指标分别列于表 1 和表 2。先借助 Thermo-Calc 软件计算合金体系的平衡相图,分析热力学平衡条件下该类不锈钢的凝固模式。在此基础上,根据表 1 成分规范中 Ni 元素含量的上限和下限设计 2 种不同 Creq/Nieq 的奥氏体不锈钢 CAP1400-1 和 CAP1400-2,并根据热力学平衡相图分析不同 Creq/Nieq 条件下该类不锈钢中铁素体含量的变化。

采用真空感应冶炼 25 kg 实验铸锭,其化学成分列于表 3。在铸锭中部 1/2 半径处切取直径为 11 mm 长度为 70 mm 的棒状试样,在 SSJ-13B 12 kW 箱式电阻炉中进行固溶处理。固溶处理温度分别为 1100℃、1130℃ 和 1160℃,具体工艺如图 1 所示。从固溶处理后的样品上切取金相试样,经机械打磨抛光后在 10%NaOH 水溶液中电解浸蚀 10~30 s 以显示其金相组织。在光学金相显微镜(OM, ZEISS

表 1 CAP1400 核主泵泵壳用奥氏体不锈钢的成分

Table 1 Composition range of CAP1400 austenitic stainless steel (% , mass fraction)

Elements	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
Specification	≤0.08	≤1.50	≤2.00	≤0.005	≤0.03	18.0~21.0	8.0~11.0	≤0.50	Bal.

表 2 CAP1400 核主泵泵壳用奥氏体不锈钢的 350℃ 拉伸性能要求

Table 2 Tensile properties of CAP1400 austenitic stainless steel at 350℃

Strength parameter	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa
Requirement	≥404	≥144

表 3 CAP1400 核主泵泵壳奥氏体不锈钢实验铸锭化学成分(% , mass fraction)

Table 3 Chemical compositions of CAP1400 austenite stainless steel (% , mass fraction)

Elements	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P	N	O	Fe
CAP1400-1	0.063	1.16	1.49	11.25	19.72	0.52	0.0004	0.004	0.026	0.0009	Bal.
CAP1400-2	0.056	1.18	1.49	8.60	19.95	0.39	0.0007	0.005	0.028	0.0008	Bal.

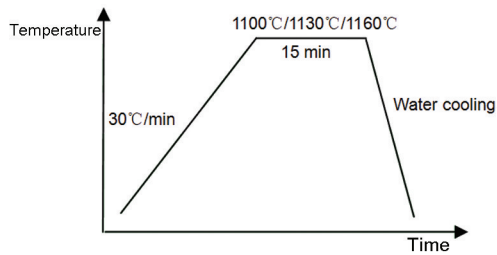


图1 CAP1400-1和CAP1400-2铸态样品的热处理制度  
Fig.1 Heat treatment process for as cast samples of CAP1400-1 and CAP1400-2 steels

Axio Imager A2m)下观察显微组织,使用Sic IAS图像分析软件统计铁素体相的体积分数。用电子拉伸试验机(SANS-CMT 5205)测试350°C拉伸性能,用扫描电子显微镜(SEM, SHIMADZU SSX-550)观察拉伸断口形貌。

## 2 结果和讨论

### 2.1 热力学计算

图2给出了在热力学平衡条件下CAP1400奥氏体不锈钢的液相分数随温度的变化。由图2可知,CAP1400不锈钢的凝固模式为铁素体-奥氏体型。当温度低于1440°C(液相线)时铁素体相先从液相中析出,随着温度降低至1410°C液相与铁素体相之间发生包晶反应(L+ $\delta$ → $\gamma$ ),在液相中开始析出奥氏体相并将铁素体相包在其中。表4给出了热力学计算所使用的化学成分,CAP1400-1和CAP1400-2的Cr/Ni

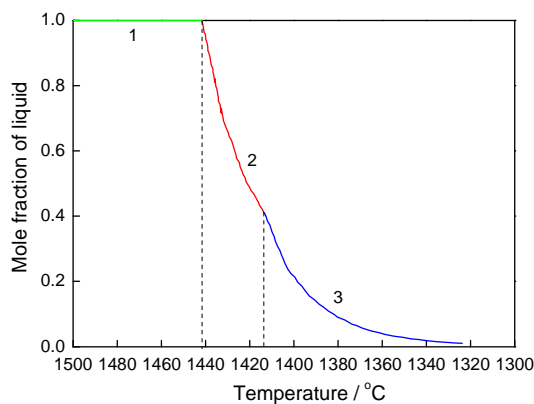


图2 在平衡态下CAP1400奥氏体不锈钢的凝固规律  
Fig.2 Solidification characteristics of CAP1400 austenite stainless steel at thermo dynamic equilibrium state (1- liquid, 2-liquid+BCC, 3-liquid+BCC+FCC)

表4 CAP1400泵体奥氏体不锈钢合金设计化学成分(% ,质量分数)

Table 4 Designed chemical compositions of CAP1400 austenite stainless steel (% , mass fraction)

Elements	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P	N	O	Fe	Creq/Nieq
CAP1400-1	0.060	1.20	1.50	11.00	20.00	0.50	≤0.0015	≤0.01	0.03	≤0.0015	Bal.	0.99
CAP1400-2	0.060	1.20	1.50	8.00	20.00	0.50	≤0.0015	≤0.01	0.03	≤0.0015	Bal.	1.22

当量比分别为0.99和1.22。

图3给出了CAP1400-1和CAP1400-2不锈钢中各平衡相质量分数随温度的变化。图3表明,CAP1400奥氏体不锈钢合金体系中的平衡相包括奥氏体、铁素体、 $M_{23}C_6$ 和sigma相,Creq/Nieq没有改变合金体系的凝固模式,CAP1400-1和CAP1400-2中的先析出相均为 $\delta$ -铁素体。但是,Creq/Nieq对铁素体的析出温度和质量分数有显著的影响。在Creq/Nieq比较小(0.99)的CAP1400-1中铁素体的析出温度为1435°C,质量分数最大值为52%,温度为1189°C时铁素体完全转变为奥氏体相;而在Creq/Nieq较大(1.22)的CAP1400-2中铁素体的析出温度升高到1454°C,最大质量分数增加到75%,铁素体完全转变成奥氏体的温度降低到1089°C。即较大的Creq/Nieq促进铁素体的析出,并扩大铁素体析出的温度区间。其原因是,在Creq/Nieq较大的合金中Ni元素的含量较低,较多的铁素体形成元素有利于扩大铁素体相区。

### 2.2 铸态组织中铁素体的含量

热力学计算结果表明,CAP1400奥氏体不锈钢中铁素体的含量与Creq/Nieq相关。由于本文使用的实验铸锭的凝固速度较高,偏离了热力学平衡状态,因此须校正铁素体的含量。将表3中CAP1400-1和CAP1400-2的实测化学成分代入赫尔等值方程,进行铸态组织中铁素体含量的校核计算。

$$Creq = Cr + 1.21(Mo) + 0.48(Si) - 4.99 \quad (1)$$

$$Nieq = Ni + 0.11(Mn) - 0.0086(Mn)^2 + 18.4(N) + 24.5(C) + 2.77 \quad (2)$$

$$FN = 100.3(Creq/Nieq)^2 - 170.72(Creq/Nieq) + 74.22 \quad (3)$$

式(3)中FN为铁素体相的体积分数。同时,根据金相统计进一步确定铸态组织中铁素体的含量。CAP1400-1和CAP1400-2的铸态组织,如图4所示。可见两种成分不锈钢的铸态组织均为奥氏体基体和少量铁素体,铁素体为深灰色,呈针状、岛状或条带状,均匀分布于奥氏体基体上。表5给出了通过赫尔等值方程计算和金相法统计所得的铁素体含量,CAP1400-1和CAP1400-2中铁素体体积分数的计算值分别为4.8%和14.5%,统计值分别为6.6%和



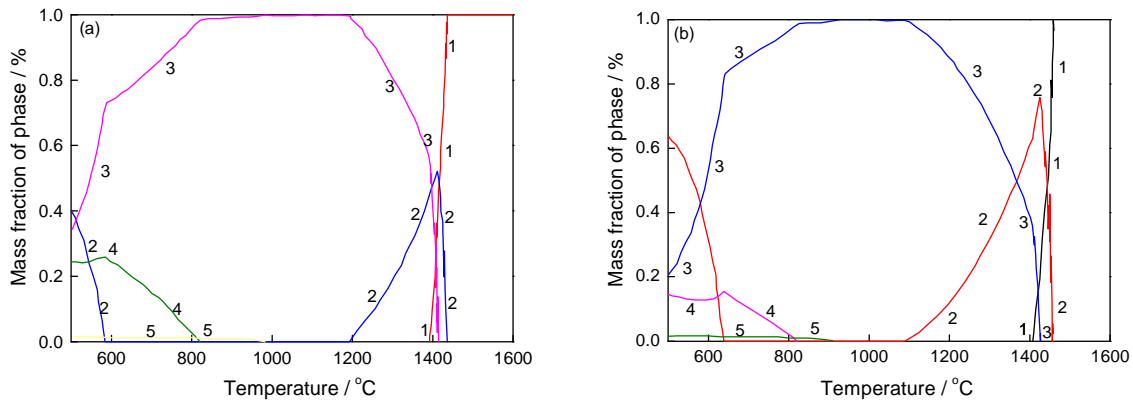


图3 在平衡态下 CAP1400-1 和 CAP1400-2 奥氏体不锈钢中平衡相质量分数与温度的关系

Fig.3 Mass fraction of phases as a function of temperature in CAP1400-1 (a) and CAP1400-2 (b) steels at thermodynamic equilibrium state (1-liquid, 2- $\delta$  phase, 3- $\gamma$  phase, 4- $\sigma$  phase, 5- $M_{23}C_6$ )

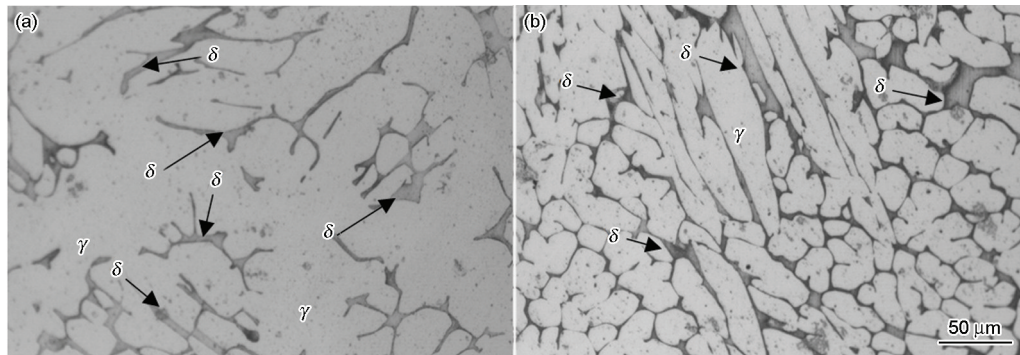


图4 CAP1400-1 和 CAP1400-2 的铸态组织

Fig.4 Optical micrographs of CAP1400-1 (a) and CAP1400-2 (b) austenite stainless steels

表5 CAP1400-1 和 CAP1400-2 铸态组织中 铁素体含量

Table 5 Volume fraction of  $\delta$  ferrite phases in CAP1400-1 and CAP1400-2 austenite stainless steels

Steel	Creq/Nieq	Calculated ferrite fraction/%, volume fraction	Measured ferrite fraction/%, volume fraction
CAP1400-1	0.99	4.8	6.6±1.1
CAP1400-2	1.22	14.5	12.1±1.3

12.1%，可见用两种方法得到的铁素体含量相差不大。在较大 Creq/Nieq 的不锈钢中铁素体的含量较高，与热力学计算结果一致。

### 2.3 固溶温度对铁素体含量的影响

高温固溶处理可使铸态样品中的合金元素得到充分扩散，提高组织均匀性，从而改善力学性能<sup>[15,16]</sup>。图5和图6分别给出了 CAP1400-1 和 CAP1400-2 经 1100℃、1130℃ 和 1160℃ 固溶处理 15 min 后的光学显微组织。可以看出，固溶处理对不锈钢的组织形貌影响不大，仍然由奥氏体和少量铁素体相组成，岛状形貌铁素体均匀地分布在奥氏体基体中。但是 Creq/Nieq 较大的 CAP1400-2 中铁素体相更为粗大，大部分呈连续的条带状分布。由于铁素体相由高温钢液凝固过程中直接析出，Creq/Nieq 越大、铁素体

形成元素越多，铁素体析出温度越高，先析出的铁素体易于迅速长大，快速冷却后残留的铁素体相组织较为粗大。而后续的热处理对铁素体相的形貌影响较小，因此在 Creq/Nieq 较大的 CAP1400-2 中铁素体相更为粗大。

图7给出了 CAP1400-1 和 CAP1400-2 在不同温度固溶处理后铁素体含量的统计结果。由图7可见，固溶温度为 1100℃ 时 CAP1400-1 和 CAP1400-2 中的铁素体体积分数分别为 5.2% 和 11.5%，均比铸态组织略有降低。由于凝固速度较高和合金元素的偏析，铸态组织中铁素体相的含量偏离平衡状态。固溶处理时合金元素在铁素体、奥氏体两相间发生溶质再分配，逐渐趋于热力学平衡。固溶温度较低时发生铁素体相向奥氏体相转变，铁素体含量降低，如图3

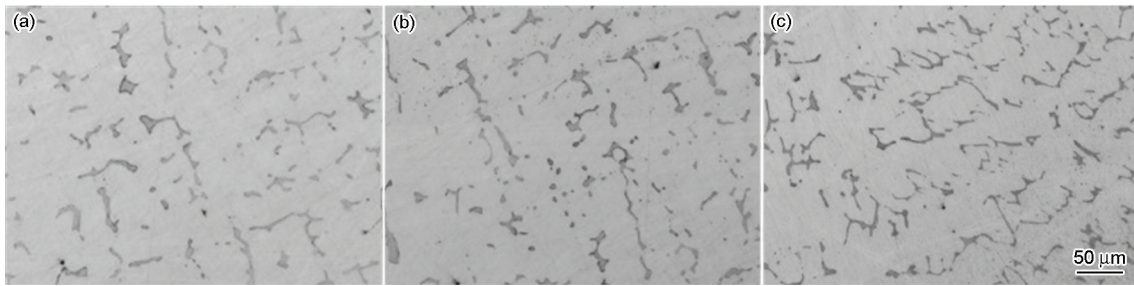


图5 CAP1400-1合金在不同温度固溶处理后的光学组织形貌

Fig.5 Microstructure of CAP1400-1 alloy after solid solution treatment (a) 1110°C, (b) 1130°C, (c) 1160°C

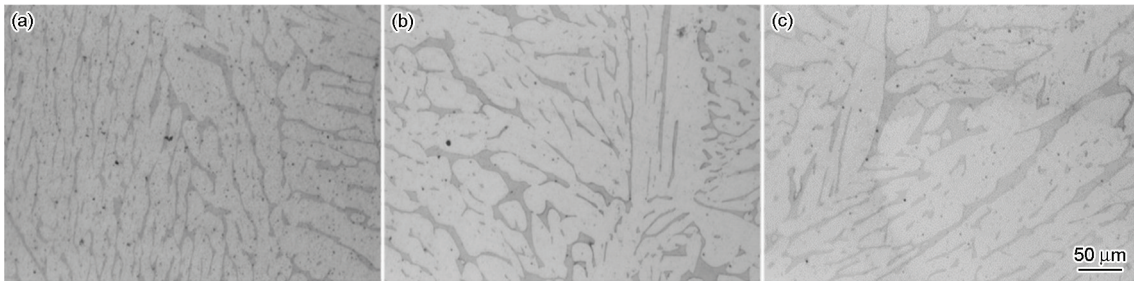


图6 CAP1400-2合金在不同温度固溶处理后的光学组织形貌

Fig.6 The microstructure of CAP1400-2 alloy after solid solution treatment (a) 1110°C, (b) 1130°C, (c) 1160°C

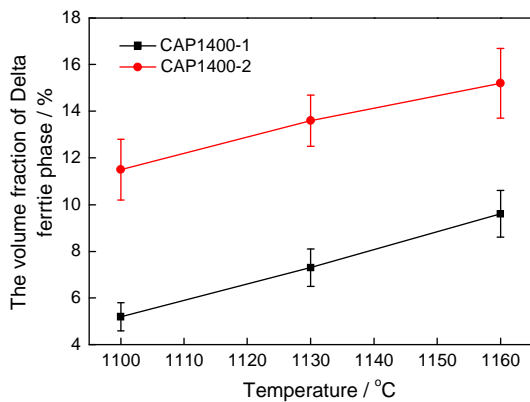


图7 热处理制度对CAP1400-1和CAP1400-2合金中铁素体含量的影响

Fig.7 Effect of heat treatment on ferrite content in CAP1400-1 and CAP1400-2 alloys

所示;固溶温度较高时奥氏体相向铁素体相转变,铁素体含量逐渐提高。当固溶温度提高到1160°C时CAP1400-1和CAP1400-2中的铁素体体积分数分别为9.6%和15.2%,均比铸态组织的铁素体含量高。

#### 2.4 固溶处理对合金350°C拉伸性能的影响

在1100、1130和1160°C固溶处理后CAP1400-1和CAP1400-2的350°C拉伸强度,如图8所示。图8中的水平虚线给出CAP1400核主泵壳350°C拉伸性能指标。由图8可见,随着固溶温度的提高CAP1400-1的屈服强度略有提高,从1100°C固溶的130 MPa提高到1160°C时的145 MPa,CAP1400-2的

屈服强度随着固溶温度的提高变化较小;固溶温度对CAP1400-1和CAP1400-2的抗拉强度都没有显著的影响。同时,在不同温度固溶处理后的CAP1400-2屈服强度和抗拉强度均高于350°C强度指标,而CAP1400-1的拉伸强度却不能满足350°C拉伸强度要求,即 $C_{req}/N_{ieq}$ 对350°C拉伸性能的影响占主导地位。

研究表明,奥氏体不锈钢中少量的铁素体与奥氏体基体形成微细双相组织使位错滑移的阻力增大。因此,含有铁素体相的奥氏体不锈钢强度主要取决于铁素体含量,韧性主要取决于奥氏体含量<sup>[17]</sup>。CAP1400-2的 $C_{req}/N_{ieq}$ 约为CAP1400-1的1.2倍,较大的 $C_{req}/N_{ieq}$ 导致铁素体含量较高。同时,CAP1400-2中的铁素体多呈连续条块状分布,而CAP1400-1中的铁素体多呈岛状分布。铁素体形貌和分布的不同使其对位错滑移的阻力发生变化,从而导致两种成分不锈钢的拉伸强度出现明显差异。虽然不同的固溶处理温度会引起铁素体含量的变化,但是对力学性能的影响却没有不同 $C_{req}/N_{ieq}$ 的合金那么明显。其原因是,固溶温度的不同不仅使相比比例发生变化,也使奥氏体相和铁素体相中的合金元素发生重新分配。在同一种钢中合金元素在铁素体和奥氏体中的分配系数不是恒定的,随着加热温度的提高、相比比例的变化铁素体中的Cr、Mo、Si含量逐渐降低,Ni含量逐渐升高,而奥氏体中Ni



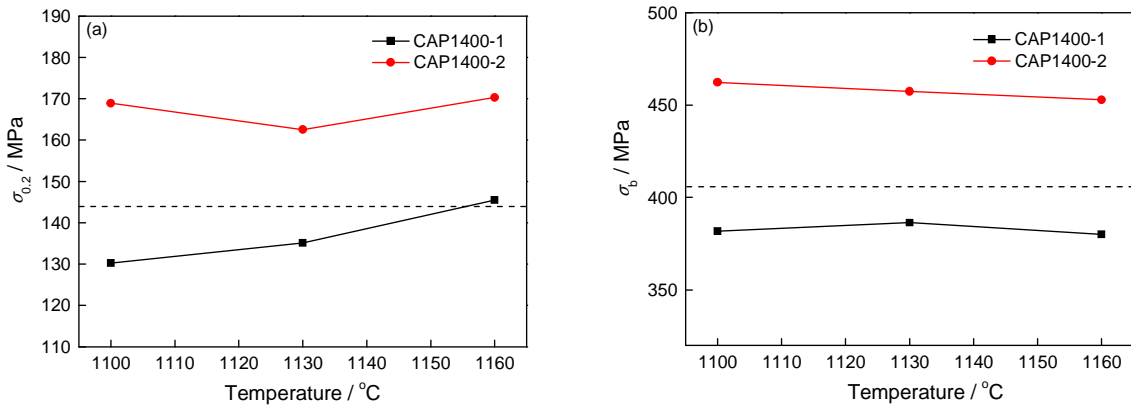


图8 CAP1400-1 和 CAP1400-2 的 350°C 拉伸时的屈服强度和抗拉强度  
 Fig.8 Yield strength (a) and tensile strength (b) of CAP1400-1 and CAP1400-2 at 350°C

元素降低, Cr、Mo 等铁素体形成元素逐渐升高, 两相的组成成分逐渐接近, 对力学性能的影响逐渐趋于一致<sup>[18]</sup>。因此, CAP1400-1 和 CAP1400-2 中由固溶温度引起的铁素体含量的变化对拉伸强度的影响并不明显。

图9给出了 CAP1400-1 和 CAP1400-2 的延伸率随固溶温度的变化情况, 可以看出, 随着固溶温度的提高延伸率略有下降, 并且 CAP1400-1 的延伸率比 CAP1400-2 高。这是 CAP1400-1 中铁素体含量较低导致的, 与奥氏体-铁素体双相不锈钢的韧塑性主要取决于奥氏体含量的结果一致。图10给出了在不同温度固溶处理后 CAP1400-1 和 CAP1400-2 的 350°C 拉伸断口 SEM 形貌。可以看出, 随着固溶温度的提高两种成分不锈钢的断口形貌变化不大, 断

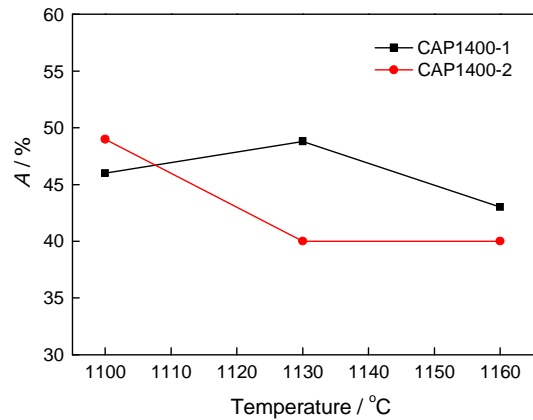


图9 固溶温度对 CAP1400-1 和 CAP1400-2 合金 350°C 拉伸延伸率的影响

Fig.9 Effect of solid solution temperature on the elongation of CAP1400-1 and CAP1400-2 steels at 350°C

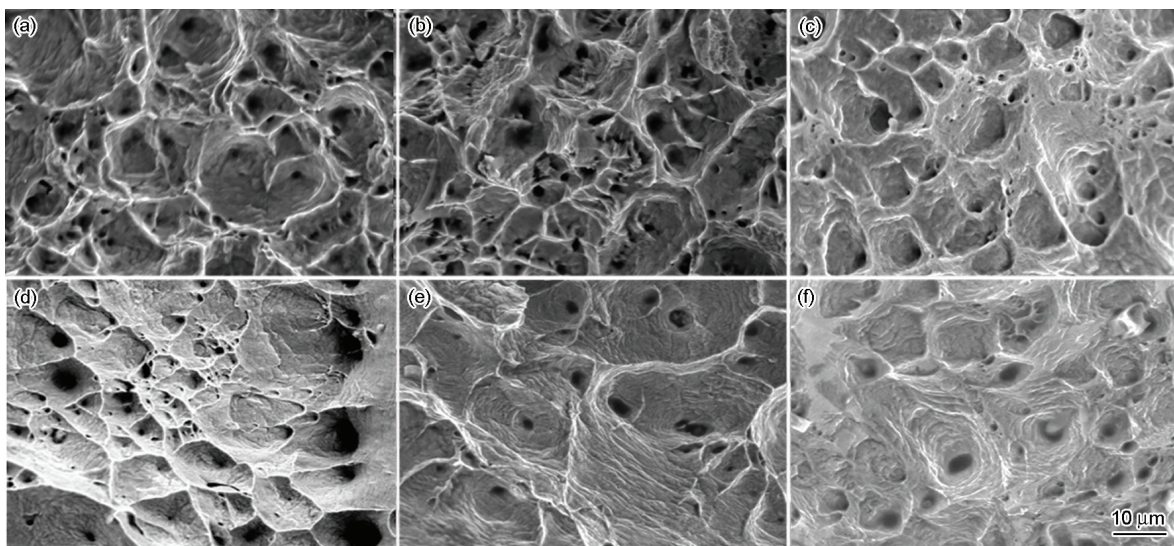


图10 在 350°C 固溶处理试样的拉伸断口微观形貌

Fig.10 Microstructure of tensile fracture at 350°C after solution treated at 1100°C (a), 1130°C (b), and 1160°C (c) for CAP1400-1 steeland solution treated at 1100°C (d), 1130°C (e), 1160°C (f) for CAP1400-2 steel

口上分布有大量韧窝,均表现为典型的微孔聚集型穿晶韧性断裂特征。

### 3 结论

(1) 随着 $Creq/Nieq$ 的增大CAP1400核主泵泵壳用奥氏体不锈钢铸态组织中铁素体的含量提高,350℃时的拉伸性能显著提高。

(2) 在1100℃~1200℃固溶温度范围内,随着固溶处理温度的提高CAP1400奥氏体不锈钢中铁素体的含量提高。但是,与钢中 $Creq/Nieq$ 的影响相比固溶处理对铁素体含量变化的影响较小。

(3) 当 $Creq/Nieq=1.22$ 时,CAP1400奥氏体不锈钢能满足核主泵泵壳350℃力学性能的要求。

### 参考文献

- [1] Flowers J W, Beck F H, Fontana M G. Corrosion and age hardening studies of some cast stainless alloys containing ferrite [J]. Corrosion, 1963, 19(5): 186
- [2] Moller G E. The successful use of austenitic stainless steels in sea water [J]. Society of Petroleum Engineers, 1976:101
- [3] McCaul C. A cavitation-resistant casting alloy for pumps-status after ten years' commercial use [C]. Second International Symposium on Advanced Materials for Fluid Machinery, 2004: 15
- [4] Mathew M D, Lietzan L M, Murty K L, et al. Low temperature aging embrittlement of CF-8 stainless steel [J]. Mater. Sci. Eng., A, 1999, 269(1): 186
- [5] Beck F H, Juppenlatz J, Wieser P F. Effects of ferrite and sensitization on intergranular and stress-corrosion behavior of cast stainless steels [J]. Astm Special Technical Publication, 1976
- [6] Chen J Z, Yan H B, Zheng Y M, et al. Influences of ferrite content on the performance of casting austenitic stainless steel CF-3M[J]. Development and Application of Materials, 2002, 17(6): 9  
(陈继志, 颜红兵, 郑咏梅等. 铁素体对铸造奥氏体不锈钢CF-3M性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2002, 17(6): 9)
- [7] Zhang H, Li S L, Liu G, et al. Effects of hot working on the microstructure and thermal ageing impact fracture behaviors of Z3CN20-09M duplex stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(5): 531  
(张海, 李时磊, 刘刚等. 热加工对Z3CN20-09M双相不锈钢组织及热老化冲击断裂行为的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(5): 531)
- [8] Li S L, Wang Y L, Li S X, et al. Effect of long term aging on the microstructure and mechanical properties of cast austenitic stainless steels [J]. Act. Metall. Sin., 2010, 46(10): 1186  
(李时磊, 王艳丽, 李树肖等. 长期热老化对铸造奥氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 金属学报, 2010, 46(10): 1186)
- [9] Man D H, Wang L F. Weld hot cracking causes and preventive measures of austenitic stainless steel [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(11): 181  
(满达虎, 王丽芳. 奥氏体不锈钢焊接热裂纹的成因及防止对策[J]. 热加工工艺, 2012, 41(11): 181)
- [10] Wang Y T. Study on regularity of austenitic stainless steel weld toughness and microstructure [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2012  
(王亚婷. 奥氏体不锈钢焊缝韧性与组织规律性研究[D]. 南京理工大学, 2012)
- [11] Ma J C, Yang Y S, Tong W H, et al. Microstructural evolution in AISI 304 stainless steel during directional solidification and subsequent solid-state transformation [J]. Mater. Sci. Eng., A, 2007, 444(1): 64
- [12] John C. Lippold, Damian J. Kotecki. Stainless Steel Welding Metallurgy and Weldability [M]. China Machine Press, 2008  
(John C. Lippold, Damian J. Kotecki [M]. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 机械工业出版社, 2008)
- [13] Zhang Y S, Zhang X Z, Tian X J, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316LN austenitic stainless steel as-cast[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(18): 180  
(张义帅, 张秀芝, 田香菊等. 加热规范对316LN铸态奥氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(18): 180)
- [14] Lei R G. Effect of the heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 316L[J]. Bao Steel Technology, 2009, 2009(5): 42  
(雷锐戈. 加热制度对316L铸坯微观组织和力学性能的影响[J]. 宝钢技术, 2009, 2009(5): 42)
- [15] Li Y, Kou H C, Liu M T, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical property of austenitic stainless steel[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(11-05): 37  
(李勇, 寇宏超, 柳木桐等. 热处理对奥氏体不锈钢00Cr18Ni10N组织和性能的影响[J]. 科技导报, 2011, 29(11-05): 37)
- [16] Deng S H, Zhang J J, Ye X H, et al. Influence of heat treatment on properties of 304 austenitic stainless steel by adding copper for nickel saving [J]. Hot Working Technology, 2010(14): 145  
(邓姝皓, 张金菊, 叶晓慧等. 热处理对含铜节镍奥氏体不锈钢性能的影响[J]. 热加工工艺, 2010(14): 145)
- [17] Lu S Y. Stainless Steel [M]. Atomic Energy Press, 1995  
(陆世英. 不锈钢[M]. 原子能出版社, 1995)
- [18] Wu J, et al. Duplex Stainless Steel [M]. Metallurgical Industry Press, 1999  
(吴玖等. 双相不锈钢[M]. 冶金工业出版社, 1999)