

# 大口径超级双相不锈钢阀体的研制

王行<sup>1, 2, 3</sup>, 王爱琴<sup>1</sup>, 李昌义<sup>2, 3</sup>, 禹兴胜<sup>2, 3</sup>, 谢敬佩<sup>1</sup>, 贾冠飞<sup>2, 3</sup>, 魏加赞<sup>2, 3</sup>, 胡中华<sup>2, 3</sup>

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023; 2. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南洛阳 471039;

3. 中信重工机械股份有限公司, 河南洛阳 471039)

**摘要:** 针对四代核电钠冷快堆循环水泵大口径超级双相不锈钢阀体铸件制造中出现的开裂、缩松、缩孔和冷隔等问题, 开展了第二相析出、铸造工艺和固溶冷却模拟工艺探索, 以研究其对铸件组织、性能和成形的影响。结果表明, 铸件冷却至1 000 °C左右打箱空冷, 析出第二相较少, 随着打箱温度降低, 第二相析出比例逐渐增加; 对铸件进行型线流畅设计、浇注系统和补缩系统等方面合理设计, 并经铸件凝固过程数值模拟, 预测铸造工艺实施结果良好; 当固溶冷却速率大于0.4 °C/s时, 可有效避免铸件组织中第二相的析出。根据工艺研究结果来生产阀体, 铸件固溶热处理后组织中 $\alpha$ 相和 $\gamma$ 相比比例接近1:1, 关键部位射线探伤满足技术标准要求, 铸件力学性能和耐腐蚀性能优异, 可较好地满足海水氯化物腐蚀介质工况要求。

**关键词:** 超级双相不锈钢; 阀体; 显微组织; 铸造工艺模拟

## 作者简介:

王行(1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为不锈钢材料的设计和开发。  
E-mail: wanghangred@163.com

## 通讯作者:

王爱琴, 女, 教授, 博士生导师, E-mail: aiqin\_wang888@163.com; 禹兴胜, 男, 高级工程师, E-mail: yuxingsheng2016@126.com

中图分类号: TG245;  
TG250.6

文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2022)12-1485-05

## 基金项目:

洛阳市重大科技专项(2021005A)。

## 收稿日期:

2022-02-22 收到初稿,  
2022-03-07 收到修订稿。

核电钠冷快堆循环水泵用超级双相不锈钢阀体作为先进第四代核能系统的主要部件, 其与海水长期接触过程中易产生孔蚀和缝隙腐蚀等, 要求具有高强度、高致密性, 较强耐氯化物腐蚀性能、耐流体和冲刷腐蚀性能, 超级双相不锈钢5A材质可较好地满足海水苛刻工况的要求<sup>[1-3]</sup>。随着合金含量的提高, 超级双相不锈钢制造难度也随之增大, 生产制造中在600~950 °C阶段易产生以 $\sigma$ 相为代表的脆性第二相及400~500 °C阶段铁素体发生脆性分解均易导致铸件开裂<sup>[4-7]</sup>。此外, 阀体铸件规格为DN2000, 几何尺寸为2 620 mm×2 265 mm×760 mm, 毛重5 000 kg, 壁厚20~150 mm, 局部部位壁厚差值较大, 应力易集中, 阀门轴孔处结构较为复杂, 铸件热节较多, 铸造工艺不当极易产生缩孔、裂纹、气孔、变形、粘砂、冷隔、浇不足、夹渣、尺寸精度低和射线探伤不合格等问题<sup>[8-12]</sup>。通过研究 $\sigma$ 相析出规律, 采用热打箱装炉及加速固溶冷却速度等措施, 有效解决了脆性相析出导致的铸件开裂问题; 通过合理设计铸型、浇注系统和补缩系统, 实现了大口径超级双相不锈钢阀体铸件的高质量铸造成形。

## 1 试验方法

原材料采用工业纯铁、金属铬、镍板、钼铁和氮化铬, 参照美国机械工程师协会标准《ASME SA-995》(2015版)5A成分范围如表1所示, 采用KGPS-100型中频感应炉进行熔炼。熔炼完成后浇注成若干标准双基尔试块, 在砂箱中加装铠装热电偶对试块凝固过程测温, 分别冷却至1 000 °C、800 °C、400 °C打箱空冷至室温, 并增加未空冷试块作对照。在基尔试块根部取样部位线切割规格为 $\Phi 18$  mm×30 mm金相试样, 并采用软件对第二相析出比例进行定量测量, 以研究第二相析出规律。试

表1 5A超级双相不锈钢标准成分  
Table 1 Nominal chemical composition of 5A super duplex stainless steel  $w_B$ /%

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N
≤0.03	≤1.50	≤1.00	≤0.04	≤0.04	24.0~26.0	6.0~8.0	4.0~5.0	0.10~0.30

样在1 080 ℃进行固溶处理, 以确保无第二相析出, 加工至 $\Phi 3$  mm  $\times$  10 mm。采用Formastor-F II全自动相变仪, 在真空状态下采用10 ℃/s速率加热至1 080 ℃保温20 min, 然后分别以0.05 ℃/s、0.1 ℃/s、0.2 ℃/s和0.4 ℃/s冷却速率冷却至室温, 以研究不同冷却速率对第二相析出的影响。

采用腐蚀液(氯化铁3 g, 盐酸40 mL及水100 mL溶液)蚀刻3~5 min, 在光学显微镜下(OM, ZEISS AXIO OBSERVER, Carl Zeiss AG, Jena, Germany)观察金相组织中第二相。采用MIAPS软件对组织中第二相含量进行测量统计。用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS EVO-18, Carl Zeiss AG, Jena, Germany)及附带能谱仪(EDS)观察第二相形貌, 并进行能谱分析。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 空冷温度对第二相析出的影响

图1所示为在不同温度下打箱空冷的金相组织。金

相组织均由浅色岛状奥氏体相、基体铁素体相和铁素体所分解的深色第二相组成。图1a所示为1 000 ℃打箱空冷组织, 可以看出, 在个别区域沿着铁素体和奥氏体相界面出现了少量第二相的析出。随着打箱温度降低, 两相交界处深色第二相析出比例增大, 在800 ℃打箱空冷条件下, 试验钢铸态组织中奥氏体相周围第二相析出比例约为10.3% (图1b); 400 ℃打箱空冷铸态组织第二相析出比例继续增加至约17.2% (图1c)。作为对比试块, 浇注后在砂型中缓冷至室温的组织第二相析出比例高达24.1% (图1d)。

图2所示为800 ℃打箱空冷组织的扫描组织。第二相以 $\sigma$ 相为代表, 属于TCP四方结构, 普遍认为通过 $\alpha \rightarrow \sigma (\chi) + \gamma_2$ 共析反应而生成<sup>[4-6]</sup>。能谱分析可以看出, 该区域(黑色框)的第二相成分富Cr、Mo, 含量分别高达27.45%和8.53%, 远高于基体中平均含量。此外, 该区域Ni含量仅为4.09%, 低于基体中含量。第二相属硬脆相, 在两相交界处析出极易在铸件应力作用

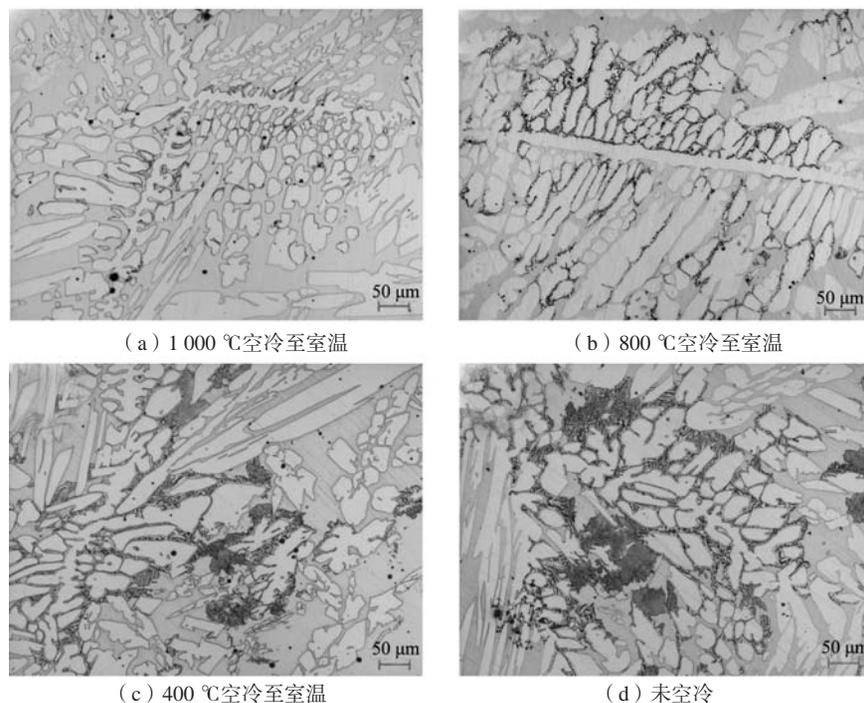


图1 不同温度空冷后第二相组织形貌

Fig. 1 Microstructure of the secondary phase after air cooling at different temperatures

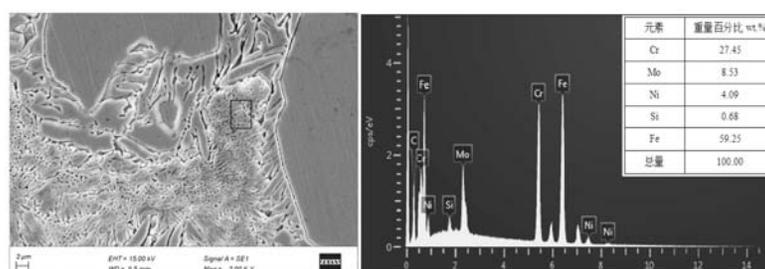


图2 第二相组织扫描形貌及能谱分析

Fig. 2 SEM images and energy spectrum analysis of the secondary phase

下出现裂纹导致铸件开裂<sup>[11-14]</sup>，生产中如何控制工艺参数以避免脆性相析出，成为解决超级双相不锈钢铸件开裂的关键。针对阀体铸件重量较大且壁厚较厚，传统冷打箱方式极有可能造成铸件开裂。因此，采用基尔试块进行工艺试验，以探索超级双相不锈钢5A材料特性，为实际生产工艺提供参考。根据冷却工艺试验结果，铸件浇注凝固冷却至900~1 100 ℃范围内热打箱装炉进行固溶热处理，固溶保温结束后快速入水冷却方案，能有效避免第二相析出导致铸件开裂的风险。

## 2.2 铸造工艺

大口径超级双相不锈钢阀体铸造工艺设计如图3a所示，在上、下法兰及轴孔等阀体铸件相应热节部位设置明、暗冒口，并辅助冷铁，提高冒口补缩效果；为使阀体铸件充型快且平稳、排气顺畅，采用内圈底

返式浇注系统，该系统不仅减少钢液流程，还可作为拉筋防止铸件变形，较适用于大规格阀体结构特点；为避免在铸件拐角处和壁厚差突变部位，特别是轴孔位置产生热节和应力集中，设计合适圆角以逐渐过渡进而避免铸件裂纹产生；为确保铸型具有较高强度、良好溃散性、较低发气量，采用酚醛树脂砂造型工艺，并涂刷高温涂料，浇注前对铸型进行充分烘烤。采用MAGMA软件进行数值模拟，结果如图3b-d所示，从图中可以看出，铸件疏松缩孔等缺陷少，凝固质量较好。针对阀体铸件5A材料低碳、高合金和高氮特点，采用“中频感应炉+VOD炉”双联精炼工艺。铸件浇注完成后热打箱，然后高温装炉实施固溶热处理，保温结束后水冷至室温，采用气刨并配合强制水冷切除浇冒口。

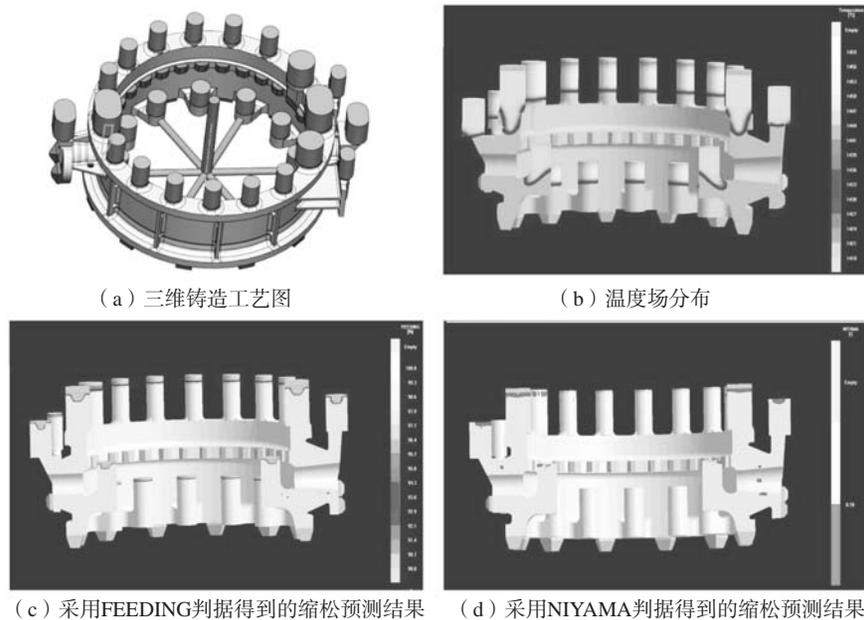


图3 铸造工艺图及铸件凝固过程数值模拟结果

Fig. 3 Casting process diagram and numerical simulation result of solidification process of casting

## 2.3 固溶冷速对组织的影响

采用Formastor-F II全自动相变仪对固溶态试样分别按照0.05 ℃/s、0.1 ℃/s、0.2 ℃/s和0.4 ℃/s的冷却速率冷却至室温，以研究固溶冷速对第二相析出的影响。图4为固溶保温后冷却速率对析出相的影响，可以看出，随着冷却速率的提高，第二相析出比例逐渐减少。图4a中冷却速率为0.05 ℃/s时，第二相大量析出分布在两相界面处，比例高达23.5%。当冷却速率增快至0.1 ℃/s后，第二相比比例减少至10.4%。而当冷却速率为0.2 ℃/s时，仍有少量第二相析出。当继续提高冷却速率至0.4 ℃/s时，金相组织为典型的铁素体和奥氏体两相组织，已无第二相析出（图4d）。阀体铸件最厚处达150 mm，附带浇道和冒口重达8 t，且超级双相不锈

钢导热系数较碳钢低，因此需保证阀体最厚处心部冷速大于0.4 ℃/s，并尽可能提高冷速，保温结束后出炉迅速冷却。铸件在固溶热处理冷却收缩过程中若出现第二相析出，则可能在铸件局部位置出现应力集中引发开裂导致报废。此外，若冷却速率不足，组织中残留着有害第二相将显著降低铸件的塑韧性和耐腐蚀性能，从而降低铸件使用寿命。因此，铸件在固溶保温结束后，生产中采用10 m × 18 m × 12 m淬火水槽（容积2 160 m<sup>3</sup>），同时开启循环冷却水量达12 800 m<sup>3</sup>/h，可保证实际冷却速率大于0.4 ℃/s，有效避免了第二相的析出，保证了铸件良好的综合力学性能和耐腐蚀性能。

阀体铸件经固溶热处理后，附铸的基尔试块试棒性能指标（表2）、有害相检验、铁素体含量均满足

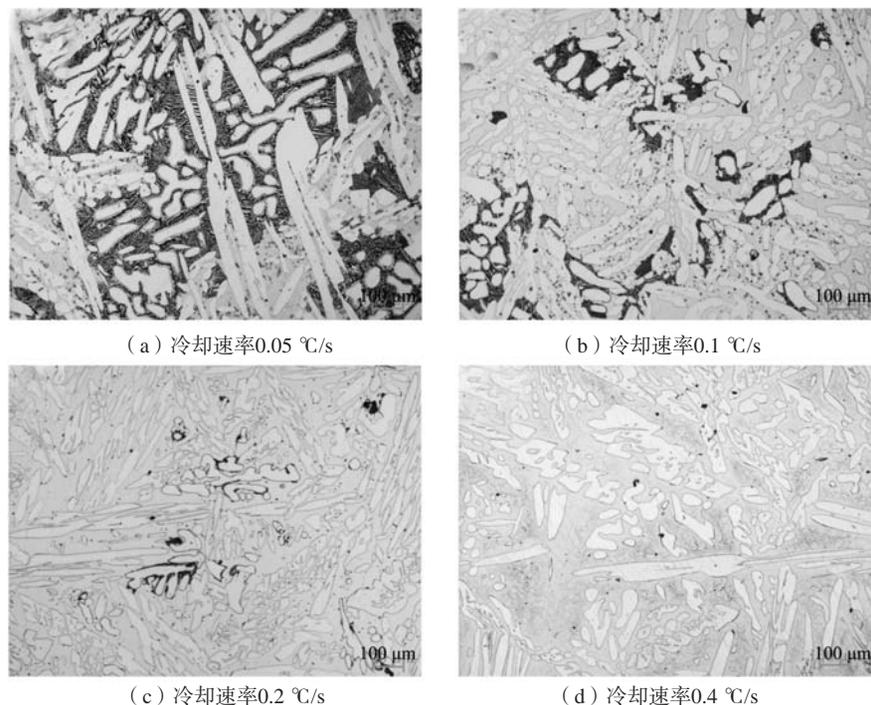


图4 不同冷却速率下金相组织

Fig. 4 Metallographic structure under different cooling rates

ASME SA-995M (2015版)要求,其中附铸试棒铁素体含量约为51.1% (图5a),两相比接近1:1。参照DIN EN ISO 3651-2 (1998版)晶间腐蚀C法40%硫酸铁试验煮沸20 h,试样压弯90°以上检验无裂纹。铸件经喷砂后表面质量优异 (图5b),目视检测无氧化皮、裂纹、疏松和夹砂等缺陷,密封区域渗透检测满足ASME NC-2576相关规定。铸件轴孔关键部位按照

ASTM E94/E94M (2017版)要求进行射线探伤,满足ASTM E446 (2015版)中不同缺陷类型验收标准,即气孔不超过A2级别,夹砂和夹渣不超过B3级别,缩孔不超过C3级别,且不存在热裂、裂纹和夹杂。

### 3 结束语

大口径超级双相不锈钢5A阀体铸件质量要求高、制造难度大,通过对铸件型线流畅设计、浇注系统和补缩系统等方面的设计,实现高质量的凝固成形。通过对第二相析出特性研究,采用高温热打箱装炉和控制固溶冷速措施,可有效避免铸件开裂。研制出的大口径阀体铸件力学性能和耐腐蚀性能指标优异,内在质量良好,可较好满足四代核电钠冷快堆循环水泵用超级双相不锈钢铸件各项技术指标要求。

表2 阀体铸件力学性能

Table 2 The mechanical properties of the valve body casting

项目	屈服 强度/MPa	抗拉 强度/MPa	伸长率/%	断面收 缩率Z/%	-46 °CKV8 冲击/J
标准	≥515	≥690	≥18	/	≥54
试验值1	585	757	33	71	221、226、243
试验值2	572	750	37	65	238、182、212

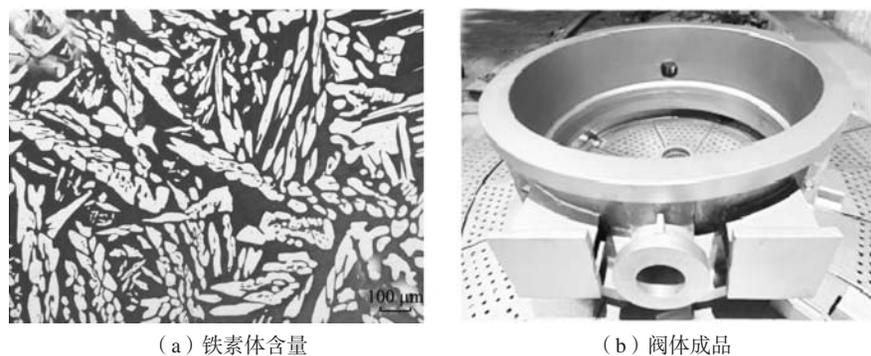


图5 阀体铁素体含量及成品照片

Fig. 5 Ferrite content and finished products of valve body

## 参考文献:

- [1] NILSSONJO. Super duplex stainless steels [J]. *Materials Science and Technology*, 1992 ( 8 ) : 685-700.
- [2] WOZNIAKMJ, GLOWACKAA, KOZUBOWSKIJA. Magnetic properties of austeno-ferritic stainless steel after cathodic hydrogen charging [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 406: 626-629.
- [3] 吴玖. 双相不锈钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [4] MARTINSM, CASTELETILC. Sigma phase morphologies in cast and aged super duplex stainless steel [J]. *Materials Characterization*, 2009, 60: 792-795.
- [5] ESCRIBADM, MATERNA-MORRIS E, PLAUTRL, et al. Chi-phase precipitation in a duplex stainless steel [J]. *Materials Characterization*, 2009, 60: 1214-1219.
- [6] LOPEZ N, CID M, PUIGGALIM. Influence of  $\sigma$ -phase on mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steels [J]. *Corrosion Science*, 1999, 41: 1615-1631.
- [7] ZHU Z H, ZHANG W D, TU X H, et al. Effect of sigma phase precipitation on microstructure and properties of cast ZG0Cr26Ni5Mo3Cu3 duplex stainless steel under different heat treatments [J]. *China Foundry*, 2018, 15 ( 3 ) : 182-188.
- [8] 李杰, 王景成, 赵芳欣, 等. 双相不锈钢铸件裂纹的形成原因及对策 [J]. *铸造*, 2015, 64 ( 6 ) : 590-592.
- [9] 胡学文, 冀文哲, 张涛, 等. CD3MWCuN 超级双相不锈钢精炼工艺及应用 [J]. *铸造*, 2018, 67 ( 9 ) : 846-848.
- [10] 周红, 闵正清, 欧家才, 等. 百万千瓦级核电站海水循环泵双相不锈钢叶轮的研制 [J]. *铸造*, 2011, 60 ( 12 ) : 1171-1174.
- [11] 张东红, 于汇峰, 王喜玉, 等. A890-5A 超级双相不锈钢核泵铸件裂纹缺陷的消除 [J]. *热加工工艺*, 2014, 43 ( 1 ) : 90-92.
- [12] 李鉴光, 陈继志, 李镜银, 等. 5A 超级双相不锈钢导流壳铸件冷裂分析及解决对策 [J]. *铸造技术*, 2014, 35 ( 4 ) : 832-833.
- [13] 詹传刚. 超级双相不锈钢叶轮的生产 [J]. *铸造技术*, 2018, 39 ( 9 ) : 1972-1974.
- [14] 陈爽, 廖兴银, 郭江, 等. 超级双相不锈钢海水循环泵铸造工艺 [J]. *铸造*, 2013, 62 ( 11 ) : 1134-1136.

---

## Developing of Large Diameter Super Duplex Stainless Steel Valve Body Casting

WANG Hang<sup>1,2,3</sup>, WANG Ai-qin<sup>1</sup>, LI Chang-yi<sup>2,3</sup>, YU Xing-sheng<sup>2,3</sup>, XIE Jing-pei<sup>1</sup>, JIA Guan-fei<sup>2,3</sup>, WEI Jia-zan<sup>2,3</sup>, HU Zhong-hua<sup>2,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. Luoyang CITIC HIC Casting & Forging Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China; 3. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China)

### Abstract:

Aiming at the problems of the cracks, the shrinkage, the dispersed shrinkage, the cold shut, and so on in the manufacturing process of large diameter super duplex stainless steel valve body casting for circulating water pump of the fourth generation nuclear power sodium cooled fast reactor, the simulation experiments of second phase precipitation, casting process and solid solution cooling rate were carried out to study the effects on the microstructures, the properties and the forming of the casting. The results show that when the casting is cooled to about 1 000 °C, the second phase precipitates less, and the proportion of the second phase precipitates gradually increases with the decrease of the pumping temperature. The casting pattern line fluency design, the gating and feeding systems design, and other reasonable designs had been finished, and the prediction result was well through numerical simulation of solidification process of the casting. When the solution cooling rate is more than 0.4 °C /s, the precipitation of the secondary phase can be effectively avoided. Based on above the results, the valve body was manufactured. After solution heat treatment, the ratio of  $\alpha$  phase to  $\gamma$  phase in the structure of the casting is close to 1:1, and the radiographic flaw detection of key parts meets the technical standard specifications. The mechanical and corrosion resistant properties of the casting are excellent, meeting the working condition requirements of the seawater chloride corrosive medium.

**Key words:** super duplex stainless steel; valve body; microstructure; casting process simulation

---