



## 冷处理对S46500超高强度不锈钢组织和性能的影响

徐 锋, 孙 强, 陆 瑞

(宝武特种冶金有限公司技术中心, 上海 200940)

**摘 要:**研究了S46500超高强度不锈钢在982 °C固溶保温后,经水冷至室温、冰冷(0 °C)和深冷(-73 °C)三种不同的冷处理方式的试样,再经时效处理(510 °C/4 h),对其组织和性能的影响。结果表明:经过-73 °C深冷处理与冷却至室温的试样相比,拉伸强度和屈服强度分别提高292 MPa和295 MPa。塑性和韧性略有下降,延伸率从13%(室温)降低到10.5%(深冷)。冲击功从64 J(室温)降低到48 J(深冷)。随着冷处理温度的降低,逆转奥氏体含量逐步减少,室温与深冷相比,奥氏体含量从8.2%降低到6.6%。

**关键词:**S46500 不锈钢; 冷处理; 力学性能; 奥氏体含量

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2023-00062 **中图分类号:**TG156

## Effect of Cold Treatment on Microstructure and Properties of S46500 Ultra High Strength Stainless Steel

Xu Feng, Sun Qiang, Lu Rui

(R&D Center, BAOWU Special Metallurgy Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

**Abstract:** Investigated the effects of three different methods of cold treatment (air cooling to room temperature, 0 °C ice water treatment, -73 °C cryogenic treatment) on the microstructure and properties of S46500 ultra high strength stainless steel after solid solution holding at 982 °C and aging treatment at 510 °C/4 h. The results showed that: After -73 °C cryogenic cooling treatment, the tensile strength and yield strength were increased respectively by 292 MPa and 295 MPa, compared to the sample cooled to room temperature. Plasticity and toughness decreased slightly, elongation reduced from 13% (room temperature) to 10.5% (cryogenic temperature). The impact was reduced from 64 J (room temperature) to 48 J (cryogenic temperature). With the decrease of cold treatment temperature, the reverse austenite content gradually decreased, and the austenite content decreased from 8.2% to 6.6% compared with that of cryogenic temperature at room temperature.

**Key Words:** S46500 Stainless Steel; Cold Treatment; Mechanical Property; Austenite Content

S46500 (Custom465) 钢是一种新型的马氏体沉淀硬化不锈钢,由于具有良好的断裂韧性和耐应力腐蚀性能,已经在医疗器械、航空航天、核能等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。作为沉淀硬化不锈钢,S46500 不锈钢的主要强化机制是通过固溶处理和时效处理,分别发生马氏体相变和时效析出第二相金属间化合物来获得超高的强度( $R_m \geq 1\ 400$  MPa),同时保持良好的韧性和塑性。

相关研究显示,S46500 不锈钢的时效析出强化相为  $Ni_3Ti$ ,通过  $Ni_3Ti$  在基体中弥散分布使 S46500 不锈钢得到有效的强化<sup>[3-7]</sup>。陈嘉砚等人<sup>[8]</sup>研究发现,S46500 钢的最佳固溶处理温度为 900 ~ 950 °C,固溶处理温度过高时,由于晶粒长大,钢的韧性迅速下降。而固溶处理温度过低时,由于产生 Laves 相和  $\chi$  相,使固溶体中 Ti 元素含量低,导致后续时效

过程中  $Ni_3Ti$  强化相析出不充分,钢的强度不足。李楠等人<sup>[9]</sup>的研究显示,S46500 不锈钢经过 480 ~ 510 °C 时效后,具有较高的强度。时效温度高于 510 °C 时,钢的拉伸强度明显下降,塑性和冲击韧性较高,因此,510 °C 时效可作为 S46500 不锈钢的优化时效工艺。研究还显示<sup>[9-10]</sup>,时效温度高于 510 °C 时,板条马氏体之间生成了数量较多的逆转变奥氏体,可以明显提高 S46500 不锈钢的韧性。

尽管已经有大量关于热处理工艺对沉淀硬化不锈钢显微组织、相组成和力学性能影响的研究<sup>[3-18]</sup>,但很少见关于冷却方式对 S46500 不锈钢组织及性能方面的研究。因此,研究 S46500 不锈钢在固溶保温后,不同的冷处理工艺对其组织和性能的影响,对于生产应用和理论研究都具有重要的意义。

## 1 试验材料与方法

试验采用真空感应加真空自耗方式冶炼 5 t 的 S46500 不锈钢铸锭。化学成分(质量分数,%)为: C: 0.005、Si: 0.02、Mn: 0.02、S: 0.001、P: 0.003、Cr: 12.50、Ni: 10.75、Mo: 1.25、Ti: 1.80。将铸锭加热到 1 200 °C 进行开坯锻造,经多次镦粗和拔长变形,获得直径为 300 mm 的大规格棒材。经退火处理后,使用带锯从棒材端部切取 20 mm 厚的横截面试样片,用于理化性能检测和分析。

使用线切割在横截面试样片的二分之一半径区域,切取拉伸试样、冲击试样和金相试样。参照 AMS5936—2007 标准规定的固溶处理温度,试样首先在马弗炉中加热到 982 °C 保温 1 h。分别采用水冷至室温、水冷至室温在冰水混合物中(温度为 0 °C)保持 2 h、水冷至室温用 -73 °C 深冷处理 8 h 等三种方式进行冷处理。经上述冷处理后的试样,按照 AMS5936—2007 标准规定的时效温度,在 510 °C 进行时效处理并保温 4 h。按照 GB/T228.1—2010 和 GB/T229—2020 对上述三种不同工艺制度处理的试样进行室温拉伸和室温冲击测试。使用 ZEISS Axio Imager A2m 型光学显微镜进行显微组织分析。使用 ZEISS Ultr55 扫描电子显微镜观察室温拉伸和室温冲击断口形貌。使用 D/max-2550/PC XRD 衍射仪检测试样中奥氏体含量。

## 2 试验结果与分析

S46500 不锈钢经过三种不同方式冷处理后的力学性能检测结果如图 1 所示。固溶处理后冷处理方式对材料的力学性能影响明显。随着冷处理温度的降低,材料的拉伸强度和屈服强度有明显提高,塑性和韧性下降。从图 1 中可以看出,经过 -73 °C 深冷处理后的试样与冷却到室温的试样相比,拉伸强度和屈服强度分别提高了 292 MPa 和

295 MPa。试样的延伸率从室温处理后的 13% 降低到深冷处理后的 10.5%。与冷却到室温的试样相比,经过 -73 °C 深冷处理后的试样冲击功从 64 J 降低到 48 J。

使用扫描电镜观察三种不同方式冷处理后的拉伸试样断口形貌,如图 2 所示,三种不同方式冷处理后的拉伸试样均呈现出杯锥状断口形貌,断口中心纤维区呈椭圆形,表面比较粗糙,如图 2(a, c, e)。其中冷却到室温的试样,断口中心纤维区可以观察到大小不同,深浅不一的各种韧窝,如图 2(b)。经过冰冷处理的试样,断口中心纤维区韧窝形貌的尺寸与分布特征与冷却到室温的试样基本相同,如图 2(d)。经过深冷处理后的试样,断口中心区各种韧窝的数量相对较少,并可以观察到较为平坦的小面积的断裂平面,如图 2(f)。

三种不同方式冷处理后的冲击试样断口 SEM 形貌如图 3 所示。通过对比看出,冲击断口形貌起伏变化明显。其中冷却到室温的试样,如图 3(a),可以观察到尺寸不同和深浅不一的撕裂棱,如图 3(b)。经过冰冷处理的试样,如图 3(c),可以观察到撕裂棱与较为平坦的小面积断裂平面共存的形貌,如图 3(d)。经过深冷处理的试样,如图 3(e),与上述两种处理的试样相比,形貌主要以不同位相的准解理小平面为主,如图 3(f)。

S46500 不锈钢经不同方式冷处理后的显微组织形貌如图 4 所示。可以看出,试样的基体组织均为回火马氏体  $\alpha'$ 。这些低碳回火马氏体  $\alpha'$  以不同位向的板条束形态分布于原奥氏体晶粒轮廓内。原奥氏体晶粒尺寸大概在 60 ~ 120  $\mu\text{m}$ 。

利用 XRD 对金相试样进行物相分析。结果表明,在未做时效处理前,试样中的相主要由马氏体  $\alpha'$  和残余奥氏体  $\gamma$  组成,如图 5(a)。经过时效处理后,试样中的相主要由回火马氏体  $\alpha'$  和逆转奥氏体

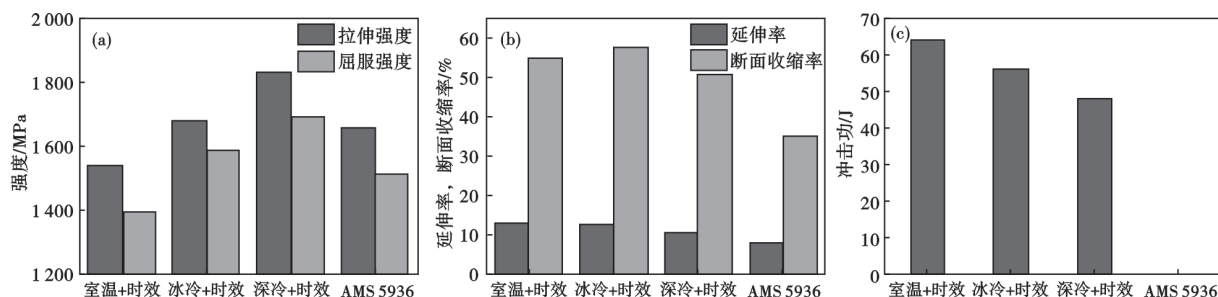


图 1 不同冷处理后 S46500 不锈钢的力学性能:(a)强度,(b)塑性,(c)冲击功

Fig. 1 Mechanical properties of S46500 stainless steel under different cooling conditions : (a) strength , (b) plasticity , (c) impact work

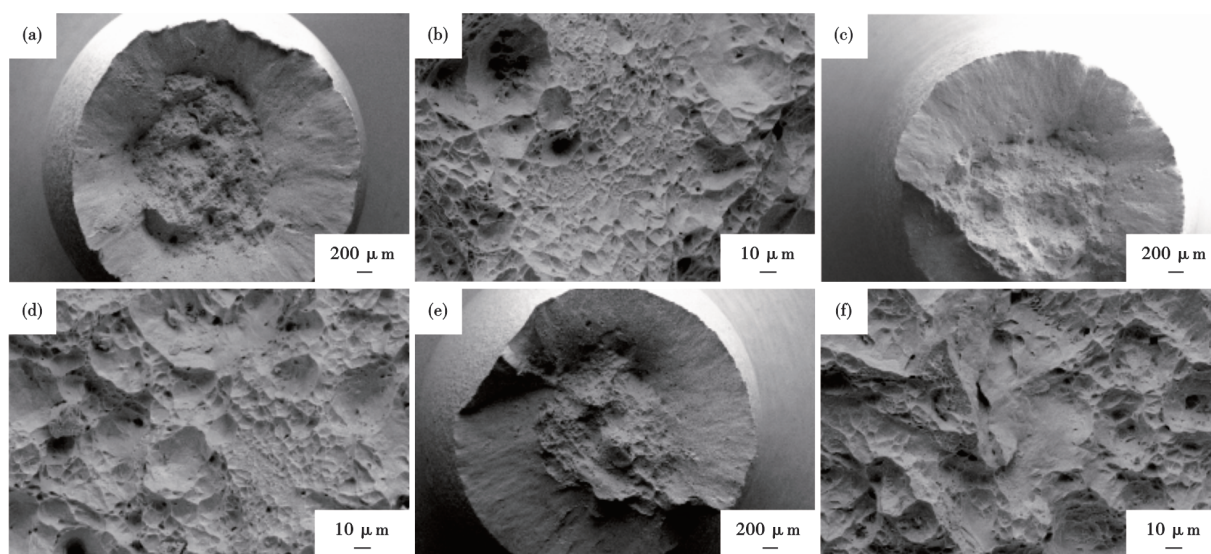


图2 不同冷处理后 S46500 不锈钢的拉伸断口形貌:(a)(b)室温+时效,(c)(d)冰冷+时效,(e)(f)深冷+时效

Fig. 2 Tensile fracture morphology of S46500 stainless steel under different cold treatment : (a) (b) Room temperature treatment+Aging , (c) (d) Ice water treatment+Aging , (e) (f)Cryogenic treatment+Aging

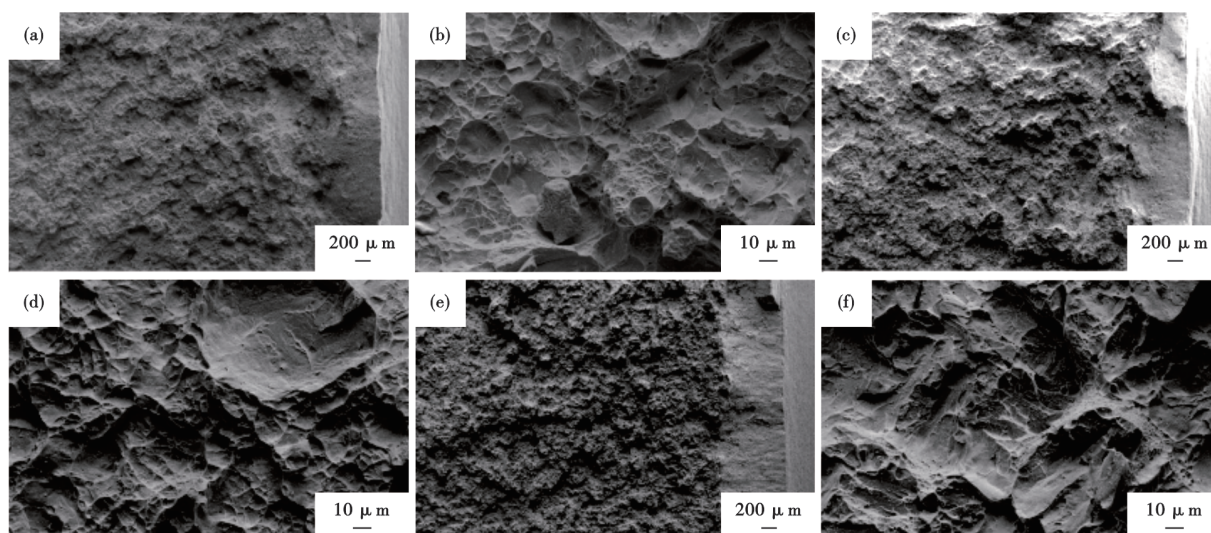


图3 不同冷处理后 S46500 不锈钢的冲击断口形貌:(a)(b)室温+时效,(c)(d)冰冷+时效,(e)(f)深冷+时效

Fig. 3 Impact fracture morphology of S46500 stainless steel under different cryogenic treatment : (a) (b) Room temperature treatment+Aging , (c) (d) Ice water treatment+Aging , (e) (f)Cryogenic treatment+Aging

$\gamma$ 组成,如图5(b)。

数据定量分析显示,冷处理方式和时效处理对材料的奥氏体含量影响明显。随着冷处理温度的降低,材料中的奥氏体含量逐步下降。在未做时效处理的试样中,钢的奥氏体含量从2.28%降低到0.81%,在做过时效处理的试样中,奥氏体含量从8.2%降低到6.6%,如图5(c)。

由上述分析结果可以看出,在固溶处理和时效处理相同的前提下,S46500 不锈钢固溶处理的不同冷处理方式对其力学性能和逆转奥氏体含量影响

显著。由文献[9~10]表明,经过时效处理后的 S46500 不锈钢中奥氏体主要是回火马氏体  $\alpha'$  通过扩散转变形成的逆转奥氏体。刘振宝和梁剑雄等人<sup>[12-14]</sup>的研究显示,沉淀硬化类高强度不锈钢中的逆转奥氏体含量对改善钢的塑韧性起重要作用。逆转奥氏体以薄膜状的形态分布于回火马氏体板条之间。这些回火马氏体板条束对原始奥氏体晶粒进行了分割。当钢受到外力变形和冲击时,裂纹的扩展将会遇到逆转奥氏体与马氏体组织间的大角度相界并受到阻碍,使裂纹容易在此发生偏转,

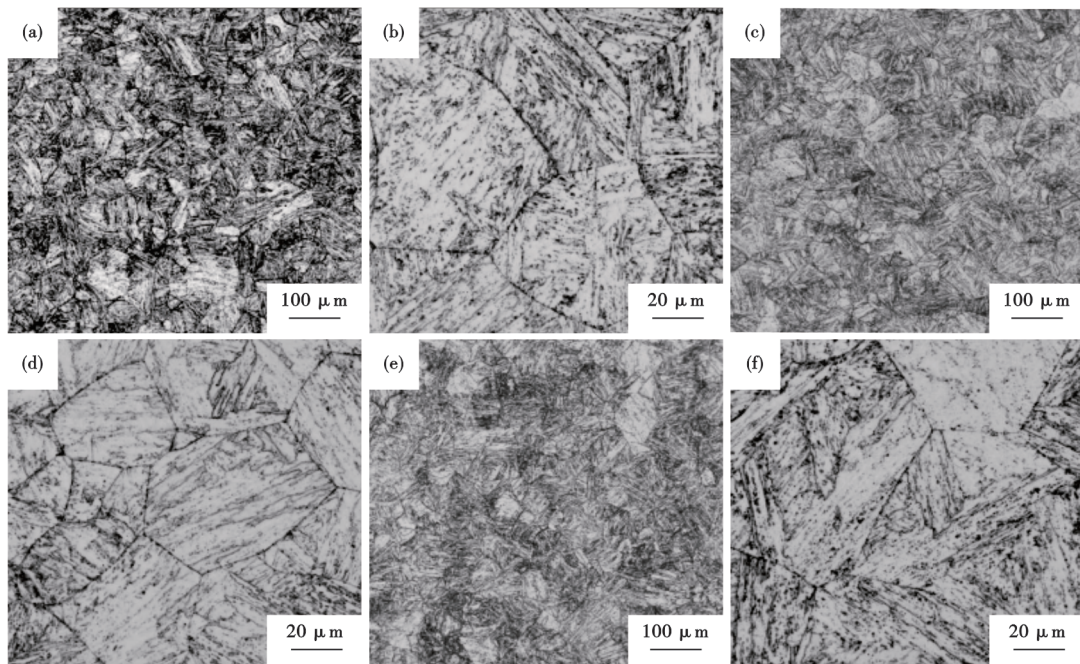


图4 不同冷处理后S46500不锈钢的显微组织:(a)(b)室温+时效,(c)(d)冰冷+时效,(e)(f)深冷+时效

Fig. 4 Microstructure of S46500 stainless steel under different cryogenic treatment : (a) (b) Room temperature treatment+Aging , (c) (d) Ice water treatment+Aging , (e) (f) Cryogenic treatment+Aging

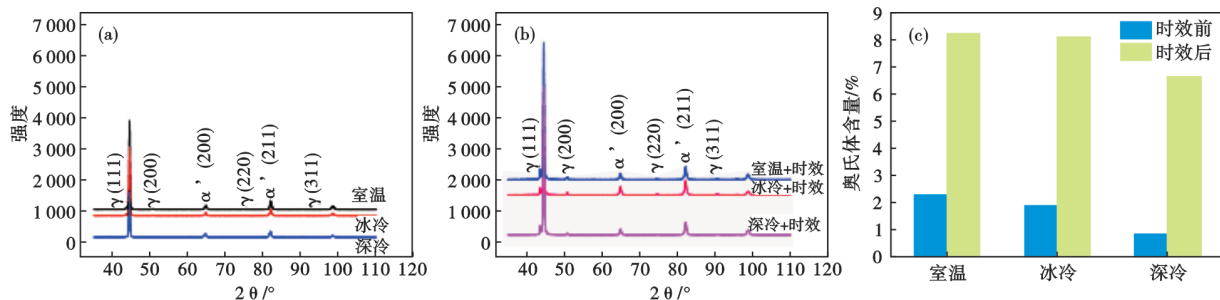


图5 不同冷处理后S46500不锈钢的XRD相分析:(a)时效前的X射线衍射谱,(b)时效后的X射线衍射谱,(c)奥氏体含量  
Fig. 5 XRD analysis of S46500 stainless steel under different cooling conditions : (a) X-ray diffraction patterns before aging , (b) X-ray diffraction patterns after aging , (c) Austenite content

增加裂纹的扩展功,使得冲击吸收能量提高,减少裂纹尖端的应力集中,使裂纹扩展缓慢,从而改善钢的韧性。

因此,冷却到室温的试样中,由于逆转奥氏体含量多,钢的强度较低,塑性和冲击韧性较高,断口分析时可以观察到尺寸不同和深浅不一的撕裂棱。当冷处理温度降低到-73℃,逆转奥氏体含量减少,材料强度显著提高,此时塑性和冲击韧性降低,断口中可看到以不同位相的准解理小平面对准的形貌。

### 3 结论

在固溶保温(982℃/1h)和时效处理(510℃/4h)相同的前提下,分别冷却至室温、冰冷(0℃)和深冷(-73℃)三种不同的冷处理方式对S46500不锈钢力

学性能和逆转奥氏体含量影响明显。

(1)经过-73℃深冷处理与冷却到室温的试样相比,随着冷处理温度的降低,S46500不锈钢的拉伸强度和屈服强度有显著提高(分别提高了292MPa和295MPa)。塑性和韧性略有下降,延伸率13%(室温)降低到10.5%(深冷),冲击功从64J(室温)降低到48J(深冷)。

(2)室温与-73℃深冷相比,奥氏体含量从8.2%降低到6.6%,随着冷处理温度的降低,逆转奥氏体含量逐步减少。

(3)S46500不锈钢中逆转奥氏体的含量对改善钢的塑韧性起重要作用。逆转奥氏体含量多,S46500不锈钢的强度低,塑性和冲击韧性好。逆转

奥氏体含量少, S46500 不锈钢的强度高, 塑性和冲击韧性略有下降。

### 参考文献

- [1] [https://www.carpentertechnology.com/globalassets/literature-files/cartech-custom-465\\_fact-shesh](https://www.carpentertechnology.com/globalassets/literature-files/cartech-custom-465_fact-shesh).
- [2] Daymond B T, Binot N, Schmidt M L, et al. Development of custom 465<sup>®</sup> corrosion-resisting steel for landing gear applications [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(4): 1539-1553.
- [3] Chen C Y, Chiu P H, Liu W S, et al. Interaction between  $\eta$ -Ni<sub>3</sub>Ti and reversed austenite within Custom 465 stainless steel: Experimental evidence and related patents investigation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 839: 142852.
- [4] Yang Z, Liu Z B, Liang J X, et al. Correlation between the microstructure and hydrogen embrittlement resistance in a precipitation-hardened martensitic stainless steel [J]. *Corrosion Science*, 2021, 182: 109260.
- [5] Shmulevitch M, Ifergane S, Eliaz N, et al. The effect of the elastic energy on the shape and orientation relations of  $\eta$ -Ni<sub>3</sub>Ti precipitates in lath martensite [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 921: 165935.
- [6] Zhang C, Wang C, Zhang S L, et al. Effect of aging temperature on the precipitation behavior and mechanical properties of Fe-Cr-Ni maraging stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 806: 140763.
- [7] 陈嘉砚, 刘江, 杨卓越, 等. 马氏体时效不锈钢时效析出相及位向关系的研究 [J]. *钢铁*, 2008, 43(3): 81-85.
- [8] 陈嘉砚, 刘江, 杨卓越, 等. 固溶温度对 Custom 465 钢组织与性能的影响 [J]. *钢铁*, 2008, 43(1): 73-75.
- [9] 李楠, 陈嘉砚, 龙晋明. Custom 465 马氏体时效不锈钢的强韧化特征及工艺优化 [J]. *物理测试*, 2005, 23(6): 4-6.
- [10] 陈嘉砚, 杨卓越, 宋维顺, 等. 时效温度对 Custom 465 钢力学性能的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 2008, 20(12): 31-34.
- [11] 张一. 00Cr13Ni6MoNb 马氏体时效不锈钢中的  $\alpha' \rightarrow \gamma$  转变 [J]. *金属学报*, 1982, 18(4): 395-401.
- [12] 刘振宝, 杨志勇, 梁剑雄, 等. 高强度不锈钢中逆转变奥氏体的形成动力学与析出行为 [J]. *材料热处理学报*, 2010, 31(6): 39-44.
- [13] 梁剑雄, 刘振宝, 杨志勇. 高强不锈钢的发展与应用技术 [J]. *宇航材料工艺*, 2013(3): 1-11.
- [14] 张良. 0Cr13Ni8Mo2Al 不锈钢的热变形行为与热处理工艺研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [15] 卫争艳, 徐梅, 谭国华. 时效处理对 05Cr17Ni4Cu4Nb 马氏体沉淀硬化不锈钢力学性能及组织的影响 [J]. *特殊钢*, 2021, 42(5): 85-88.
- [16] 任艳茹, 刘周利, 杨维宇, 等. 固溶温度对新型无钴马氏体时效钢 00Ni14Cr3Mo3Ti 冲击性能的影响 [J]. *特殊钢*, 2020, 41(1): 64-67.
- [17] 董晓亮, 张秀丽, 许广鹏, 等.  $\Phi 300$  mm S53 马氏体时效强化钢环状花样低倍组织分析及工艺改进 [J]. *特殊钢*, 2022, 43(1): 69-72.
- [18] 刘杰, 叶茂, 姜枫, 等. 固溶后冷处理对 PH13-8Mo 马氏体不锈钢组织及性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2018, 43(2): 156-159.

《特殊钢》期刊官方投稿网站

[www.specialsteeljournal.com](http://www.specialsteeljournal.com)

地址: 湖北省黄石市黄石大道 316 号、大冶特殊钢有限公司《特殊钢》杂志社

邮编: 435001 咨询电话: 15961618632 19371518672 0510-80673212

《特殊钢》编辑部邮箱: E-mail: tsghs@sina.com