

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3278

热处理工艺对 06Cr16Ni5Mo 不锈钢组织与力学性能的影响

潘 兴^{1,3}, 易出山², 黄秋玉², 吴剑涛^{1,3}, 邵文宝^{1,3}, 范 瑜^{1,3}

(1. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北 涿州 072750; 2. 中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002; 3. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

摘 要: 06Cr16Ni5Mo 不锈钢对半机匣作为航空发动机压气机的重要组成结构, 除需具备良好的耐腐蚀性和强度外, 对铸件硬度也提出了较高的要求, 须控制在 221~294 HBW。对 06Cr16Ni5Mo 不锈钢试样进行不同淬火温度和回火温度的热处理, 研究热处理工艺对试样组织和力学性能的影响。结果表明, 随着淬火温度的升高, 拉伸强度先增加后降低, 而屈服强度先降低后升高, 塑性和韧性先降低后升高, 硬度逐渐增加。在淬火温度为 1 070 °C 时, 合金的抗拉强度达到最大, 塑韧性较高, 硬度值较大。随着回火温度的升高, 强度和硬度先降低后升高, 塑性先降低后升高再降低, 韧性先升高后降低再升高。回火温度在 580~650 °C 范围时, 合金的抗拉强度、塑性、韧性和硬度均满足技术条件要求。

关键词: 06Cr16Ni5Mo 不锈钢; 热处理工艺; 金相组织; 力学性能

中图分类号: TG161

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)11-1099-06

Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of 06Cr16Ni5Mo Stainless Steel

PAN Xing^{1,3}, YI Chushan², HUANG Qiuyu², WU Jiantao^{1,3}, SHAO Wenbao^{1,3}, FAN Yu^{1,3}

(1. Dekai Intelligent Casting Co., Ltd., Zhuozhou 072750, China; 2. Aecc South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China; 3. Beijing Cisri-Gaona Materials Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: As an important component of aviation engine compressors, stainless steel half casings not only need to have good corrosion resistance and strength but also have very high hardness requirements, which must be controlled at 221~294 HBW. 06Cr16Ni5Mo stainless steel was heat treated at different quenching temperatures and tempering temperatures, and the effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of the samples were studied. The results show that with increasing quenching temperature, the tensile strength increases and then decreases, the yield strength decrease and then increases, the plasticity and toughness decrease and then increase, and the hardness gradually increases. At a quenching temperature of 1 070 °C, the tensile strength of the alloy reaches a maximum, the plastic toughness increases, and the hardness increases. With increasing tempering temperature, the strength and hardness first decrease and then increase, the plasticity first decreases, then increases, and finally decreases, while the toughness first increases, then decreases and finally increases. When the tempering temperature is in the range of 580~650 °C, the tensile strength, plasticity, toughness and hardness of the alloy all meet the technical conditions.

Key words: 06Cr16Ni5Mo stainless steel; heat treatment process; metallographic structure; mechanical properties

对半机匣作为航空发动机压气机的重要组成部分, 工作环境十分恶劣, 不仅要在高温环境下工作, 还要承受一般腐蚀介质侵蚀、空蚀等多种工况。因此要求对半机匣不仅具有较高的强度和韧性, 还要有良好的耐腐蚀性。同时为了便于加工, 材料硬

度也必须在要求的范围内。目前对半机匣的力学性能指标是: 抗拉强度 $\sigma_b \geq 750$ MPa、屈服强度 $\sigma_{0.2} \geq 550$ MPa、伸长率 $A \geq 15\%$ 、面缩率 $Z \geq 35\%$ 、冲击功 $A_{KV} \geq 50$ J, 布氏硬度(HBW): 221~294。对半机匣使用 06Cr16Ni5Mo 合金精密铸造而成。06Cr16Ni5Mo

收稿日期: 2023-11-23

作者简介: 潘 兴, 1997 年生, 硕士, 初级工程师, 主要从事高温合金熔模精密铸造方面的工作。Email: 171393315@qq.com

引用格式: 潘兴, 易出山, 黄秋玉, 吴剑涛, 邵文宝, 范瑜. 热处理工艺对 06Cr16Ni5Mo 不锈钢组织与力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(11): 1099-1104.

PAN X, YI C S, HUANG Q Y, WU J T, SHAO W B, FAN Y. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 06Cr16Ni5Mo stainless steel[J]. Foundry Technology, 2024, 45(11): 1099-1104.

是超低碳马氏体不锈钢^[4],该合金具有很好的塑形,耐腐蚀能力。研究表明,不同热处理工艺对于06Cr16Ni5Mo合金的组合和性能有很大的影响^[5-10],工业上常采用的热处理工艺是淬火+回火处理^[11-13]。

本文通过对06Cr16Ni5Mo合金试样在不同淬火和回火温度下热处理试验,对不同热处理条件下合金相的析出、转变对性能影响进行研究,确定合金及机匣最佳热处理工艺,以满足机匣的性能控制要求,保证机匣工作的安全性、可靠性。

1 实验材料与方法

采用06Cr16Ni5Mo合金作为研究对象,其化学成分见表1,热处理工艺参数见表2。通过熔模精密铸造技术在真空感应炉中浇注出试棒($\phi 15\text{ mm}\times 70\text{ mm}$),根据表2试验方案和工艺参数将06Cr16Ni5Mo试棒在高压气淬真空炉中,采用阶梯加热,升温速率小于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,进行不同淬火温度的热处理。淬火后将试棒加工为直径为 6 mm ,标距长度为 30 mm 的标准拉伸试样和 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ 标准V型冲击试样。分别采用《金属室温拉伸试验方法》(HB 5143)和《金属室温冲击试验方法》(HB 5144)进行室温条件下的拉伸试验(设备型号:Landmark)和

冲击试验(设备型号:NI750C)。试验完成后,对试样的断裂处采用GX-71型光学显微镜和Sigma300型扫描电镜进行金相组织的观察。

根据测试结果选取性能最佳试样的淬火温度作为最优方案。以最佳的淬火温度对试样进行淬火热处理,而后展开不同回火温度的热处理试验,按上述相同办法进行试样的拉伸和冲击试验,以及对试样进行组织分析。

2 实验结果及讨论

2.1 淬火温度对06Cr16Ni5Mo合金组织和力学性能的影响

图1和2为06Cr16Ni5Mo合金分别经过 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{ }070\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火后的金相组织及SEM图像。由图1和2可知,经过淬火处理后合金的组织主要为板条状淬火马氏体+ δ -铁素体+残余奥氏体。通过扫描电镜可以观察到,最宽的板条界可达 $2.1\text{ }\mu\text{m}$,较窄的大约是 $0.021\text{ }\mu\text{m}$ 。随着淬火温度的增加,马氏体的板条逐渐粗大。在 $1\text{ }070\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火温度时达到顶峰, $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火温度下马氏体的板条尺寸基本不变。残余奥氏体则是在 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最少,在 $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到峰值。残余奥氏体会使得材料的屈服强度和抗拉强度有所

表1 06Cr16Ni5Mo不锈钢合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of the 06Cr16Ni5Mo stainless steel alloy

(mass fraction/%)										
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
Content	0.049	0.42	0.30	0.011	0.002 9	16.44	5.57	0.71	0.003 9	0.003 7

表2 不同热处理工艺参数
Tab.2 Parameters for different heat treatment processes

Heat treatment	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Holding time/min	Cooling method
Quenching	950	40	Air cooling (AC)
	1 000		
	1 070		
	1 100		
	550		
Tempering	580		
	650		
	700		

下降^[14-16],但是对提升材料的韧性和塑性有着明显的作用^[17]。

表3是06Cr16Ni5Mo合金在不同温度淬火后的力学性能,图3是不同淬火温度下合金力学性能的变化趋势对比。由表可知,在 $950\sim 1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火温度下,随着淬火温度的升高,拉伸强度先增加后降低,屈服强度先降低后升高,塑性和韧性先降低后升高,硬度逐渐增加。随着淬火温度的升高,抗拉强度先升高后降低,在淬火温度为 $1\text{ }070\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值 $1\text{ }090\text{ MPa}$,之后逐渐降低,在 $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 抗拉强度降

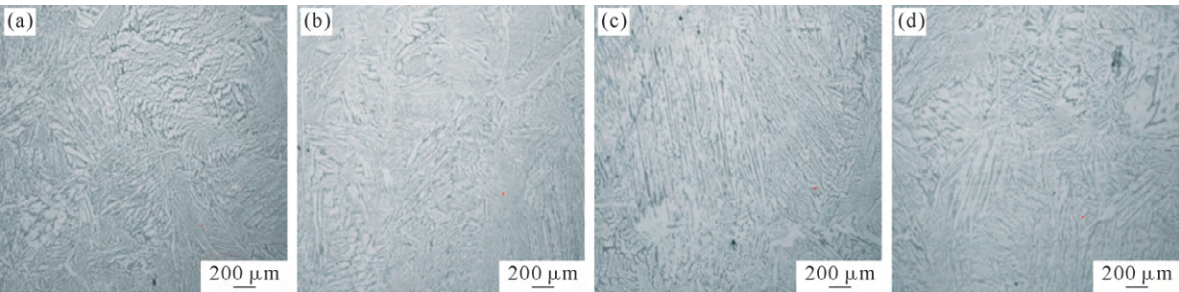


图1 06Cr16Ni5Mo合金不同温度下淬火后的金相组织:(a) $950\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $1\text{ }070\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig.1 OM images of the 06Cr16Ni5Mo alloy after quenching at different temperatures: (a) $950\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $1\text{ }070\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$

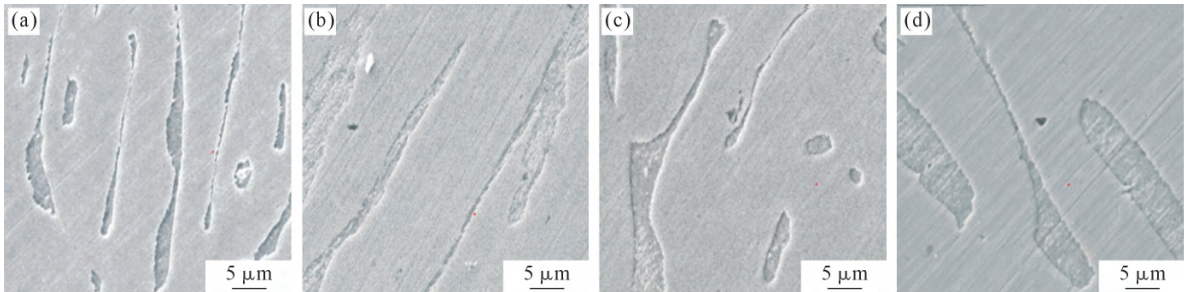


图 2 06Cr16Ni5Mo 合金不同温度下淬火后的扫描电镜图像:(a) 950 °C; (b) 1 000 °C; (c) 1 070 °C; (d) 1 100 °C
Fig.2 SEM images of the 06Cr16Ni5Mo alloy after quenching at different temperatures: (a) 950 °C; (b) 1 000 °C; (c) 1 070 °C; (d) 1 100 °C

表3 06Cr16Ni5Mo合金相同浇注工艺下的力学性能

Pouring temperature and shell temperature/°C		Heat treatment	Tensile strength σ_b /MPa	Yield strength $\sigma_{0.2}$ /MPa	Elongation A /%	Reduction of area Z /%	Impact value A_{KV} /J	HBW
1 535/1 000		950 °C quenching	1 050	615	12	57	73	304
1 535/1 000		1 000 °C quenching	1 070	595	10	39	69	307
1 535/1 000		1 070 °C quenching	1 090	610	12	45	68	313
1 535/1 000		1 100 °C quenching	1 060	630	13	58	74	321

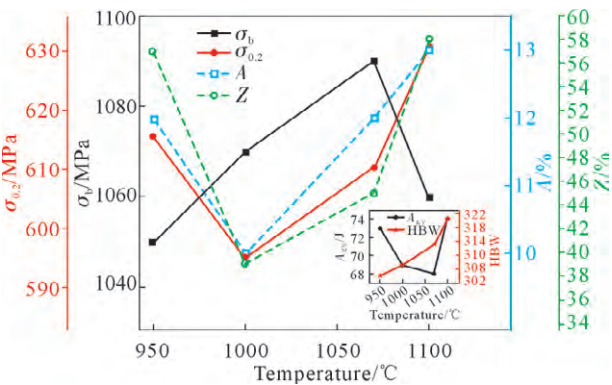


图 3 不同淬火温度下 06Cr16Ni5Mo 合金力学性能变化
Fig.3 Trends of the mechanical properties at different quenching temperatures

至 1 060 MPa。屈服强度先降低后升高,在淬火温度为 1 070 °C 时达到最小值 595 MPa,之后逐渐升高,1 100 °C 时达到最大值 630 MPa。伸长率则先降低后升高,在淬火温度为 1 000 °C 时达到最小值 10%,之后逐渐升高,1 100 °C 时达到最大值 13%。面缩率先降低后升高,在淬火温度为 1 070 °C 时达到最小值 39%,之后逐渐升高,1 100 °C 时达到最大值 58%。冲击功则先降低后升高,在淬火温度为 1 070 °C 时达到最小值 68 J,之后逐渐升高,1 100 °C 时达到最大值

74 J;布氏硬度随着淬火温度的升高而升高,淬火温度为 1 100 °C 时达到最大值 321 HBW。

由此可得,在淬火温度为 1 070 °C 时,合金的抗拉强度达到最大,塑韧性也较高,硬度值较大。综合考虑试样的组织和力学性能的试验结果,可得 06Cr16Ni5Mo 合金最佳的淬火温度为 1 070 °C,保温时间为 40 min,空冷,此时合金的综合力学性能最佳。

2.2 回火温度对 06Cr16Ni5Mo 合金组织和力学性能的影响

根据 2.1 节研究结果,将 06Cr16Ni5Mo 合金试样均进行 1 070 °C/40 min 的淬火处理,然后进行不同温度的回火处理。图 4~5 是 06Cr16Ni5Mo 合金经过 1 070 °C/40 min 淬火,然后分别进行 550、580、650、700 °C 回火后的金相组织及扫描电镜图像。试样在回火后的组织主要是回火马氏体+δ-铁素体+残余奥氏体。淬火马氏体随着回火过程的进行,最终会变成细小的回火马氏体^[18]。而当回火温度增加到 700 °C 时,又出现新的淬火马氏体。经过回火处理后,一部分马氏体会再次转化为奥氏体,且在冷却过程中被保留在基体当中,随着回火温度的增加,试样中的奥氏体在短时间内大量增多,650 °C 时达到峰值。随着

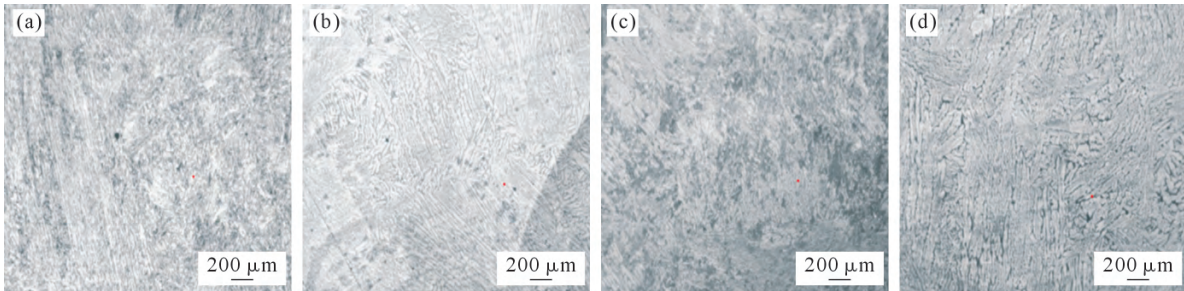


图 4 06Cr16Ni5Mo 合金不同温度回火后的金相组织:(a) 550 °C; (b) 580 °C; (c) 650 °C; (d) 700 °C
Fig.4 OM images of the 06Cr16Ni5Mo alloy after tempering at different temperatures: (a) 550 °C; (b) 580 °C; (c) 650 °C; (d) 700 °C

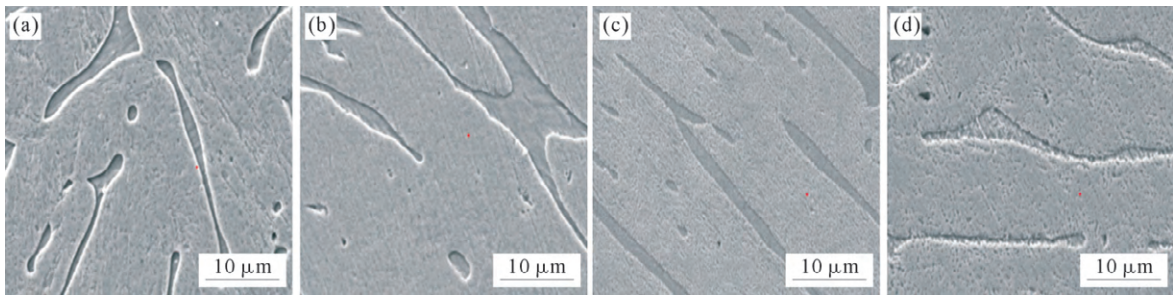


图5 06Cr16Ni5Mo 合金不同温度回火后的扫描电镜图像:(a) 550 °C; (b) 580 °C; (c) 650 °C; (d) 700 °C
Fig.5 SEM images of the 06Cr16Ni5Mo alloy after tempering at different temperatures: (a) 550 °C; (b) 580 °C; (c) 650 °C; (d) 700 °C
回火温度的进一步增高, 逆变奥氏体的热稳定逐渐下降, 易在冷却过程中转变为新的淬火马氏体, 使材料强度有所提升^[19-21]。

表4是06Cr16Ni5Mo合金在相同浇注工艺下淬火+回火后的力学性能, 可知不同温度淬火+回火后的力学性能, 随着回火温度的升高, 强度和硬度先降低后升高, 塑性先降低后升高再降低, 韧性先升高后降低再升高。

具体来看, 随着淬火温度的升高, 抗拉强度先降低后升高, 回火温度为550 °C时抗拉强度为1 003 MPa, 650 °C时抗拉强度达到最小值870 MPa, 之后逐渐升高, 在700 °C时抗拉强度升至893 MPa; 屈服强度先降低后升高, 回火温度为550 °C时屈服强度为918 MPa, 650 °C时屈服强度达到最小值618 MPa, 之后逐渐升高, 在700 °C时屈服强度升至720 MPa; 伸长率随着回火温度的升高逐渐降低, 回火温度为

700 °C时伸长率最小为13%, 550和580 °C时合金的伸长率基本相近约18%, 650 °C时合金的伸长率为16%; 面缩率先降低再升高再降低, 回火温度为580 °C时面缩率最小为64%, 650和700 °C时合金的面缩率基本相近约70%; 冲击功先升高后降低再升高, 回火温度为550 °C时冲击功最小为81.3 J, 700 °C时合金的冲击功达到最大为129.5 J; 布氏硬度则随着回火温度的升高先降低后升高, 回火温度为550 °C时布氏硬度达到最大值304 HBW, 650 °C时布氏硬度达到最小值269 HBW, 700 °C时布氏硬度升高至290 HBW。

由此可得, 回火温度在580~650 °C时, 合金的抗拉强度、塑性、韧性和硬度才能满足技术条件要求。综合以上分析可得, 06Cr16Ni5Mo合金最佳的回火温度为580~650 °C, 保温时间为40 min, 此时合金的综合力学性能最佳。

表4 06Cr16Ni5Mo合金不同温度回火后的力学性能

Tab.4 Mechanical properties of the 06Cr16Ni5Mo alloy after tempering at different temperatures

Pouring temperature/shell temperature/°C	Heat treatment (quenching+tempering)	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	A_{KV} /J	HBW
1 535/1 000	1 070 °C/40 min/AC+550 °C/40 min/AC	1 003	918	17.5	67.5	81.3	304
1 535/1 000	1 070 °C/40 min/AC+580 °C/40 min/AC	965	848	18	64	90.5	289
1 535/1 000	1 070 °C/40 min/AC+650 °C/40 min/AC	870	618	16	70.5	82.5	269
1 535/1 000	1 070 °C/40 min/AC+700 °C/40 min/AC	930	720	13	70	129.5	290

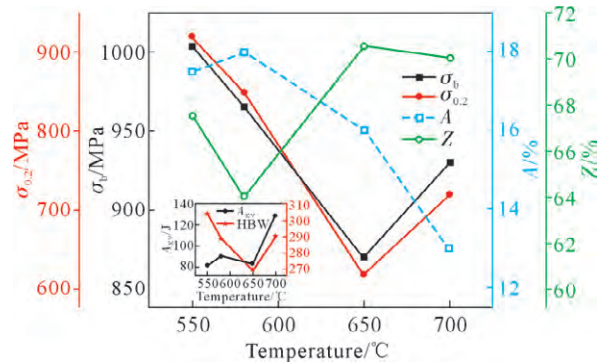


图6 1 070 °C淬火后不同回火温度处理的 06Cr16Ni5Mo 合金力学性能变化
Fig.6 Trends of the mechanical properties of the 06Cr16Ni5Mo alloy with different tempering temperatures after quenching at 1 070 °C

3 结论

(1)通过对06Cr16Ni5Mo合金不同淬火温度对合金组织和性能的影响规律研究可得, 淬火后的组织主要是板条状淬火马氏体。随着淬火温度的升高, 合金的淬火马氏体板条逐渐粗化。在950~1 100 °C温度范围内, 随着淬火温度的升高, 拉伸强度先增加后降低, 而屈服强度先降低后升高, 塑性和韧性先降低后升高, 硬度逐渐增加。合金在淬火温度1 070 °C, 抗拉强度达到最大, 塑韧性也较高, 硬度值较大。

(2)通过对06Cr16Ni5Mo合金不同回火温度对合金组织和性能的影响规律研究可得, 回火后的组织主要是板条状回火马氏体。随着回火温度的升高, 回火

马氏体板条逐渐变细小之后开始粗化。在回火温度 550~700 °C 范围内,随着回火温度的升高,强度和硬度先降低后升高,塑性先降低后升高再降低,韧性先升高后降低再升高。在回火温度为 580~650 °C 范围合金综合力学性能最佳,且硬度能满足技术条件要求。

(3)对半机匣 06Cr16Ni5Mo 合金最佳的热处理制度为:淬火 1 070 °C/40 min,空冷,回火 580~650 °C/40 min,空冷。

参考文献:

- [1] 张鹏. 超级马氏体不锈钢 00Cr13Ni5Mo 与 06Cr13Ni5MoN 的组织性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2016.
ZHANG P. Study on microstructure and properties of 00Cr13Ni5Mo and 06Cr13Ni5MoN super-martensitic stainless steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [2] 过洁,龙友松. 0Cr16Ni5Mo 不锈钢应用特性的研究[J]. 大电机技术,2001(3): 44-47.
GUO J, LONG Y S. Research for the characteristic of 0Cr16Ni5Mo stainless steel[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001(3): 44-47.
- [3] 秦斌,王军. 低碳马氏体不锈钢 0Cr16Ni5Mo 的研制[J]. 宝钢技术,2011(5):56-59.
QING B, WANG J. Development of low-carbon martensite stainless steel 0Cr16Ni5Mo[J]. Baosteel Technology, 2011(5): 56-59.
- [4] 龚雪辉. 0Cr16Ni5Mo 马氏体不锈钢热处理及热变形行为研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
GONG X H. The behavior of heat treatment and hot deformation of 0Cr16Ni5Mo martensitic stainless steel[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [5] 米丰毅,龚雪辉,袁武华,梁剑雄. 回火温度对 0Cr16Ni5Mo 马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 材料开发与应用,2015, 30(1): 38-42.
MI F Y, GONG X H, YUAN W H, LIANG J X. Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of 0Cr16Ni5Mo martensitic stainless steel[J]. Development and Application of Materials, 2015, 30(1): 38-42.
- [6] 田伟,潘伟,钟庆元. 0Cr16Ni5Mo 马氏体不锈钢 δ -铁素体含量及奥氏体晶粒度的控制[J]. 金属热处理,2022, 47(9): 194-201.
TIAN W, PAN W, ZHONG Q Y. Control of δ -ferrite content and austenite grain size in 0Cr16Ni5Mo martensite stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(9): 194-201.
- [7] ZOU D, LIU X, HAN Y, ZHANG W, LI J, WU K. Influence of heat treatment temperature on microstructure and property of 00Cr13Ni5Mo2 supermartensitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 21: 364-368.
- [8] 程志伟,金建军,鲁世强,胡春文,刘大博,刘俊伟. 热处理工艺对 PH13-8Mo 钢的组织 and 性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013, 34(11): 48-54.
CHENG Z W, JIN J J, LU S Q, HU C W, LIU D B, LIU J W. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of PH13-8Mo steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(11): 48-54.
- [9] JIANG W, ZHAO K Y, YE D, LI J, LI Z D, SU J. Effect of heat treatment on reversed austenite in Cr15 super martensitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2013, 20(5): 61-65.
- [10] 刘丽玉,钟平,王祺,张业勤. 回火温度对超高强度不锈钢的力学性能和微观组织的影响[J]. 失效分析与预防,2013, 8(2): 94-97, 122.
LIU L Y, ZHONG P, WANG Q, ZHANG Y Q. Effect of tempering temperature on mechanical properties and microstructure of super strength steel[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(2): 94-97, 122.
- [11] LIU Y R, YE D, YONG Q L, SU J, ZHAO K Y, JIANG W. Effect of heat treatment on microstructure and property of Cr13 super martensitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(11): 60-66.
- [12] 宋逸思,李传维,李克,胡海鹏,张梅,陈益华,顾剑锋. 0Cr16Ni5Mo1 马氏体不锈钢奥氏体晶粒生长行为[J]. 材料热处理学报,2023, 44(12): 136-143.
SONG Y S, LI C W, LI K, HU H P, ZHANG M, CHEN Y H, GU J F. Growth behaviour of austenite grain of 0Cr16Ni5Mo1 martensitic stainless steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(12): 136-143.
- [13] 赵梓钧,黄帅,郭绍庆,张学军,秦仁耀. 回火温度对激光选区熔化 0Cr16Ni5Mo1 不锈钢组织性能影响的探讨[J]. 中国标准化,2020(S1): 367-373.
ZHAO Z J, HUANG S, GUO S Q, ZHANG X J, QIN Y R. Study on influence of tempering temperature on microstructure and properties of 0Cr16Ni5Mo1 stainless steel by selective laser melting[J]. China Standardization, 2020(S1): 367-373.
- [14] 黄帅,马宇超,郭绍庆,周标,董春雨,张学军. 激光选区熔化 0Cr16Ni5Mo1 马氏体不锈钢的成形工艺及显微组织研究[J]. 热加工工艺,2020, 49(16): 78-81.
HUANG S, MA Y C, GUO S Q, ZHOU B, DONG C Y, ZHANG X J. Study on forming process and microstructure of 0Cr16Ni5Mo1 martensitic stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(16): 78-81.
- [15] 董泽民,陈伟,刘璐璐,赵振华,罗刚. 压机机匣材料 ZG0Cr16Ni5Mo1 铸钢动态力学行为的研究[A]. 中国力学大会论文集 (CCTAM 2019)[C]. 北京/杭州: 中国力学学会/浙江大学,2019: 12.
DONG Z M, CHEN W, LIU L L, ZHAO Z H, LUO G. Study on dynamic mechanical behavior of compressor casing material ZG0Cr16Ni5Mo1 cast steel [A]. Proceedings of the Chinese Mechanics Congress (CCTAM 2019)[C]. Beijing/Hanzhou: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics/Zhejiang University, 2019: 12.
- [16] 王少朋. 热处理对 0Cr13Ni5Mo/28Mn 焊接接头组织和性能的影响[D]. 大连:大连海事大学,2017.
WANG S P. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 0Cr13Ni5Mo/28Mn welded joints[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [17] YUAN W H, GONG X H, SUN Y Q, LIANG J X. Microstructure evolution and precipitation behavior of 0Cr16Ni5Mo martensitic stainless steel during tempering process [J]. Journal of Iron and

- Steel Research(International), 2016, 23(4): 401-408.
- [18] 董飞. 高氮超级马氏体不锈钢0Cr16Ni5Mo-0.12N的组织与性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- DONG F. Study on microstructure and properties of 0Cr16Ni5Mo-0.12N high nitrogen super-martensitic stainless steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [19] 魏晓伟. 新型06Cr16Ni5Mo不锈钢的研制[Z]. 成都: 西华大学, 2012-3-01.
- WEI X W. The development of the new 06Cr16Ni5Mo stainless steel[Z]. Chengdu: Xihua University, 2012-03-01.
- [20] 张然, 康进武, 黄天佑, 柳百成, 胡永沂. ZG0Cr13Ni5Mo马氏体不锈钢的铸态高温力学性能测试研究[J]. 铸造技术, 2009, 30(10): 1252-1255.
- ZHANG R, KANG J W, HUANG T Y, LIU B C, HU Y Y. Mechanical properties of martensite stainless steel at high temperature [J]. Foundry Technology, 2009, 30(10): 1252-1255.
- [21] 古立新, 金建军, 刘富荣. 热处理对0Cr17Ni5Mo3钢组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2004(6): 16-19.
- GU L X, JIN J J, LIU F R. The effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 0Cr17Ni5Mo3 steel [J]. Journal of Materials Engineering, 2004(6): 16-19.