

淬火、回火制度对 M152 合金机匣组织性能的影响

魏 鑫¹, 杨 钢², 李昌永¹, 赵兴东¹

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043; 2. 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: 国产大飞机及其发动机的自主研制需采用 M152 合金制造发动机机匣, 该机匣盘锻件尺寸大、结构复杂, 工作时承受很大的载荷, 对其综合力学性能要求苛刻。为提高 M152 合金机匣锻件的组织与力学性能水平, 需要对其热处理工艺进行系统研究。通过试验研究了不同的淬火、回火制度对 M152 合金机匣组织性能的影响。采用光学显微镜分析了锻件的显微组织, 测试了锻件的室温拉伸、冲击和硬度。综合分析结果表明: 当 M152 合金锻件经 1010 °C 淬火, 油冷, 565 °C 回火, 空冷热处理后, 可实现强度、韧性的良好匹配。

关键词: M152 合金; 机匣; 组织性能; 热处理

中图分类号: V250.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.01.011

Effect of Quenching and Tempering Heat Treatments on Microstructure and Properties of M152 Alloy Casing

WEI Xin¹, YANG Gang², LI Chang-yong¹, ZHAO Xing-dong¹

(1. AECC Shenyang Liming Aeroengine Corporation Ltd, Shenyang 110043, China;

2. Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The engine casing should be made of M152 alloy during independent research on domestic large aircrafts and their engines. Requirements of the general mechanical properties were rigorous due to large size, complex structure, and great working load of the engine casing disk forging. The systematic study on heat retreatment technology was necessary for increasing the microstructure and properties of M152 alloy casing forging. The effect of different quenching and tempering treatments on microstructure and properties of M152 alloy casing was studied through the experiment. The microstructure of the forging was analyzed by optical microscope, moreover, the room-temperature tensile, impact and hardness of the forging were tested. The results show that after quenching at 1010°C, oil cooling, tempering at 565°C and air cooling, a well matching of intensity and toughness of M152 alloy forging can be reached.

Key words: M152 alloy; casing; microstructure and properties; heat retreatment

0 引言

M152 合金是 1 种 12%Cr 马氏体热强不锈钢, 由 13%Cr 钢发展而来, 普通 13%Cr 钢的应力极限是 700 ~ 800 MPa^[1-2], 降低回火温度, 可提高极限应力, 但是延伸率、冲击值和抗应力腐蚀开裂性会降低, 以致不能使用^[3]。为了满足先进航空发动机部件的强度要求, 美国于 20 世纪 80 年代末研制开发出一系列强度更高的 12Cr 钢, 并已实际应用^[4-7]。M152 合金通过在 12Cr 钢基础上添加少量合金元素提高综合力学性能, 主要添加 Mo 进一步提高了抗回火性能和自硬

性, 具有较高的中温抗蠕变性能、抗疲劳性能和抗腐蚀性能, 及满意的焊接性能和成型性能, 可在 500 °C 以下使用^[8-13]。与其它不锈钢相比, M152 合金具有导热性较好、线膨胀系数小、减振性较高等特点, 同时能够避免“钛火”问题的发生, 在国外已广泛应用于制造 CMF56 等发动机的前机匣等零件, 并且大量用于制造超(超)临界机组汽轮机末级叶片及紧固件^[14-16]。

随着国产大型运输机及其发动机的自主制造, 国内开展 M152 合金机匣零件的研制, 某发动机大型机匣毛坯采用该材料锻造成形。由于属首次应用, 对其热处理制度与组织性能的对应关系的研究较少。本文

收稿日期: 2017-07-24 基金项目: 航空动力基础科研项目资助

作者简介: 魏鑫(1983), 男, 硕士, 从事航空发动机材料研发和应用工作; dangjianshiti@126.com。

引用格式: 魏鑫, 杨钢, 李昌永, 等. 淬火、回火制度对 M152 合金机匣组织性能的影响[J]. 航空发动机, 2018, 44(1): 58-62. WEI Xin, YANG Gang, LI Chang yong, et al. Effect of quenching and tempering heat treatments on microstructure and properties of M152 alloy casing[J]. Aeroengine, 2018, 44(1): 58-62.

通过分析淬火、回火热处理制度对其性能影响,摸索大规格 M152 合金锻件在不同热处理制度下的性能特点,为锻件生产工艺的制定及热处理制度的选择提供参考。

1 试验材料及试验过程

试验选用 1Cr12Ni3Mo2VN (M152) 合金机匣锻件,其化学成分见表 1。

表 1 M152 合金锻件的化学成分					
元素	C	Si	Mn	S	P
质量分数 / %	0.12	0.17	0.67	0.0006	0.010
元素	Cr	Ni	Mo	V	N
质量分数 / %	11.15	2.76	1.66	0.32	0.048

将 M152 合金机匣锻件沿直径方向 9 等分,并切取弦向力学性能试样,分别按不同的淬火工艺和回火工艺进行热处理,具体工艺及试样数量见表 2。

表 2 热处理工艺			
淬火工艺	回火工艺	室温拉伸	冲击
1010 ℃、1 h、油冷	565 ℃、2 h、空冷	2	2
	565 ℃、2 h、空冷	2	2
	565 ℃、2 h、1 ℃/min 炉冷	2	2
1040 ℃、1 h、油冷	565 ℃、2 h、炉冷	2	2
	585 ℃、2 h、空冷	2	2
	605 ℃、2 h、空冷	2	2
1040 ℃、1 h、炉冷	565 ℃、2 h、空冷	2	2
1040 ℃、1 h、1 ℃/min 炉冷	565 ℃、2 h、空冷	2	2
1070 ℃、1 h、油冷	565 ℃、2 h、空冷	2	2

光学显微组织观察使用 SISC-IAS-6.0 图像分析仪,试样用 10%Cr₂O₃ 电解液电解腐蚀。拉伸试验在 WE-300 型拉伸试验机上进行,采用 d₀=5 mm 的标准试样;冲击试验在 JBN-300B 型冲击试验机上进行,采用标准 10 mm×10 mm×55 mm 的 V 型缺口试样,所有数据均为 2 个试样的平均值。

2 试验结果与分析

2.1 淬火温度对组织和力学性能的影响

在 565 ℃、2 h、空冷回火制度下,淬火温度对 M152 合金力学性能的影响如图 1 所示。随淬火温度的提高,M152 合金强度、硬度略微提高,塑性变化不大,冲击功显著减小,1040 ℃淬火后减小至 80 J,

1070 ℃淬火,虽有所增大,但仍显著低于 1010 ℃淬火冲击功。由此可见,淬火温度主要影响锻件的冲击韧性,对强度、硬度的影响不大。

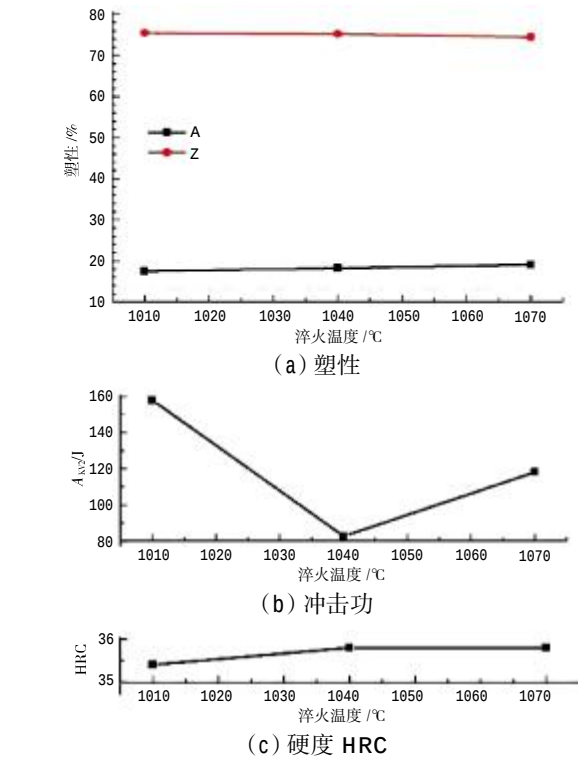


图 1 淬火温度对 M152 合金力学性能的影响

淬火温度对金相显微组织的影响如图 2 所示。随淬火温度的提高,M152 合金晶粒长大,马氏体板条发生了粗化。1040 ℃淬火,部分晶粒开始长大,形成明显的混晶组织,导致冲击功显著减小;1070 ℃下淬火,晶粒进一步长大,虽然组织粗化显著,但混晶现象有所改善,组织均匀性得到提高,可能是冲击功有所增大的原因。

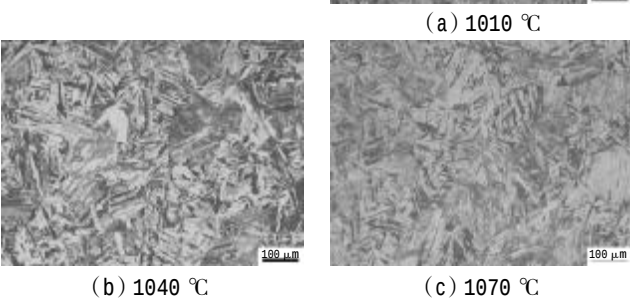


图 2 淬火温度对 M152 合金金相显微组织的影响

2.3 淬火冷却速度对力学性能的影响

在 565 ℃、2 h、空冷的回火制度下,1040 ℃淬火

冷却速度对 M152 合金力学性能的影响如图 3 所示。其中,淬火油冷的冷却速度约为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,炉冷的冷却速度约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

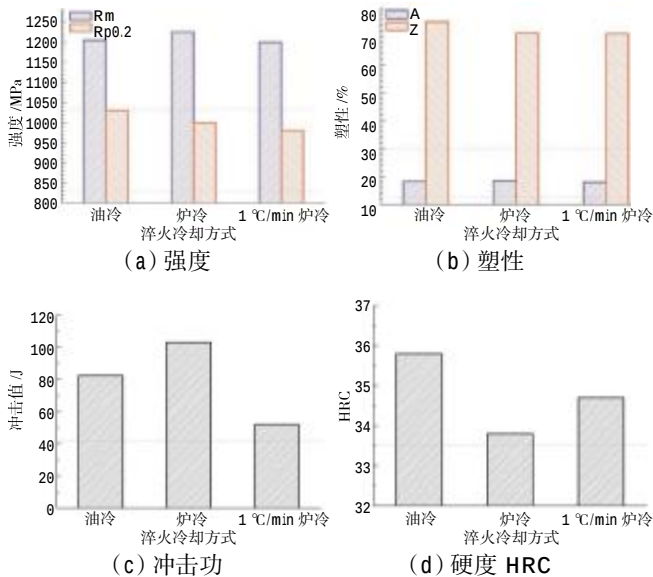


图 3 淬火冷却速度对 M152 合金力学性能的影响

从图中可见,随 $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶后的淬火冷却速度降低,抗拉强度变化不大,屈服强度逐渐降低;延伸率变化不大,断面收缩率略有降低;冲击值先增大后减小;硬度在慢速冷却状态的整体数值均匀,明显低于油冷状态。

淬火冷却方式对 M152 合金金相显微组织的影响如图 4 所示。随 $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶后淬火冷却速度的降低,金相显微组织未见明显变化。值得注意的是,炉冷条件下形成的板条状马氏体较粗且连续性与分布规律性较强,而如前所述,同一晶粒内的马氏体的排列与分布越均匀一致,合金的韧性越好,因此该种处理状态下的断裂韧性明显优于其他 2 种处理状态。随着冷却速度进一步降低,晶粒显著长大,强度、冲击明显下降。

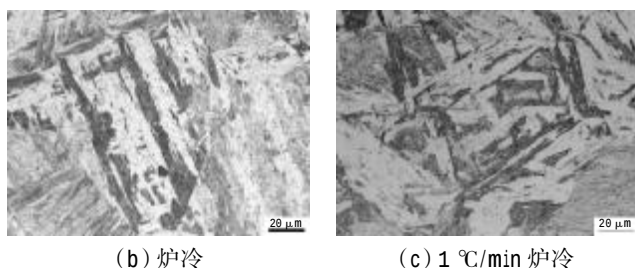


图 4 淬火冷却方式对 M152 合金金相显微组织的影响

2.4 回火温度对力学性能的影响

在 $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、1h、油冷淬火制度下,回火温度对 M152 合金力学性能的影响如图 5 所示。随回火温度的升高,M152 合金的强度与硬度值均逐渐降低,延伸率变化不大,断面收缩率略有降低,冲击值在 $585\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火条件下大幅度增大,继续提升回火温度至 $605\text{ }^{\circ}\text{C}$,则小幅度下滑,但仍高于 $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火处理条件下的值。

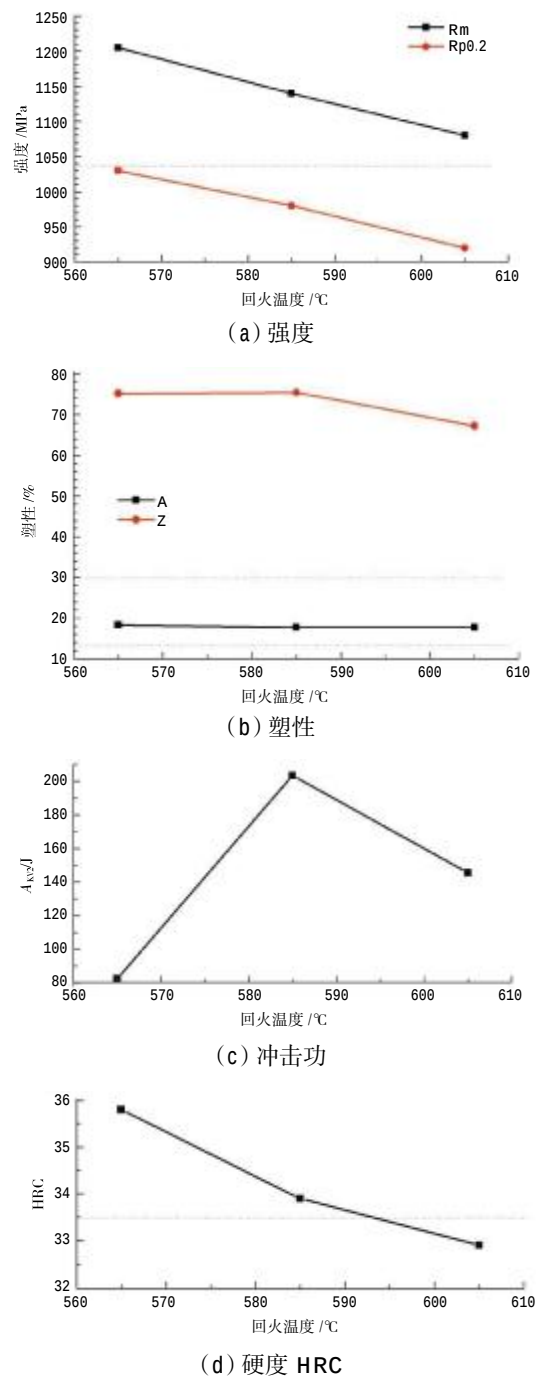


图 5 回火温度对 M152 合金力学性能的影响

回火温度对 M152 合金金相显微组织的影响如图 6 所示。从图中可见, M152 合金的金相显微组织看不出明显的区别, 但随回火温度的提高, 晶粒会发生显著回复与再结晶过程, 导致强度、硬度降低。此时, 合金的韧性得到显著提升, 冲击值从 80 J 大幅度增大至 200 J; 但回火温度过高时, 则也可能存在碳化物 M₂₃C₆ 的大量析出现象, 而碳化物的增加以及碳化物的粗化是导致韧性小幅度降低的主要原因^[13]。

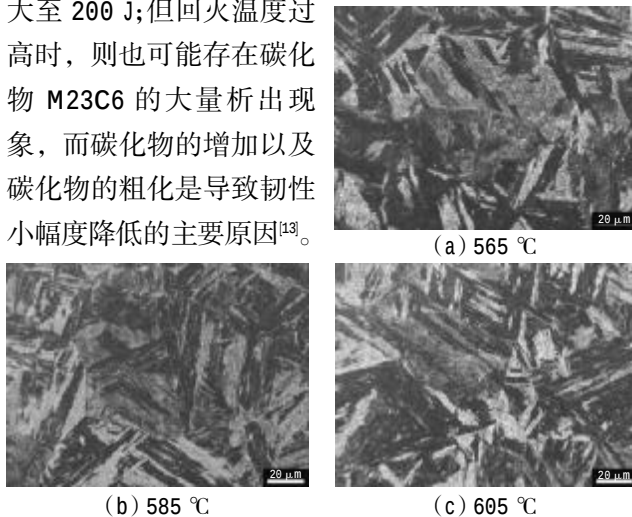


图 6 回火温度对 M152 合金金相显微组织的影响

2.6 回火冷却方式对 M152 合金力学性能的影响

在 1040 °C、1 h、油冷淬火制度下, 565 °C 回火冷却方式对 M152 合金力学性能的影响如图 7 所示。从图中可见, 随 565 °C 回火后的冷却速度降低, M152 合金的屈服强度略有提高, 但硬度值却逐步降低, 塑性变化不大, 冲击值略有增大, 没有发生显著的脆化现象。

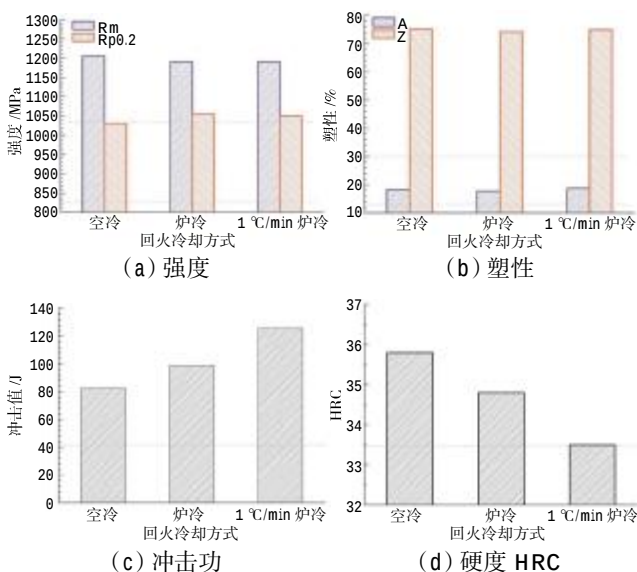


图 7 回火冷却方式对 M152 合金力学性能的影响

回火后冷却方式对 M152 合金金相显微组织的影响如图 8 所示。随 565 °C 回火后冷却速度的降低,

在 2 种炉冷条件下 M152 合金的晶粒回复长大过程明显, 且组织均匀性也随冷却速度的减慢而增加, 从而合金的冲击值逐步增大, 相比空冷的 80 J, 提升至 120 J。晶粒的回复长大也显著降低了合金的硬度, 但此时马氏体板条处晶界析出的碳化物增加, 导致屈服强度不仅未出现明显降低, 还略有提高。

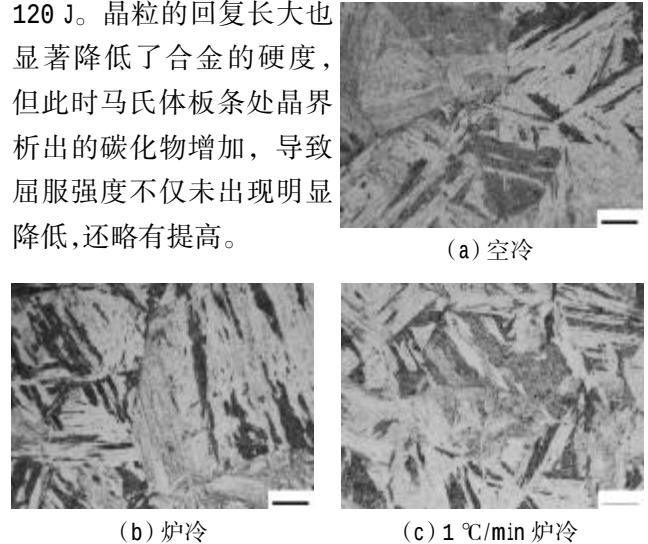


图 8 回火冷却方式对 M152 合金金相显微组织的影响

综上所述, 提高淬火温度, 强度、硬度、塑性变化不大, 但冲击功显著下降, 组织粗化明显; 降低淬火冷却速度, 屈服强度下降明显, 采用炉冷冲击功虽较高, 但硬度下降显著, 采用 1 °C/min 冷却, 冲击功下降显著; 提高回火温度, 强度、硬度下降显著, 降低回火冷却速度, 硬度下降显著, 因此锻件热处理工艺采用 1010 °C 淬火, 油冷 +565 回火, 空冷, 可实现强度、韧性的良好匹配。

3 结论

(1) 随淬火温度的提高, M152 合金的强度、硬度略微提高, 塑性变化不大, 冲击值降低; 随淬火冷却速度降低, M152 合金的抗拉强度变化不大, 屈服强度和塑性略有降低, 硬度与冲击功变化复杂, 冲击值先升后降; 硬度先降后升。

(2) 随回火温度的提高, M152 合金的强度、硬度、逐渐下降, 延伸率变化不大, 断面收缩率略有下降, 冲击功先升后降; 随回火冷却速度降低, M152 合金的屈服强度略有增加, 塑性变化不大, 冲击值略有增加, 硬度显著下降。

(3) M152 合金锻件热处理工艺采用 1010 °C 淬火、油冷 +565 °C 回火、空冷, 可实现强度、韧性的良好匹配。

参考文献:

- [1] 崔昆. 钢铁材料及有色金属材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980:

- 263-265.
- CUI Kun. Steel material and nonferrous material [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1980:263-265. (in Chinese)
- [2] 姚新阳, 国旭明. 0Cr13Ni6Mo 不锈钢涂层耐冲刷腐蚀性能研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015(3):31-36.
- YAO Xinyang, GUO Xuming. On erosion resistance of MIG 0Cr13Ni6Mo coating [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2015(3):31-36. (in Chinese)
- [3] 藤田辉夫. 不锈钢的热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 1983:80.
- Fujita Teruo. Heat treatment of stainless steel [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983:80. (in Chinese)
- [4] 龚虎, 郭桢, 秦尚武, 等. 12%Cr 超超临界转子钢中化学元素含量与淬火温度关系的研究[J]. 大型铸锻件, 2017(3):5-7.
- GONG Hu, GUO Zhen, QIN Shangwu, et al. Research on relation between chemical element content and quenching temperature of 12% Cr ultra supercritical rotor steel [J]. Heavy Castings and Forgings, 2017(3):5-7. (in Chinese)
- [5] 苏昕, 张爽, 赵义瀚, 等. 12% Cr 钢降低淬火温度试验研究[J]. 汽轮机技术, 2014(4):315-317.
- SU Xin, ZHANG Shuang, ZHAO Yihan, et al. Study on reduction quenching temperature of 12%Cr steel [J]. Turbine Technology, 2014(4):315-317. (in Chinese)
- [6] 黄志涛, 田文怀, 李春华, 等. 碳化物形态及回火时间对 Cr12MoV 钢热处理畸变的影响[J]. 金属热处理, 2016(11):26-30.
- HUANG Zhitao, TIAN Wenhui, LI Chunhua, et al. Effect of initial microstructure on heat treatment distortion of Cr12MoV steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2016(11):26-30. (in Chinese)
- [7] 王敏, 徐光, 胡海江, 等. 12Cr2Mo1R 压力容器钢动态 CCT 曲线研究[J]. 材料与冶金学报, 2014(4):280-283, 311.
- WANG Min, XU Guang, HU Haijiang, et al. Research on dynamic CCT curve of 12Cr2Mo1R pressure vessel steel [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2014(4):280-283, 311. (in Chinese)
- [8] 孙文玲. 热处理对马氏体不锈钢 KT5312AS6 机械性能的影响[J]. 特钢技术, 2013(2):15-18.
- SUN Wenling. Effect of heat treatment on mechanical property of martensitic stainless KT5312AS6 [J]. Special Steel Technology, 2013(2):15-18. (in Chinese)
- [9] 李伟. 1Cr12Ni3Mo2VN 退火工艺研究 [J]. 特钢技术, 2011(1):19-23.
- LI Wei. Research on the annealing process of 1Cr12Ni3Mo2VN [J]. Special Steel Technology, 2011(1):19-23. (in Chinese)
- [10] 杨钢, 刘新权, 杨沐鑫, 等. 1Cr12Ni3Mo2VN(M152)耐热钢的脆化机制[J]. 特钢技术, 2009(4):14-24, 59.
- YANG Gang, LIU Xinquan, YANG Muxin, et al. Research on brittleness of heat resistant steel 1Cr12Ni3Mo2VN [J]. Special Steel Technology, 2009(4):14-24, 59. (in Chinese)
- [11] 崔永静, 陆峰, 汤智慧, 等. M152 钢基体超音速火焰喷涂 WC-17Co 涂层性能研究[J]. 热喷涂技术, 2012, (3):23-27.
- CUI Yongjing, LU Feng, TANG Zhihui, et al. Performance of WC-17Co coatings fabricated by high velocity Oxy-fuel thermal spray on M152 steel [J]. Thermal Spray Technology, 2012, (3):23-27. (in Chinese)
- [12] 杨钢, 郭永华, 刘新权, 等. 595 °C 长期时效对 M152 马氏体耐热钢力学性能的影响[J]. 钢铁, 2010(10):62-65.
- YANG Gang, GUO Yonghua, LIU Xinquan, et al. Effect of long-term aging at 595°C on mechanical properties of M152 martensitic heat-resistant steel[J]. Iron & Steel, 2010(10):62-65. (in Chinese)
- [13] 谢学林, 杨钢, 陈庚, 等. 1Cr12Ni3Mo2VN 耐热钢的回火工艺[J]. 钢铁研究学报, 2017(2):156-160.
- XIE Xuelin, YANG Gang, CHEN Geng, et al. Temper technics of heat-resistant steel 1Cr12Ni3Mo2VN [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017(2):156-160. (in Chinese)
- [14] 李俊儒, 龚臣, 陈列, 等. 10Cr12Ni3Mo2VN 超超临界机组用叶片钢的热变形行为[J]. 金属学报, 2014(9):1063-1070.
- LI Junru, GONG Chen, CHEN Lie, et al. Hot deformation behavior of blades steel 10Cr12Ni3Mo2VN for ultra-supercritical units [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014(9):1063-1070. (in Chinese)
- [15] 严清忠, 陈列, 李发文, 等. 叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 1.1t 电渣锭重熔工艺的优化[J]. 特殊钢, 2015(2):44-47.
- YAN Qingzhong, CHEN Lie, LI Fawen, et al. Optimization on remelting process of 1.1t ESR ingot of blades steel 1Cr12Ni2Mo2VN [J]. Special Steel, 2015(2):44-47. (in Chinese)
- [16] 贺小毛, 蒋鹏, 林锦棠, 等. 1Cr12Ni3Mo2VN 核电用叶片钢高温本构关系[J]. 塑性工程学报, 2016(4):96-100.
- HE Xiaomao, JIANG Peng, LIN Jintang, et al. High temperature constitutive equations of 1Cr12Ni3Mo2VN alloy steel for nuclear power blades [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016 (4):96-100. (in Chinese)

(编辑:李华文)