

低热胀管道正回火制度对微观组织 及性能的影响规律研究

韩丽青^{1,*}, 李根^{2,*}, 李鑫¹, 赵雷², 涂凯², 燕春光¹, 赵吉庆², 徐海涛¹, 包汉生²

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 钢铁研究总院有限公司, 北京 100081)

摘要: 为满足一体化快堆 60 年寿命设计需要, 本文开展了热处理正火(1 040~1 080 °C)与回火(730~800 °C)工艺对 9Cr-1Mo 系铁素体-马氏体耐热钢低热胀管道组织稳定性的影响规律研究。结果表明: 正火温度提高至 1 060 °C, 可以促进合金元素回溶, $M_{23}C_6$ 相更加弥散, 室温及高温强度提高约 20 MPa, 但继续提高正火温度影响不大; 回火温度升高, 板条状马氏体合并为块状马氏体, 晶界总长度减少, 且马氏体板条回复加剧, 位错密度下降, 强度迅速降低; 随回火时间延长至 2 h 以上, 析出相充分析出导致基体强度降低、冲击功提高, 组织基本达到稳定, 继续延长回火时间或焊后热处理时间强度不会发生明显变化, 建议采用 1 060 °C×1 h 正火、770 °C×2 h 回火制度进行热处理, 以保障工艺管道长寿命安全服役。

关键词: 钠冷快堆; 工艺管道; 铁素体-马氏体耐热钢; 热处理工艺

中图分类号: TL353.1; TG14.73

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)S1-0165-08

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0903

Study of Normalizing and Tempering Processes on Microstructure and Properties of Low Thermal Expansion Pipeline

HAN Liqing^{1,*}, LI Gen^{2,*}, LI Xin¹, ZHAO Lei², TU Kai², YAN Chunguang¹,

ZHAO Jiqing², XU Haitao¹, BAO Hansheng²

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The 9Cr-1Mo ferrite-martensite (FM) heat-resistant steel is one of the main candidate materials for sodium-cooled fast reactor process pipeline and steam generator. Compared to austenitic stainless steels, FM steel exhibits higher thermal conductivity, lower thermal expansion coefficient, anti-irradiation properties and lower cost. As the designing lifespan of commercial reactors extends to 60 years, higher requirements of microstructure stability under high-temperature environments are proposed to ensure the long-term creep strength of FM steel. Through multi-scale characterization and mechanical testing, this study investigates the effect of normalizing and tempering processes on the microstructure and mechanical properties of 9Cr-1Mo FM steel used in sodium-cooled fast reactor process pipelines. By comparing the microstructure evolution and mechanical performance under

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-01-23

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3712102); 央企自主投入重点基金(事 23T60170Z); 中核集团集中研发项目

* 通信作者: 韩丽青, 李根

varying normalizing temperatures (1 040, 1 060, 1 080 °C), tempering temperatures (730, 750, 770, 800 °C) and tempering time (1-4 h), combined with scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and electron backscatter diffraction (EBSD), the mechanisms of heat treatment on grain size, precipitate distribution, and dislocation density were elucidated. The results show that increasing the normalizing temperature from 1 040 °C to 1 060 °C enhances the dissolution of alloying elements, which facilitates the precipitation of dispersed $M_{23}C_6$ carbides with the average size decreases from (150±30) nm to (138±19) nm after tempering, thereby improving precipitation strengthening and elevating both room-temperature and high-temperature strength by 20 MPa. However, further increasing the normalizing temperature to 1 080 °C shows limited influence on mechanical properties and prior austenitic grain size. Besides, higher tempering temperatures (730 °C→770 °C) promotes the coalescence of martensitic laths into blocky, which reduces total grain boundary length by 34% and dislocation density. This leads to a decline in strength but enhances long-term creep resistance due to optimized grain boundaries and homogeneous precipitates distribution. In addition, extending tempering time promotes the precipitation of $M_{23}C_6$ and MX phases, which leads to the decrement of matrix strength and the increment of impact energy. The mechanical properties are not changed significantly since the tempering time extended to more than 2 h or the post-welding heat treatment time extended to more than 4 h. The mechanical properties tend to remain stable confirming the engineering applicability of the optimized process. Based on above studies, the quantitative relationships between heat treatment parameters and microstructure evolution in FM steel are established, and the recommended heat treatment regime of FM steel used in processed pipeline is 1 060 °C×1 h normalizing followed by 770 °C×2 h tempering, which effectively promotes the dispersion of $M_{23}C_6$ and MX phases, reduces grain boundary length and dislocation density and balances high strength with long-term microstructure stability. This work provides theoretical support for determining heat treatment processes and engineering application of low thermal expansion pipeline.

Key words: sodium-cooled fast reactor; process pipeline; ferrite-martensite heat resistant steel; heat treatment process

以池式钠冷快堆为代表的快堆具有良好的固有安全性。作为冷却剂的钠,其导热系数是水的100多倍,且常压下沸点达883 °C,远高于工作温度(540 °C),工作压力接近常压,可在各种工况下有效导出堆内热量^[1]。9Cr-1Mo系铁素体-马氏体耐热(FM)钢是新一代钠冷快堆蒸汽发生器和工艺管道的主要备选材料之一^[2-7]。日本JSME于20世纪90年代开展了Mod. 9Cr1Mo钢研制,其成分与ASTM Grade 91钢接近,并开展了550 °C下超过175 800 h的持久检测,满足60年持久蠕变强度1:3外推的要求^[8]。同时,Kannan等^[9-10]开展了Mod. 9Cr1Mo钢在动态钠环境下的低周疲劳和蠕变疲劳试验,发现液态钠环境下Mod. 9Cr1Mo钢具有良好的疲劳性能,优于RCC-MR设计数据。相对于奥氏体不锈钢,FM钢具有较高的导热

系数、较低的热膨胀系数、较强的抗辐射空洞膨胀能力和较低的成本,用于工艺管道能够显著缩短管道长度和设计复杂度,十分契合商用一体化快堆简化系统设计、降低设备制造成本的发展目标。

随着商用反应堆设计寿命延长至60年,对结构材料的持久蠕变强度提出了更高的要求,而高温环境下的组织稳定性是持久蠕变强度的必要保障。9Cr-1Mo钢采用正火+回火热处理后的组织为回火板条马氏体,且原始奥氏体晶界和马氏体板条界有纳米级 $M_{23}C_6$ 和MX相析出,表现出优良的热强性。在火电机组过热器(540 °C、1.5 MPa)服役105 000 h^[11]和主蒸汽管道(571 °C、24.5 MPa)服役40 000 h^[12]后,组织依然为回火板条马氏体,位错密度较高并形成了许多细小的亚晶粒,仍能

保持较高的持久蠕变强度。但热处理工艺不当可能导致 FM 钢的组织稳定性恶化,长时服役后出现块状铁素体和大尺寸碳化物,性能明显降低^[12]。Abe^[13]发现,热处理后具有较高位错密度的耐热钢在短时间内表现出较高的强度,但更易出现组织回复和再结晶,造成组织软化和持久蠕变强度降低。此外,FM 钢焊后热处理需控制在较窄的温度范围内,如工艺控制不当出现过回火会导致硬度降低、硬度分布不均等情况,造成接头组织性能下降^[14]。因此,明确低热胀 9Cr-1Mo 系 FM 钢的热处理制度,综合利用析出强化、位错强化、固溶强化及晶界强化等强化机制,是支撑工艺管道 60 年长寿期安全服役的重要保证。

Maruyama 等^[15]基于 Mod. 9Cr1Mo 钢持久检测数据,对比研究了不同正火、回火制度对 Mod. 9Cr1Mo 钢持久性能的影响,发现提高正火温度或延长正火时间有助于原始奥氏体晶粒粗化,从而改善持久蠕变强度;而提高回火温度或延长回火时间会加快马氏体板条合并,导致短时持久强度降低。Kral 等^[16]对 P92 钢的研究表明,将晶粒尺寸减小到超细晶区域会降低 P92 钢的蠕变抗力,蠕变速率指数(n)明显低于粗晶 P92 钢,其机理与高角度晶界处位错的动态回复有关。此外,Abe 等^[17-18]对比了不同热处理工艺对 FM 钢的性能影响,明确了弥散分布的 MX 相对提高持久性能有显著作用。Ennis 等^[19]发现随着正火温度升高,P92 钢中 MX 相颗粒尺寸迅速增大,体积密度显著减小,且正火温度提高至 1 125 ℃ 以上时,原始奥氏体尺寸迅速增加。但由于 $M_{23}C_6$ 相主要在原始奥氏体晶界和马氏体板条间界面位置形核,随正火温度提高,形核位置减少,析出相尺寸略微增加,但间距降低,仍然起到改善第二相强化效果的作用^[20]。Zielińska-Lipiec 等^[21-22]对 NF616、VM12 钢不同正火、回火温度下组织进行表征,发现随着正火温度的升高,板条宽度增加,位错密度降低,但 MX 相的尺寸几乎不随正火/回火温度升高而增加。

为进一步验证热处理对 FM 钢力学性能的影响,优化热处理工艺制度,本研究通过对比不同正回火工艺下 FM 钢的力学性能、显微组织和析出相情况,结合模拟焊后热处理工艺试验,明确热处理制度对组织稳定性的影响规律,从而为制订低

热胀无缝钢管性能热处理和焊后热处理工艺制度提供依据。

1 试验方法

试验用低热胀 FM 钢取自热轧+热扩工艺制制的 $\phi 1\ 118\ \text{mm} \times 18\ \text{mm}$ 大径厚比无缝钢管,其化学成分(质量分数 w)列于表 1。采用 Thermocalc 热力学软件 TCFE10 数据库计算的热力学相图如图 1 所示。采用箱式热处理炉进行正回火处理和模拟焊后热处理研究,热处理工艺如图 2 所示,工艺制度如表 2 所列。

对热处理后相关试样开展组织及力学性能表征。金相试样经磨抛后采用 5 g FeCl_3 +50 mL HCl +

表 1 低热胀铁素体-马氏体耐热钢化学成分

Table 1 Composition of low thermal expansion ferrite-martensite heat resistant steel

元素	w/%	元素	w/%
C	0.10	Ni	0.12
Si	0.30	Mo	0.95
Mn	0.35	V	0.20
P	0.012	Nb	0.077
S	0.002 9	N	0.053
Cr	8.81	Fe	余量

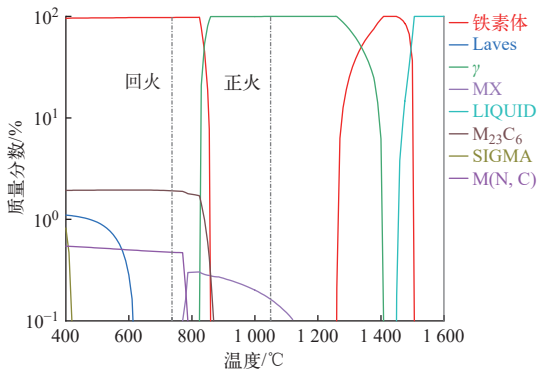


图 1 低热胀铁素体-马氏体耐热钢平衡相图

Fig. 1 Equilibrium phase diagram of low expansion FM steel

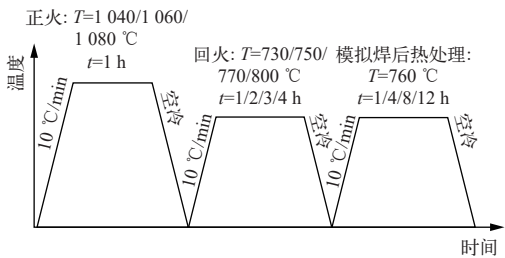


图 2 试验钢热处理工艺

Fig. 2 Heat treatment processes of testing steel

表 2 试验钢正回火工艺设计

Table 2 Heat treatment designing of testing steel

项目	正火工艺	回火工艺
正火温度影响	1 040/1 060/1 080 °C×1 h, 空冷	770 °C×1 h, 空冷
回火温度影响	1 060 °C×1 h, 空冷	730/750/770/800 °C×1 h, 空冷
回火时间影响	1 060 °C×1 h, 空冷	770 °C×1/2/3/4 h, 空冷
模拟焊后	1 060 °C×1 h, 空冷	770 °C×1 h, 空冷+
热处理影响		760 °C×1/4/8/12 h, 空冷

100 mL 去离子水混合液腐蚀 10~20 s, 在 Leica FEM-4M 光学显微镜(OM)和 FEI Quanta650 扫描电镜(SEM)下观察显微组织。随后将该试样重新机械研磨、抛光后进行电解抛光, 电解抛光液为 10 °C 的 100 mL HClO_4 +900 mL $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 混合液, 抛光电压为 20 V, 抛光时间为 10~15 s, 然后用 JSM-IT800 场发射电镜进行 EBSD 观察, 扫描步长为 0.05 μm , 扫描区域为 43 μm ×32 μm 。透射电镜试样经机加工减薄后, 利用 150 mL HClO_4 +850 mL $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 双喷减薄, 试验温度为-25 °C, 双喷电压为 22 V, 然后在 Hitach-800 透射电镜下对组织形貌进行观察。拉伸、冲击等力学性能

采用 WE-300B 万能拉伸试验机、GNT 100 高温拉伸试验机和 FWC332-1800-G 冲击试验机进行分析。

2 试验结果

2.1 正火温度对组织及力学性能的影响

正火温度对试验钢室温力学性能和 550 °C 高温力学性能的影响如图 3 所示。相较于热处理前试样, 正火+回火热处理后试样强度明显提高, 但断面收缩率大幅降低。随着正火温度由 1 040 °C 提高至 1 060 °C, 抗拉强度(R_m)和屈服强度($R_{p0.2}$)均提高 20 MPa 以上, 但继续提高正火温度至 1 080 °C 强度变化不明显, 且伸长率和断面收缩率基本不受正火温度影响。不同正火温度对应金相组织如图 4 所示。图 4a 为管材初始组织, 由图 4b~d 可见, 正火后发生奥氏体再结晶相变, 晶粒尺寸得到显著细化。通过截点法统计不同正火温度下原始奥氏体晶粒尺寸平均值, 分别为 10.2、9.6、10.4 μm , 表明正火温度升高晶粒未发生明显粗化。

图 5 为不同正火温度下析出相的 TEM 图像。结

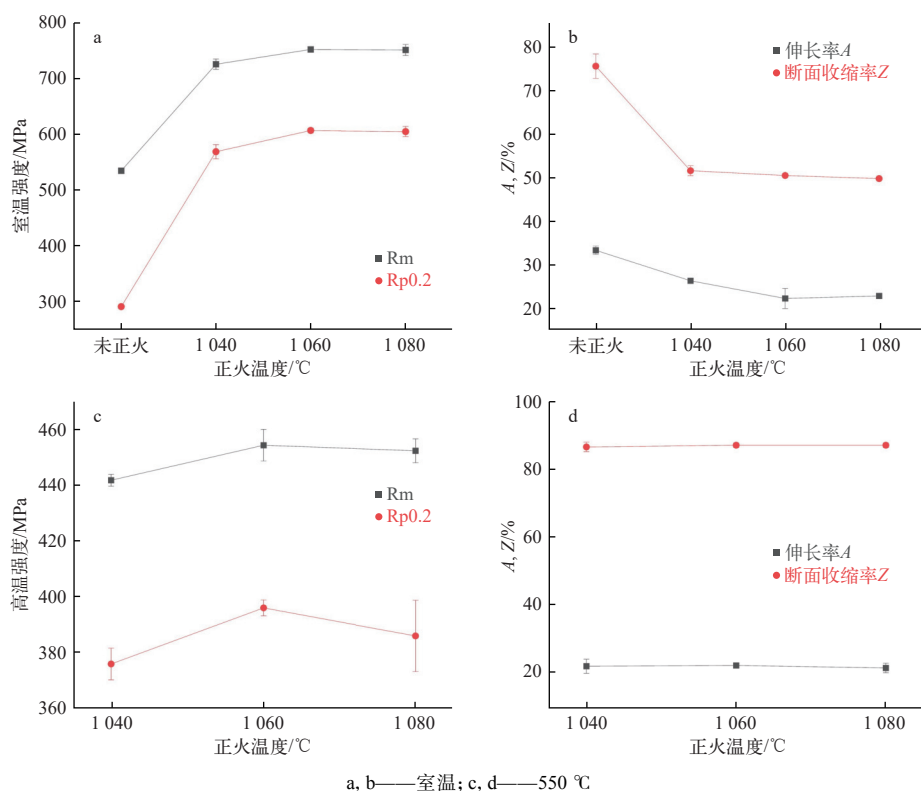
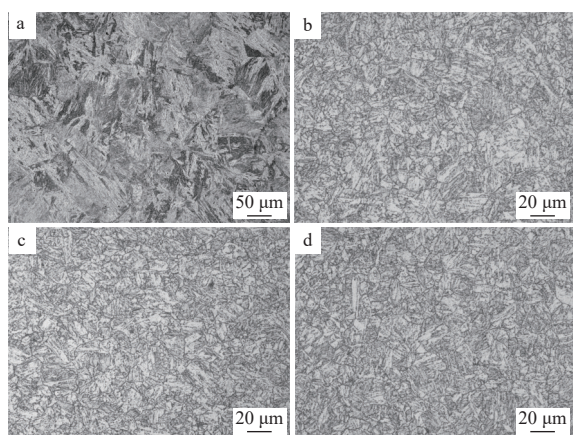


图 3 正火温度对力学性能的影响

Fig. 3 Effect of normalizing temperature on mechanical properties



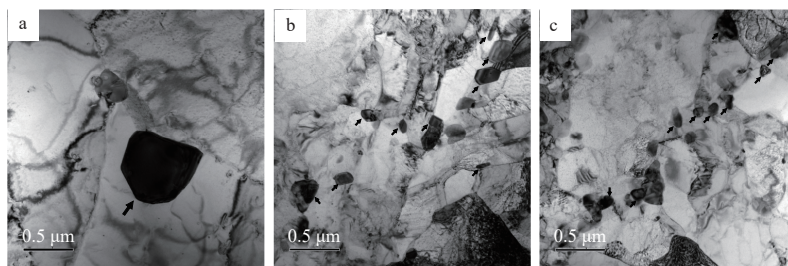
a——热处理前; b——1 040 °C; c——1 060 °C; d——1 080 °C

图4 正火温度对显微组织的影响

Fig. 4 Effect of normalizing temperature on microstructures

合图1可知, FM钢中主要析出相包括 $M_{23}C_6$ 、MX、Laves相和Z相, 其中Laves相和Z相均为长

时服役过程中出现的^[23], 在正火+回火处理后钢中析出相经标定后均为 $M_{23}C_6$ 和MX相。性能热处理前, 试验钢中存在大尺寸 $M_{23}C_6$, 尺寸可达0.5 μm以上(图5a)。热力学计算表明, 当前正火温度下 $M_{23}C_6$ 相可完全回溶, 而随着正火温度由1 040 °C提高至1 060 °C以上, MX相回溶更加充分, 但仍未达到完全回溶温度。合金元素Cr、Mo、C等回溶更加充分, 在相同回火温度下能够析出更为细小弥散的 $M_{23}C_6$ 相, 从而促进析出强化, 提高材料的强度。统计20张随机视场TEM图像可知, 随着正火温度由1 040 °C提高至1 060 °C, $M_{23}C_6$ 相尺寸由(150±30) nm降低至(138±19) nm, 尺寸得到细化同时均匀性大幅提高。而MX相主要在位错析出, 尺寸集中在5~20 nm, 正火温度对该析出相尺寸影响较小。



a——未热处理; b——1 040 °C; c——1 060 °C(箭头所指为 $M_{23}C_6$)

图5 不同正火温度下典型析出相的TEM形貌

Fig. 5 TEM morphology of typical precipitates at different normalizing temperatures

2.2 回火温度对组织及力学性能的影响

回火温度对新型耐热钢室温力学性能的影响如图6所示。相较于1 060 °C正火1 h(未回火)后试样, 回火可以促进马氏体基体中过饱和的固溶元素析出, 从而大幅改善组织稳定性及材料韧性。尤其对于550 °C高温强度, 回火后试样抗拉/屈服强度降低约400 MPa, 同时断面收缩率提高约20%。而随回火温度由730 °C提高至800 °C, 试验钢强度几乎呈线性下降, 室温下抗拉/屈服强度由最高的878/756 MPa降低至674/505 MPa, 高温抗拉/屈服强度由最高的558/471 MPa降低至418/343 MPa。

在回火过程中, FM钢主要发生 $M_{23}C_6$ 相析出和马氏体板条回复再结晶, 因此对不同回火温度下显微组织进行了EBSD表征, 结果如图7所示。图7a、b分别为电镜下730 °C和770 °C回火后显微

组织形貌, 对应的IPF反极图如图7c、d所示。由图7a~d可见, 正火+回火后FM钢组织为全马氏体结构, 且随回火温度的升高原始奥氏体晶粒内板条状马氏体逐渐向块状马氏体转变。图7e、f为回火组织晶界分布, 其中蓝线为取向差在2°~15°的小角度晶界(low-angle boundary, LAB), 黑线为取向差高于15°的随机大角度晶界(random high-angle boundary, HAB), 对应统计结果如表3所列。随回火温度的升高, 相邻取向差较小的马氏体板条逐渐合并, HAB占比增加2.7%。由于晶界处原子排列的紊乱和缺陷的存在, 为裂纹的扩展提供了较低的能量路径, 使得晶界成为材料中的薄弱区域。回火温度从730 °C升至770 °C, 包括原始奥氏体晶界在内的晶界总长度缩短了34%, 可以有效阻碍裂纹扩展, 对持久蠕变性能有一定改善作用^[17]。图7g、h为回火组织KAM图。在

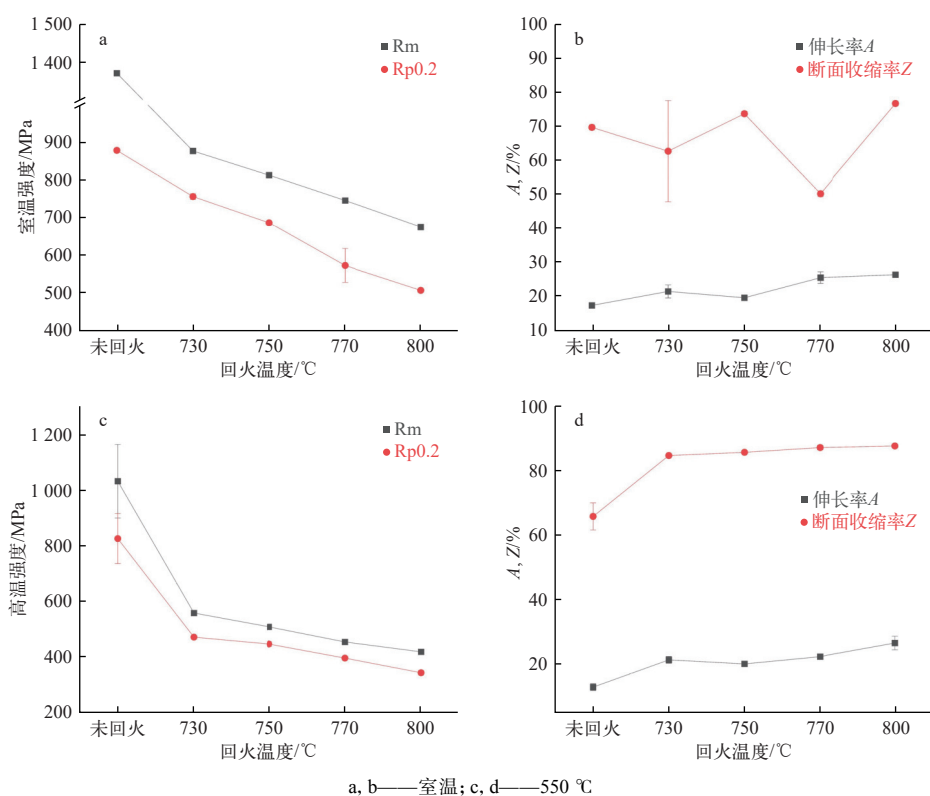


图6 回火温度对力学性能的影响

Fig. 6 Effect of tempering temperature on mechanical properties

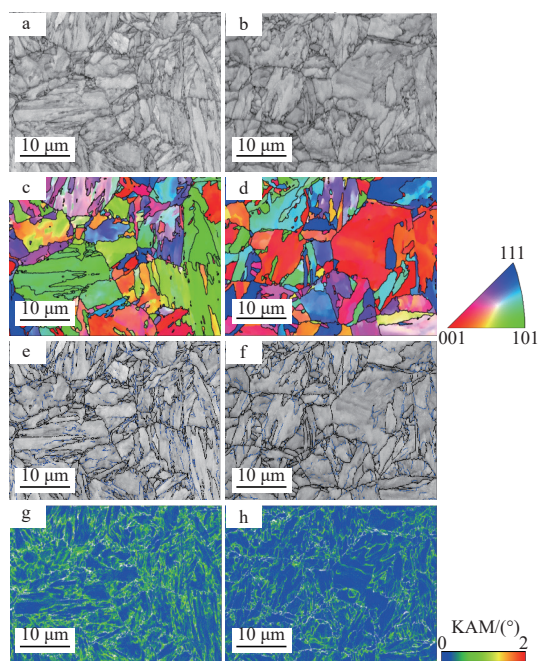


图7 回火温度对显微组织影响的EBSD检测结果

Fig. 7 Effect of tempering temperature on microstructure EBSD detection results

回火态时,材料中的位错密度较高,在短期服役时,能够起到很好的强化效果,可以提高材料的持

久蠕变性能;但随着服役时间的延长,位错会发生较快的回复和湮灭,导致位错密度迅速下降,强化效果明显弱化。随着回火温度升高至 770 °C,马氏体板条回复加剧,位错密度降低,导致强度迅速下降。

表3 不同回火温度下的晶界分布
Table 3 Distribution of grain boundaries at different normalizing temperatures

回火温度/°C	LAB 占比/%	HAB 占比/%	晶界长度/cm
730	35.3	64.7	0.95
770	32.6	67.4	0.63

2.3 回火时间及模焊热处理对力学性能的影响

在 1 060 °C 正火 1 h、770 °C 回火不同时间后试验室室温强度、塑性及冲击功变化如图 8a~c 所示。随着回火时间由 1 h 延长至 2 h,室温抗拉强度降低约 50 MPa,屈服强度波动减小,断面收缩率提高 25%,冲击功提高 10 J;继续延长回火时间至 3 h 以上,抗拉强度、塑性、冲击功基本不再发生明显变化,仅屈服强度略有降低。回火时间延长有助于析出相充分析出,使基体中间隙原子

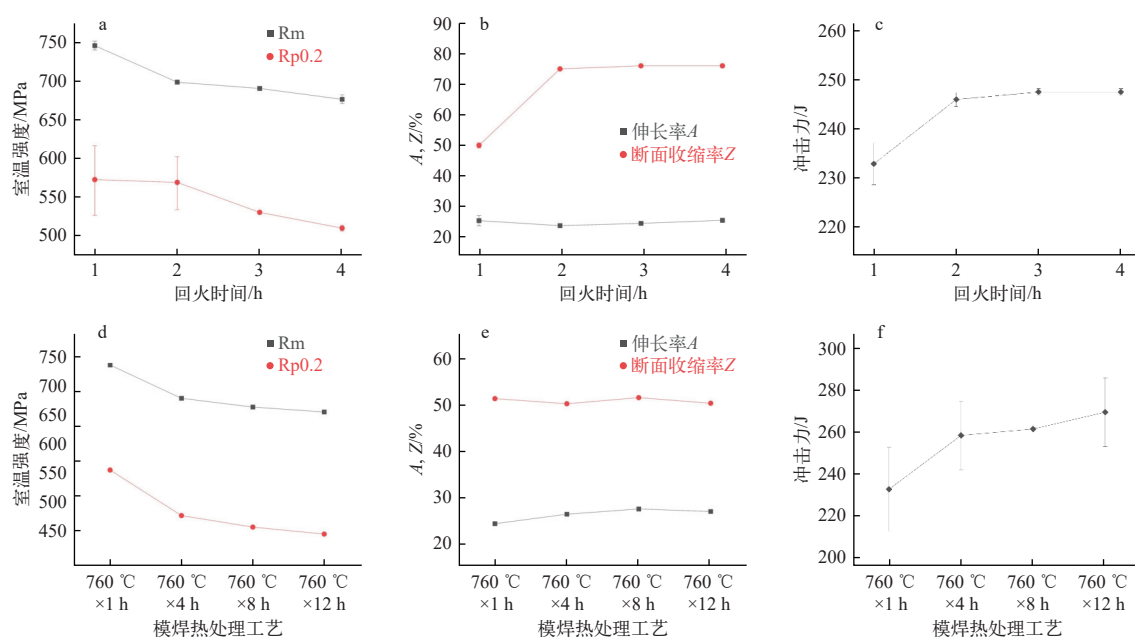


图8 回火时间及模拟焊后热处理对室温强度及冲击功的影响
Fig. 8 Effect of tempering time and post-welding on strength and impact

过饱和度降低, 固溶强化效果减弱, 从而降低强度、提高韧性。同时这些细小的析出相颗粒弥散分布在基体中, 有效阻碍了位错的运动, 从而提高了材料的持久性能。析出相的存在还有助于稳定材料的组织。在高温和长期服役条件下, 材料容易发生组织退化和性能下降, 而析出相通过钉扎晶界和亚晶界, 抑制了晶粒的长大和亚晶粒的合并, 从而减缓了组织的退化过程^[24]。因此, 对于低热胀管道用 FM 钢, 热处理时在 770 °C 回火 2 h 以上有助于降低位错密度, 减缓持久蠕变过程中组织回复导致的软化, 并进一步发挥析出强化作用。图 8d~f 为模拟焊后热处理对室温力学性能及冲击功的影响。770 °C 回火 1 h 后, 试验钢在 760 °C 进行 1 h 模拟焊后热处理的性能和热处理前性能基本一致, 而延长热处理时间至 4 h 以上, 强度略有降低但力学性能基本保持稳定, 有助于保证焊接后管体性能的一致性。

3 结论

- 1) 随正火温度的提高, 低热胀 FM 钢合金元素回溶更加充分, 在相同回火温度下能够析出更为细小弥散的 $M_{23}C_6$ 相, 且原始奥氏体晶粒尺寸基本不变, 室温及高温强度先升高后基本保持不变。
- 2) 回火后低热胀马氏体钢为全马氏体结构, 随回火温度的升高, 板条状马氏体合并为块状马

氏体, 晶界总长度减少, 且马氏体板条回复加剧, 位错密度降低, 导致强度迅速下降。

- 3) 随回火时间延长至 2 h 以上, 析出相充分析出导致基体强度降低、冲击功提高, 组织基本达到稳定, 继续延长回火时间或焊后热处理时间强度不会发生明显变化。

- 4) 综合力学性能和组织分析结果, 建议低热胀管道采用 1 060 °C×1 h 正火、770 °C×2 h 回火制度进行热处理, 确保热处理后组织达到稳定, 并获得最优的力学性能。

参考文献:

- [1] 张东辉, 王松平, 代智文. 国际快堆发展综述[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(增刊): 265-270.
ZHANG Donghui, WANG Songping, DAI Zhiwen. Review on development of sodium-cooled fast reactor worldwide[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(Suppl.): 265-270(in Chinese).
- [2] KLUEH R L, HASHIMOTO N, MAZIASZ P J. Development of new nano-particle-strengthened martensitic steels[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(3): 275-280.
- [3] TAN L, SOKOLOV M A, PAWEL S J, et al. Varied enhancements in mechanical properties and sodium compatibility of Grade 92 by thermomechanical treatments[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 832: 142359.
- [4] SAMANT S S, SINGH I V, SINGH R N. Effect of tem-

- pering and rolling on fatigue crack growth behavior of modified 9Cr-1Mo steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(11): 5898-5912.
- [5] 郑全, 钟巍华, 王成龙, 等. 样品尺寸变化对 T91 钢蠕变力学行为的影响[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(2): 334-344.
- ZHENG Quan, ZHONG Weihua, WANG Chenglong, et al. Effect of specimen size change on creep mechanical behavior of T91 steel[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(2): 334-344(in Chinese).
- [6] 张钰慧, 孟彬, 王立民, 等. 10Cr9Si1Mo1VNb 钢在 450 °C 静态铅铋中的腐蚀行为[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(11): 2371-2378.
- ZHANG Yuhui, MENG Bin, WANG Limin, et al. Corrosion behavior of 10Cr9Si1Mo1VNb steel in static lead-bismuth eutectic at 450 °C[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2024, 58(11): 2371-2378(in Chinese).
- [7] 田浪浪, 马誉高, 张卢腾, 等. 高温液钠与不锈钢界面润湿机制研究[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(9): 1902-1911.
- TIAN Langlang, MA Yugao, ZHANG Luteng, et al. Study on interface wetting mechanism between high-temperature liquid sodium and stainless steel[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2024, 58(9): 1902-1911(in Chinese).
- [8] ONIZAWA T, HASHIDATE R. Development of creep property equations of 316FR stainless steel and Mod. 9Cr-1Mo steel for sodium-cooled fast reactor to achieve 60-year design life[J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2019, 6(1): 18-00477.
- [9] KANNAN R, SANDHYA R, GANESAN V, et al. Effect of sodium environment on the low cycle fatigue properties of modified 9Cr-1Mo ferritic martensitic steel[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 384(3): 286-291.
- [10] KANNAN R, GANESAN V, MARIAPPAN K, et al. Influence of dynamic sodium environment on the creep-fatigue behaviour of modified 9Cr-1Mo ferritic-martensitic steel[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(8): 2807-2812.
- [11] GOLĄŃSKI G, ZIELIŃSKA-LIPIEC A, ZIELIŃSKI A, et al. Effect of long-term service on microstructure and mechanical properties of martensitic 9% Cr steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(3): 1101-1107.
- [12] 钟万里, 李文胜, 王伟, 等. P91 钢管长时间服役后的组织与力学性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(6): 54-60.
- ZHONG Wanli, LI Wensheng, WANG Wei, et al. Microstructure and mechanical properties of P91 steel pipe after long term service[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(6): 54-60(in Chinese).
- [13] ABE F. Creep rates and strengthening mechanisms in tungsten-strengthened 9Cr steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 319: 770-773.
- [14] 宋海峰, 谭敦权. 核电常规岛安装工程 P91 钢主蒸汽管道焊接技术[J]. 安装, 2024(增刊 1): 102-103.
- [15] MARUYAMA K, NAKAMURA J, SEKIDO N, et al. Causes of heat-to-heat variation of creep strength in grade 91 steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 696: 104-112.
- [16] KRÁL P, DVORÁK J, SKLENICKÁ V, et al. The effect of ultrafine-grained microstructure on creep behaviour of 9% Cr steel[J]. *Materials*, 2018, 11(5): 787.
- [17] ABE F. Heat-to-heat variation in long-term creep strength of some ferritic steels[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2010, 87(6): 310-318.
- [18] TANEIKE M, SAWADA K, ABE F. Effect of carbon concentration on precipitation behavior of M23C6 carbides and MX carbonitrides in martensitic 9Cr steel during heat treatment[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35(4): 1255-1262.
- [19] ENNIS P J, ZIELIŃSKA-LIPIEC A, WACHTER O, et al. Microstructural stability and creep rupture strength of the martensitic steel P92 for advanced power plant[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(12): 4901-4907.
- [20] YAN P, LIU Z, BAO H, et al. Effect of normalizing temperature on the strength of 9Cr-3W-3Co martensitic heat resistant steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 597: 148-156.
- [21] ZIELIŃSKA-LIPIEC A, CZYRSKA-FILEMONOWICZ A, ENNIS P J, et al. The influence of heat treatments on the microstructure of 9% chromium steels containing tungsten[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 64(1/2/3): 397-405.
- [22] ZIELIŃSKA-LIPIEC A, KOZIEL T, CZYRSKA-FILEMONOWICZ A. Quantitative characterisation of the microstructure high chromium steel with boron for advanced steam power plants[J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2010, 43(1): 200-204.
- [23] LIU Z, LIU Z, WANG X, et al. Evolution of the microstructure in aged G115 steels with the different concentration of tungsten[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 729: 161-169.
- [24] YU Y, LIU Z, ZHANG C, et al. Correlation of creep fracture lifetime with microstructure evolution and cavity behaviors in G115 martensitic heat-resistant steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 788: 139468.