● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3210

多次热处理对超超临界锅炉用 P92 钢显微组织及硬度的影响

王 瑜[1,2],坚永鑫[1,3],胡鹏飞[2],王耿洁[3],皇志富[3]
(1. 西安交通大学 机械工程学院,陕西 西安 710049; 2. 陕西省特种设备检验检测研究院,陕西 西安 710054; 3. 西安交通大学 材料科学与工程学院 金属材料强度国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘 要:在超超临界机组用 P92 钢管道现场安装过程中,为了满足硬度标准经常对接头部位进行多次回火处理,但当前关于多次热处理对 P92 钢显微组织及其硬度的影响规律尚不清楚。为此,本文对 P92 钢进行 1~4 次回火处理,借助 OM、SEM、XRD、TEM 及硬度计等分析其显微组织特征及硬度变化规律。结果表明,多次回火处理后 P92 钢均主要由板条状回火马氏体、原奥氏体界面处的 $M_{23}C_6$ 相和马氏体内的 MX 相组成,其物相组成无明显差异。随回火次数增加,马氏体板条宽度逐渐增加,4 次热处理后提高约 52.2%;界面处的 $M_{23}C_6$ 析出相发生明显粗化,但析出相数量有所减少,主要粗化机制为 Ostwald 熟化;基体中 Cr、Mo 和 W 合金元素的固溶含量下降,导致回火马氏体的固溶强化作用减弱,P92 钢的硬度呈现降低现象。

关键词:P92 钢;回火处理;显微组织;析出相;维氏硬度
中图分类号:TG379 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2023)11-0997-07

Effect of the Tempering Times on the Microstructure and Hardness of P92 Steel for USC Boilers

WANG Yu[1,2], JIAN Yongxin[1,3], HU Pengfei[2], WANG Gengjie[3], HUANG Zhifu[3]
(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Special Equipment Inspection and Testing Institute, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: During the installation process of P92 steel pipes in the ultra-supercritical units, tempering treatment is a popular method to adjust the hardness of weld joints so that the hardness can meet the installation standard. However, it is still unclear how repeated heat treatments affect the microstructure and hardness of P92 steel. Thus, P92 steel was subjected to 1~4 times of tempering, and the microstructure and hardness evolution were analysed by utilizing OM, SEM, XRD, TEM and hardness testing. The results show that P92 steel is mainly composed of lath martensite, the $M_{23}C_6$ phase and the MX phase. The $M_{23}C_6$ phase mainly precipitates on the interface of the lath or original austenite boundaries, while the MX phase distributes inside martensite laths. The phase composition of P92 steel has little change after different tempering times. With increasing tempering times, the width of the martensitic lath gradually increases by approximately 52.2% after 4 times of tempering. The $M_{23}C_6$ phase at the interface obviously coarsens, while the amount gradually decreases. The main coarsening mechanism of the $M_{23}C_6$ phase is Ostwald ripening. In addition, the contents of Cr, Mo and W alloying elements decrease in the matrix, causing the weakening of the solid solution strengthening. Consequently, the Vickers hardness of P92 steel tends to decrease with increasing tempering times.

Key words: P92 steel; tempering treatment; microstructure; precipitated phase; Vickers hardness

收稿日期:2023-08-11
基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2019MK162HZ)
作者简介:王 瑜,1981 年生,硕士,高级工程师.研究方向为锅炉、压力容器、压力管道检验及相关研究.Email: 2440023458@qq.com
通讯作者:坚永鑫,1988 年生,博士,副教授.研究方向为高速激光熔覆涂层制备与再制造技术、先进抗磨蚀合金、陶瓷及复合材料开发研究.Email: yxjian@xjtu.edu.cn
引用格式:王瑜,坚永鑫,胡鹏飞,等.多次热处理对超超临界锅炉用 P92 钢显微组织及硬度的影响[J].铸造技术,2023,44(11): 997-1003
WANG Y, JIAN Y X, HU P F, et al. Effect of the tempering times on the microstructure and hardness of P92 steel for USC boilers[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 997-1003

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

20 世纪 90 年代初，由于 T91/P91 钢综合性能优良，在日本开始大量推广应用。在此基础上，研究发现当 T91/P91 钢在 600 ℃以上条件下工作时容易出现疲劳失效的问题，无法满足使用温度高于 600 ℃时仍能长期安全服役的需求。因此，为适应电站锅炉向高参数的发展，日本学界在 T91/P91 钢种的基础上，开发了新的大型机组锅炉用钢钢种。其中新日铁公司开发了 T92/P92 钢，其是在 T91/P91 钢成分的基础上引入 1.5%~2.0%的元素 W，减少部分元素 Mo，同时添加微量的元素 B 而获得[1]。T92/P92 钢种于 1996 年获得 ASME 标准认定。2005 年，德国瓦鲁海克研究中心联合萨尔茨基特思曼研究公司，综合了 ECCC 对 P92 钢蠕变断裂试验的相关数据，采用 Graphical 法外推 P92 钢在温度为 650 ℃、寿命为 10 000 h 时的蠕变断裂强度为 90 MPa，约为 P91 钢蠕变断裂强度的 1.5 倍，P92 钢持久塑性约为 P91 钢的 1.6 倍[2]。并且，相较于 T91/P91 钢，T92/P92 钢在 600 ℃条件下的许用应力增加了约 34%，这一指标达到了 TP347 钢的水平，并具有较好的塑韧性、加工性能、可焊性和高温蠕变性能，逐渐成为了温度在 600 ℃以上、压力在 25~30 MPa 的超超临界机组中主蒸汽管道与再热蒸汽管道等的理想钢种。

P92 钢的显微组织具有热不稳定性，在长期服役于高温、高压氛围的条件下，P92 钢可能会产生一系列的显微组织演变，例如板条状回火马氏体的等轴化、位错的运动导致位错密度的下降、析出相 $M_{23}C_6$ 相向 Laves 相的转变以及析出相 MX 相向 Z相的转变等[3-6]。Laves 相是一种六方晶系结构的 A_2B 型金属间化合物，其化学式为$(Fe/Cr)_2(W/Mo)$；Z 相为四方晶系结构，其化学式为 Cr(V/Nb)N。Laves 相在长时服役过程中的粗化速率远高于 $M_{23}C_6$ 相。这些演变会弱化材料强度，导致构件过早地产生蠕变断裂[7-9]。然而，在锅炉现场安装过程中，常利用回火处理的方法以降低 P92 钢及其焊接接头的硬度，从而保证其满足锅炉管道检验标准。目前关于多次热处理后 P92 钢的显微组织及硬度规律，尤其是对其蠕变极限和强度密切相关的 $M_{23}C_6$ 析出相的演化规律，尚不清晰，亟待进一步研究。

本文重点研究 P92 钢经历 1~4 次回火处理后其显微组织及硬度的演化规律，借助 OM、SEM、XRD、EBSD 和 TEM 等分析 P92 钢显微组织物相组成等特征及其随回火次数的变化情况。

1 实验材料与方法

实验用 P92 钢材料由陕西省特种装备质量检测研究院提供，为轧制态钢管(规格为 ϕ426 mm×40 mm)，材料种类为 ASME-A335 P92 钢，对应国内牌号为 10Cr9MoW2VNbBN。该 P92 钢属于 9%Cr(质量分数)马氏体耐热钢，其标准化学成分如表 1 所示。

表 1 ASME-A335 中 P92 钢标准化学成分[10]
Tab.1 The standard chemical compositions of P92 steel according to ASME-A335[10]

(mass fraction/%)

元素		C	Si	Mn	P	S	Cr	W
含量	下限	0.07	-	0.30	-	-	8.50	1.50
	上限	0.13	0.50	0.60	0.020	0.010	9.50	2.00
元素		V	Ni	N	Mo	B	Nb	Al
含量	下限	0.15	-	0.03	0.30	0.001	0.04	-
	上限	0.25	0.40	0.07	0.60	0.006	0.09	0.02

利用电火花线切割，从 P92 钢管上切去尺寸为 100 mm×100 mm 的试块，随后置入箱式电阻炉中，进行回火处理。根据国家电力行业标准 DL/T 819-2019《火力发电厂焊接热处理技术规程》，确定回火温度为 760 ℃，保温时间为 6 h，回火过程的预热温度为 150~250 ℃。在回火处理过程中，要求升降温速度须不超过 150 ℃/h，在 300 ℃以下可不控制升、降温速度。将 P92 钢试样分别进行 1、2、3、4 次回火，从而得到不同回火次数的测试样品，以模拟现场使用过程中的多次回火处理过程。

为了观察试样组织，将机械研磨和抛光后的金相试样在自制腐蚀剂(4 mL 双氧水 +3 mL 浓硝酸 +2 mL 氢氟酸 +20 mL 白猫洗洁精 +100 mL 蒸馏水)中腐蚀，以获得清晰的显微组织。利用 Leica DM5500 光学金相显微镜(OM)、TESCAN MIRA3 扫描电子显微镜(SEM)观察试样的显微组织特征；利用牛津 EBSD (借助 ZEISS SEM)、Bruker D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)及 JEM 2100F 透射电子显微镜(TEM)表征试样的物相变化及小尺度析出相的形态演化特征。利用 HXD-1000 TMC 型显微维氏硬度计，试验力为 0.49 N，保压时间为 10 s，测试不同回火处理后试样的硬度变化规律。

2 实验结果及讨论

2.1 微观组织

图 1 为经受不同回火处理次数的 P92 钢的光学金相组织图片。从图中可以看出，P92 钢主要由回火马氏体组成，其生长于原奥氏体晶粒内部；原始奥氏体的尺寸约为 50~200 μm，回火马氏体束的宽度约为 1~5 μm。随着回火次数的增加，原始奥氏体的尺寸未发生明显变化，而回火马氏体板条则有明显粗化的趋势。通过 Image Pro Plus 软件统计，可以发现，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

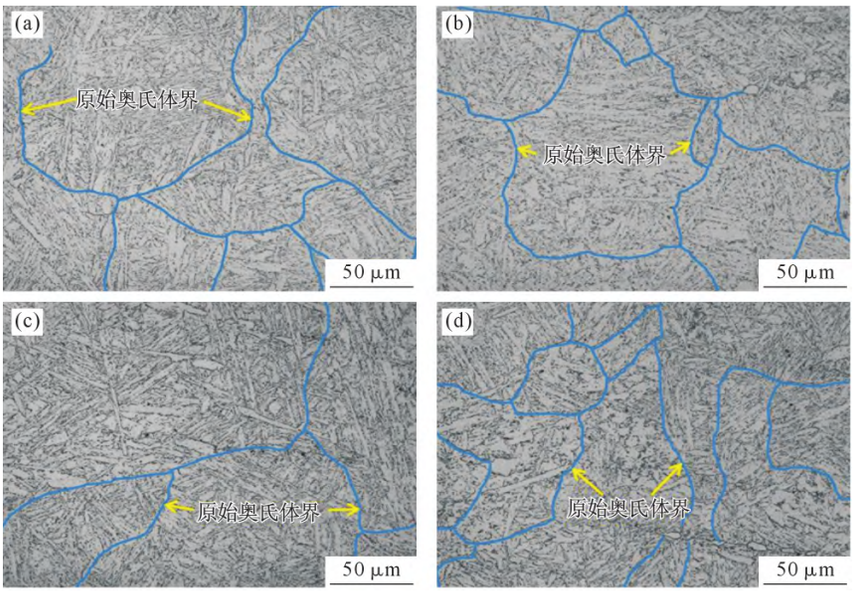

图 1　不同回火处理次数的 P92 钢光学金相组织：(a) 1 次，(b) 2 次，(c) 3 次，(d) 4 次

Fig.1　Metallographic structure of P92 steels with different tempering times: (a) once, (b) twice, (c) 3 times, (d) 4 times

经受 1~4 次回火的马氏体板条宽度分别为 2.49、3.08、3.48 和 3.79 μm，4 次回火后板条宽度增加了约 52.2%。在回火过程中，马氏体内部位错不断运动到板条界面处，通过位错攀移和滑移而消失，使得马氏体板条界面逐渐模糊而发生粗化[11]。

利用 EBSD 对不同次数回火处理后 P92 钢中马氏体的取向进行分析，结果如图 2 所示，图中黑色粗实线代表晶体位向差大于 10°的大角度晶界，而黑色细实线代表晶体位向差为 2°左右的亚晶界。从图 2 可以发现，原奥氏体晶粒内部由若干个马氏体束组成，且同一奥氏体晶粒内部的马氏体束间晶体取向差较小。马氏体板条束则由若干个马氏体板条组成，且马氏体板条内部存在亚晶界，这可能源于回火过程中马氏体板条的合并长大现象。经过回火处理后，P92 钢并没有明显的取向特征，且随回火次数增加，马氏体取向特征未发生明显变化。

2.2　物相组成

图 3 为经受不同次数回火处理后 P92 钢的 XRD 图谱。从图中可以看出，经过不同次数的回火处理后，P92 钢的物相组成未发生明显变化，其主要由体心立方相的 Fe-Cr 相组成。结合前面 P92 钢的金相组织和 EBSD 分析结果，可以确认经历不同回火次数的 P92 钢主要由马氏体相组成。Wang 等[12]研究表明，P92 钢主要由回火马氏体、晶间及板条界分布的碳化物析出相和马氏体板条内分布的 MX 相组成。然而，由于析出相的含量较低，在 XRD 图谱中未发现明显的衍射峰。随着回火次数的增加，P92 钢的衍射峰为发生明显变化，仅发生了微小的偏移，其主

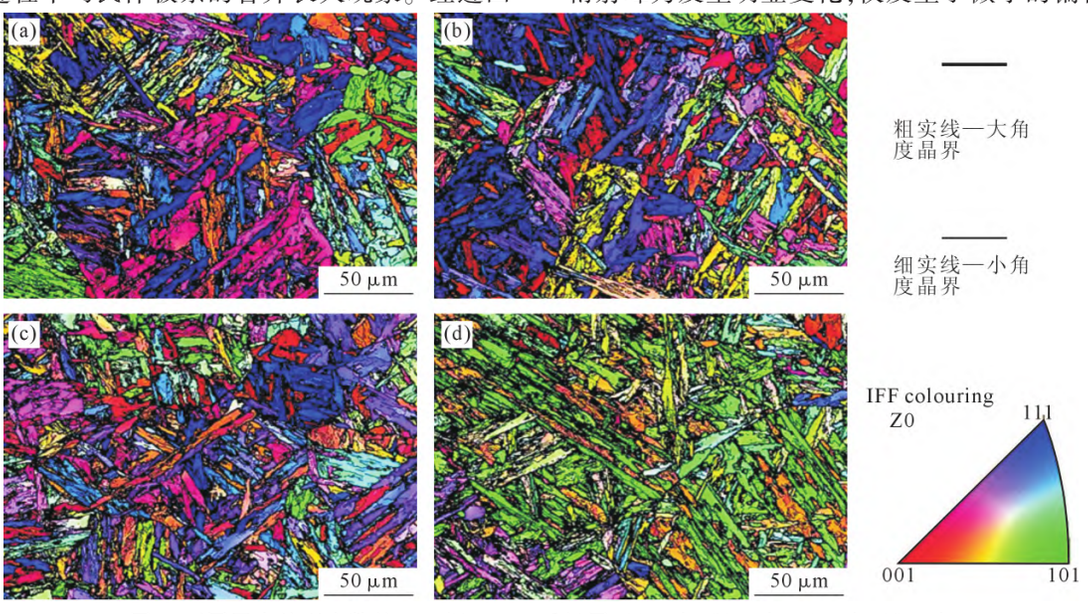

图 2　不同回火处理次数的 P92 钢 EBSD 反极图：(a) 1 次，(b) 2 次，(c) 3 次，(d) 4 次

Fig.2　EBSD IPFs of P92 steels with different tempering times: (a) once, (b) twice, (c) 3 times, (d) 4 times

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

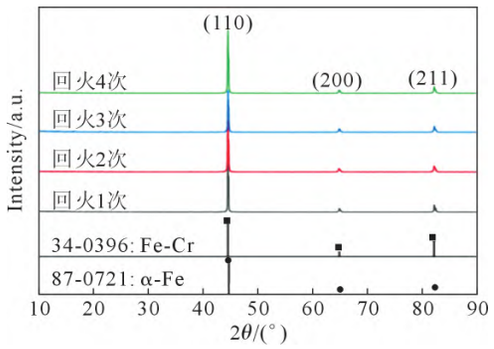

图 3 不同次数回火处理的 P92 钢 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of P92 steels with different tempering times

要由于马氏体内固溶元素含量变化导致的[13]。

图 4 分别为经过 1 次回火和 4 次回火处理的 P92 钢试样的 TEM 检测结果。由图 4a 和 b 可以看出，经回火处理后的 P92 钢内部主要由马氏体相及界面析出相组成。其中，在基体内部存在 50 nm 左右等轴状的析出相及少量位错，而沿着基体界面分布有 200 nm 左右的短棒状析出相。回火次数增加，位错密度降低，界面内的析出相尺寸未发生明显粗化，界面处的析出相发生粗化且数量密度降低。

通过对基体位置进行衍射分析，结果显示其主要为体心立方晶体结构，与 XRD 结果一致，说明回火处理后的 P92 钢主要由回火马氏体相组成。图 4e 和 f 分别为经过 1 次回火和 4 次回火处理的 P92 钢中马氏体基体内析出相的衍射斑点。经过标定分析，该相为 MX 相(M=V/Nb, X=C/N)。在 P92 钢中，MX

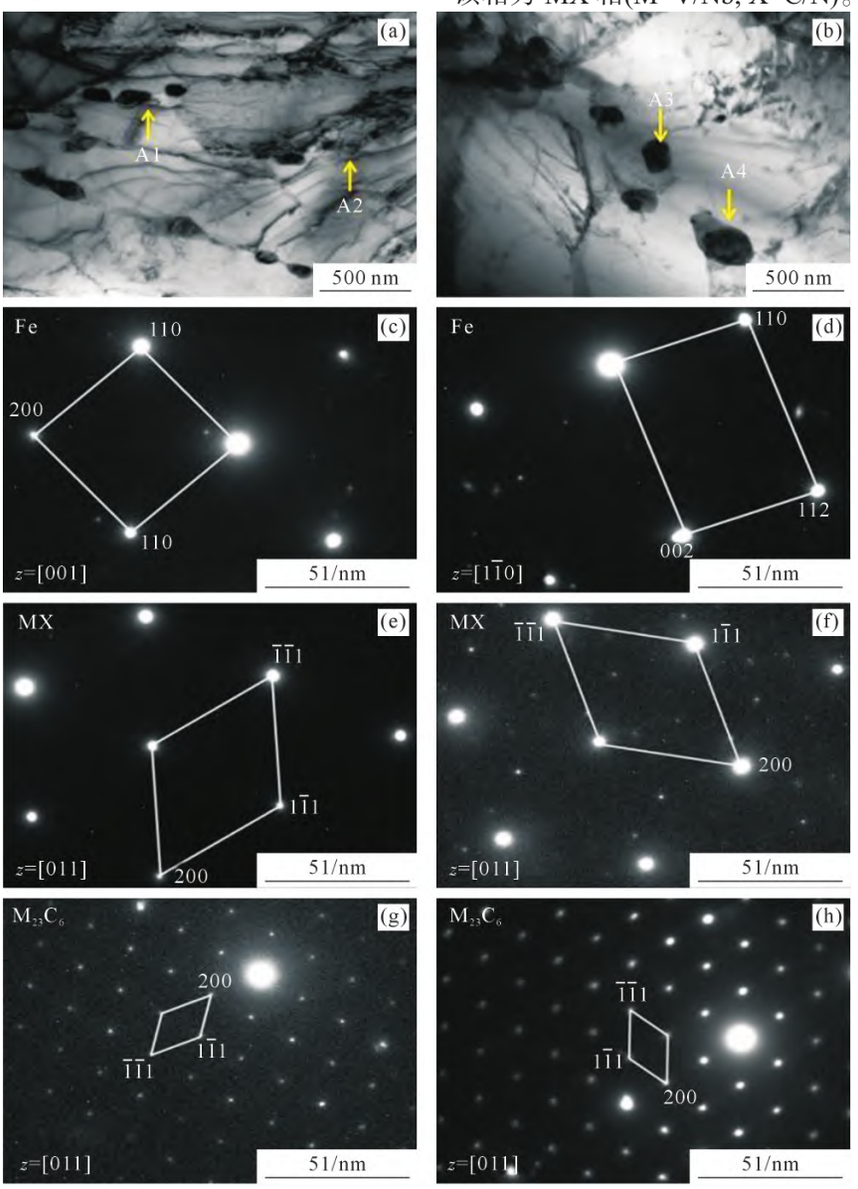

图 4 回火 1 次和 4 次处理后 P92 钢的 TEM 明场像和衍射分析：(a~b) 回火 1 次及 4 次试样明场像，(c~d) 回火 1 次及 4 次试样基体衍射斑点，(e~f) 回火 1 次及 4 次试样基体内析出相衍射斑点，(g~h) 回火 1 次及 4 次试样马氏体板条界析出相衍射斑点
Fig.4 TEM morphology and diffraction analysis of P92 steels with different tempering times: (a~b) TEM morphologies of samples with 1 and 4 times of tempering, respectively, (c~d) matrix diffraction spots of samples with 1 and 4 times of tempering, respectively, (e~f) diffraction spots of precipitated phase in the matrix of samples with 1 and 4 times of tempering, respectively, (g~h) diffraction spots of precipitated phase on the martensite lath boundaries of samples with 1 and 4 times of tempering, respectively

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

相是一种稳定相，回火次数增加，其将稳定存在，且种类、尺寸和数量不会发生较大变化，有利于阻碍晶体内位错的运动，从而提高材料蠕变强度[14]。由图 4g~h 可以看出，回火处理后 P92 钢中马氏体板条界处析出相为 $M_{23}C_6$ 相(M=Fe/Cr/Mo/W)。在经受 4 次回火处理后，$M_{23}C_6$ 相未发生晶格结构的改变，说明其未发生向 Laves 相的转变[15]。在高温服役过程中，Laves 相的粗化速率远高于 $M_{23}C_6$ 相，因此会显著恶化材料的高温力学性能[16-18]。结合 XRD 和TEM 分析结果可见，经回火处理的 P92 钢主要由回火马氏体、$M_{23}C_6$ 相和 MX 相组成。

2.3　微观组织演化

借助场发射 SEM 在高倍下观察 P92 钢的显微组织，以进一步分析不同热处理次数对其微观组织及物相的影响，如图 5 所示。从图中可以清晰地观察到，经回火处理后 P92 钢显微组织中原始奥氏体晶界及马氏体板条界处分布着大量的亮色 $M_{23}C_6$ 析出相；马氏体板条内部同时分布着少量的 MX 析出物。在原始奥氏体边界上分布的 $M_{23}C_6$ 析出相尺寸较大，且分布密集，主要呈现为短棒状或等轴状。在回火马氏体板条界上分布的 $M_{23}C_6$ 析出相主要呈短棒状，且析出相尺寸相对较小。在马氏体板条内，MX 析出相尺寸相对较小，主要呈颗粒状。界面处 $M_{23}C_6$ 析出相的形状主要受析出位置点阵结构的取向性约束影响，趋向于沿界面切向择优生长，而板条内部 MX 析出相生长无明显方向性。

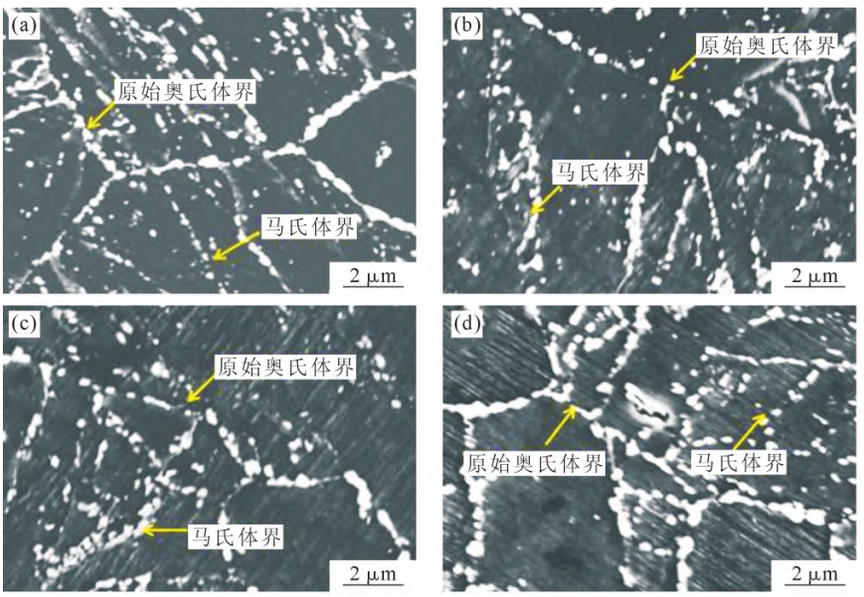

图 5　不同次数回火处理的 P92 钢高倍 SEM 组织图像：(a) 1 次，(b) 2 次，(c) 3 次，(d) 4 次

Fig.5　SEM images of P92 steels with different tempering times: (a) once, (b) twice, (c) 3 times, (d) 4 times

另一方面，由图 5 可以发现，随回火次数的增加，马氏体板条界上的 $M_{23}C_6$ 析出相出现明显的粗化现象，同时 $M_{23}C_6$ 析出颗粒分布密度有所降低。通过能谱分析可以发现，随着回火次数增加，马氏体板条内 Cr、Mo 和 W 合金元素含量有所降低，而板条界上 $M_{23}C_6$ 析出相中的合金元素比例有所提高。在回火过程中，马氏体基体中过饱和的合金元素脱溶析出，含量相应降低；同时马氏体板条界面处的细小 $M_{23}C_6$ 析出相趋于溶解，而较大的析出相不断吸收合金元素长大，通过 Ostwald 机制产生粗化[19]。而界面处碳化物析出相的尺度增大，会导致其第二相强化作用减弱，且在受外加载荷时容易开裂作为裂纹源，影响 P92 钢的力学性能。马氏体内固溶合金元素含量的降低，会导致其固溶强化作用减弱，从而影响钢材的强度和硬度。

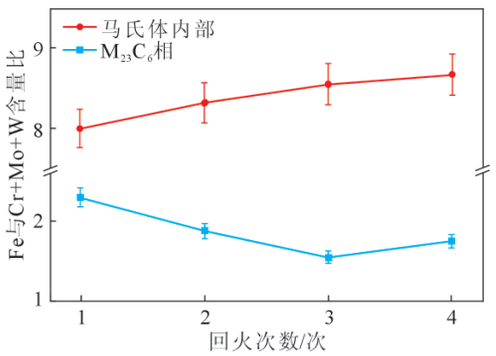

图 6　P92 钢中 Cr+Mo+W 元素含量变化规律

Fig.6　Ratio of Fe to Cr+Mo+W alloying elements in P92 steel

2.4　显微硬度

图 7 为 P92 钢维氏硬度随回火次数的变化曲线图。从图中可以看出，多次回火处理后 P92 钢的硬度在 200~220 HV 范围内分布；随着回火次数增加，P92 钢的硬度有略微降低趋势。根据图 6 中能谱分析结果，经过多次回火处理后，P92 中马氏体基体内固溶的合金元素含量明显降低，且马氏体内部的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

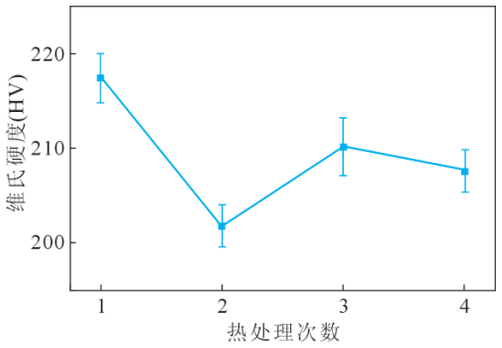

图 7 P92 钢中维氏硬度随回火次数的变化规律
Fig.7 The variation of Vickers hardness of P92 steels with tempering times

位错密度下降，因此会导致马氏体的固溶强化作用减弱，从而影响其硬度。而 P92 钢的硬度与其强度在一定程度上呈正相关关系[20]，因此可以推断随着回火次数增加会对钢的硬度和强度产生不利影响。

3 结论

(1)经回火处理的 P92 钢物相不发生转变，主要由回火马氏体、界面处的 $M_{23}C_6$ 析出相和马氏体内部的 MX 相组成。随着回火次数的增加，马氏体板条出现粗化现象，4 次回火处理后 P92 钢中马氏体板条宽度比 1 次回火后增加约 52.2%。

(2)随着回火次数增加，马氏体内部的 Cr、Mo和 W 合金元素含量有所降低，而板条界上 $M_{23}C_6$ 析出相中的合金元素比例有所提高。原奥氏体晶间与板条界处的 $M_{23}C_6$ 析出相通过 Ostwald 熟化机制不断粗化。

(3)随着回火次数增加，P92 钢的显微硬度有下降趋势，主要源于回火过程中马氏体内合金元素含量下降而导致的固溶强化作用减弱。

参考文献：

[1] ENNIS P J, CZYRSKA-FILEMONOWICZ A. Recent advances in creep-resistant steels for power plant applications[J]. Sadhana, 2003, 28: 709-730.

[2] KIMURA M, YAMAGUCHI K, HAYAKAWA M, et al. Microstructures of creep-fatigued 9%~12% Cr ferritic heat-resisting steels[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(3): 300-308.

[3] 陈俊豪，宁保群. P92 钢高温蠕变过程中显微组织演变研究现状及强化途径[J]. 材料导报，2014, 28(17): 53-59.
CHEN J H, NING B Q. Research status of microstructure evolution and strengthening methods of P92 steel in the process of high temperature creep[J]. Materials Reports, 2014, 28(17): 53-59.

[4] YAN W, WANG W, SHAN Y Y, et al. Microstructural stability of 9%~12%Cr ferrite/martensite heat-resistant steels[J]. Frontiers of Materials Science, 2013, 7: 1-27.

[5] PEŠIČKA J, KUŽEL R, DRONHOFER A, et al. The evolution of dislocation density during heat treatment and creep of tempered martensite ferritic steels[J]. Acta Materialia, 2003, 51(16): 4847-4862.

[6] DANIELSEN H K, HALD J. Behaviour of Z phase in 9%~12% Cr steels[J]. Energy Materials, 2006, 1(1): 49-57.

[7] 涂善东，轩福贞，王卫泽. 高温蠕变与断裂评价的若干关键问题[J]. 金属学报，2009, 45(7): 781-787.
TU S D, XUAN F Z, WANG W Z. Some critical issues in creep and fracture assessment at high temperature[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(7): 781-787.

[8] SCHELLER H J, HAIGH L, WOITSCHECK A. Der mascginen-schaden[M]. Berlin: Vedag Stallleisen, 1974.

[9] 王学，潘乾刚，陶永顺，等. P92 钢焊接接头Ⅳ型蠕变断裂特性[J]. 金属学报，2012, 48(4): 427-434.
WANG X, PANG Q G, TAO Y S, et al. Type IV creep rupture characteristics of P92 steel weldment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(4): 427-434.

[10] 张俊峰，王黎明，仲学兰. 超超临界火电机组主蒸汽、再热蒸汽管道选材分析[J]. 华中电力，2010, 23(4): 49-52.
ZHANG J F, WANG L M, ZHONG X L. Selection of pipe material for main steam pipe and reheat steam pipe in ultra-supercritical thermal power unit [J]. Central China Electric Power, 2010, 23(4): 49-52.

[11] MADDI L, BALLL A R, PESHWE D R, et al. Effect of tempering temperature on the stress rupture properties of grade 92 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 639: 431-438.

[12] WANG Y, JIAN Y X, XU R B, et al. Microstructure evolution and mechanical behaviors of P92 steel welded joint with repetitive post tempering[J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(3): 2300018.

[13] PANDEY C, MAHAPATRA M M, KUMAR P, et al. Homogenization of P91 weldments using varying normalizing and tempering treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 710: 86-101.

[14] PANDEY C, MAHAPATRA M M, KUMAR P, et al. Some studies on P91 steel and their weldments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 743: 332-364.

[15] PANDEY C, MOHAN MAHAPATRA M, KUMAR P, et al. Role of evolving microstructure on the mechanical behaviour of P92 steel welded joint in as-welded and post weld heat treated state[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 241-255.

[16] 张红军，周荣灿，唐丽英，等. P92 钢 650 ℃时效的组织性能研究[J]. 中国电机工程学报，2009(S1): 174-177.
ZHANG H J, ZHOU R C, TANG L Y, et al. Study on microstructure and mechanical properties of P92 steel aged at 650 ℃[J]. Proceedings of the CSEE, 2009(S1): 174-177.

[17] 王学，于淑敏，任遥遥，等. P92 钢时效的 Laves 相演化行为[J]. 金属学报，2014, 50(10): 1195-1202.
WANG X, YU S M, REN Y Y, et al. Laves phase evolution in P92 steel during ageing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(10): 1195-1202.

[18] 王学，潘乾刚，陈方玉，等. P92 钢高温蠕变损伤分析[J]. 材料热处理学报，2010, 31(2): 65-69.
WANG X, PAN Q G, CHEN F Y, et al. Analysis of creep damage

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

at elevated temperature in a P92 steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(2): 65-69.

[19] 于在松，刘江南，王正品，等. T91 钢服役过程中碳化物的熟化分析[J]. 铸造技术，2007, 28(5): 635-638.
YU Z S, LIU J N, WANG Z P, et al. Analysis on ripening of carbides during service of T91 steel[J]. Foundry Technology, 2007, 28(5): 635-638.

[20] 彭志方，刘省，杨华春，等. Grade 91 耐热钢的硬度与持久强度，许用应力和运行/剩余寿命的相关性研究[J]. 材料工程，2021, 49(9): 109-118.
PENG Z F, LIU S, YANG H C, et al. Correlation of hardness with creep rupture strength, allowable stress and service/remaining life of Grade 91 heat-resistant steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(9): 109-118.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net