P22高压锅炉管热处理工艺优化研究*

郭志文,张行刚,姜海龙,刘玉荣,罗忠辉,贺 钰

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 规格为Φ325 mm×10 mm的P22高压锅炉管经正火+回火热处理后,由于壁厚较薄,冷却速度较快导致硬度值超出标准上限。通过试验研究,提出一种"正火后缓冷+空冷+回火"热处理新工艺。控制正火后冷却速度,P22钢管热处理后得到铁素体+珠光体为主的显微组织,是保证其具有良好综合力学性能的关键。

关键词: P22; 高压锅炉管; 薄壁; 缓冷

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)03-0049-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.03.014

Study on Optimizing Heat Treatment Process of P22 High Pressure Boiler Tube

Guo Zhi-wen, Zhang Xing-gang, Jiang Hai-long, Liu Yu-rong, Luo Zhong-hui, He Yu

(*Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: After the heat treatment of normalizing + tempering, the hardness value of P22 high pressure boiler tube with specification of Φ325 mm×10 mm exceeds the upper limit of standard due to thinner wall thickness and faster cooling rate. A new heat treatment process of "slow cooling after normalizing + air cooling + tempering" is proposed through experimental research. The P22 steel pipe is with the microstructure of ferrite + pearlite after heat treatment by controlling the cooling rate after normalizing, which is the key to ensure its good comprehensive mechanical properties.

Key words: P22; high pressure boiler tube; thin wall; slow cooling

P22是2.25Cr-1Mo系的锅炉和过热器用铬钼高温铁素体钢,该钢种具有较高的热强性能,在温度低于550 ℃时具有良好的抗氧化性能和热强性能,兼具良好的加工性能、焊接性能、塑韧性[1]。我国于1985年将其首次纳入GB 5310中,并命名为12Cr2MoG,现行GB/T 5310—2017增加了硬度指标要求(HBW:125~180)[2],因此对热处理工艺提出了更高要求。生产实践证明:P22高压锅炉管特别是薄壁钢管经"正火+回火"处理后,易出现硬度值偏高甚至不合格的现象。本文对P22钢管热处理工艺进行了研究,为该钢管的生产提供理论参考。

1 工业生产问题及分析

ASME SA—335/SA—335M规定了P22最低回火温度[3],GB/T 5310—2017规定P22高压锅炉管(壁厚不大于30 mm)为正火+回火,正火温度

* 收稿日期:2021-05-06

作者简介:郭志文(1984-),男,内蒙古清水河县人,硕士,高级工程师,主要从事无缝钢管新产品及新工艺开发。

900～960 ℃;回火温度680～730 ℃,可调整范围较窄。某钢管厂生产的Φ325 mm×10 mm P22高压锅炉管,其化学成分(见表1)符合ASME SA—335/SA—335M及GB/T 5310—2017标准要求,经正火+回火热处理后,硬度值超出标准上限,产品不合格,检验数据见表2。

表1 Φ325 mm×10 mm P22高压锅炉管化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.14	0.25	0.43	0.017	0.006	2.08	0.97

表2 工业生产Φ325 mm×10 mm P22高压锅炉管性能不合格情况

热处理工艺	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HBW		
检验结果	511	637		193	191	192
GB/T 5310—2017	≥205	≥415	22		125～180	

取上述P22管样加工为毛坯试样后进行实验室热处理工艺研究。根据相关标准对热处理工艺要求设计热处理工艺,工艺制度及试样力学性能见表3、表4。

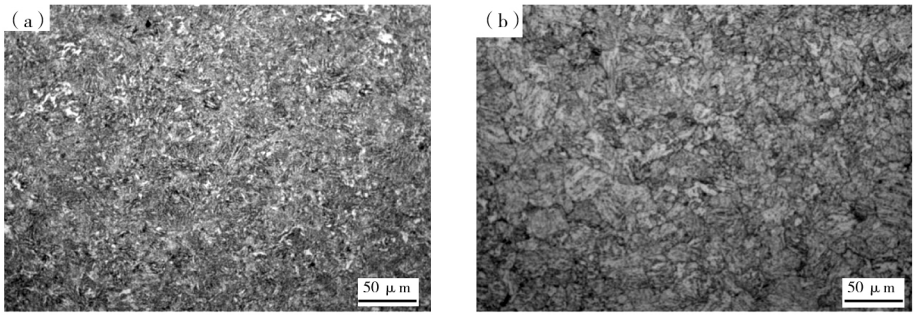
表3 小试样实验室热处理工艺

编号	正火	回火
1	940 ℃+60 min	680 ℃+80 min
2	940 ℃+60 min	710 ℃+80 min
3	940 ℃+60 min	740 ℃+80 min
4	940 ℃+60 min	760 ℃+80 min

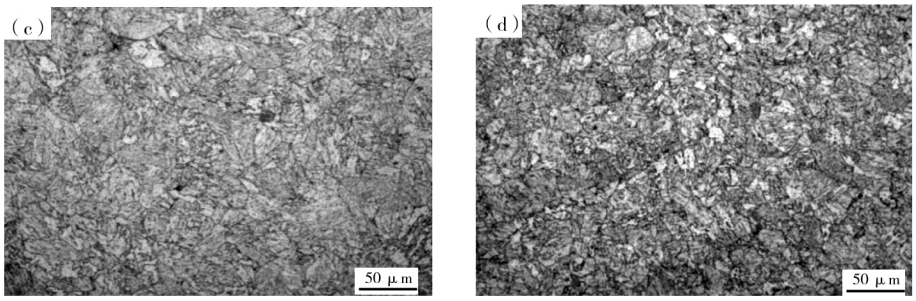
表4 小试样热处理后力学性能

编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	硬度*HBW*	
1	596,595	710,710	21.5,22.5	218,227,226	226,225,225
2	564,550	686,668	23.5,23.0	211,211,210	212,213,213
3	510,511	626,630	24.5,25.0	198,198,198	196,195,194
4	467,460	584,578	29.5,28.0	183,183,185	184,183,182

从以上热处理工艺和性能可以看出,材料拉伸性能满足P22拉伸性能要求,但可以看到当抗拉强度达到600 MPa以上,材料的硬度都超过了标准要求,通过采用正火+回火热处理工艺,即使回火温度设置到标准要求的最高温度,材料的硬度还是不能满足要求,采用最高的回火温度都不能降低材料的抗拉强度至600 MPa以下。试样显微组织为贝氏体,详见图1。P22钢的CCT连续冷却转变曲线如图2所示[4],分析认为材料正火后空冷,冷速较快,不会进入铁素体+珠光体区,而是直接进入贝氏体区。钢中的贝氏体相变是发生在珠光体转变和马氏体相变温度范围之间的中温转变。它既不是珠光体那样的扩散型相变,也不是马氏体那样的无扩散型相变,而是“半扩散型相变”,既只有碳原子能够扩散,而铁原子及替换合金元素的原子已难以扩散。钢中贝氏体本质上是以贝氏体铁素体为基体,其上分布着θ-渗碳体(或ε-渗碳体)或残留奥氏体等相构成的有机结合体。是贝氏体铁素体(BF)、碳化物、残余奥氏体、马氏体等相构成的一个复杂整合组织[5]。图2 P22钢的CCT连续冷却转变曲线在后续窄区间温度范围内回火材料的强度下降不多。如果能使材料的显微组织变成铁素体+珠光体或铁素体+珠光体+贝氏体,那么将会大幅降低材料的强度、硬度,而通过后续的回火使材料的性能达到标准要求,要得到原始组织为铁素体+珠光体或铁素体+珠光体+贝氏体,可以通过正火加热后降低冷却速度,让其在铁素体+珠光体或铁素体+珠光体及贝氏体区转变,需对热处理工艺进行重新调整。



(a) 1# 试样　　(b) 2# 试样



(c) 3# 试样　　(d) 4# 试样

图 1　小样热处理后 P22 显微组织照片

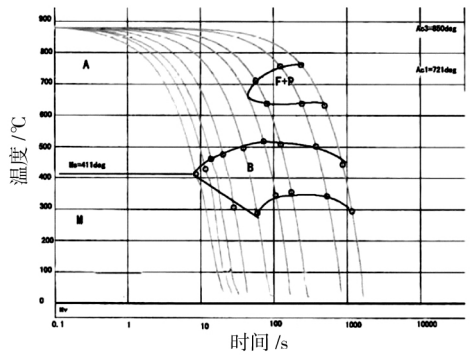


图 2　CCT 连续冷却转变曲线

2　工艺优化

从 CCT 曲线可以看出，P22 钢 A_{c_1} 为 721 ℃，A_{c_3} 为 750 ℃。如果控制正火的冷却速度，正火后缓慢冷却，通过降低冷速，使钢管在中温区发生组织转变，让组织中保持一定量的铁素体，得到铁素体 + 珠光体组织，这样回火后材料强度及硬度不易超出标准上限。在原工业生产不合格批次钢管上截取管样，加工为拉伸、硬度试验毛坯试样，设计以下 2 个热处理工艺（见表 5），进行实验室小试样热处理试验，对应试样组编号为 1、2。经检验，工艺 1 处理的试样硬度值处于标准要求中限，综合性能较好，工艺 2处理的试样硬度值超出标准上限，见表 6。

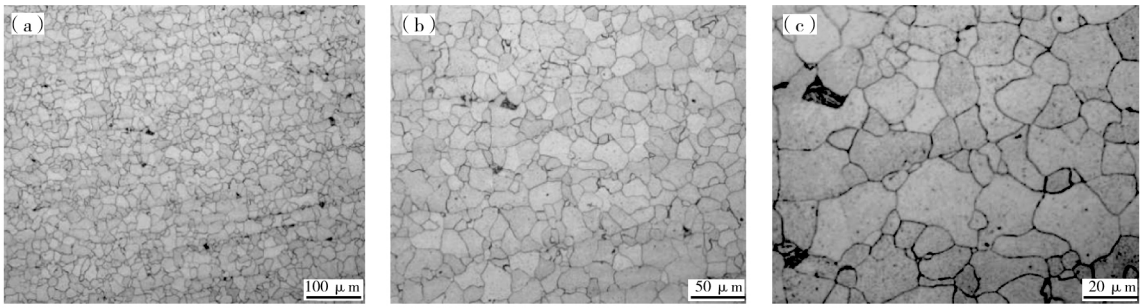
表 5　P22 小试样热处理试验

钢种	编号	热处理制度	实际控制
P22	1	(930 ± 10) ℃正火保温 40 min，炉冷至 770 ℃，出炉空冷，(750 ± 10) ℃回火，保温 150 min	从 930 ℃炉冷降低到 770 ℃共计用时 85 min。
	2	(930 ± 10) ℃正火保温 40 min，炉冷至 850 ℃，出炉空冷，(750 ± 10) ℃回火，保温 150 min	从 930 ℃降低到 850 ℃共计用时 40 min。

表6 小试样热处理后P22力学性能

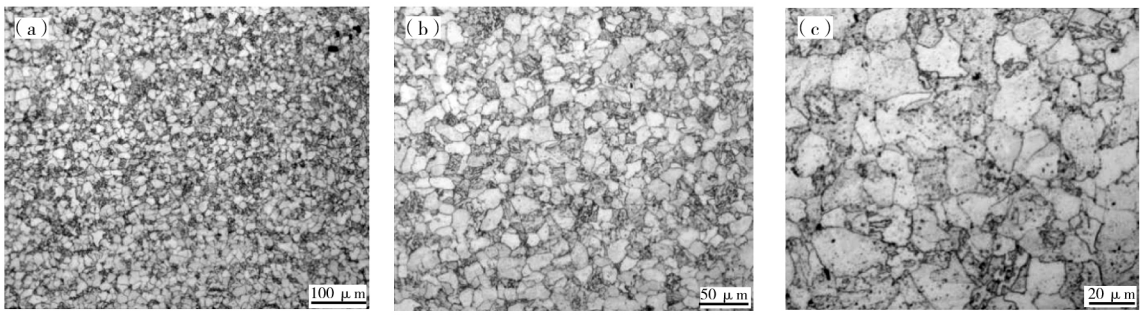
编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度 *HBW*		
1	385	525	38	155	156	155
2	454	572	40	185	184	182

将编号为1、2的硬度试样加工金相试样，进行显微组织检验，见图3、图4。表6结果表明采用正火后缓冷工艺，材料的强度都有一定幅度降低，P22钢经930 ℃正火保温40 min炉冷至770 ℃空冷至室温、750 ℃回火保温150 min工艺处理后，材料强度满足标准要求，特别是硬度（*HBW*）在155左右，处于标准要求中限，较为理想。在930 ℃正火保温40 min炉冷至850 ℃空冷至室温、750 ℃回火保温150 min热处理工艺下，材料强度满足要求，但硬度超过标准上限要求。图4显微组织显示，炉冷至750 ℃，组织为铁素体+珠光体，炉冷至850 ℃，组织为铁素体+珠光体+贝氏体。贝氏体是硬质相，导致硬度偏高。



（a）放大100倍　（b）放大200倍　（c）放大500倍

图3 1试样的显微组织照片



（a）放大100倍　（b）放大200倍　（c）放大500倍

图4 2试样的显微组织照片

3 工业试验

现有产线的热处理装备除了空冷、风冷、完全淬火外，没有其他控制冷却速度的方法。经过实验室试验以及数次工业调试，创新性地利用现有保护气氛辊底炉节拍模式（一种类似步进炉运行模式），将1～3区设定为加热区，4～6区设定为保温区，7～10区设定为冷却区，实现正火后缓冷却工艺目的。采用表7所示工艺重新处理上述批次钢管，检验发现产品具有良好的综合性能（见表8），符合标准要求。采用相同工艺，处理其他规格P22产品，检验结果符合预期，见表9。

表 7　P22 工业热处理工艺

材质	规格	热处理制度
P22	Φ325 mm × 10 mm	正火温度 930 ℃,保温 50 min 然后炉冷至 770 ℃出炉冷却(辊底炉温度设定:1 ~ 3 区 930 ℃,4 ~ 6 区 930 ℃,7 ~ 10 区 770 ℃),回火温度 750 ℃,保温 150 min。

表 8　采用正火后缓冷 + 空冷 + 回火热处理后 P22 性能

规格	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度 *HBW*		
Φ325 mm × 10 mm	364	525	31.5	157	158	160
	366	528	31.5	154	156	154

表 9　其他规格 P22 工业热处理性能

规格	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度 *HBW*		
Φ457.2 mm × 13.5 mm	362	550	33.0	158	159	159
	362	547	33.5	160	160	159
	361	542	32.0	161	161	161
	356	525	32.5	159	159	157

4　结论

(1) 正火后控制合理的冷却速度,得到以铁素体 + 珠光体为主的显微组织,是保证 P22 高压锅炉管具有良好综合机械性能的关键。

(2) 采用“正火后缓冷 + 空冷 + 回火”热处理工艺,利用现有热处理设备,可生产满足 ASME SA—335/SA—335M 及 GB/T 5310—2017 标准 P22 高压锅炉管产品。

参　考　文　献

[1] 朱晓林. P22 钢管力学工艺性能与室温断裂机制研究[J]. 计量与测试技术,2016,43(4):38 - 39.

[2] GB/T 5310—2017,高压锅炉用无缝钢管[S].

[3] ASME SA—335/SA—335M—2019, SPECIFICATION FOR SEAMLESS FERRITIC ALLOY - STEEL PIPE FOR HIGH - TEMPERATURE SERVICE[S].

[4] 靳燕. P22 耐热管的热处理工艺研究[J]. 包钢科技,2016,42(3):48 - 50.

[5] 刘宗昌. 金属固态相变教程[M]. 北京: 冶金工业出版社,2014.

(上接第 8 页)

均回磷量水平由原来的 0.004% 减小至 0.002% 以内。

(3) 滑板挡渣成果明显,生产条件和精炼就位 Al 含量保持原来水平,减少脱氧剂用量 0.3 kg/t。

参　考　文　献

[1] 胡光立,谢希文. 钢的热处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社,2010.

[2] Enkner B, Paster A, Schwelberger J. 新型 VAI - CAN转炉挡渣系统[J]. 钢铁,2002,37(8):28 - 32.

[3] 张贺艳,姜周华,梁连科. EAF - LF 炼钢流程中钢水回磷的热力学分析[J]. 钢铁研究学报,2003,15(1):11 - 15.