



超超临界锅炉管P92耐热钢用大圆坯开发

杨志强, 龚志翔, 汪开忠, 胡芳忠, 陈恩鑫
(马鞍山钢铁有限公司特钢公司, 马鞍山 243000)

摘要:介绍了马钢特钢公司采用电弧炉/转炉炼钢→LF精炼→RH真空脱气→CCM连铸工艺生产超超临界锅炉管P92耐热钢用连铸圆坯($\phi 380\text{mm}\sim\phi 1\,000\text{mm}$)的生产工艺。通过采用精料入炉、电弧炉全程泡沫渣操作、EBT出钢合金化、精炼白渣操作、连铸三段电磁搅拌及全程保护浇注等工艺措施,使 $w[\text{Cr}]\leq 8.75\%$, $w[\text{Ni}]\geq 0.20\%$, $w[\text{N}]\geq 0.050\%$ 从而实现高温铁素体的有效控制,通过控制白渣时间 $\geq 20\text{min}$,使圆坯 $w[\text{T.O}]\leq 0.003\,0\%$,各类低倍组织缺陷级别低,连铸坯中心裂纹 ≤ 2.0 级。最终制成的超超临界锅炉管纯净度高,A、B、C、D类粗系夹杂物级别 ≤ 1.0 级;A、B、C、D类细系和DS夹杂物级别 ≤ 1.5 级。采用 $\phi 500\text{mm}$ 的P92连铸坯通过斜轧制管,经过 $1\,040\text{ }^\circ\text{C}$ 正火+ $760\text{ }^\circ\text{C}$ 回火处理后,钢管的室温抗拉强度 $\geq 730\text{ MPa}$, $625\text{ }^\circ\text{C}$ 高温抗拉强度 $\geq 280\text{ MPa}$,屈服强度 $\geq 260\text{ MPa}$,10万小时持久强度外推值 96.9 MPa (110 MPa ,已持续 2.52 万小时未断),满足超超临界锅炉管制造企业对产品冶金质量的要求。

关键词:超超临界锅炉管; P92耐热钢; 连铸圆坯; 夹杂物; 低倍组织

DOI:10.20057/j.1003-8620.2025-00051 **中图分类号:**TF703; TG142.1

Development of Continuous Casting Round Billet for P92 Heat-resistant Steel for Ultra-supercritical Boiler Tubes

Yang Zhiqiang, Gong Zhixiang, Wang Kaizhong, Hu Fangzhong, Chen Enxin
(Special Steel Company of Ma'an Shan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'an Shan 243000, China)

Abstract: The production process of P92 heat-resistant steel continuous casting billets ($\phi 380\text{ mm}\sim\phi 1\,000\text{ mm}$) for ultra-supercritical boiler tubes was introduced by Special Steel Company of Ma'an Shan Iron and Steel, the process involved electric furnace/converter steelmaking \rightarrow LF refining \rightarrow RH vacuum degassing \rightarrow CCM continuous casting. By adopting processes such as charging refined materials in the furnace, full-process foam slag operation in electric arc furnaces, EBT alloying during steel tapping, white slag operations during refining, electromagnetic stirring in three stages of continuous casting, and full-process protective pouring, $w[\text{Cr}]$ was kept at $\leq 8.75\%$, $w[\text{Ni}]$ at $\geq 0.20\%$, and $w[\text{N}]$ at $\geq 0.050\%$. This effectively controlled high-temperature ferrite. By controlling the white slag time to be $\geq 20\text{ min}$, the $w[\text{T.O}] \leq 0.003\,0\%$ of the billet is maintained, with low levels of various microstructure defects and center cracks in the continuous casting billet being ≤ 2.0 grade. The final ultra-supercritical boiler tubes exhibited high purity, with A, B, C, D, coarse series inclusions at level ≤ 1.0 , and A, B, C, D fine series and DS inclusions at level ≤ 1.5 . Using a $\phi 500\text{ mm}$ P92 continuous casting billet, after oblique rolling into tube and heat treatment at $1\,040\text{ }^\circ\text{C}$ normalizing + $760\text{ }^\circ\text{C}$ tempering, the steel tube demonstrated room temperature tensile strength $\geq 730\text{ MPa}$, high-temperature tensile strength at $625\text{ }^\circ\text{C} \geq 280\text{ MPa}$, yield strength $\geq 260\text{ MPa}$, and an extrapolated value of $100\,000$ hour creep strength of 96.9 MPa (110 MPa for $25\,200$ hours without failure), meeting the metallurgical quality requirements of manufacturers producing ultra-supercritical boiler tubes.

Key Words: Electric Furnace Process; P92 Heat-resistant Steel; Continuous Casting Round Billet; Inclusions; Macrostructure

火电是我国的基础电力和保障电力,2024年我国的电力构成中火电装机容量占比43.14%,但发电量占比是63.19%,远高于装机占比。火电为了减少二氧化碳排放向高温、高压高参数的超超临界机组方向发展^[1]。超超临界火电机组需要高品质的超超临界锅炉管,超超临界锅炉管主要用来制造火电站的主蒸汽管、再热器热段管、再热器冷段管、主给水管等,常用锅炉管的使用情况见表1^[2-3]。而P92钢

是制造超超临界锅炉管的重要材料,主要用于制造超超临界锅炉的主蒸汽管、再热器热段管等高温管道^[4-5]。P92锅炉管通常采用钢锭或者电渣锭作为管坯母材进行制管,但在GB/T 5310—2023高压锅炉用无缝钢管标准^[6]中允许采用连铸坯作为管坯制造超超临界锅炉管,这为P92钢连铸坯的应用提供了基础。

为满足超超临界电站建设的需要同时促进超

超临界锅炉管的绿色、高效制造,马鞍山钢铁有限公司特钢公司采用电弧炉/转炉炼钢→LF精炼→RH真空脱气→CCM连铸工艺开发P92锅炉管用连铸圆坯,产品规格覆盖 $\phi 380\text{ mm}\sim\phi 1\ 000\text{ mm}$ 。通过对电弧炉/转炉及精炼工艺优化控制,连铸过热度、拉速、电磁搅拌等工艺参数的合理匹配,实现了 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 的P92连铸坯中心裂纹 ≤ 2.0 级, $w[\text{T.O}]\leq 0.003\ 0\%$ 等高品质要求。 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 的P92连铸坯通过国内知名锅炉制造企业认证纳入采购规范。

表 1 常用锅炉管使用情况

Table 1 Common boiler tube usage condition					
工况		锅炉部位			
温度/°C	压力/MPa	主蒸汽管	再热器热段管	再热器冷段管	主给水管
540	18.2	P22	P22	SA106C	SA106B
566	24.2	P91	P22	SA106C	WB36
600	25	P92	P92	P22	WB36

1 主要装备

马钢特钢公司是一条以电弧炉/转炉、精炼、连铸等为主的特殊钢精品生产线。主要工艺装备包括:超高功率电弧炉 1 座、转炉 1 座、LF 精炼炉 4 座(三工位)、RH 真空脱气炉 4 座、五机五流圆坯连铸机 1 台、四机四流圆坯连铸机 1 台,主要装备参数见表 2。其关键技术和设备从意大利 SMS-Concast、德国 SMS-Mevac、意大利 Danieli 等公司引进,代表了当今世界先进的工艺技术装备水平,可以满足用户对中高端产品在质量、性能上的需求。

2 生产工艺及控制要点

马钢特钢公司采用 110 t EAF→LF→RH→CCM 工艺生产的高压锅炉管 P92 连铸圆坯,以达到去除夹杂物、脱氧、提高圆坯低倍质量的目的,主要工艺路径如图 1 所示。

2.1 P92 大规格连铸坯技术难点

2.1.1 P92 钢中高温铁素体控制

P92 钢的成分要求应符合 ASTM A335/A335M—2023 具体见表 3^[7],由于含有较高的 Cr 等影响 Cr 当

表 2 连铸圆坯生产主要装备参数

Table 2 Main equipment parameters for continuous casting round billet production

装备	项目	参数
BOF	转炉公称容量/t	150
	冶炼周期/min	30~40
EAF	电弧炉公称容量/t	110
	电弧炉平均出钢量/t	120
	炉壁氧枪数量/把	6
LF	额定处理容量/t	120
	最大处理容量/t	130
	最小处理容量/t	80
	钢液升温速度/(°C·min ⁻¹)	≥4.5
	电极直径/mm	450
RH	真空槽内径/mm	1 732
	浸渍管内径/mm	500
	顶枪加热范围/°C	20~1 450
	极限真空度/Pa	67
CCM	流数	4 流一台、5 流一台
	矫直方法	3 点矫直
	电磁搅拌	M+S+F-EMS
	浇注断面直径/mm	380~1 200
	二次冷却	水

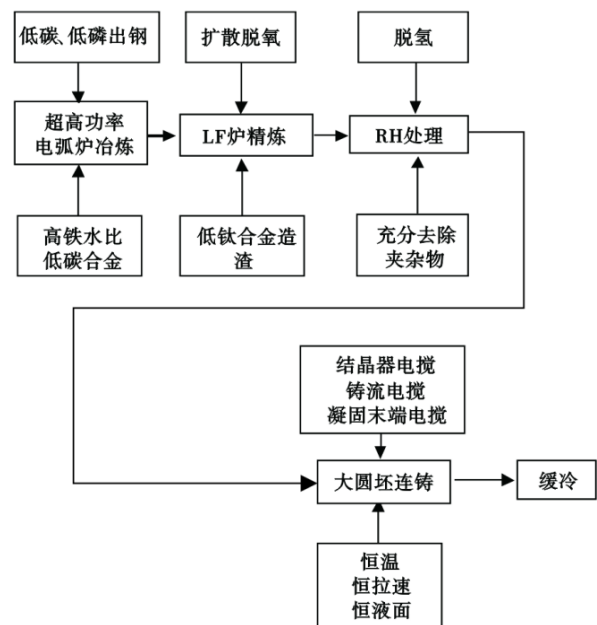


图 1 P92 连铸圆坯生产工艺路径

Fig. 1 P92 continuous casting round billet production process path

表 3 P92 钢成分标准要求(质量分数)

Table 3 Standard requirements for chemical composition of P92 steel

Table 3 Standard requirements for chemical composition of P92 steel								%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	B	
0.07~0.13	≤0.50	0.30~0.60	≤0.020	≤0.010	8.50~9.50	0.30~0.60	0.001~0.006	
V	Nb	Ni	Al	W	N	N/Al	T.O	
0.15~0.25	0.06~0.09	≤0.40	≤0.020	1.50~2.0	0.030~0.070	≥4	≤0.004 0	

量的元素,易产生高温铁素体,从而影响最终性能^[8-9]。目前,国内主要锅炉制造企业要求高温铁素体含量 $\leq 3\%$,若成分、工艺控制不当,极易超出要求。因此,要对成分进行优化并且在冶炼、连铸过程中降低元素偏析,从而消除高温铁素体是生产难点之一。

采用Ni、Cr当量计算P92钢标准成分的Ni、Cr当量在成分组织图中的位置,如图2所示。通过优化合金成分来调节Ni、Cr当量从而控制高温铁素体,其中要求 $w[\text{Cr}] \leq 8.75\%$, $w[\text{Ni}] \geq 0.20\%$, $w[\text{N}] \geq 0.050\%$ 从而实现高温铁素体的有效控制。另外,P92钢在冶炼、连铸过程中易产生成分偏析。因此,要优化冶炼及连铸工艺降低成分偏析消除因成分不均引起的高温铁素体。

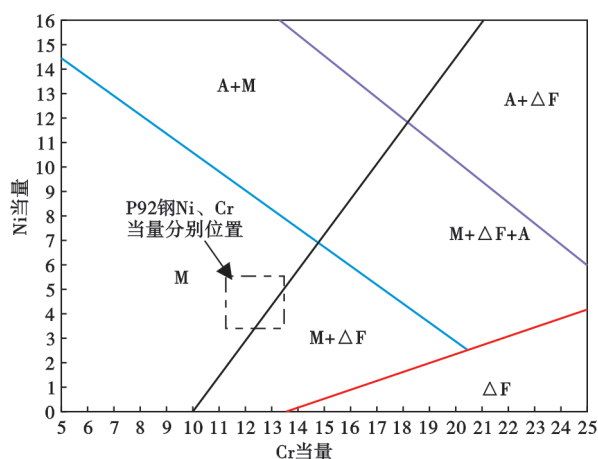


图2 P92成分-组织关系图

Fig. 2 Diagram of P92 composition and microstructure

2.1.2 大规格P92连铸坯中心及表面质量控制

另外,P92钢中合金含量高并且添加了微合金元素V、Nb,在凝固过程中铸坯心部易产生中心裂纹,铸坯表面易产生微裂纹,尤其是在铸坯拉矫过程中更易产生表面裂纹^[10]。这将降低连铸坯的成材率。因此,如何生产出心部及表面质量优良的连铸坯是该钢生产难点之一。

2.1.3 高质量P92大口径厚壁管均质化控制

与模铸锭相比采用连铸坯生产大口径厚壁管时减少了制坯墩拔环节,提高了生产效率,降低了生产成本,但轧制比偏小。另外,壁厚增加后如何保证横截面各个区域组织、性能的一致性也比较困难。因此,需要P92钢的制管工艺、热处理工艺进行研究分析,P92大口径厚壁管均质化控制是钢管的制造难点之一。

2.2 EAF冶炼

电弧炉冶炼采取炉料结构配比优化,强化供氧,强化泡沫渣技术,终点C、P、温度同时命中等多项现代电弧炉冶炼技术,在铁水比例稳定在65%的情况下,合理用氧,控制废钢熔清一次取样 $w[\text{C}] \geq 0.60\%$;同时确保熔池搅拌,促进C-O反应,控制好渣面渣厚度,提高传热效率,减少辐射热损失,避免钢液裸露,减少气体吸入。出钢过程加强预脱氧操作,降低钢水初始氧含量。

具体控制要点:废钢+65%铁水,熔清样分析温度 $\geq 1540\text{ }^\circ\text{C}$,熔清碳、熔清 $w[\text{P}] \leq 0.025\%$;终点 $w[\text{C}] \geq 0.03\%$,终点 $w[\text{P}] \leq 0.006\%$ 。为确保残余元素符合要求,废钢配料过程中减少社会废钢破碎料配加量,终点加强残余五害元素的控制;出钢温度 $1630 \sim 1665\text{ }^\circ\text{C}$;出钢过程加入 $1.0 \sim 2.0\text{ kg/t}$ 复合脱氧剂块及相应数量低碳、低磷合金,将主要成分调整至标准下限。注意合金增碳的控制。渣量按 12 kg/t 加入。

2.3 LF+RH精炼

钢包达到精炼炉后,采用碳粉和碳化硅配合进行扩散脱氧,同时,采用大流量吹氩,促进钢渣反应;中期向钢包内喂入 $1.0 \sim 1.5\text{ kg/t}$ 铝线进行沉淀脱氧,控制渣中 $w[\text{FeO}] + w[\text{MnO}] \leq 1.0\%$,控制炉渣碱度 ≥ 4.0 。强化脱氧白渣保持时间 $\geq 20\text{ min}$ 后取样分析调整成分至内控标准,精炼在进行成分微调过程中,严格控制Cr当量。

根据生产节奏及RH温降情况控制好精炼出钢温度,确保钢液符合连铸温度要求。精炼出钢后扒渣 $1/3 \sim 1/2$ 后进行RH真空处理,钢水的真空处理参数为:真空保持时间 $\geq 15\text{ min}$,破空后软吹时间 $\geq 15\text{ min}$ 。

2.4 大规格圆坯连铸

连铸是P92钢生产的关键工序,因P92钢中 $w[\text{C}]$ 低($0.07\% \sim 0.13\%$),属于包晶钢,铸坯在凝固过程中会发生包晶反应,包晶反应时线收缩量很大,易发生漏钢和铸坯内部及表面质量缺陷^[11]。连铸时采用低过热度、低拉速、二冷弱冷、恒液面工艺并且优化三段电磁搅拌工艺(表4为不同电搅工艺对圆坯的影响),同时根据P92钢的热塑性曲线,如图3所示,优化拉矫温度及缓冷工艺,从而确保连铸坯中心及表面质量。

3 产品质量

3.1 化学成分

马钢特钢采用电弧炉流程从2015年开始生产

表 4 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ 的 P92 钢电磁搅拌试验结果

Table 4 Electromagnetic stirring test results of P92 steel with a diameter of 1 000 mm

方案	电磁搅拌强度			末端位置	中心裂纹/级	δ -铁素体面积百分比/%
	结晶器	二冷段	末端			
一	中	强	中	1	2.5	2.5
二	中	强	强	2	1.5	0.5
三	中	中	中	3	3.0	1.9

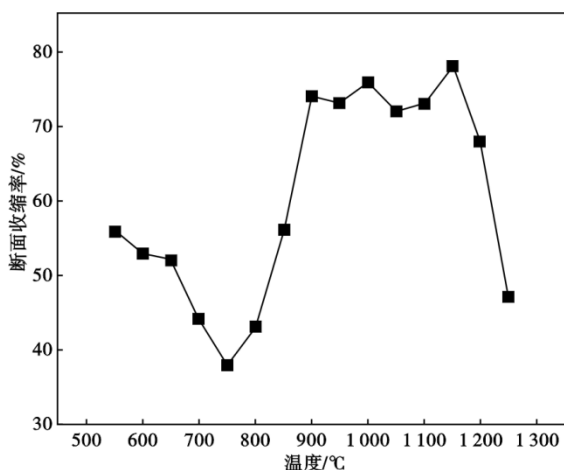


图 3 P92 钢塑性与温度的关系曲线

Fig. 3 Relationship between plasticity and temperature of P92 steel

P92 大规格连铸圆坯, 已经累计生产 6 万吨, 近三年 P92 钢关键化学成分控制情况如图 4 所示。由图 4 可知, 马钢电弧炉流程成分控制稳定。

3.2 低倍组织

P92 大规格 ($\phi 1\ 000\ \text{mm}$) 连铸圆坯低倍形貌如图 5 所示, 近 3 年低倍评级统计结果见表 5。高合金钢连铸坯中心裂纹无法消除, 只能缩小, 因连铸坯中心裂纹小能够满足连铸坯去除中心缺陷穿管和连铸坯锻造后镗孔制管的要求。

3.3 非金属夹杂物

P92 连铸圆坯通过打孔→加热→穿孔→轧管→热处理→修磨后成品钢管 (外径 $\phi 508\ \text{mm}$, 壁厚 $60\ \text{mm}$), 按 GB/T 10561—2023 进行非金属夹杂物评定, 夹杂评定情况见表 6, 夹杂物满足标准要求。

3.4 力学性能

钢管外径 $\phi 508\ \text{mm}$, 壁厚 $60\ \text{mm}$, 经 $1\ 040\ ^\circ\text{C}$ 正火 + $760\ ^\circ\text{C}$ 回火处理后, 在钢管外壁、1/2 半径及内部检验力学性能结果见表 7、表 8。室温力学性能测试结果表明, P92 钢管的室温力学性能良好, 满足标准

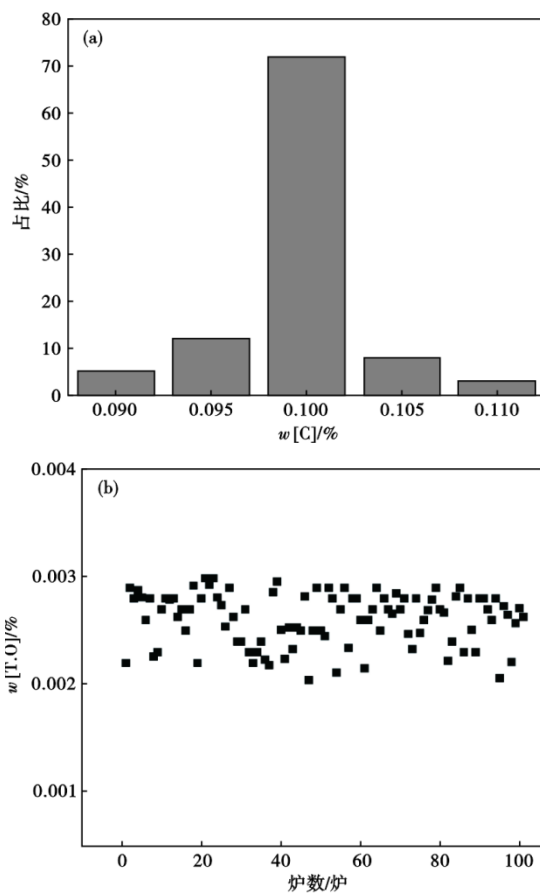


图 4 P92 钢 $w[\text{C}]$ 和 $w[\text{T.O}]$ 成分控制情况: (a) $w[\text{C}]$; (b) $w[\text{T.O}]$

Fig. 4 Composition control of P92 steel $w[\text{C}]$ and $w[\text{T.O}]$: (a) $w[\text{C}]$; (b) $w[\text{T.O}]$

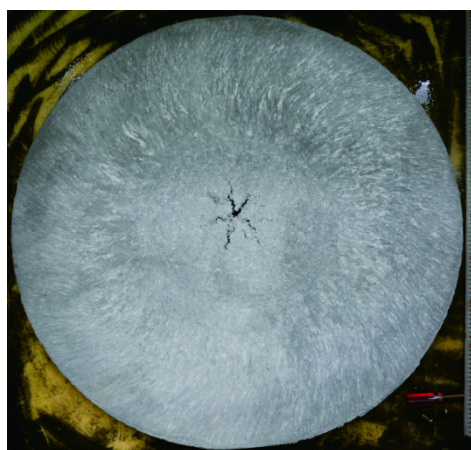


图 5 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ P92 低倍组织形貌

Fig. 5 Macrostructure morphology of P92 with a $\phi 1\ 000\ \text{mm}$

要求。不同壁厚处的试验结果无明显差异, 沿壁厚方向的性能较为均匀。表 9 为 P92 钢管高温持久数据, 通过数据拟合 ($110\ \text{MPa}$, 已持续 2.52 万小时未断) 外推获得 10 万小时持久强度为 $96.9\ \text{MPa}$, 高于

表5 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ 的P92低倍评级结果Table 5 Macrostructure rating results of $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ P92 级

项目	中心疏松	缩孔	中心裂纹	中间裂纹	皮下裂纹	皮下气泡
标准	≤ 2.0	≤ 1.5	≤ 2.5	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0
实测值(max)	1.5	1.0	2.0	0	0	0
实测值(min)	1.0	0.5	1.0	0	0	0

表6 P92钢管夹杂物评级结果

Table 6 P92 steel pipe inclusion rating results 级

类型	A		B		C		D		DS
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
标准	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 2.5
实测值(max)	0.5	0.5	1.5	1.0	0.5	0	1.5	1.0	1.5
实测值(min)	0	0	0.5	0	0	0	1.0	0.5	0.5

国标 85 MPa 的要求。

表7 P92钢管(外径 $\phi 508\ \text{mm}$,壁厚 $60\ \text{mm}$)室温力学性能Table 7 Mechanical properties of P92 steel pipe (outer diameter $\phi 508\ \text{mm}$, wall thickness $60\ \text{mm}$) at room temperature

项目	部位	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	KV ₂ /J
测试值	外	735	592	29	72	153
		730	586	32	75	155
	1/2	730	584	31	75	146
		734	594	29	73	148
	内	733	590	30	71	153
		730	587	32	76	151
标准	横向	≥ 620	≥ 440	≥ 13	-	≥ 27

表8 P92钢管高温力学性能

Table 8 Mechanical properties of P92 steel pipe at high temperature

试验温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	屈服强度标准/MPa
575	349	322	30	87	-
	348	322	30	88	
600	312	291	30	90	≥ 251
	315	296	30	91	
625	286	272	32	92	-
	278	263	32	92	
650	245	225	32	93	-
	242	224	33	92	

3.5 微观组织

对钢管(外径 $\phi 508\ \text{mm}$,壁厚 $60\ \text{mm}$)微观分析

表9 P92钢管高温持久性能

Table 9 High temperature endurance performance of P92 steel pipe

试验温度/℃	应力/MPa	断裂时间/h	断后伸长率/%	断面收缩率/%
625	110	>25 191.0	-	-
	115	6 882.0	28.4	83
	120	4 630.5	19.5	77
	120	3 755.5	22.0	83
	130	1 953.0	29.0	81
	130	1 532.5	22.6	84
	140	502.0	28.0	90
	140	738.0	24.0	88
	150	269.0	27.0	90
	150	235.0	27.2	90

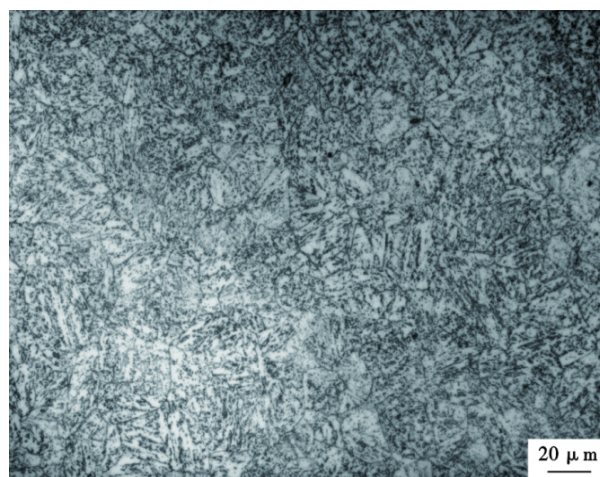


图6 P92钢的微观组织

Fig. 6 Microstructure of P92 steel

结果表明,P92钢中无高温铁素体,且组织为回火索氏体,晶粒度为7.5级,满足使用要求。

4 结论

1)通过控制Cr、Ni、N含量实现P92钢中无高温铁素体,通过控制白渣时间 $\geq 20\ \text{min}$ 和真空脱气时间使钢中 $w[\text{T.O}] \leq 0.003\ 0\%$,各类夹杂物均 ≤ 1.5 级。

2)连铸中通过恒拉速、恒温工艺及三段电磁搅拌优化实现了连铸坯中心裂纹 ≤ 2.0 级。

3)连铸坯通过轧制成钢管(外径 $\phi 508\ \text{mm}$,壁厚 $60\ \text{mm}$)后,抗力强度 $730\sim 735\ \text{MPa}$,钢管在 $625\ \text{℃}$ 高温10万小时持久强度外推值 $96.9\ \text{MPa}$,高于国标85 MPa的要求。

参考文献

- [1] 韩元, 王超, 朱愉洁, 等. 煤电与新能源技术现状及协同发展路径[J]. 新型电力系统, 2024(4): 386-405.
- [2] 王金龙, 马爱清, 张行刚. T/P91 高压锅炉管应用及生产工艺概述[J]. 包钢科技, 2013, 39(3): 10-13+36.
- [3] 王琨. 基于超超临界锅炉发展综述分析[J]. 中国金属通报, 2020(8): 246-247.
- [4] 侍克献, 张作贵, 田根起, 等. 国产主蒸汽管道用 P92 钢的持久性能研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(10): 1260-1267.
- [5] Saini N, Pandey C, Mahapatra M M. Characterization and evaluation of mechanical properties of CSEF P92 steel for varying normalizing temperature [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 688: 250-261.
- [6] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 高压锅炉用无缝钢管: GB/T 5310—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [7] 美国材料与试验协会. ASTM A335/A335M—2023. 高温用铁素体合金钢无缝钢管规范[S]. 西康舍霍肯: ASTM 国际, 2023.
- [8] Nitin Saini, Rahul S. Mulik, Manas Mohan Mahapatra, et al. Effect of Preheating Temperature on Retention of δ -Ferrite in ASTM A355 Grade P92 [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54: 315-330.
- [9] Sirohi S, Pandey C, Goyal A. Brief study on δ -ferrite characterization: A review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50: 1367-1371.
- [10] 宗健, 董延楠, 涂高岭, 等. 立式连铸 P91 钢大圆坯表面纵裂缺陷及其控制[J]. 中国冶金, 2024, 34(5): 65-73.
- [11] 边军, 王志芬, 孙德全, 等. 连铸坯低倍中心裂纹分析与探讨[J]. 甘肃冶金, 2021, 43(2): 16-19.