



锅炉扁钢用免退火 12Cr1MoV 盘条控轧控冷工艺优化

朱 帅, 李 阳, 王广顺, 马春雨, 陈 猛, 曹长法
(青岛特殊钢铁有限公司 中信特钢研究院青钢分院, 青岛 266043)

摘 要:为开发免球化退火扁钢用 12Cr1MoV 热轧盘条, 基于形变诱导相变机理, 采用 830 °C 终轧温度和 800 °C 的吐丝温度。通过抑制形变奥氏体晶粒回复和再结晶过程增加形变储能, 促进奥氏体分解为铁素体和珠光体组织。同时配合轧后风冷辊道速度调节, 实现分段控制冷却, 延长盘条在 630 ~ 750 °C 区间停留时间, 可完全消除盘条中马氏体和贝氏体组织。试验结果为: 热轧盘条抗拉强度从 576 MPa 降至 520 MPa, 断面收缩率从 66% 提高至 74%, 淬火组织的消除使盘条变形能力明显优化, 避免少量或极少量马氏体组织无法协同变形而产生的心部孔洞或拉拔断裂, 经用户多规格批量使用, 未发生塑性开裂问题。

关键词: 锅炉扁钢; 12Cr1MoV 钢; 形变能; 形变诱导相变; 马氏体

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00235 **中图分类号:** TG356. 4

Controlled Rolling and Cooling Process Optimization of Non-annealed 12Cr1MoV Wire Rod Products for Boiler Flat Steel

Zhu Shuai, Li Yang, Wang Guangshun, Ma Chunyu, Chen Meng, Cao Changfa
(Qinggang Branch of CITIC Special Steel Research Institute, Qingdao Special iron and steel Co., Ltd., Qingdao 266043, China)

Abstract: In order to develop non-spheroidizing annealing 12Cr1MoV hot rolled wire rod, based on deformation induced phase transition mechanism, the finishing rolling temperature of 830 °C and laying temperature of 800 °C were adopted. By inhibiting deformation austenite grain recovery and recrystallization process, increasing deformation energy storage, thereby promoting austenite decomposed into ferrite and pearlite. Meanwhile in stage controlled cooling was realized with adjusting the air-cooled roller speed, the quenching microstructures were completely eliminated because prolonging the holding time between 630 °C and 750 °C. The test results are that the tensile strength of 12Cr1MoV hot-rolled wire rod was reduced from 576 MPa to 520 MPa, while reduction of area increasing from 66% to 74%. The elimination of quenched microstructure significantly optimizes the deformation ability of wire rod, and also avoided holes in the cross-section center or draw break which caused by a small or minimal martensite microstructure are unable to cooperate with deformation. Plastic cracking has not occurred after batch use of multiple specifications by users.

Key Words: Boiler Flat Steel; 12Cr1MoV Steel; Deformation Energy; Deformation Induced Phase Transition; Martensite

12Cr1MoV 钢具有优异的热强性能、抗氧化性能和抗高温蠕变性能, 在高温、高压、超高压环境得到广泛应用, 用于制造亚临界电站锅炉过热器、集箱、主蒸汽导管、吊杆或强化部件。其中锅炉内壁吊杆或加强筋通常采用小规格 12Cr1MoV 热轧扁钢进行生产, 加工工艺为: 扁钢→下料→正火→回火处理→精整, 通过组织均匀化^[1]和碳化物析出的控制^[2]提高抗裂纹扩展性能, 从而满足 GB 713—2014 对产品力学性能和冲击性能的要求^[3]。

为提高产品表面质量和尺寸精度, 部分用户采用热轧盘条经冷加工变形生产扁钢; 由于 12Cr1MoV 钢含有 0.90% ~ 1.20%Cr 和 0.25% ~ 0.35%Mo 元素,

常规热轧态产品中含有一定量的马氏体组织, 在拉拔和压扁过程易发生脆断, 因此, 在拉拔前需进行球化退火处理, 以提高热轧盘条塑性。具体生产工艺为: 盘条→球化退火→拉拔→压扁→成卷→正火→回火处理→精整。球化退火的整个过程用时 24 ~ 48 h, 为高耗时、耗能和高成本工序。

目前对于 12Cr1MoV 钢热处理和组织性能研究主要聚集在成形后的回火热处理工序, 如杨在志、贺格平等^[4-5]研究了回火时间对组织和性能的影响规律, 杨佳等^[6]提出了加快正火冷却速度、延长回火保温时间的热处理工艺改善方法。但针对如何通过热轧工艺优化, 消除盘条中马氏体和贝氏体组

织,提高热轧盘条塑性未见研究报道。为提高 12Cr1MoV 热轧盘条塑性,取消盘条冷变形前的球化退火工序,本文通过对 12Cr1MoV 钢相变规律分析,结合轧制工艺优化和用户使用验证,开发出免球化退火的锅炉扁钢用热轧盘条。

1 试验材料相变规律

GB/T3077—2015 标准对 12Cr1MoV 钢合金元素成分要求为, $w[\text{Mn}]$ 0.40%~0.70%、 $w[\text{Cr}]$ 0.90%~1.20%、 $w[\text{Mo}]$ 0.25%~0.35%、 $w[\text{V}]$ 0.15%~0.30%,合金成分决定了其具有较好的淬透性。

采用 JMatPro 软件模拟预测 12Cr1MoV 钢过冷奥氏体连续冷却转变 (CCT, Continuous Cooling Transformation) 曲线如图 1 所示^[7],可以看出,12Cr1MoV 钢在 0.1 °C/s 冷速下的组织类型为铁素体+少量珠光体,当冷速超过 1 °C/s 时组织中开始出现少量贝氏体组织,随着冷速提高,贝氏体和马氏体组织比例增加。通过相变曲线发现,铁素体开始转变温度约 872 °C,珠光体开始转变温度约 755 °C,结束温度约 624 °C,贝氏体开始形成温度为 620 °C,盘条冷速应不超过 0.3 °C/s,保温时间不低于 900 s,可完成奥氏体向铁素体+珠光体转变,避免马氏体和贝氏体组织形成。常规斯太尔摩风冷线由于长度限制,无法同时满足冷速和保温时间的要求。

2 试验材料及方法

试验材料采用工业生产 180 mm×240 mm 矩形

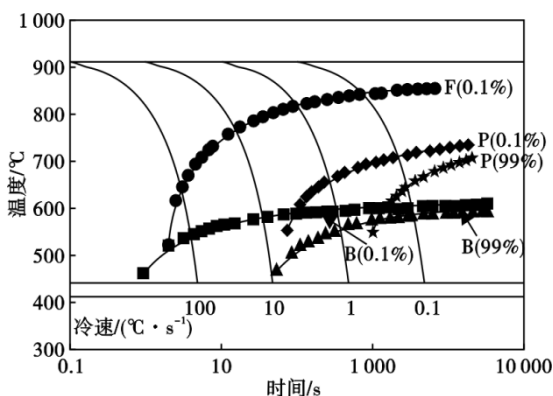


图 1 12Cr1MoV 锅炉钢的 CCT 曲线^[7]

Fig. 1 CCT curves of the 12Cr1MoV boiler steel

12Cr1MoV 钢连铸坯,其冶炼工艺为:铁水脱硫→BOF→LF→RH→CCM,其化学成分见表 1。Cr 元素可提高钢的抗蠕变性能和热强性,Mo 元素固溶条件下在晶格中产生强烈畸变,抑制铁和其他元素原子的扩散速度,添加 V 析出 VC 粒子来保证成品的强度和高温性能。12Cr1MoV 钢冶炼过程中,Cr、Mo、V、Mn 等合金元素含量按中下限控制,在保证产品热处理性能的前提下降低产品的淬透性能。

金启邦等^[8-9]的控轧控冷相关研究表明,通过降低轧制温度,累积形变能有利于降低 CrMo 系产品硬度,提高变形能力。结合相变规律分析和青岛特钢—高线设备情况,在轧制 $\phi 14$ mm 规格 12Cr1MoV 钢盘条时试验 860、830、800 °C 不同终轧温度和吐丝温度,同时在控冷阶段调节风冷辊道速度实现分段阶梯控制冷却,通过辊道速度先快后慢调整,使盘条快速通过吐丝至珠光体开始相变温度之间的区域,增加盘条在 630~750 °C 停留时间。具体工艺方案见表 2。

上述 4 种不同工艺生产盘条分别取整圈热轧盘条样品,平均分为 8 支试样进行力学性能测试和金相组织观察。采用万能拉伸试验机检测盘条抗拉强度和断面收缩率;金相样品经 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 7~10 s,利用光学显微镜进行组织观察。

3 试验结果和分析

不同工艺生产 12Cr1MoV 钢盘条的组织 and 力学性能见表 3,横截面芯部位置金相组织如图 2 所示。

3.1 金相组织

通过组织检测可以看出,所有工艺生产样品均以铁素体和珠光体为主,工艺一样品中出现了马氏体组织,工艺一、二、三样品均存在贝氏体组织,且所有马氏体和贝氏体组织均存在于样品芯部,其余位置为铁素体和少量珠光体组织。由于盘条后续加工过程存在拉拔→压扁→成卷三种连续变形工艺,淬火组织的存在成为组织中的硬质点,拉拔过程与周围组织无法协同变形,从而在淬火组织附近形成微裂纹^[10],压扁过程裂纹扩展,严重位置甚至出现孔洞,在后续成卷过程发生断裂。

从出现淬火组织比例来看,工艺一和工艺二样

表 1 试验用 12Cr1MoV 钢铸坯化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of tested 12Cr1MoV steel cast billet

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
熔炼成分	0.10	0.21	0.50	0.011	0.005	1.04	0.27	0.17
标准要求	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.020	≤0.020	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30

表 2 12Cr1MoV 钢控轧控冷工艺

Table 2 Controlled rolling and cooling process of 12Cr1MoV steel

工艺	终轧温度/℃	吐丝温度/℃	辊道速度/(m·s ⁻¹)
一	860	830	0.18
二	830	830	0.18
三	830	800	0.18
四	830	800	前 2 段 0.18, 3-4 段 0.16, 5-6 段 0.14

品中分别 6 支、5 支均存在马氏体和/或贝氏体组织,与工艺三相比,出现淬火组织的概率明显提高。分析认为,随着终轧温度降低,抑制了奥氏体组织动态回复和再结晶过程,形变储能增加,奥氏体自由能升高,形核驱动力增加,形核位置增多。通过形变诱导相变机制,会促使奥氏体组织发生分解,结合后续延迟型冷却方式,分解产物为铁素体和少量珠光体,减少或消除盘条下线后残余奥氏体组织。

检测结果显示,工艺一和工艺二出现淬火组织的概率并无明显差异,说明通过降低终轧温度,不及时通过控冷降温至临界区,仍采用较高的吐丝温度,则累积的形变能和形核位置在短时间内由于奥氏体晶粒的回复和再结晶过程而消除,对于形变诱导奥氏体分解、消除最终产品中淬火组织效果不佳。

对比工艺三和工艺四的样品组织可以看出,在降低终轧温度和吐丝温度的基础上,配合分段阶梯控制冷却。通过调整辊道速度先快后慢,使盘条快

速通过吐丝至珠光体开始相变温度之间的区域,增加盘条在 630 ~ 750 °C 停留时间,可完全消除盘条中的淬火组织,且铁素体晶粒有粗化趋势。从钢的奥氏体等温转变规律可知^[11],随着相变温度降低而使过冷度增大,有利于相变形核速率提高,但原子扩散速率降低,相变时间延长。因此,存在一个“鼻尖”温度,此时形核和长大速率匹配,相变孕育期短,奥氏体完全分解用时最少。

综上分析可知,降低终轧温度通过累积奥氏体形变能为相变提供动力,同时快速降温至相变开始温度以下,抑制高温条件下奥氏体晶粒回复和再结晶,最终结合分段阶梯控制冷却在“鼻尖”温度附近停留时间,促使奥氏体组织完全分解,避免了盘条下线后残余奥氏体向马氏体或贝氏体组织转变。

3.2 力学性能

不同工艺生产 12Cr1MoV 热轧盘条同圈力学性能如图 3 所示,可以看出,当采用 830 °C 的吐丝温度时,终轧温度从 860 °C 降低至 830 °C 时力学性能无明显差异。采用工艺三可通过低温终轧和低温吐丝保留形变能,从而诱导奥氏体发生分解,降低组织中出现马氏体、贝氏体组织的比例和含量,从而抗拉强度均值从 569 MPa 降至 555 MPa,断面收缩率由 66% 提高至 69%。

工艺四在保留形变诱导奥氏体分解热力学条件的前提下,通过匹配合适的相变温度区间和延长保温时间,可使奥氏体组织完全转变为铁素体和珠

表 3 不同工艺 12Cr1MoV 盘条的组织 and 力学性能

Table 3 Microstructure and mechanical properties of 12Cr1MoV wire rod under different processes

工艺	组织	淬火组织样品数量/个	抗拉强度/MPa		断面收缩率/%	
			范围	均值	范围	均值
一	F+P+少量(M+B)	6/8	550 ~ 592	576	62 ~ 70	66
二	F+P+少量B	5/8	534 ~ 580	569	65 ~ 72	66
三	F+P+少量B	2/8	530 ~ 576	555	66 ~ 72	69
四	F+P	0/8	513 ~ 534	520	73 ~ 78	74

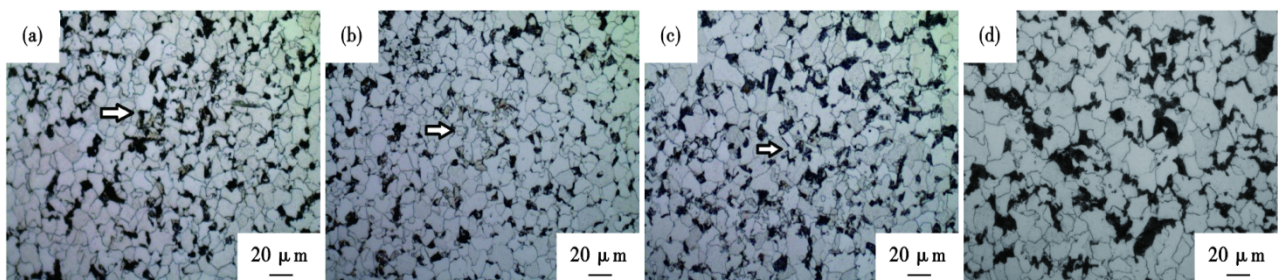


图 2 不同工艺生产 12Cr1MoV 热轧盘条组织:(a)工艺一,(b)工艺二,(c)工艺三,(d)工艺四

Fig. 2 Microstructure of 12Cr1MoV wire rod under different processes : (a) Process 1, (b) Process 2, (c) Process 3, (d) Process 4

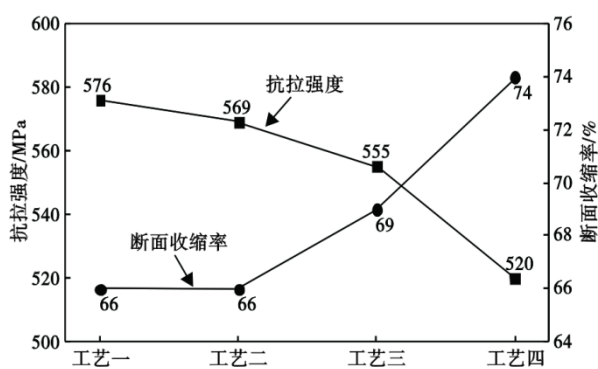


图3 不同工艺生产12Cr1MoV热轧盘条力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of 12Cr1MoV wire rod under different processes

光体组织,从而消除淬火组织。断面收缩率提高至74%,抗拉强度降至520 MPa,盘条塑性得到明显改善。

通过上述工艺优化后,生产锅炉扁钢用

12Cr1MoV 钢盘条产品并进行用户使用跟踪,满足免球化退火拉拔压扁成卷使用;后续将规格从 $\phi 14$ mm 单规格扩展至 $\phi 10 \sim \phi 22$ mm 全规格系列,经过多轮次用户批量使用,均未发生塑性开裂现象。

4 结论

(1)通过降低轧制温度和吐丝温度,增加奥氏体组织形变能,有利于促进奥氏体组织分解,配合分段控冷工艺控制盘条相变温度区间、延长保温时间,可完全消除12Cr1MoV 钢盘条中马氏体和贝氏体组织。

(2)采用830 °C终轧温度和800 °C吐丝温度,配合辊道速度调整实现分阶段控制冷却,热轧盘条抗拉强度从576 MPa降至520 MPa,断面收缩率从66%提高至74%,淬火组织的消除使盘条变形能力明显优化,同时也避免少量或极少量马氏体组织无法协同变形而产生的心部孔洞或拉拔断裂。

参考文献

- [1] 孟宪震, 张 军, 张 建. 蒸汽分汽缸用珠光体耐热钢板12Cr1MoVR的研制[J]. 特钢技术, 2022, 28(2): 13-16.
- [2] Yan J L, Ding H, Huang H B, et al. In-situ investigation of tensile deformation and fracture mechanism of 12Cr1MoV steel after long-term service [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 700(17): 33-41.
- [3] 冯路路, 张学峰. 耐热钢12Cr1MoVR的生产工艺研究[J]. 宽厚板, 2015, 21(3): 8-10.
- [4] 杨在志, 傅小明, 孙 虎, 等. 12Cr1MoV 钢的组织 and 力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(20): 204-206.
- [5] 贺格平, 吴忠民, 张米娟. 热处理时间对12Cr1MoV 钢微观组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(22): 168-170.
- [6] 杨 佳, 张铁桀, 陈忠兵, 等. 12Cr1MoVG 钢弯管热处理工艺对其组织性能影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(18): 181-183.
- [7] 袁晓敏, 胡珊珊, 张义伟, 等. 控制冷却工艺对12Cr1MoV 锅炉钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(6): 116-120.
- [8] 金启邦, 孙世平, 王青海, 等. 控轧控冷和冷床保温工艺对42CrMo 钢 $\Phi 50$ mm 轧材力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 72-74.
- [9] 马志军. 控轧控冷对38CrMoAl 钢盘条硬度的影响和工艺优化[J]. 特殊钢, 2019, 40(3): 35-38.
- [10] 董 庆, 孔令波, 李世琳. 冷却速度对 $\Phi 6.5 \sim 12$ mm SCM435 钢盘条组织和冷镦开裂的影响[J]. 特殊钢, 2017, 38(6): 37-39.
- [11] 陈 浩, 张聰雨, 朱加宁, 等. 奥氏体/铁素体界面迁移与元素配分的研究进展[J]. 金属学报, 2018, 54(2): 217-227.