

L80-9Cr 连铸坯异常坯料分析

张艳¹, 张爱亮¹, 高杰¹, 刘静¹, 刘富强¹, 庞于思², 左晶晶¹
(1. 新兴铸管股份有限公司, 河北 邯郸 056300; 2. 江阴华润制钢有限公司, 江苏 无锡 214404)

摘要: 通过采用连铸坯+热挤压的方式代替传统的锻坯挤压生产9Cr 管材, 生产出的 L80-9Cr 连铸坯在锯切中存在切割困难等明显异常情况, 经取样分析, 发现异常区域的组织除铁素体+碳化物以外, 还存在一定量的马氏体组织, 异常区域的硬度明显高于正常区域的硬度, 但成分与铁素体、珠光体区域无明显差别, 分析认为是在退火过程中部分马氏体未完全转变为铁素体+珠光体, 马氏体残留较多致使连铸坯局部硬度较高, 导致锯切困难, 容易切斜, 锯切断面处颜色不均。后续延长坯料退火时间, 未再发现此类现象。

关键词: 连铸坯; L80-9Cr; 组织; 马氏体; 铁素体; 硬度

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2022.6.50.53

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Abnormality of L80-9Cr Continuous Casting Billet

ZHANG Yan¹, ZHANG Ailiang¹, GAO Jie¹, LIU Jing¹, LIU Fuqiang¹, PANG Yusi², ZUO Jingjing¹

(1. Xinxing Ductile Iron Pipes Co., Ltd., Handan 056300, China;

2. Jiangyin China Resources Steelmaking Co., Ltd., Wuxi 214404, China)

Abstract: The 9Cr steel pipe is manufactured by means of the process of CC billet+hot-extrusion. However obvious abnormalities like cutting difficulty are found with the L80-9Cr CC billet during the cutting operation. Relevant analysis is conducted with sample as taken from the abnormal section of the said CC billet, which reveals that in the abnormal area, there exist in the microstructure contents not only ferrite+carbide, but also certain content of the martensite structure, and that the hardness of the abnormal area is remarkably higher than that of the normal area, but the contents are not obviously other than those of the ferrite and pearlite areas. It is regarded via the analysis that during the annealing process, part of the marstenite has not completely transformed into ferrite+pearlite, and thus much more residual marstenite leads to local high hardness of the CC billet, which in turn causes cutting difficulties like frequent oblique cutting, and uneven color of the sawed pipe end face. Accordingly the time for the follow-up annealing of the billet is extended, and then no more abnormalities as above mentioned are found.

Key words: CC billet; L80-9Cr; microstructure; martensite; ferrite; hardness

L80-9Cr 属于马氏体钢, 为高抗腐蚀性油套管, 9Cr 中含有 8%~10% 的 Cr 元素, 0.9%~1.1% 的 Mo 元素, 通常用于重腐蚀油井中。另外, 对 9Cr 成分进行微调后形成改良的 9Cr1Mo, 改良型的 9Cr1Mo 由于耐热性能比较好, 也常用于超临界火力发电站的锅炉管道上。常规的 9Cr 管主要采用模铸锭+锻压+挤压或热穿孔的方式生产, 直接采用连铸坯进行挤压或者热穿孔生产的非常少, 主要由

于 9Cr 为马氏体钢, 在连铸过程易发生开裂、中心缩孔和中心裂纹, 从而在后续穿孔生产中引发较多问题, 导致穿管成材率较低^[1-4]。随着近年连铸技术的发展, 宝武钢铁集团有限公司、太原钢铁(集团)有限公司、抚顺特殊钢股份有限公司、衡阳华菱钢管有限公司等钢厂分别摸索材料在凝固过程中的组织转变, 通过对冶炼成分进行优化、控制二冷区各段冷却水量, 并采用结晶器和凝固末端组合电磁搅拌、连续矫直等措施, 避免铸坯表面裂纹和中间裂纹的产生, 目前在 9Cr 连铸坯生产中开裂情况有明显的改观^[5-15]。

张艳(1984-), 女, 硕士, 工程师, 长期从事无缝钢管的生产与研发工作。

某公司采用 L80-9Cr 连铸坯进行挤压生产，主要生产工艺为：连铸→退火→机加工→挤压→热处理。由于在挤压前需要进行坯料加工，为减少机加工工具损耗，要求连铸坯在生产完成后必须进行退火，以保证硬度不大于 230 HBW。其中机加工工序为：锯切→钻孔→车外圆。本次来料后，在坯料锯切加工中有一炉坯料锯切时发现锯切端面存在异常，硬度相对较大，端面容易切斜，下面对坯料锯切异常现象进行分析，确定异常区域形成的原因。

1 试验方法

对使用中发现异常情况的坯料进行取样，取样的坯料截面如图 1 所示，从端面看，组织不均匀，中心有疑似硬质点存在，对该截面分正常区域和异常区域进行取样，如图 1 所示编号 1、2、3 为异常区域，编号 4、5 为正常位置。分别对 1、2、3 和 4、5 两个区域取样进行夹杂物、金相组织、化学成分、硬度对比分析；另外，对 1 号样进行了微区成分分析。夹杂物采用光学显微镜按照 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》进行评定；组织采用光学金相

显微镜进行分析；采用扫描电镜 SEM 和能谱设备对显微组织下的微区成分进行分析；化学成分采用直读光谱仪依据 ASTM A 751—2014a《钢制品化学分析的标准测试方法》进行分析；硬度采用洛氏硬度仪按照 ASTM E 18—2019《金属材料洛氏硬度的标准试验方法》进行分析。



图 1 9Cr 连铸坯坯料取样位置示意

2 化学成分

化学成分分析是在接近坯料中心位置取样，具体位置为图 1 中 1 号位置，后续记录为 1 号样，1 号样分析了 4 个点的成分；边部正常区域的试样为图 1 中 4 号位置，记录为 4 号样，4 号样分析了 2 个点的成分。异常区域与正常区域成分对比见表 1。

表 1 9Cr 连铸坯异常区域与正常区域成分(质量分数)对比

位置	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
1 号样单点 1	0.12	0.41	0.39	0.02	0	0.09	8.43	0.90
1 号样单点 2	0.13	0.43	0.41	0.02	0	0.09	8.47	0.96
1 号样单点 3	0.12	0.42	0.41	0.02	0	0.09	8.49	0.92
1 号样单点 4	0.12	0.40	0.40	0.02	0	0.09	8.46	0.90
4 号样单点 1	0.11	0.42	0.40	0.02	0	0.09	8.39	0.91
4 号样单点 2	0.12	0.42	0.40	0.02	0	0.09	8.49	0.92
标准值	≤0.15	0.25~1.0	0.35~0.55	≤0.02	≤0.01	≤0.5	8.0~10.0	0.9~1.1

从化学元素之间的差别来看，1 号样的 4 个点和 4 号样的 2 个点成分均存在一定的波动，异常区域的 1 号样 Mo 元素波动较 4 号正常试样的 Mo 元素波动大一些，但整体元素含量都在 API Spec 5CT 标准 L80-9Cr 的合格范围之内，铸态成分波动也在合理范围内。

3 夹杂物检测

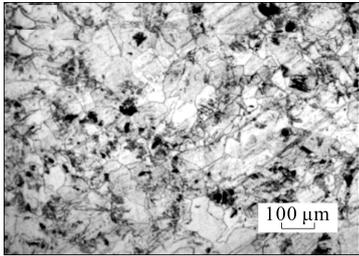
对异常区域夹杂物进行取样。从坯料夹杂物的检测情况来看，所评级别均比较低，且夹杂物尺寸相对较小，满足要求，未发现明显较大颗粒的夹杂

物。从夹杂物分析结果来看，钢坯中心异常区域的形成应与夹杂物无直接关系。

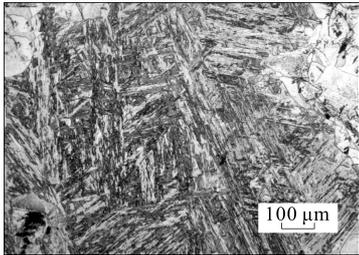
4 金相组织对比分析

分别在正常区域和异常区域取金相组织试样，并对金相组织进行对比。9Cr 为马氏体不锈钢，连铸后空冷状态组织为马氏体，经过充分退火后马氏体转变为铁素体+珠光体。通过组织试样分析来看，异常区域的组织主要有两种，一种为铁素体+珠光体，占组织中的大部分，如图 2(a)所示；另一种为马氏体，占组织中的少部分，如图 2(b)所示。

观察正常区域的组织基本为同一种组织，正常区域试样组织如图 3 所示，组织为铁素体+珠光体，另外残留有极少量的马氏体。

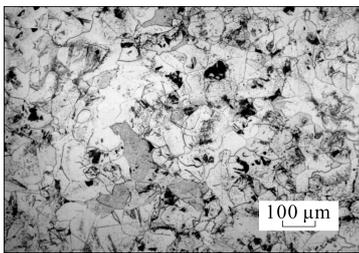


(a) 铁素体+碳化物

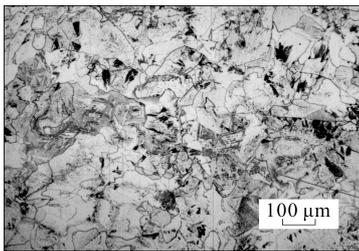


(b) 马氏体

图 2 9Cr 连铸坯异常区域试样组织



(a) 铁素体+碳化物



(b) 铁素体+碳化物+极少量马氏体

图 3 9Cr 连铸坯正常区域组织

坯料以退火态交货，正常组织应为铁素体+珠光体，但心部异常组织中存在一定量的马氏体，分析认为连铸后空冷的马氏体未完全发生组织转变，初步推测退火过程中马氏体未发生转变的原因一方面可能与成分偏析有关，另一方面可能为连铸坯心部组织退火不充分导致。

5 扫描电镜微区成分分析

为分析异常区域的微区成分差别，对 1 号样(异常区域)进行扫描电镜组织分析及微区成分能谱分析。扫描电镜下组织形貌如图 4 所示，能谱分析位置如图 5 所示，能谱微区元素分析结果见表 2。从扫描电镜组织形貌来看，组织与显微镜下的组织一致，对珠光体区域进行放大，明显可见片层碳化物。从能谱分析情况来看，马氏体区域(谱图 1)与铁素体(谱图 3)、珠光体区域(谱图 2)元素含量差别不大，Cr、Mo 元素的含量都在 L80-9Cr 的元素要求范围内，只有谱图 4 成分分析结果与其他点成分差别较大，谱图 4 的位置位于珠光体区域，碳化物片层较密，Cr、Mo 元素含量较高，考虑谱图 4 位置为 Cr、Mo 碳化物，为 9Cr 退火后的正常组织。从能谱微区分析结果来看，虽然坯料金相组织存在一定差别，但微区成分并无较大差别。

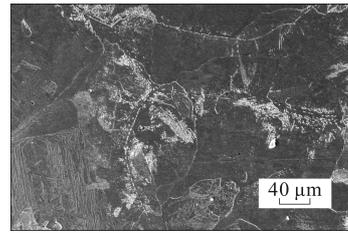


图 4 扫描电镜下 9Cr 连铸坯异常区域组织形貌

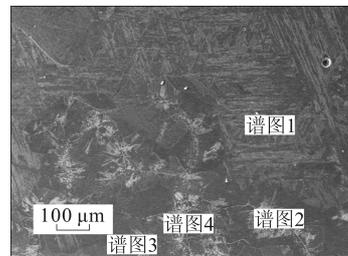


图 5 9Cr 连铸坯扫描电镜微区分析位置

表 2 9Cr 连铸坯扫描电镜微区化学成分(质量分数)分析结果

谱图	Si	Cr	Mn	Fe	Mo	%
谱图 1	0.50	8.72	0.46	89.35	0.98	
谱图 2	0.52	8.30	0.42	89.85	0.91	
谱图 3	0.49	8.92	0.42	89.06	1.11	
谱图 4	0.46	11.83	0.52	85.21	1.98	

6 硬度对比分析

对 1 号样(异常区域)和 4 号样(正常区域)分别打 HRB 硬度，1 号样中存在明显异常区域的硬度

值也明显高于其他位置, 硬度压痕如图 6 所示, 图中灰色区域为异常区域, 其他为正常区域。4 号样正常区域和 1 号样异常区域的硬度值对比见表 3。根据 HRB 与 HBW 硬度换算关系, 异常点区域硬度值集中在 247~294 HBW(100.1~106.0 HRB), 而正常区域的硬度值集中在 133~143 HBW(74.2~79.4 HRB), 对比本炉批坯料的进厂验收硬度值, 正常的硬度平均值为 143 HBW, 与本次试验的正常区域硬度值一致。



图 6 1 号样硬度试样压痕示意

表 3 正常区域和异常区域的硬度值对比 HRB

位置	单点硬度值		
	1	2	3
异常点区域	103.8	100.1	106.0
正常区域	79.4	74.2	74.4

7 结 语

从硬度和金相组织分析情况来看, 异常质点为马氏体组织。结合成分分析及扫描电镜微区分析结果, 虽成分有一定偏析, 但能谱分析马氏体区域与铁素体、珠光体区域成分并无明显差别, 并非成分偏析引起金相组织未发生转变。结合异常质点主要位于坯料心部, 考虑在退火过程中部分马氏体未完全转变为铁素体+珠光体, 残留相对较多马氏体导致局部硬度较高, 心部硬度较高的形成硬质点, 导致锯切困难。由于硬度不均容易切斜, 锯切后, 由于组织、硬度不同, 故在锯切断面处显示不同的颜色。至于马氏体在退火过程中转变不充分, 经了解退火工艺, 这一炉批确实存在退火时间不足, 坯料

心部未完全烧透的情况, 因而坯料心部部分区域马氏体未完全转变为铁素体+珠光体。后续延长坯料退火时间, 未再发现存在此类异常现象。

8 参考文献

- [1] 胡茂会, 苏雄杰. P91(T91)钢电弧炉冶炼工艺技术浅析[J]. 钢管, 2002, 31(1): 17-19.
- [2] 翟国丽, 王起江, 田青超. T91 连铸坯开裂分析[J]. 宝钢技术, 2016(1): 64-68.
- [3] 田研, 彭先明, 左国锋, 等. 大直径 P91 钢管淬火裂纹分析[J]. 钢管, 2020, 49(3): 34-37.
- [4] 郭元蓉, 吴红. P91 无缝钢管国产化研究进展[J]. 钢管, 2008, 37(1): 22-27.
- [5] 钟文, 石绍清, 江自然, 等. P91 连铸钢坯的显微组织和残余应力分布与测试[J]. 热加工工艺, 2012, 41(14): 63-66.
- [6] 邢国成, 李涛, 孙大利, 等. 优化二冷工艺提高 T91 连铸坯中心凝固质量[J]. 连铸, 2018, 43(2): 46-49.
- [7] 赵乾坤. 高合金钢 P91 圆坯连铸生产实践[J]. 山西冶金, 2020, 43(1): 80-82, 106.
- [8] 苏俊, 张铮, 李进. P91 高压锅炉管的开发[J]. 钢管, 2008, 37(4): 33-37.
- [9] 邢国成, 刘桂江, 李涛, 等. 超声波探伤不合格 T91 钢棒材的分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2019, 40(3): 8-12.
- [10] 徐路军. 大直径 P91 厚壁锅炉用钢管的生产工艺开发[J]. 钢管, 2019, 48(4): 51-55.
- [11] 沈建国, 王迎春. 大方坯连铸内部缺陷与轻压下工艺研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(3): 335-338.
- [12] 许庆太, 杨颀光, 吴春雷, 马艳铭, 孙中强. 连铸坯内部裂纹缺陷的检验和分析[J]. 连铸, 2015, 40(5): 1-6.
- [13] 杨娥, 何润, 陈国生, 等. P91 钢材表层裂纹分析[J]. 特钢技术, 2018, 24(4): 17-20.
- [14] 宁保群, 严泽生, 付继成, 等. 冷却速率对 T91 钢相变过程及组织的影响[J]. 钢铁, 2009, 44(7): 71-75.
- [15] 钟文. P91 高合金钢连铸坯凝固后的组织和力学性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.

(收稿日期: 2021-08-13; 修定日期: 2022-10-12)

推进产业结构转型升级 推动绿色低碳技术研发应用