

Production Practice of 250 mm Thick Heat Resistant Steel F5 by Water-Cooled Die Casting

Hu Zhao, Xi Chen, Hai Li

Nanyang Hanye Special Steel Co., Ltd., Nanyang Henan
Email: 414091623@qq.com

Received: Aug. 30th, 2019; accepted: Sep. 11th, 2019; published: Sep. 18th, 2019

Abstract

By optimizing the production process and controlling the smelting operation, the low carbon medium alloy steel has been produced by the process of converter + LF refining furnace. By resorting to water-cooled die casting with independent intellectual property rights, 250 mm steel plate with large thickness and keeping S2E2 flaw detection was produced by combining with special heating and rolling process. Then, the traditional flame cutting method for medium alloy steel was realized through reasonable cutting technology.

Keywords

Medium Alloy Steel, Extra Thick, Residual Oxygen Decarbonization, Temperature Cutting, Water-Cooled Die Casting

250 mm厚耐热钢F5水冷模铸的生产实践

赵 湖, 陈 熙, 李 海

南阳汉冶特钢有限责任公司, 河南 南阳
Email: 414091623@qq.com

收稿日期: 2019年8月30日; 录用日期: 2019年9月11日; 发布日期: 2019年9月18日

摘 要

本研究通过优化生产工艺, 控制冶炼操作, 实现了采用“转炉 + LF精炼炉”流程生产出了低碳中合金钢; 通过拥有自主知识产权的水冷模铸法浇铸, 配合特殊加热、轧制工艺, 生产出了250 mm规格大厚度保

S2E2探伤的钢板；通过合理的切割工艺，实现了中合金钢用传统的火焰切割法切割。

关键词

中合金钢，特厚，残氧脱碳，带温切割，水冷模铸

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

由于中高合金钢坯/锭内部应力大，因此该类合金钢生产过程中钢锭裂纹、切割面裂纹、钢锭与钢板防炸裂、探伤、高低倍组织将是生产过程中控制的难点和重点。为了避免炸裂及裂纹产生，同时为了保证钢锭内部质量，一般情况下，采用常规铸铁模生产，好处是锭模散热慢内部质量好且锭模保温能够释放钢锭内部应力。

近期，我公司与客户甲签订一单 250 mm 规格 F5 合同，其 F5 要求合金含量达 6.5%~7.4%，属于中合金钢，受合同量限制，只能采用我公司自主知识产权的水冷模铸锭生产，而我公司之前未采用水冷模生产合金含量高的钢种，对我公司来说，是一个极大的挑战。

根据协议要求，该合同保化学成分、保 S2E2 探伤，保高低倍组织，其化学成分要求如表 1：

Table 1. F5 composition table

表 1. F5 成分表

钢种	技术条件	范围	C	Si	Mn	P	S	Als	Cr	Mo	Ni	Ceq
F5	技术条件	最小	0.11	0.15	0.3	≤0.02	/	/	4.0	0.44	0.2	/
		最大	0.15	0.5	0.5		0.015	/	6.0	0.85	0.5	/
	内控	最小	0.12	0.2	0.45	≤0.018	/	0.02	4.8	0.6	0.3	1.275
		最大	0.14	0.4	0.55		0.005	0.04	5.2	0.7	0.4	1.415
	目标	0.13	0.3	0.5	≤0.015	0.003	0.03	5.0	0.65	0.35	1.345	

2. 生产总体情况概述

本钢种根据合同技术协议要求：交货状态为热轧两切，保化学成分，保 S2E2 探伤。采用模铸生产，锭型为 46.4 t 常规水冷模，规格为 250 * (2000 - 2300) * L，成材率 82%。

围绕本钢种生产的难点和重点，生产过程需重点做好以下几方面控制：

- 冶炼环节：钢水精炼夹杂控制、B 元素控制、H 含量控制；
- 钢锭管理：及时堆冷，带温清理，清理大于面积 50%；
- 钢锭加热：带温装炉，慢速升温，延长闷钢；
- 轧制堆冷：低温、高速、大压下，高温下线，做好缓冷；
- 钢板切割：带温切割，切后立即转运；
- 去应力：采用高温退火，以消除内部应力。

通过以上各环节的控制，最终实现了：冶炼成分全部内控；N、H、O、S、P 大五有害元素含量小于 150 ppm；钢板外检合格率 100%；探伤合格率 100%；两张钢板采用火焰切割的方式切为 6 块，所有切割面未有异常。最终全部顺利入库发货。

3. F5 生产关键技术和工艺要点

3.1. 模铸冶炼

本钢种冶炼工艺流程：铁水(KR 脱硫)→转炉(氩站)→VD 真空氧脱碳[1]→LF 精炼→VD 真空处理→模铸浇注。

3.1.1. VD 真空氧脱碳

降低钢水氧含量是控制钢水各种内生夹杂的关键，同时根据本钢种特点，必须控制钢水初始 C 含量在一个较低的水平。因此在本钢种生产时采用了“VD 真空氧脱碳”工艺。其原理如下：

钢水中[C]、[O]反应公式如下：



$$\lg k = \lg \frac{P_{co}}{a[c]a[o]} = \frac{1160}{T} + 2003 \quad (2)$$

由公式(1)和(2)得：

$$a[c]a[o] = \frac{P_{co}}{k}, k = 10^{\frac{1160}{T} + 2003} \quad (3)$$

$$a[c] = \frac{P_{co}}{k * a[o]} \quad (4)$$

$a[c]$ 和 $a[o]$ 分别表示 C 和 O 的浓度， k 为平衡常数， T 为钢水温度， P_{co} ，表示真空中 CO 分压。

由公式(3)可以看出，平衡常数仅与钢水温度 T 有关，在一定温度下，减少 CO 的分压 P_{co} ，可以极大的降低 C、O 深度积 $a[c]a[o]$ 。在降低 P_{co} 的同时，增大 $a[o]$ 可极大的降低钢水中碳的浓度。

利用以上原理，转炉出钢后不进行钢水脱氧和合金化，直接以合适的温度进入 VD 进行真空处理，根据我厂生产数据，可将钢水碳含量控制到 0.01% 以下。

3.1.2. C 成分控制

本炉理论合金加入量 104 kg/t，LF 精炼纯加热时间 60 分钟，合金增碳及加热增碳约 0.09~0.11%。因此 C 成分控制是难点，LF 精炼一加热碳含量必须 $\leq 0.03\%$ ，冶炼时间需控制在 2 h 以内。

实际工艺执行情况，VD 残氧脱碳保压 10 分钟，LF 精炼一加热碳含量 0.03%，过程配加碳粉 10 kg，纯加热时间 67 min，成品碳 0.13%。成品成分如表 2：

Table 2. Finished product analysis of F5

表 2. F5 成品分析

炉号	钢种	质检结果	C	Si	Mn	P	S	Als	Cr	Ni	Mo	B	N	Ceq
3-6331	F5	合格	0.13	0.32	0.52	0.008	0.002	0.041	4.862	0.333	0.632	0.00052	0.00549	1.343

3.1.3. 精炼造渣

钢水脱氧值是精炼造好白渣的关键，为此在 VD 残氧脱碳的同时，根据工艺要求补加碳粉若干，以

达到钢水 C、O 同时去除(以 CO 气体的形式排出钢水)的效果。在此基础上, LF 精炼过程中增加前期脱氧剂、石灰的加入量, 以尽快造出粘稠合适的泡沫性白渣。二加热阶段醃渣变白, 白渣保持时间满足工艺要求。

3.1.4. VD 脱气

钢水 H 含量高会加剧钢锭/钢板的裂纹敏感性, 本炉要求 VD 产前试车确认, 保压标准按照 H 含量 1.3 ppm 以下控制;

实际预抽 6 min, 保压 20 分钟, H 含量测定值和破空温度全部一次达到工艺要求。

3.2. 钢锭管理

3.2.1. 钢锭堆冷

本炉钢锭严格按照工艺要求, 浇毕 10 h 脱模, 脱模后 1 h 内转之缓冷坑, 采用集中堆放、上部热锭覆盖的方式堆冷; 钢锭在装炉前始终保持带温集中堆放状态。

3.2.2. 钢锭清理

本炉两支钢锭在堆冷 12 小时后于安排热清, 清理温度约 300℃; 对于裂纹敏感区采取的清理方式为: 中部通清, 清理面积不小于 50%。清理过程中仅 1 支钢锭单面头部存在 20 mm * 300 mm 裂纹, 清理结果符合要求。清理情况见下图 1 和图 2:



Figure 1. Ingot crack diagram
图 1. 裂纹清理图



Figure 2. Cleaning effect diagram
图 2. 清理效果图

3.3. 钢锭加热

由于 Cr 含量高达 5%，加热最高温度需控制，按照现行 III 组钢工艺执行，对最高加热温度和钢锭表面温度进行了工艺优化。具体加热曲线如下图 3：

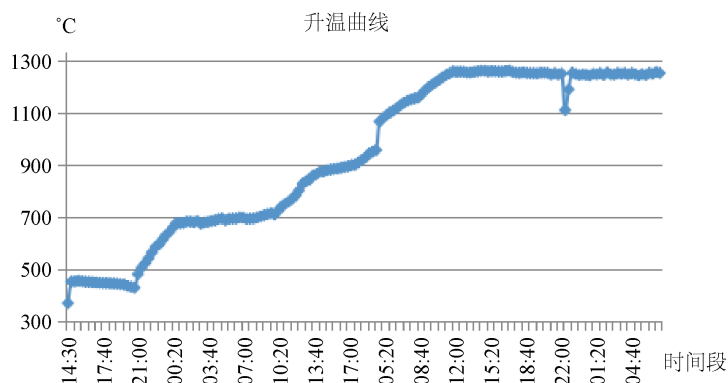


Figure 3. Ingot heating curve

图 3. 钢锭加热曲线

3.4. 钢锭轧制

钢锭采用热轧的轧制方式，执行“高温、低速、大压下[2]”工艺，过除鳞箱后表面一次铁皮情况良好，开轧温度均 $>1020\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后三道次压下量按照 50 mm，轧制平均电流 6000~6500 A，终轧温度 $>980\text{ }^{\circ}\text{C}$ 轧制热态公差按照 4.5~5.0 mm 控制；

为保证钢板拆垛后具备高温火切条件，轧后采用夹钳高温下线，集中堆冷 48 h 后视钢板温度进行拆垛切割。

3.5. 带温切割

根据我厂生产实际，因缓冷和切割工艺执行不当，已造成多起碳素钢、铬钼钢钢锭、钢板炸裂及切割面出现延时裂纹，从而对生产和合同履行造成了重大影响。因此针对本钢种必须强化带温切割和堆冷工艺。

待钢板堆冷到达时间后，对其进行拆垛，钢板实际测温 $150^{\circ}\text{C}\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 满足工艺要求，之后立即转至火切场进行切割处理，切割时控制切割方式，限定切割温度和切割时间。同时提前做好下步安排，切割完毕后 1 h 内转至下道工序。

3.6. 高温退火

退火工艺：钢板 $150^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进台车炉，在 $560^{\circ}\text{C}\sim 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温保持 10 h，然后转缓冷坑缓冷至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右拆垛。堆冷过程中做好监控，禁止倒垛和提前拆垛。

3.7. 检测环节

3.7.1. 探伤

钢板按照 EN10160-1999 探伤标准执行，探伤结果全部满足 S2E2 要求，合格率 100%。

3.7.2. 外检

外检 6 块，初检合格 6 块，最终正品发货 6 块，正品率 100%。

3.7.3. 低倍情况

根据 GB/T 226-2015 要求，对 250 mm 钢板进行检测，结果如下表 3：

Table 3. Non-destructive testing table for steel plate

表 3. 钢板探伤检测情况表

批号	GD161011012	状态	/	规格	250 mm
缺陷分类评级					
缺陷分类	评级	缺陷分类	评级		
一般偏析	C1.0	中心偏析	0		
一般疏松	0.5	中心疏松	0		
中心裂纹	0	皮下裂纹	0		
角裂纹	0	皮下气泡	0		

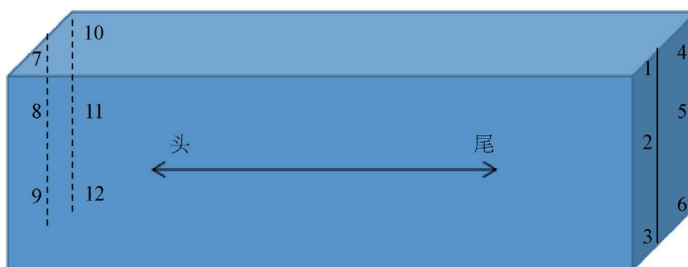


经腐蚀后，试样无明显偏析，低倍评级：C1.0 级，一般疏松 0.5 级，中心疏松 0 级，角裂纹 0 级，无中心裂纹、皮下裂纹、皮下气泡。

3.7.4. 成分偏析分析

1) 取样分析

为进一步分析采用水冷模铸生产中合金钢板成分偏析情况，为性能稳定性提供参考，在钢板不同部位进行了取样和成分分析，取样情况如图 4：



注：尾部宽 1/2 取样，厚度方向从上到下编号 1-2-3；
尾部边部取样，厚度方向从上到下编号 4-5-6；
头部宽 1/2 取样，厚度方向从上到下编号 7-8-9；
头部边部取样，厚度方向从上到下编号 10-11-12。

Figure 4. Schematic diagram of sampling position of steel plate

图 4. 钢板取样位置示意图

采用 M10 直读光谱分析仪对各位置取样进行光谱成分分析，分析结果如表 4：

Table 4. Spectral component analysis
表 4. 光谱成分分析

编号	C	Si	Mn	P	S	Als	Cr	Ni	Mo
熔炼成分	0.13	0.32	0.52	0.008	0.002	0.041	4.860	0.335	0.630
样 1	0.138	0.31	0.51	0.007	0.002	0.037	4.727	0.334	0.626
样 2	0.127	0.31	0.52	0.006	0.002	0.037	4.86	0.331	0.621
样 3	0.133	0.31	0.51	0.005	0.002	0.038	4.794	0.34	0.615
样 4	0.128	0.32	0.52	0.008	0.002	0.038	4.751	0.339	0.623
样 5	0.137	0.3	0.5	0.006	0.002	0.037	4.683	0.351	0.632
样 6	0.131	0.3	0.49	0.007	0.002	0.038	4.743	0.335	0.619
样 7	0.136	0.3	0.5	0.006	0.002	0.037	4.797	0.339	0.638
样 8	0.146	0.31	0.5	0.006	0.002	0.037	4.897	0.348	0.63
样 9	0.128	0.3	0.5	0.007	0.002	0.038	4.712	0.346	0.646
样 10	0.131	0.32	0.51	0.0087	0.002	0.038	4.781	0.335	0.630
样 11	0.129	0.31	0.51	0.008	0.002	0.037	4.821	0.336	0.632
样 12	0.13	0.32	0.52	0.008	0.002	0.038	4.812	0.333	0.631

注：红色代表高值，绿色代表低值。

按照以下公式：

$$k = |1 - k_0| \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{C_1}{C_0} \quad (6)$$

k 表示分配系数， k_0 表示分配比， C_1 表示任意处某成分浓度， C_0 表示熔炼成分浓度。

最终算得各成分偏析系数如表 5：

Table 5. Segregation coefficients of elements in F5
表 5. F5 各元素偏析系数

编号	C	Si	Mn	P	S	Als	Cr	Ni	Mo
最大分配比	1.12	0.94	0.94	0.63	1.00	0.90	0.96	1.05	1.03
偏析系数	0.12	0.06	0.06	0.38	0.00	0.10	0.04	0.05	0.03

Table 6. Segregation coefficients of different elements in iron [3]
表 6. 不同元素在铁中的偏析系数[3]

元素	P	S	B	C	V	Ti	Mo	Mn	Ni	Si	Cr
元素质量分数/%	0.01~0.03	0.01~0.04	0.002~0.1	0.3~1.0	0.5~4.0	0.2~1.2	1.0~4.0	1.0~2.5	1.0~4.5	1.0~3.0	1.0~8.0
偏析系数 $ 1 - k_0 $	0.94	0.9	0.87	0.74	0.62	0.53	0.51	0.86	0.65	0.35	0.34

2) 结果分析

根据取样光谱分析情况, 可得出以下结果:

- a. 成分偏析相对较大元素为 C、P、Als (浇钢未采取保护浇铸, 浇钢过程钢水吸氧, 导致 Als 降低);
- b. 正偏析较大的部分出现在钢板头部厚 1/2 处; 负偏析较大的部分多出现在钢板尾部厚 1/2 处; 整体偏析情况符合模铸法钢锭偏板情况分布趋势;
- c. 铬元素含量为 4.86%, 其偏析系数为 0.04%, 偏析程度较低;
- d. 采用水冷模铸生产, 钢板整体成分相对均匀, 与表 6 各元素分配系数相比, 各成分偏析都要明显优于参考数据。

3) 偏析原理分析

- a. 依靠铜板通水强制冷却, 促使锭模内的钢水尽快消除过热度, 减轻钢锭发达的柱状晶, 确保钢锭中心组织较致密, 同时大大减轻中心偏析的影响;
- b. 采用大的宽厚比, 以增加钢锭的比表面积, 从而增大冷却强度, 细化晶粒, 减轻疏松和偏析, 从而提高本体凝固过程的凝固率;
- c. 为保证钢锭本体的充分补缩, 防止二次缩孔和中心疏松产生。采用钢锭本体厚度方向上的较大锥度以形成喇叭口的补缩通道, 使液相穴前沿呈 V 型, 考虑到水冷铜板的加工制作难度, 取钢锭大面锥度为 0.6%~0.8%;
- d. 就现场生产实际而言, 一般采取高温慢、低温快、开浇稳、跟流准, 到模帽接口减流, 保证流不散, 圆流浇铸的原则。

4. 结论

通过以上分析, 得出以下结论:

- 1) 可采用“转炉 + VD”生产低碳中高合金钢;
- 2) 通过工艺优化和控制, 利用我厂现在设备可以生产 250~350 mm 保国标探伤超厚板;
- 3) 通过合适的工艺控制, 可以利用传统火焰切割对高碳、高合金钢进行切割;
- 4) 我厂水冷模铸生产的产品具有成分偏析小、内部质量优良等优势, 能满足大特厚度钢板的研发和量产需求。

参考文献

- [1] 杨海林, 周前, 韩铁水. VD 真空氧脱碳工艺[J]. 炼钢, 2005, 21(5): 18-20.
- [2] 宋瑞甫. 提高钢锭质量的实践和探讨[J]. 宽厚板, 2001, 7(5): 21-23, 44.
- [3] 刘全坤. 材料成形基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.