



新型水冷模铸生产抗层状撕裂特厚板的浇铸 参数模拟优化

唐郑磊^{1,2}, 许少普², 王福明¹, 李红洋², 陈熙², 张涛²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 南阳汉冶特钢有限公司, 南阳 474500)

摘要: 新型水冷模铸锭模系统由可调整锭模、水冷铜底板、保温帽及控制系统组成, 从生产抗层状撕裂性能特厚板的提料尺寸来倒推水冷模铸的尺寸, 并通过 Anycasting 软件进行 4 因素 5 水平正交试验模拟, 确定目前水冷控制系统下的最优锭模尺寸 (宽面锥度 0.75%, 窄面锥度 0.45%, 窄面弧半径 1 500 mm, 保温帽高度 500 mm) 及浇铸后 2~8 h 跟进冷却工艺, 并利用水冷模铸中心加隔板的方式, 将铸锭一分为二达到一模双锭, 类似定向凝固的方式, 来使中心的偏析和疏松缺陷存在于坯料的表面, 更易于清理, 从而提高坯料质量, 并可使轧制过程中渗透作用更为有效, 达到生产抗层状撕裂特厚板的目的。生产 200~400 mm 的特厚板钢板, 内部质量符合标准 JB/T 4730.5-2005 的 I 级及特厚板的抗层状撕裂 Z35 性能。

关键词: 新型水冷模铸; 特厚板; 抗层状撕裂性能; Z 向

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00045 **中图分类号:** TF775

Simulation and Optimization of Casting Parameters for Producing Laminar Tear Resistant Extra-thick Plate by The New Type of Water-cooled Die Casting

Tang Zhenglei^{1,2}, Xu Shaopu², Wang Fuming¹, Li Hongyang², Chen Xi², Zhang Tao²

(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 NanYang HanYe Special Iron and Steel Co., Ltd., Nanyang 474500, China)

Abstract: The new type of water-cooled mold casting ingot mold system consists of an adjustable ingot mold, a water-cooled copper bottom plate, an insulation cap, and a control system. The size of the water-cooled mold casting is inversely calculated from the size of the material used to produce a thick plate with laminar tear resistance, and a 4-factor 5-level orthogonal test simulation is conducted by using Anycasting software, to determine the optimal ingot mold size under the current water cooling control system (wide surface taper 0.75%, narrow surface taper 0.45%, narrow surface arc radius 1 500 mm, insulation cap height 500 mm) and follow up the cooling process 2 to 8 h after casting. Use the method of adding a separator to the center of the water cooling mold casting to divide the ingot into two parts to achieve one mold double ingots, similar to the directional solidification method, to make the center segregation and loose defects exist on the surface of the billet, making it easier to clean and improve the quality of the billet, And it can make the penetration effect more effective during the rolling process, so as to achieve the purpose of producing laminated tear resistant extra thick plates. 200-400 mm plate produced by the said method, internal quality meets the standard JB / T 4730.5-2005 class I and plate with layered tear resistance Z35 performance.

Key Words: New Type of Water-cooled Mold Casting; Extra Thick Plate; Layered Tear Resistance; Z-direction

模铸特厚板有着比锻造板成本低、生产效率高, 但相比连铸坯又具有特厚、特重以及便于冶炼特种钢等优势, 因此, 在目前连铸为主的生产模式下, 众多领域依然保留模铸生产特厚板的方式^[1]。但传统的常规铸铁模铸生产方式由于冷却速度小、钢锭凝固时间长, 得到的铸造组织存在疏松、偏析等严重缺陷^[2-3], 导致生产的 200~400 mm 特厚板内部致密性不够, 抗层状撕裂性能无法满足 Z35 的

性能要求, 且因铸铁模应力开裂报废及不能随客户尺寸实时调整锭模尺寸而导致特厚板成材率低, 生产成本较高; 而定向凝固方式随着特厚板坯的厚度增加冷却强度达不到定向凝固的效果^[4-6], 电渣重熔锭和锻造锭生产的特厚板虽质量较好, 但由于生产效率低、生产成本高等一系列的缺点, 也限制了其大规模使用^[7-8]。

特厚板的大量需求, 促使以轧代锻迅速成为行

业热点,但是其要求的原料一般为高质量钢锭。优质大断面铸坯或铸锭生产难度较大^[9-10],厚规格钢板相对常规钢板必须有更高的钢水纯净度以及更好的凝固组织,以保证内部质量良好的坯料,而目前水冷铜板结晶器铸模凝固方式能加快凝固速度减轻偏析,但其最后凝固的中心位置不可避免的依然存在偏析及疏松,导致特厚板抗层状撕裂性能差。

针对以上问题,本文对汉冶特钢自主研发的新型水冷模铸生产抗层状撕裂特厚板的浇铸参数进行了模拟优化,并利用中心加隔板的一模双锭方式生产了抗层状撕裂特厚板。

1 新型水冷模优化设计依据

受连铸结晶器的启发,新型钢锭浇铸设备以大型铜板作为钢锭铸造模,四周类似于连铸结晶器结构,底部为水冷铜板,通过调节阀及流量计建立模型进行精准冷却,钢锭本身的凝固放热可以迅速地通过流动的水带走,加快钢锭冷却及凝固速度,减少偏析,钢锭帽口采取妥善的保温措施,可使钢锭在凝固过程中内部形成上大下小的补缩通道,防止缩孔的产生,并且由于钢锭凝固时间的缩短,能够显著减轻内部疏松、偏析,明显提高钢板内部探伤质量^[11]。四周铸模壁与底部铜底板可相对调整,并用电机驱动达到无级调整,从而达到生产不同厚度、不同宽度、不同大小的铸锭。

水冷模铸结晶器主要由水循环冷却系统、浇铸系统和可调式结晶器、保温帽等系统组成^[12]。其中可调式结晶器系统是新型钢锭模设备的核心,主要由结晶器框架、浇铸底部冷却板、宽窄边水箱和铜板装配组成的冷却器(四周边共四块组成)、宽窄边夹紧、调整系统(电机驱动)组成,铸锭模如图1所示。

2 新型水冷锭模尺寸及跟进工艺优化

2.1 水冷锭模尺寸正交设计

依据水冷锭模尺寸设计三要素,对水冷模铸的双对面锥度、弧半径以及保温帽高度进行正交工艺方案设计,并利用Anycasting软件进行模拟计算,结合水冷模钢锭的特点,钢锭模的本身尺寸设计考虑了宽面的锥度、窄面的锥度、窄面弧半径三要素,保温帽仅考虑高度这一因素。本体选用4因素5水平,采用正交法进行设计,选用L16(45)正交表,具体详见表1。实验正交设计方案见表2。



图1 水冷模铸锭模

Fig. 1 Water-cooled mold casting ingot mold

表1 水冷锭模 Anycasting 软件模拟计算因素以及水平
Table 1 Anycasting software simulates calculation factors and levels of water-cooled mold casting ingot mold

计算因素	宽面锥度/%	窄面锥度/%	窄面弧半径/mm	保温帽高度/mm
计算水平	0.65	0.45	800	400
	0.75	0.55	1 000	450
	0.85	0.65	1 200	500
	0.95	0.75	1 500	550

表2 水冷锭模 Anycasting 软件模拟计算方案
Table 2 Anycasting software simulation calculation scheme of water-cooled mold casting ingot mold

方案编号	宽面锥度/%	窄面锥度/%	窄面弧半径/mm	保温帽高度/mm
1	0.65	0.45	800	400
2	0.65	0.55	1 000	450
3	0.65	0.65	1 200	500
4	0.65	0.75	1 500	550
5	0.75	0.45	800	400
6	0.75	0.55	1 000	450
7	0.75	0.65	1 200	500
8	0.75	0.75	1 500	550
9	0.85	0.45	800	400
10	0.85	0.55	1 000	450
11	0.85	0.65	1 200	500
12	0.85	0.75	1 500	550
13	0.95	0.45	800	400
14	0.95	0.55	1 000	450
15	0.95	0.65	1 200	500
16	0.95	0.75	1 500	550

借助韩国 Anycasting 公司设计的大钢锭专用铸造软件对正交设计的 16 种方案进行浇铸过程与凝固全过程仿真模拟,通过对水冷模铸浇铸过程流场、温度场、残余熔体模量模拟仿真计算,确定最优残余熔体模量、凝固时间最短、缩孔脱离铸锭本体

全部在帽口的方案,其模拟最终结果示意图如图 2 所示。

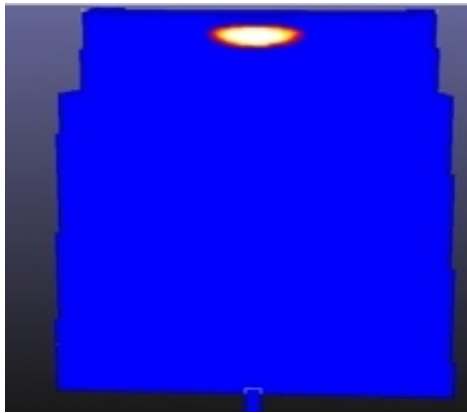


图 2 最佳方案凝固效果图
Fig. 2 Solidification Effect of the Best Scheme

2.2 浇铸初始条件设置

2.2.1 初始温度设置

为确定初始边界条件,对钢水以及与钢水相接触的锭模及耐材、绝热板和保温剂的初始温度进行设定,相关参数见表 3。

表 3 浇铸初始温度参数

Table 3 Initial casting temperature parameters

材料名称	钢水	锭模铜板	锥砖	绝热板	保温剂
温度/°C	1 535	25	30	60	30

2.2.2 材料属性参数设置

在此仅列举部分材料的属性参数,涉及变量部分需根据温度或时间进行设定变量,相关参数设置见表 4。

表 4 水冷模铸浇铸参数设置

Table 4 Setting of casting parameters for water cooled mold casting

属性名称	材料名称			
	钢水	锭模铜板	保温帽	耐火砖
密度/(g·cm ⁻³)	变量	8.8	变量	3.85
比热容/[cal·(g·°C) ⁻¹]	变量	0.09	变量	0.21
热导率/[cal·(cm·s·°C) ⁻¹]	变量	0.18	变量	0.06
液相线温度/°C	1 513	1 000	1 227.6	无
固相线温度/°C	1 388	854	1 147.6	无
潜热/(cal·g ⁻¹)	55.5	41.66	47.77	无
动态粘度/[g·(cm·s) ⁻¹]	变量	无	无	无
热膨胀系数/°C ⁻¹	变量	1.8e ^{-0.005}	变量	变量
凝固收缩体积变化/%	5.57	7.3	0.8	无

2.2.3 钢水浇铸工艺参数设置

按现场实际浇铸工艺对浇铸工艺参数进行设定,并对铸毕后锭模内的实际钢水温度进行测定,具体参数见表 5,水冷模铸控制系统如图 3。

表 5 水冷模铸浇铸工艺

Table 5 Water cooled mold casting process

浇铸温度/°C	进入锭模钢水温度/°C	本体浇铸时间/min	帽口浇铸时间/min
1 560	1 535	16	6

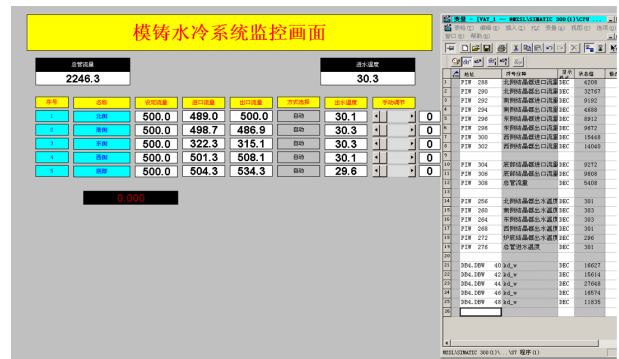


图 3 水冷模铸冷却系统监控画面

Fig. 3 Monitoring screen of water cooled mold casting cooling system

2.2.4 热传导参数设置

确定了凝固初始边界条件、各种材料的属性参数和浇铸工艺参数之后,再结合 anycasting 数据库和现场实际生产情况,对钢水、模具、耐材、空气之间的热传导参数进行设计见表 6,将凝固模型建立之后,然后对模型进行网格划分,最后进行 Anycasting 模拟运算。

表 6 水冷模铸各材质热传导系数

Table 6 Thermal conductivity coefficient of various materials in water cooled mold casting

热传导对象	换热系数/[cal·(cm·s·°C) ⁻¹]
空气-各种材料	0.001
耐材-各种实体材料	0.010
模具-模具	0.600
钢水-模具	变量(随温度变化,从数据库中导出)

2.3 钢锭充型过程

按照上述假定的边界条件,对模型的充型模拟过程如图 4 所示。

从充型过程的模拟可知:钢水在浇铸至 2 000 mm 高度时,从底部反射的钢水已不能冲破锭模内上层钢水的静压力,锭模上层的钢水均为浇铸前期浇入锭

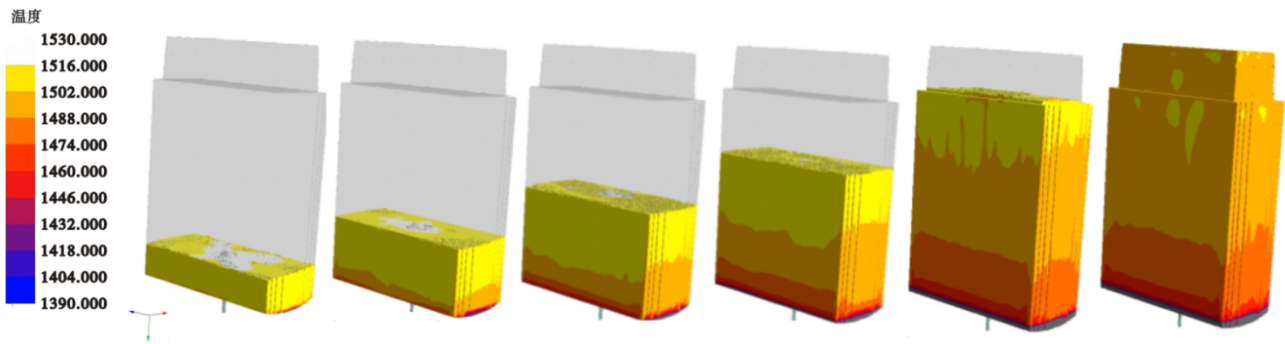


图 4 水冷模铸浇铸过程的模拟示意图

Fig. 4 Simulation diagram of water cooled mold casting process

模的钢水(已经过锭模冷却,温度较低),而浇铸后期注入的钢水动量只能促使钢水流入到钢锭中下部(此部分钢水为从钢包注入的钢水,温度较高),不利于钢水补缩。而从钢水浇铸过程中钢锭外层坯壳温度情况可知,钢水注入锭模中,均会立即冷却形成一定厚度的坯壳,坯壳厚度从小往上逐渐减薄,而此方面则有利于钢水的补缩。

通过借助韩国 Anycasting 公司对采用正交设计选定参数的铜板结晶器水冷锭进行耦合模拟,以验证所选的尺寸参数。经耦合模拟,水冷铜板结晶器锭模最佳尺寸:宽面锥度 0.75%,窄面锥度 0.45%,窄面弧半径 1 500 mm,保温帽高度 500 mm。

3 水冷铜板结晶器锭模跟进挤压工艺设计

钢水的凝固过程是一个体积收缩过程,断面厚度尺寸减小,在锭模与坯壳之间必然形成气隙。为保证持续给予坯壳一定的压力,则需减小气隙厚度,这是一个动态调整过程。通过浇铸后不同的时间,计算出钢锭的收缩尺寸,从而推导出铜板需要跟进挤压的尺寸。

(1) 坯壳生成厚度的确定。

依据凝固的平方根定律确定凝固坯壳厚度,如式(1)所示:

$$d = K \sqrt{t} \quad (1)$$

式中:d-坯壳厚度,mm;K-凝固系数,mm·min^{-1/2},取 K=20;t-凝固时间,min。

(2)凝固收缩率 ε 包括液态收缩率和固态收缩率,大小主要取决于各种成分含量的多少。

(a) C 对 ε 的影响见表 7;(b) 合金元素对 ε 的影响见表 8。

根据 C 以及合金元素对凝固收缩率的影响大小,对于低合金钢,钢水的液态收缩和凝固体积收缩之和可按 4.9% 计算。

表 7 碳含量对凝固收缩率 ε 的影响

Table 7 Effect of carbon content on solidification shrinkage rate ε

C/%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\varepsilon_{液}$ 收缩 (降温 10 °C) /%	1.51	1.50	1.50	1.59	1.59	1.62	1.62	1.62	1.68	1.68
$\varepsilon_{固}$	1.98	3.12	3.39	3.72	4.03	4.13	4.04	4.08	4.05	4.02

表 8 四种主要合金元素对体积收缩的影响

Table 8 Effect of four main alloy elements on volume shrinkage rate

合金元素	质量分数/%	$\Delta V_{液}/\%$ (温度降 100 °C)	$\Delta V_{凝}/\%$	$\Delta V_{固}/\%$ (温度降至 20 °C)	$\Delta V_{总}/\%$
Ni	9.44	0.25	3.40	6.07	9.72
Mn	8.50	2.28	0.44	6.15	8.87
Si	3.60	2.05	1.77	5.95	9.77
Cr	13.70	1.66	0.90	6.14	8.70

(3) 气隙厚度的确定:

$$h = 2 \cdot d \cdot \varepsilon \quad (2)$$

式中:h-气隙厚度,mm;d-坯壳厚度,mm; ε -凝固收缩率,%。

(4) 铜板跟进挤压尺寸的确定。

为保护结晶器铜板,两面铜板跟进挤压尺寸按理论产生气隙的 70% 计算,则根据坯壳厚度、凝固收缩比、气隙厚度可计确定铜板单面的跟进挤压尺寸:

$$l = 70\% \cdot h \cdot \frac{1}{2} = K \cdot \sqrt{t} \cdot \varepsilon \quad (3)$$

凝固开始后 8 h 过程中,单面铜板的跟进挤压尺寸见表 9。

铜板跟进挤压操作要求:根据理论设计跟进尺寸,通过液压机构(减速机)推动丝杆推进宽面铜板进行挤压;在挤压过程中,通过油表压力指示数据可以判断挤压是否到位,并通过液压推动丝杆进程

表 9 水冷模铸铜板跟进挤压尺寸

Table 9 Follow-up extrusion dimensions of water cooled mold cast copper plate

水冷时间/h	凝固坯壳厚度/mm	理论收缩率/%	理论气隙/mm	单面跟进尺寸/mm
2	219.1	4.9	21.47	7.5
3	268.3	4.9	26.29	9.2
4	309.8	4.9	30.36	10.6
5	346.4	4.9	33.95	11.9
6	379.5	4.9	37.19	13.0
7	409.9	4.9	40.17	14.1
8	438.2	4.9	42.94	15.0

量可以得出挤压量。而对于高合金钢来说,又可以通过扩大气隙来对钢锭冷却速度进行限制。

4 新型水冷模浇铸

利用 Anycasting 软件对铸铁模与新型水冷模铸进行模拟计算对比,从图 5 可看出,铸铁模的疏松缺陷在凝固后依然在帽口下部的本体位置,而新型水冷模的疏松在帽口位置,疏松缺陷导致的缩孔,最终在后续的轧制过程中无法焊合而导致内部质量不合格,且还严重影响特厚板抗层状撕裂性能。实际钢锭解剖截面的低倍组织与 Anycasting 模拟的结果相似,水冷模偏析明显比常规模的偏析轻,且最后凝固的缩口及疏松最终收缩在大帽口区域。由此说明在同等条件下,新型钢锭在质量方面及成材率方面均比常规模铸锭具有明显的优势。

水冷模结晶器设计所要求的水流量、流速以及冷却效果势必会影响钢锭的冷却凝固时间,进而影响到新型锭模钢锭生产所涉及的动力能源消耗,同时还会对新型钢锭模的周转时间产生影响。水冷结晶器内腔铜板的尺寸和形状直接影响到浇铸生

产的钢锭几何形状与尺寸,钢锭的尺寸对轧制钢板的成材率也会产生极大的影响。众所周知,钢锭的尺寸与形状对钢锭内部的冷却凝固过程也会产生重大影响,进而对钢锭内部凝固过程产生的疏松、偏析等缺陷产生重大影响,而钢锭内部质量最终也直接影响所轧制钢板的质量与用户使用效果。

在采用韩国 Anycasting 大钢锭软件进行充分模拟和在实际生产过程不断试验、总结验证的基础上,汉冶特钢对新型钢锭模尺寸、保温帽、保温耐火材料和新型锭模通水的水流量等一系列工艺参数均进行了优化和调整,并取得了较为显著的成效。

水冷铜板结晶器锭模凝固方式能加快凝固速度减轻偏析,但其最后凝固的中心位置不可避免的依然存在偏析及疏松,利用水冷模铸最佳冷却优化模型,中间加隔热板,这样可以将钢锭最薄弱的中心部分,作为锭模表面,改变常规冷却铸锭中心疏松及偏析最严重的常态,将铸锭一分为二达到一模双锭,类似定向凝固的方式,来使中心的偏析、疏松缺陷存在于坯料的表面,并可使轧制过程中渗透作用更为有效,来保证特厚板的内部质量以及抗层状撕裂性能。

通过严格的转炉炼钢-LF 精炼-VD 真空、新型水冷模铸浇铸方式处理工序,使最终钢板的非金属夹杂物控制较低,反映了钢板纯净度高,气体含量 N 控制在 $\leq 59 \times 10^{-6}$, O 控制在 $\leq 14 \times 10^{-6}$, VD 定氢检测在 2×10^{-6} 以下,并保证了 200 ~ 400 mm 的特厚板钢板内部质量符合标准 JB/T 4730.5-2005 的 I 级及特厚板的抗层状撕裂 Z35 性能。

5 结论

(1) 根据连铸结晶器的启发,以大型铜板作为

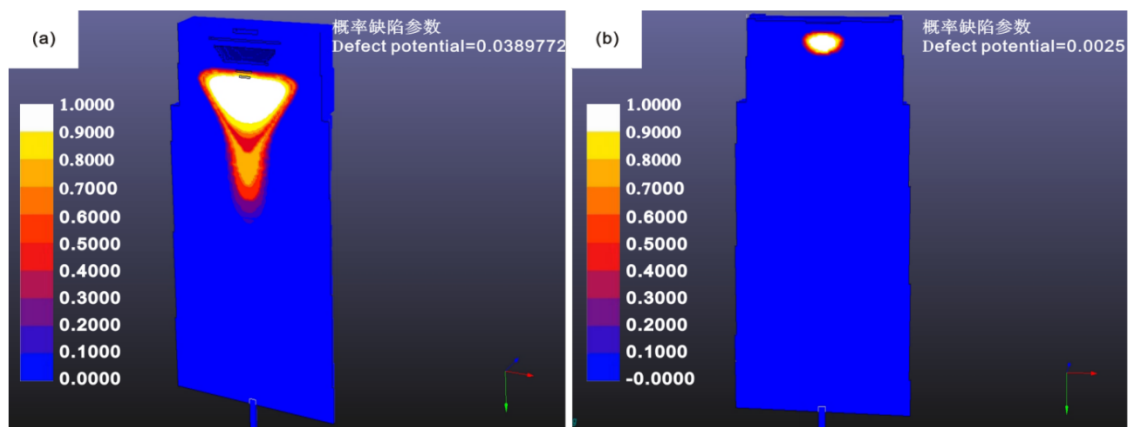


图 5 浇铸模拟示意图:(a)铸铁模铸锭,(b)新型水冷模铸锭

Fig. 5 Casting simulation diagram: (a) Cast iron ingot, (b) new water-cooled mold ingot

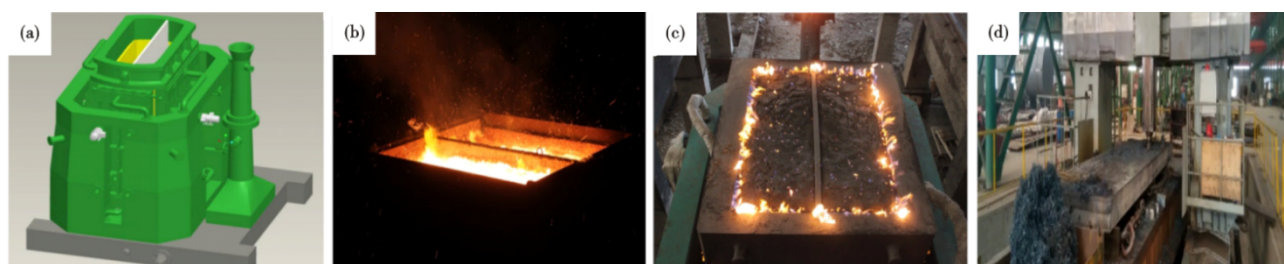


图6 水冷模铸生产特厚Z向钢板方法:(a)中间加隔板浇铸示意图,(b)实际浇铸过程,(c)浇铸完毕凝固四侧跟进过程,(d)表面加工过程

Fig. 6 Water cooled mold casting method for producing extra thick Z-direction steel plate : (a) Schematic diagram of casting with intermediate partition plate , (b) Actual casting process , (c) Follow up process on four sides after casting and solidification , (d) Surface processing process

钢锭铸造模,四周类似于连铸结晶器结构,底部为水冷铜板,通过调节阀及流量计建立模型进行精准冷却,钢锭本身的凝固放热可以迅速地通过流动的水带走,加快钢锭冷却及凝固速度,减少偏析,钢锭帽口采取妥善的保温措施,可使钢锭在凝固过程中内部形成上大下小的补缩通道,防止产生缩孔的产生,并且由于钢锭凝固时间的缩短,能够显著减轻内部疏松、偏析,明显提高钢板内部探伤质量。

(2)从抗层状撕裂特厚板的提料尺寸来倒推水冷模铸的尺寸,通过Anycasting软件进行4因素5水平正交试验模拟,确定目前水冷控制系统下的最优

的锭模尺寸(宽面锥度0.75%,窄面锥度0.45%,窄面弧半径1500 mm,保温帽高度500 mm)及浇铸后2~8 h跟进冷却工艺。

(3)利用中心加隔板的方式,将铸锭一分为二,达到一模双锭,类似定向凝固的方式,使中心的偏析疏松缺陷存在于坯料的表面,并可使轧制过程中渗透作用更为有效,来保证特厚板的内部质量以及抗层状撕裂性能,利用水冷模铸中心加隔板的方式生产了200~400 mm的特厚板钢板,内部质量符合标准JB/T 4730.5-2005的I级及特厚板的抗层状撕裂Z35性能。

参考文献

- [1] 耿明山,刘艳,曹建宁,等. 水冷模铸技术在大型扁钢锭制造中的应用[A]. 2014年全国炼钢—连铸生产技术会论文集[C]. 中国金属学会, 2014:12.
- [2] 耿明山,曹建宁,刘艳,等. 大宽厚扁钢锭的锭型设计和61tQ345B钢扁锭的生产实践[J]. 特殊钢, 2017, 38(4): 23-26.
- [3] 胡德志,周碧珊,赵文忠,等. 定向凝固大型铸锭研究[J]. 宽厚板, 1995, 1(1): 11.
- [4] 刘海啸,薛志明,胡林. 特厚板的生产和单向凝固技术[J]. 炼钢, 1998, (1): 52.
- [5] 木下胜雄,小口征男,吉田雅一,等. 通过水冷锭模底盘来制造单向凝固钢锭[J]. 铁と钢, 1985, 70(8): 226.
- [6] 新庄丰,木下胜雄,小口征男,等. 采用水冷钢锭底盘的单向凝固钢锭的制造[J]. 铁と钢, 1985, 71(12): 186.
- [7] 唐郑磊,许少普,陆岳璋,等. 水电站座环用S500Q-Z35钢245 mm特厚板的热处理工艺[J]. 特殊钢, 2015, 36(3): 34-37.
- [8] 唐郑磊,王福明,于乔木,等. 热处理工艺对水电站用钢SXQ500/550DZ35奥氏体晶粒的影响[J/OL]. 特殊钢, 2023, 44(3): 1-5.
- [9] 齐新霞,贾琦. Q460钢3250 mm×150 mm宽板坯凝固传热数值模拟研究和应用[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 1-4.
- [10] 侯敬超,赵国昌,吴艳阳,等. 高品质980 mm×1960 mm电渣扁锭轧制164 mm×1700/1806 mm 12Cr2Mo1VR钢板研发[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 47-51.
- [11] 唐郑磊,许少普. 特厚桥梁钢板Q370qE-Z35的开发研究[J]. 钢铁, 2012, 47(5): 82-86.
- [12] 唐郑磊,高照海. HG785D塔式起重机用高强特厚焊接钢板的研发[J]. 轧钢, 2013, 30(5): 10-14.