

(1) 结晶器中初生坯壳的凝固冷却和应力应变位于高温脆性区,利用数值计算,可以得出结晶器中钢液及坯壳中的温度场、速度场及应力场,从而分析得出影响铸坯应力的主要因素。应用钢的高温特性试验,可以测量得出高温下产生裂纹的临界应变及应力,由此对铸坯应力的主要影响因素进行调整、控制。

(2) 在连铸二次冷却区,由于间断的喷雾冷却作用,使铸坯表面温度呈周期性变化,会产生一定的热应力,同时钢水静压力造成铸坯鼓肚,导辊不对中造成铸坯产生额外应力。通过高温特性测试,可以研究循环加热与冷却对钢的高温特性的影响,据此提出为避免产生裂纹,保持铸坯表面温度高于脆性温度区,在铸机机械和冷却制度的设计上应遵循的原则和应该采取的措施。

(3) 根据钢的高温力学特性测试结果,铸坯矫直温度应避免低温脆性区,该温度范围与钢的化学成分密切相关。通过钢的高温力学性能的测试,可以准确地确定该温度范围,为制定二次冷却制度提供依据。

在 X1、X2、X3 三种钢的生产过程中均采用了较弱的冷却制度,保证其矫直区铸坯表面温度在 930 ℃ 以上,同时在结晶器操作中采用了适当的中碳钢保护渣,并加强了结晶器液面的控制,获得了良好的铸坯质量。

## 5 结论

(1) 研究了三种钢的高温力学性能,得出其低温脆性和高温脆性温度范围。

(2) 应变速率、钢的化学成分和冷却速率对高温性能有明显影响,降低应变速率将使高温性能显著恶化。

(3) 利用以上研究结果可以对连铸生产的结晶器操作、二次冷却制度的制定及确定矫直温度提供指导。

### 参 考 文 献

- 1 Mintz B, Yue S, Jonas J, International Materials Reviews, 1991,36(5):187
- 2 Turkdogan E T. I & S M, 1989(5):61~75
- 3 铃木健一郎. 铁と钢, 1993, 79, (11):50
- 4 蔡开科, 党紫九. 连铸钢高温力学性能专集. 北京科技大学学报, 1993, 15(增刊 2):38

# 压力水膜结晶器的开发与应用

李本海 李文秀 胡大伟 谭昌祥 孙文强

(首钢总公司)

**摘 要** 采用压力水膜冷却原理,开发了一项高效连铸新技术——压力水膜附加结晶器(长 320 mm 左右),该结晶器冷却强度大,能使坯壳的凝固生长速度明显加快,坯壳厚度增厚一倍左右,从而可大幅度提高现有铸机的拉速,同时还可以减少铸机的漏钢率。首钢第二炼钢厂以这项新技术为依托,对 140 mm 的 5 号小方坯铸机进行了高效化改造,铸机的平均拉速达到 2.7 m/min,提高 30% 以上,最高拉速达 3.2 m/min,铸机的平均漏钢率下降到 0.18%,创直接经济效益 256 万元/(a·台)。

**关键词** 结晶器 压力水膜 铸坯 冷却 拉速

## 1 压力水膜结晶器设计及冷却原理

采用先进技术,快速浇注,大幅度提高现有铸机的生产能力是实现“铸机高效化”的主要内容。针对首钢目前小方坯铸机的设备和技术状况,从有利于提高铸机拉速的角度出发,本着“投资少、见效快”的原则,开发了强化结晶器出口坯壳冷却的“压力水膜结晶器”。

压力水膜结晶器装置如图 1 所示,它安装在主结晶器的下方,高压冷却水通过该装置后,在铸坯表面形成一层高速流动的压力水膜,其绝大部分水向下流动,对铸坯进行强有力的冷却,保证水膜的压力等于钢水的静压力,以便使坯壳处于平衡压力之下快速凝固,铸坯通过压力水膜段后,其表面温度迅速大幅度降低。少量的冷却水向上窜进主结晶器铜管与铸坯之间的间隙,强化主结晶器下部冷却,使主结晶器和该冷却装置

形成一个有机的整体,充分发挥各自的优点,在提高拉速的同时,减少漏钢率。与此同时,铸坯的角部仍用喷嘴冷却。另外附在水箱背板上的机械自动调节复位装置,能够保证在结晶器的振动和拉坯过程中,使水箱面板与铸坯始终保持良好的接触,形成的压力水膜符合设计的参数。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 铜质压力水膜结晶器的试验

#### 2.1.1 试验情况

从1995年11月到1996年7月先后在首钢第二、第三炼钢厂做了八次试验,共浇钢17 138 t,试验数据见表1。

#### 2.1.2 试验结果

(1) 铸坯通过压力水膜段后,其表面温度可由1 200℃左右冷却到474℃。

(2) 压力水膜结晶器对减少漏钢率有一定的作用,漏钢率明显下降。

(3) 试验时,120 mm小方坯铸机的最高拉速达3.5 m/min;140 mm小方坯铸机的最高拉速达3.2 m/min。铸坯质量与平时生产水平相当。

(4) 试验中没有出现任何安全问题。

#### 2.1.3 分析讨论

(1) 对漏钢、断流的影响:压力水膜结晶器对于减少漏钢率有一定的作用。在压力水膜冷却段,当出现因下渣或裂纹引起的漏钢时,漏钢的部位会因压力水膜强有力的连续冷却而重新凝固,从而避免了漏钢断流。

(2) 压力水膜结晶器的冷却效果:

① 从铸坯表面的颜色看,铸坯通过压力水膜冷却段后,表面发黑。

② 从铸坯通过主结晶器铜管后坯壳厚度的变化情况看,效果也是比较明显的,对应的厚度从8.16 mm增厚到16.74 mm。

③ 从整个坯壳厚度的变化情况看,压力水膜冷却段(850~1 200 mm)的斜率最大,即坯壳凝固生长的速度最大。图2是从结晶器铜管上口到二冷直线段末端的坯壳厚度变化曲线图。

④ 从有水膜结晶器和无水膜结晶器连铸坯坯壳厚度的比较看,效果也是明显的,图3是两种条件下坯壳厚度的比较。

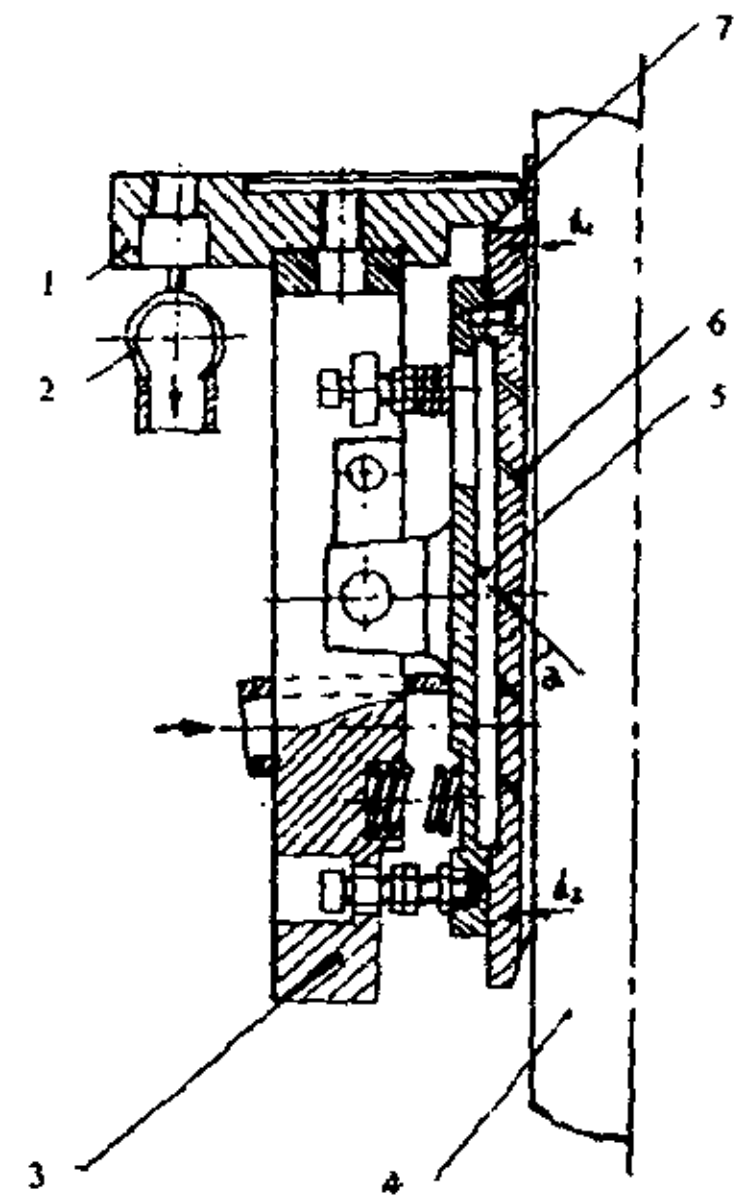


图1 压力水膜结晶器结构及安装图

1—结晶器法兰盘;2—水环;3—机械自动复位机构;4—铸坯;5—水箱;6—水缝;7—主结晶器铜管

表1 首钢第二、第三炼钢厂试验情况

试验内容	试验流浇钢量/ t	平均拉速/ m·min <sup>-1</sup>	0段水压/ MPa	中包温度/ ℃	铸坯质量	注
第一次 单流可行性试验	1 350	2.8	0.72	1 566	无废品	
第二次 单流提高拉速试验	1 550	3.2	0.75	1 548	无废品	三炼钢2号铸机
第三次 四流提高拉速试验	2 100	2.6	0.39	1 566	无废品	120 mm
第四次 四流提高拉速试验	1 990	2.7	0.46	1 577	无废品	钢种 Q235
第五次 八流提高拉速试验	5 010	2.8	0.49	1 555	10支脱方	
第六次 四流提高拉速试验	570	2.6	0.55	1 561	无废品	
第七次 单流提高拉速试验	53	---	---	---	无废品	二炼钢2号机 120 mm
第八次 四流提高拉速试验	4 515	2.4	0.55	1 540	无废品	三炼钢5号机 140 mm

### 2.2 铸铁材质压力水膜结晶器的试验

在铜质水膜结晶器试验取得成功之后,为进一步降低生产成本,克服铜质压力水膜结晶器抗破坏能力差的缺点,我们又开发了铸铁材质的压力水膜结晶器,这种结晶器共进行了两次工业性试验,由于铸铁材质的高强度和耐磨性,从而增强了压力水膜结晶器的抗破坏能力,且寿命明显提高。试验中,浇钢量达6 210 t的一个压力水膜结晶器,其磨损量也只有0.3 mm左右,还可继续使用。

### 3 数值模拟计算

#### 3.1 数学模型及计算条件

连铸坯凝固传热的微分方程<sup>[1,2]</sup>和压力水膜冷却段的边界条件如下

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_x (T_x - T_0) \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = h_y (T_x - T_0) \quad (3)$$

式中： $h_x$  和  $h_y$  为压力水膜冷却段的换热系数，与水膜的压力、流速和流量等因素有关。

主要的计算条件：钢种 - Q235，拉速 - 3.2 m/min，中间包钢水温度 - 1535 ℃。导热系数  $\lambda(T) = 0.159 + 1.171 \times 10^{-4} T$  (J/cm·s·℃)。主结晶器的热流  $q = 267.648 - 48.093 \sqrt{\tau}$  (J/cm<sup>2</sup>·s)

#### 3.2 计算结果

用上述数学模型及计算机模拟软件对压力水膜冷却效果进行了模拟计算，结果见图4。图4(a)是从主结晶器上口到压力水膜结晶器下口连铸坯表面温度的计算值，图中的曲线在800 mm处有一个拐点，该拐点相对于主结晶器的出口处(850 mm)往上移了50 mm，这与压力水膜结晶器有少量冷却水向上窜进主结晶器，强化主结晶器下部的冷却是一致的。图4(b)是铸坯坯壳厚度的实测值与计算值的比较，从图中可以看出，计算值与实测值基本吻合。

### 4 工业应用

从1997年4月25日开始，压力水膜结晶器在首钢第二炼钢厂的5号铸机上正式推广应用，并以该技术为依托完成了高效化改造，140 mm小方坯铸机的平均拉速由2.0 m/min提高到2.7 m/min，最高拉速达3.2 m/min，铸机的平均漏钢率下降到0.18%，同应用前相比下降31%，创直接经济效益256万元/(a·台)。

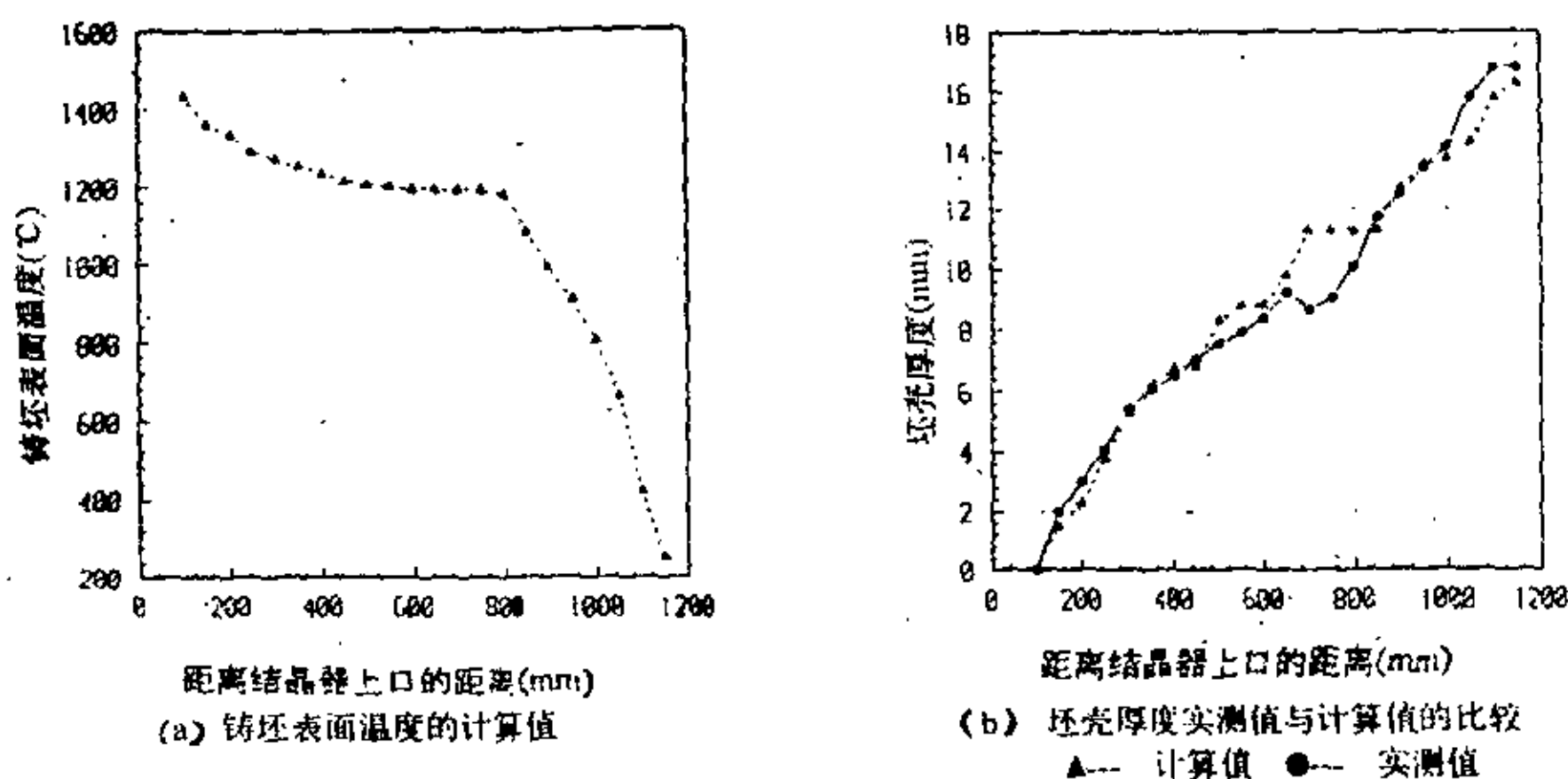


图4 压力水膜结晶器的数值模拟计算

### 5 结论

(1) 根据压力水膜冷却原理开发的压力水膜结晶器，对铸坯的强化冷却效果明显，能使坯壳增厚一倍左

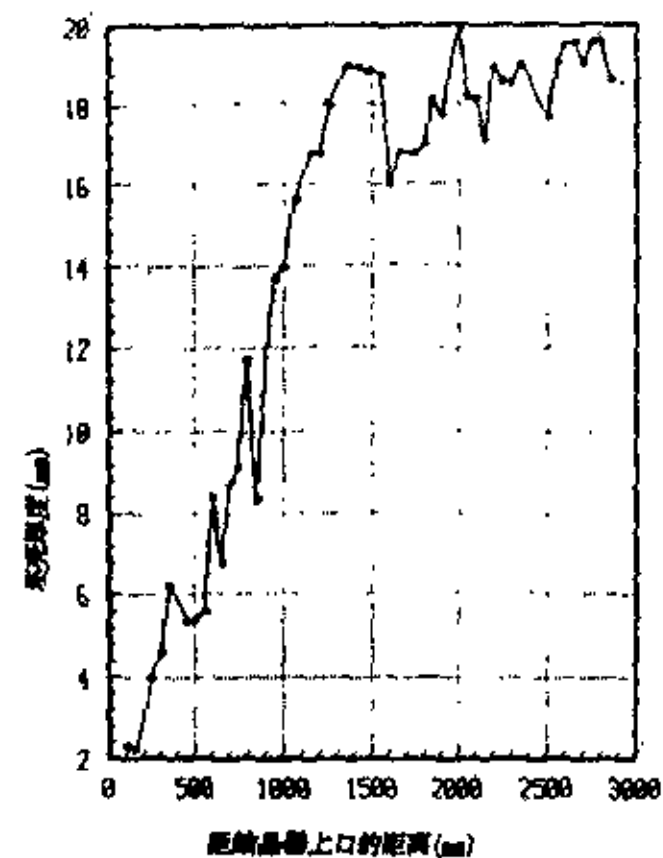


图2 从主结晶器上口到二冷直线段的坯壳厚度(拉速为3.2 m/min)

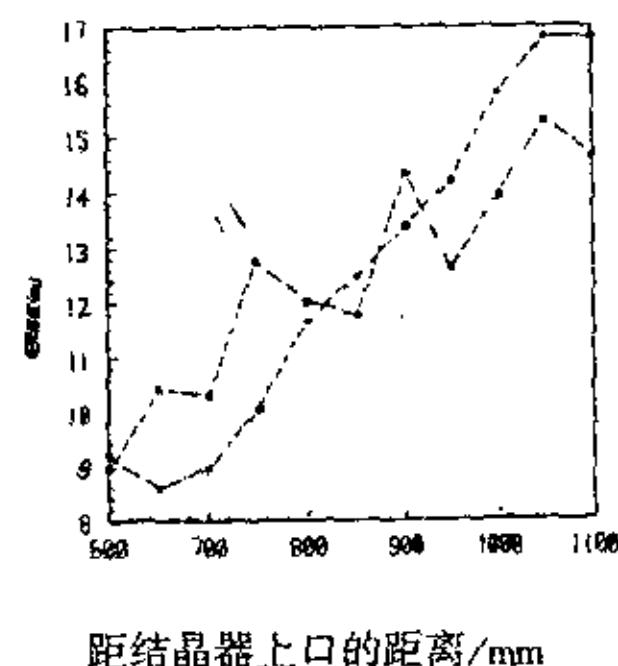


图3 两种情况下坯壳厚度的比较  
●—有水膜结晶器,拉速为3.2 m/min  
■—无水膜结晶器,拉速为3.2 m/min