

[文章编号] 1004- 0609(2000) 06- 0800- 04

半固态连铸过程的滞留层尺寸预测^①

邢书明¹, 曾大本¹, 胡汉起², 翟启杰², 马 静³, 李亚敏³

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 北京科技大学 铸造研究所, 北京 100083;

3. 河北科技大学 材料科学与工程系, 石家庄 050054)

[摘 要] 通过对凝固层的受力分析, 提出了滞留层初期尺寸的预测模型及定量计算方法, 并据此分析了各工艺因素的影响趋势。结果表明, 在通常范围内增加结晶器直径或减小其长度、提高凝固系数或提高结晶器内的纵向温度梯度、减小拉坯速度、降低制浆室高度、改善结晶器润滑, 都可以提高初期裂口的形成位置, 减小滞留层尺寸, 进而有利于提高半固态连铸过程的稳定性。验证实验表明, 这一预测模型的误差在 5% ~ 10% 范围内。

[关键词] 半固态金属; 连铸; 滞留层

[中图分类号] TG 292

[文献标识码] A

半固态连铸是制备半固态成形用坯的一种高效、优质、低耗新工艺, 但目前对其过程稳定性的认识不足, 失稳现象时常发生。半固态连铸过程失稳的主要形式是拉漏和拉断, 其主要机理是开拉时滞留层的形成及随后的发展, 导致流道堵塞造成拉断或裂口的焊合层过薄而拉漏^[1~3]。拉漏、拉断的本质都是裂口和滞留层形成及扩展的过程。滞留层的最初尺寸、裂口的焊合速度、滞留层的增厚及减薄速度是决定半固态连铸过程稳定性的主要因素, 其中, 滞留层的存在是半固态连铸过程失稳的根本原因, 因此, 滞留层的预测是半固态连铸过程稳定性理论研究的首要问题。作者通过理论分析, 建立了滞留层初期尺寸预测模型, 并通过实验进行了验证。

1 滞留层预测模型

半固态浆料中的固相实现枝晶化需要一定时间^[3, 4~8], 因此, 为保证坯料组织合格, 在浇注与开拉之间需要有一个时间差。在这一时间段内, 结晶器内会形成一个凝固壳, 拉坯开始时会在某处形成裂口, 裂口上方的凝固壳就会滞留在那里, 形成滞留层, 如图 1 所示。这个滞留层的长度和厚度对半固态连铸过程的稳定性产生重要影响, 滞留层越大, 半固态连铸过程越容易失稳^[1, 2]。

图 2 示出了开拉时结晶器内的凝固层形状及其强度和拉应力随高度变化的基本趋势^[2]。拉应力曲

线与强度曲线之间的交点就是初期裂口的形成位置, 这一点至凝固壳上沿的距离就是初期滞留层的长度。

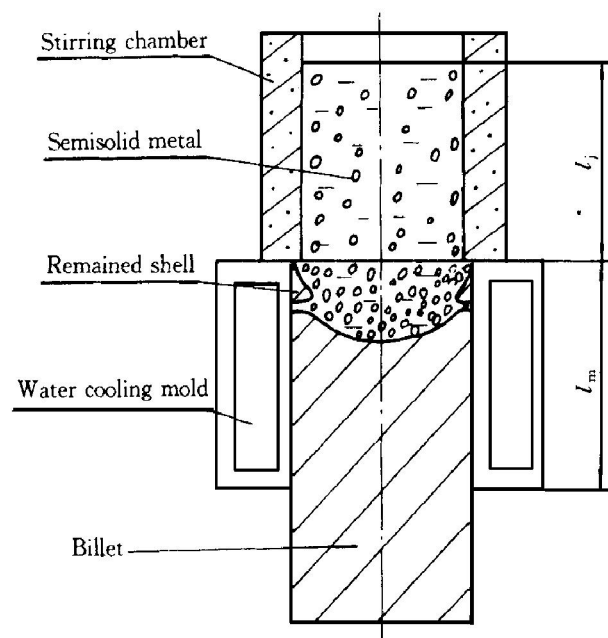


图 1 半固态连铸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semisolid continuous casting process

设 h 是距凝固壳上沿的距离, l_s 是结晶器内凝固壳的长度。由于进入结晶器的金属温度已经低于液相线温度, 且在结晶器的激冷作用下失去了流动性, 一般可以认为 l_s 等于结晶器长度 l_m 。 l_j 为制浆室内半固态浆料的高度, ρ_l 是半固态浆料的密度。

① [基金项目] 河北省自然科学基金资助项目(599281)

[收稿日期] 1999- 12- 08; [修订日期] 2000- 03- 27

[作者简介] 邢书明(1962-), 男, 教授, 博士后。

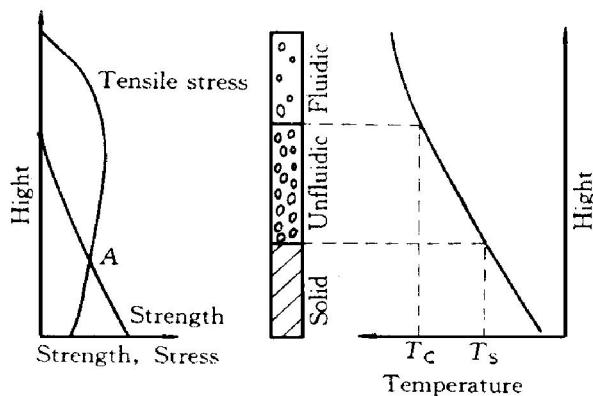


图2 初期凝固层的拉应力及强度随高度的变化

Fig. 2 Variations of strength and tensile stress in initial solidified shell with height

作用在结晶器内壁上的正压力 p 可以用抛物线方程来计算^[9]:

$$p = \rho_1 g h - \rho_1 g \frac{h^2}{l_s} + p_0 \quad (1)$$

式中 第1项表示高度为 h 的半固态浆料产生的静压力, 第2项表示因坯壳存在一定强度而对静压力产生的消减作用, p_0 为制浆室内半固态浆料产生的静压力,

$$p_0 = \rho_1 g l_j \quad (2)$$

设坯料与结晶器之间的摩擦系数为 f , 结晶器直径为 D_m , 则任一位置坯壳所受的摩擦力为

$$F_w = \int_0^h \pi D_m f p dh \quad (3)$$

将式(1)代入式(3), 并积分得

$$F_w = \pi D_m f \left[\frac{\rho_1 g (3l_s h^2 - 2h^3)}{6l_s} + p_0 h \right] \quad (4)$$

设 h 处坯壳的厚度为 δ , 其大小可以根据平方根定律表示:

$$\delta = K \sqrt{\frac{h}{v_p}} \quad (5)$$

式中 K 为凝固系数, v_p 为拉坯速度。于是, 坯壳的横截面积

$$A_p = \pi K \left[D_m \sqrt{\frac{h}{v_p}} - K \frac{h}{v_p} \right] \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可得坯壳内的拉应力

$$\sigma_w = \frac{f [\rho_1 g (3l_s h^2 - 2h^3) + 6l_s p_0 h]}{6l_s K \left[\sqrt{\frac{h}{v_p}} - \frac{Kh}{v_p D_m} \right]} \quad (7)$$

另一方面, 凝固壳强度也是温度的函数, 具体的函数关系随材料不同会有所差异; 但是, 在熔点附近, 多数材料都服从近似直线规律。由文献[10]提供的数据进行曲线拟合可得

$$\sigma_s = \frac{1}{34} (T_{cl} - T) \times 10^6 \quad (8)$$

式中 T_{cl} 为材料强度为零时的温度。

若结晶器内的纵向温度梯度为 G , 则任一点的温度可近似表示为

$$T = T_{cl} - Gh \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得到材料强度随位置变化的规律为

$$\sigma_s = \frac{1}{34} Gh \times 10^6 \quad (10)$$

当拉应力大于材料的强度时, 坯壳就会发生塑性变形直至断裂。因此, 令

$$\sigma_s = \sigma_w$$

由式(10)和式(7)可以得到最初裂口形成的位置为

$$h = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{\sqrt{2y-c}} - c - \sqrt{2y-c} \sqrt{\frac{2d}{\sqrt{y-c}}} - 2y-c \right) \quad (11)$$

式中

$$c = - \left[\frac{3}{2} + \frac{3K^2 G}{34f \rho_1 g v_p D_m} \times 10^6 \right] l_s \quad (12)$$

$$d = \frac{3l_s K G}{34f \rho_1 g \sqrt{v_p}} \times 10^6 \quad (13)$$

y 由如下表达式确定:

$$y = \begin{cases} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \frac{c}{6} & (\Delta > 0) \\ \frac{c}{6} & (\Delta = 0) \\ 2\sqrt[3]{r \cos \theta} + \frac{c}{6} & (\Delta < 0) \end{cases} \quad (14)$$

式中

$$p = - \left[e + \frac{c^2}{12} \right], \quad e = - \frac{3l_s p_0}{\rho_1 g},$$

$$q = \frac{1}{216} [72ce - 27d^2 - 2c^3], \quad r = \sqrt[3]{-\left(\frac{p}{3}\right)^3},$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos \left[-\frac{q}{2r} \right], \quad \Delta = \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3$$

由于最初形成的裂口上方的凝固壳不随坯料运动下移, 因此, h 为滞留层的最初长度。 h 值越大, 滞留层的最初长度也越大, 其厚度相应也越大, 因而半固态连铸过程出现拉断现象的倾向也越大。因此 h 可以作为半固态连铸过程稳定性的一个判断指标, 其计算过程可以用图3所示的流程图来说明, 计算用数据见表1。

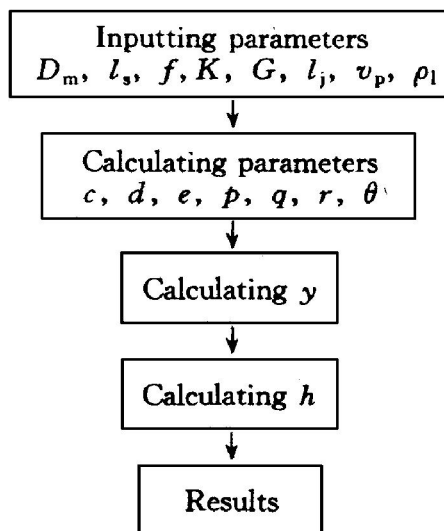


图 3 滞留层长度的计算流程

Fig. 3 Flow diagram of calculating length of remained shell

表 1 滞留层长度计算用数据

Table 1 Data used in determining dimension of remained shell

Parameter	Value	Parameter	Value
f	0.5	l_s/m	0.5
$G/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1})$	500	$K/(m\cdot s^{-\frac{1}{2}})$	0.0032
$\rho_l/(kg\cdot m^{-3})$	7600	p_0/Pa	44688
D_m/mm	0.082	$v_p/(m\cdot s^{-1})$	0.0083

2 讨论与验证

2.1 工艺因素对滞留层长度的影响

将有关数据(见表 1)代入滞留层预测模型,按照图 3 所示的方法计算可得各个因素的影响规律,如图 4 所示。

由图 4 可见,增加结晶器直径或减小其长度、提高凝固系数、减小拉坯速度、降低制浆室高度、改善结晶器润滑状况,都可以提高初期裂口的形成位置,减小滞留层尺寸,进而对提高半固态连铸过程的稳定性有利。这种影响趋势已被作者^[2]及 Blazer^[3]的试验结果所证实。

2.2 验证

这里得到的滞留层预测模型将工艺参数与滞留层尺寸定量地联系在一起,因而,可以对半固态连铸工艺方案事先进行定量评价,并通过合理选择工艺参数,尽量减小滞留层厚度,提高半固态连铸过程的稳定性。

滞留层尺寸的精确测量是比较困难的。为了验证这一计算方法的正确性,作者进行了专门实验。

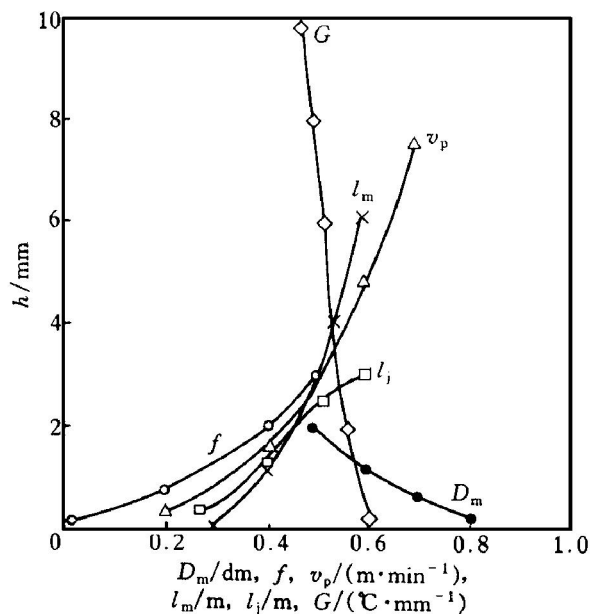


图 4 各因素对滞留层长度的影响

Fig. 4 Influence of various factors on length of remained shell

实验方法是在设定条件下进行浇注,开拉后 5s 即停止拉坯,冷却后取出残留在结晶器内的坯料,可以看到初期裂口被充填焊合的痕迹,这一位置距结晶器上口的距离即是初期滞留层长度。将实测结果与计算结果比较,发现两者基本吻合,平均误差在 5% ~ 10% 范围内。

但是,滞留层尺寸大小只是决定半固态连铸过程稳定性的因素之一,另外还需考虑连铸过程滞留层的发展和裂口的充填与焊合。

3 结论

1) 半固态连铸开拉时会形成一个滞留层。滞留层的尺寸越大,半固态连铸过程失稳的可能性越大。

2) 建立了定量计算滞留层长度的数学公式和计算方法。这种方法将工艺参数与滞留层尺寸定量地联系在一起,可以对半固态连铸工艺方案事先进行评价,预测其失稳的可能性。

3) 验证实验表明,滞留层的计算方法和公式可以用于实际生产和实验,其误差在 5% ~ 10% 范围内。

[REFERENCES]

- [1] XIANG Shu-ming(邢书明), HU Han-qi(胡汉起), LI Ya-min(李亚敏), et al. 半固态连铸过程拉漏(断)机理研究[J]. Special Casting & Nonferrous Alloy(特种铸造与有色合金), 2000(1): 16-19.

- [2] XING Shu-ming(邢书明). 难变形钢铁材料半固态连铸技术研究 [D]. Beijing: University of Science & Technology Beijing, 1996. 51– 74.
- [3] Blazek K E, Kelly J E and Pottore S. The development of a continuous rheocaster for ferrous and high melting point alloys [J]. ISIJ International, 1995, 35(6): 813 – 818.
- [4] XING Shu-ming(邢书明), LI Ya-min(李亚敏), HU Han-qi(胡汉起), et al. 半固态亚共晶铝硅合金非枝晶固相的形成与演变 [J]. The Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1999, 9(1): 270– 274.
- [5] WEI Peng-yi(魏朋义), FU Heng-zhi(傅恒志) and Reif W, et al. 熔体搅拌 Al-12.0% Si 合金的组织细化 [J]. The Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(1): 98– 102.
- [6] ZHU Ming-yuan(朱明原), SHI Wei(史文), YANG Sen-long(杨森龙), et al. 电磁搅拌作用对铝合金显微组织的影响 [J]. The Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1999, 9(Suppl. 1): 29– 33.
- [7] ZHANG Kui(张奎), LIU Guo-jun(刘国钧), XU Jun(徐俊), et al. 电磁搅拌法连铸半固态铝合金及其凝固组织分析 [J]. The Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1999, 9(Suppl. 1): 47– 50.
- [8] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metall Trans, 1991, 22B: 269– 293.
- [9] CAI Kai-ke(蔡开科). Continuous Casting Steel(连续铸钢) [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1990. 105.
- [10] 波卢欣. (LIN Zhi-ping(林治平) tr). The Resistant Force to Deformation of Metal and Alloy(合金的塑性变形抗力) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1984. 55.
- [11] HU Han-qi(胡汉起). Solidification Theory of Metals(金属凝固原理) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1991. 85.

Prediction of remained shell dimension of semisolid continuous casting process

XING Shu-ming¹, ZENG Da-ben¹, HU Han-qi², ZHAI Qi-jie², MA Jing³, LI Ya-min³

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China;

2. Foundry Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China;

3. Department of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050054, P. R. China)

[Abstract] Through mechanical analysis, the mathematics model to predict the dimension of the remained shell of semisolid continuous casting process is promoted and the influence of various process factors is discussed. The calculated results show that such methods as increasing the diameter or decreasing the length of the copper mold, increasing the solidifying coefficient and the longitudinal temperature gradient in mold, decreasing withdrawal rate, decreasing the length of stirring chamber, or modifying the lubricating condition between copper mold and casting are beneficial to decreasing the dimension of the remained shell so as to modifying the stability of the process. The comparison between the calculated and the experimental results shows that the error of prediction is 5% ~ 10%.

[Key words] semisolid metals; continuous casting; remained shell

(编辑 杨兵)