

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0163- 04

半固态连铸工艺参数设计^①

邢书明¹, 曾大本¹, 胡汉起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 材料系, 石家庄 050054)

[摘 要] 提出了半固态连铸的主要工艺参数设计原则: 浇注温度为浇入制浆室后的熔体温度恰好等于液相线的温度; 制浆室预热温度保证熔体浇入后, 其界面温度不小于停止流动的临界温度, 不大于熔体的初始温度; 开拉时间在保证开拉时引锭不滑脱的前提下越短越好; 拉坯速度既保证金属熔体通过制浆室的时间不小于非枝晶球状组织的形成时间, 又要保证熔体在通过结晶器的时间内能够形成不小于安全厚度的凝固层。

[关键词] 半固态金属; 连铸; 工艺参数

[中图分类号] TG 249. 1; TF 771. 1

[文献标识码] A

半固态连铸是根据材料流变学原理制备半固态加工用坯料的新技术, 有时人们也叫它连续流变铸造^[1], 其本质特征为进入结晶器的金属为固液共存的混合物, 而且其中的固相具有非枝晶特征^[2]。这些特征赋予了半固态连铸许多技术优势^[1~4]: 如坯料质量高, 成型性好, 具有普通连铸的各种优点。但是, 它也有一些缺点, 如工艺控制困难、拉漏拉断倾向较大及生产效率较低等。由于没有工艺设计准则可依, 目前的半固态连铸工艺方案只能靠反复的试验摸索来确定, 无法优化工艺, 有时甚至出现一些令人失望的结果。所以, 建立半固态连铸工艺参数的设计原则和相应的计算公式是一个紧迫的任务。本文对此进行了初步的尝试。

1 工艺设计的目标与任务

半固态连铸工艺设计的基本目标有 2 个, 一是保证过程连续稳定, 不发生拉漏或拉断事故; 另一个是坯料质量合格, 组织为非枝晶粒状组织。要实现上述目标, 就必须对半固态连铸过程的工艺参数进行精心设计和控制。

对半固态连铸过程产生明显影响的工艺参数可以归纳为 4 类: 浇注工艺、搅拌工艺、拉坯工艺及冷却工艺。浇注工艺参数主要包括浇注温度、浇注速度、制浆室预热温度; 搅拌工艺参数包括搅拌方式、搅拌速度及搅拌时间; 拉坯工艺参数包括拉坯

速度和开拉时间; 冷却工艺参数包括冷却水压力、流量和温度。这些工艺参数中, 有的(如结晶器的冷却制度)可以参照普通连铸进行设计, 这里不再重复, 而多数工艺参数需要结合半固态连铸的特点重新探讨其设计原则和计算公式。这样众多的工艺参数中, 有些是独立参量, 可以独立设计和控制, 如浇注温度、制浆室预热温度、搅拌方式和搅拌速度、开拉时间等, 而有些则是非独立参量, 如浇注速度和搅拌时间都与拉坯速度有关。这里只限于讨论独立参量的设计原则和计算公式。

2 半固态连铸的工艺参数设计

2.1 浇注温度的设计

浇注温度是半固态连铸过程最重要的工艺参数之一。它既影响半固态连铸过程稳定性, 也影响所得坯料的内部组织和性能。浇温过高容易导致拉漏^[2, 4, 5], 加大耐火材料消耗, 且易引起浇注控制系统失控^[6]。此外, 浇温过高, 会使坯料中的非枝晶粒状组织减少。非枝晶粒状晶少到一定程度, 其成形性能就会与普通铸坯没有两样^[1, 7]。由此似乎可以得出结论, 浇温越低越好。但是浇温过低, 又有可能使半固态浆料在到达结晶器之前已失去流动性, 无法实现连铸。所以, 浇注温度的设计原则是在保证浇注的条件下越低越好, 其下限是保证金属熔体浇入制浆室后的温度恰好等于液相线温度。如

① [基金项目] 河北省自然科学基金资助项目(599281)

[收稿日期] 2000- 09- 11; [修订日期] 2001- 01- 02

[作者简介] 邢书明(1962-), 男, 教授, 博士。

果浇入制浆室的金属温度低于液相线温度,在制浆室壁面上就会形成完整的凝固壳。这种凝固壳的形成不仅显著地阻碍晶体的剥落游离,而且明显增大拉断的机率。相反,如果浇入制浆室内金属熔体的初始温度 θ_0 高于其液相线温度 θ_l ,就必须将不必要的过热量传出,使生产率降低。

设合金的液相线温度为 θ_l ,浇注过程的温度降为 $\Delta\theta_p$,则理想的浇注温度应满足下式:

$$\theta_p = \theta_l + \Delta\theta_p \quad (1)$$

2.2 制浆室预热温度的设计

对工作过程无外热源加热的情况而言,制浆室预热是半固态连铸过程必需的一道工序。制浆室预热的主要作用是防止浇注初期在制浆室内壁上形成完整的凝固壳或不可流动的半固态层或凝固层^[2]。制浆室内壁上一旦形成不可流动的半固态层或凝固壳,则壁面晶体的游离会急剧减少,甚至中止^[1,8]。此外,开拉前制浆室内形成完整的凝固壳会使拉坯阻力急剧增大,使连铸过程稳定性降低,易发生拉断^[2,4,5]。因此,制浆室预热温度的设计原则是保证金属熔体浇入后,其界面温度 θ_i 不小于停止流动的临界温度 θ_c ,即

$$\theta_i \geq \theta_c$$

设制浆室及金属熔体的蓄热系数分别为 b_2 和 b_1 ,制浆室的预热温度为 θ_{mo} ,则界面温度 θ_i 可由下式计算:

$$\theta_i = \frac{b_1 \theta_0 + b_2 \theta_{mo}}{b_1 + b_2}$$

所以制浆室的预热温度应满足下式:

$$\theta_{mo} \geq \frac{\theta_c (b_1 + b_2) - b_1 (\theta_p - \Delta\theta_p)}{b_2}$$

上式给出了制浆室预热温度的下限。但预热温度并不是越高越好,其上限是熔体的初始温度,即 $\theta_{mo} < \theta_0$ 。如果预热温度超过金属熔体的初始温度 θ_0 ,则失去了半固态连铸的基本特征。

综合起来,制浆室预热温度的设计公式为

$$\theta_0 \geq \theta_{mo} \geq \frac{\theta_c (b_1 + b_2) - b_1 (\theta_p - \Delta\theta_p)}{b_2} \quad (2)$$

2.3 制浆室冷却水设计

制浆室的冷却水对半固态连铸过程及坯料质量的影响是举足轻重的^[2,5,9]。制浆室冷却水设计的目的在于使制浆室内的金属熔体具有一个合适的冷却速度和温度分布,其理想的设计应当使进入结晶器的半固态浆料温度恰好等于停止流动的临界温

度。

在半固态连铸过程中,单位时间冷却水带走的热量 Q_j 与通过制浆室顶面放出的热量 Q_d 之和应当等于单位时间内金属熔体放出的热量 Q_1 ,即

$$Q_j = Q_1 - Q_d$$

据此,可以推导出制浆室冷却水流量的设计公式(单位 l/s):

$$V_j = \frac{4.9}{\Delta t_j} \left\{ [(\theta_0 - \theta_c) C + g(1 - f_{sc})] - \frac{\pi D_j^2}{4} \varepsilon \left[\left(\frac{\theta_0 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_0' + 273}{100} \right)^4 \right] \right\}$$

式中 $\Delta\theta_j$ 进出水温差, D_j 为制浆室的直径, ε 为黑度系数, θ_0' 为环境温度。系数 4.9 是考虑角度系数为 0.85 时黑体的辐射系数($W/m^2 \cdot K^4$)。 f_{sc} 为熔体停止流动的固相分数, C 为熔体的比热, θ_c 为熔体停止流动的临界温度, θ_0 为熔体的初始温度, g 为重力加速度。

一般来说,通过顶面的散热量约为冷却水带走热量的 10% 左右,而且进出水温差一般不大于 30 ~ 35 $^{\circ}C$,因此,作为粗略计算,也可将上式简化为

$$V_j = 3.0 \times 10^{-2} G [C(\theta_p - \Delta\theta_p - \theta_c) + g(1 - f_{sc})] \quad (3)$$

2.4 开拉时间的设计

半固态连铸过程的稳定性研究表明^[2,4,10],缩短开拉时间可以防止拉漏或拉断。但开拉过早,会由于引锭上方的凝固壳过薄而出现引锭滑脱现象,使连铸失败。因此,开拉时间设计应在保证开拉时引锭不滑脱的前提下越短越好。

设凝固系数为 K ,开拉时间为 t_i ,则开拉时引锭上方的凝固层厚度 δ 可按平方根定律估算:

$$\delta = K \sqrt{t_i}$$

相应地,开拉时结晶器内凝固壳的厚度也为 δ ,其横截面积为

$$A_0 = \frac{1}{4} \pi [D_p^2 - (D_p - 2\delta)^2] = \pi (D_p \delta - \delta^2)$$

式中 D_p 为坯料的直径。

开拉时的拉坯阻力 F 主要取决于凝固层与结晶器间的摩擦阻力。根据文献[2]可知,其间的摩擦力为:

$$F = \frac{1}{6} \pi D_p f \rho g (l_m - h_d)^2$$

式中 f 是摩擦系数, ρ 是熔体的密度, l_m 是结晶器长度, h_d 是引锭插入结晶器的长度。

这一摩擦力在凝固壳内产生的拉应力

$$\sigma' = \frac{F}{A_0} = \frac{D_p f \rho_g (l_m - h_d)^2}{6(D_p \delta - \delta^2)}$$

设坯料的强度为 σ_b 。为保证拉坯时不滑脱, 则要求

$$\sigma' \leq \sigma_b$$

解不等式并将 δ 的表达式代入加以整理, 可得开拉时间的设计公式:

$$t_i \geq \frac{1}{K^2} \left[\frac{D_p}{2} - \frac{1}{6} \sqrt{9D_p^2 - \frac{6f\rho_g D_p (l_m - h_d)^2}{\sigma_b}} \right]^2 \quad (4)$$

2.5 拉坯速度的设计

拉坯速度指结晶器中的铸坯在拉坯力作用下单位时间移动的距离, 它是描述生产能力的重要标志。半固态连铸速度设计的原则有 2 个, 一是保证离开结晶器的坯料凝固壳厚度大于安全厚度, 二是保证熔体通过制浆室的时间大于非枝晶组织形成时间。如果违背第一原则, 会出现拉漏^[2, 4, 5]。如果违背第二原则, 坯料的组织不合格。

根据第一原则, 可以推导出 不拉漏的最大拉速:

$$v_p \leq \frac{l_m}{\delta_{\min}^2} K^2$$

根据第二原则, 可以推导出满足半固态连铸坯组织要求所允许的最大拉速

$$v_p = \frac{l_i}{t_c} \left[\frac{D_i}{D_m} \right]^2$$

式中 l_i 制浆室有效长度, D_i 为制浆室直径, t_c 非枝晶球状组织的形成时间, D_m 结晶器直径, v_p 为拉速, $\delta_{\min}$ 安全厚度, K 是凝固系数。

综合上述结果, 拉坯速度的设计公式为

$$v_p = \min \left[\frac{l_m}{\delta_{\min}} K^2, \frac{l_i}{t_c} \left[\frac{D_i}{D_m} \right]^2 \right]$$

可以看出, 要想提高拉速, 必须设法缩短非枝晶组织形成时间 t_c , 延长制浆室及结晶器的长度, 提高结晶器的冷却强度, 加大制浆室与结晶器的直径比。

3 验证与讨论

在上述设计公式中, 有几个参数的计算是比较困难的。例如非枝晶组织形成时间 t_c 、材料的安全厚度 $\delta_{\min}$ 、停止流动的临界温度 θ_c (对应的临界固相分数 f_{sc})、熔点附近材料的强度 σ_b 以及浇注过程的温度降 $\Delta\theta_p$ 等都随具体条件而变化。但是根据

目前积累的数据^[11~13], 在具体计算时可以按表 1 给出的范围选取。

表 1 有关参数的取值范围及选取原则
Table 1 Selection of some parameters

Parameter	General range	Selecting principle
t_c/min	0.5~ 1.5	The larger with decrease of stirring strength or to alloy with strong dendrites tendency
$\delta_{\min}/\text{mm}$	10~ 15	The smaller to alloy with high strength or with mold lubricated well
σ_b/MPa	8~ 15	The larger to alloy with high strength at high temperature
f_{sc}	0.4~ 0.65	The larger with stirring strength
$\Delta\theta_p/^\circ\text{C}$	20~ 50	Smaller when pouring rate is high or a plunger ladle is used to pour

为了验证上述设计原则与公式的有效性, 利用上述工艺设计式 (1) ~ (5), 以 Fe-Cr-C 系白口铁、ZGMn13 高锰钢及 A356 铝合金进行了半固态连铸工艺设计, 并根据设计结果进行半固态连铸工业试验。结果表明, 符合设计要求的工艺方案其连铸过程顺利, 而且所得坯料组织合格。这说明, 上述工艺设计原则和计算公式可以用来指导生产和试验。

4 结论

- 半固态连铸的主要工艺参数设计原则为:
- 1) 浇注温度以浇入制浆室后的温度恰好等于液相线温度为宜;
 - 2) 制浆室预热温度保证金属熔体浇入后, 其界面温度 θ_i 不小于停止流动的临界温度 θ_c , 不大于熔体的初始温度;
 - 3) 开拉时间在保证开拉时引锭不滑脱的前提下越短越好;
 - 4) 拉坯速度既保证金属熔体通过制浆室的时间不小于非枝晶球状组织的形成时间 t_c , 又要保证熔体在通过结晶器的时间内能够形成不小于安全厚度的凝固层。

[REFERENCES]

[1] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metal Trans, 1991, 22B(3): 269.

[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. 60.

[3] Blazek K. The development of a continuous rheocaster for

- ferrous and high melting point alloys [J]. ISIJ International, 1995, 35(6): 813–818.
- [4] Blazek K. The improvement of surface quality of continuous rheocast bar of steel and high melting point alloys [J]. ISIJ International, 1997, 37(4): 365–374.
- [5] XING Shu-ming(邢书明), LI Ya-min(李亚敏), HU Han-qi(胡汉起), et al. 半固态连铸过程拉漏(断)机理研究[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金), 2000, (1): 16–19.
- [6] CAI Kai-ke(蔡开科). Continuous Casting Steel(连续铸钢) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990. 105.
- [7] Prasad P R, Ray S, Gaidher J L, et al. Relation between processing, microstructure and mechanical properties of rheocast Al-Cu alloys [J]. J Mater Sci, 1988, 23: 823–829.
- [8] XING Shu-ming(邢书明), LI Ya-min(李亚敏), HU Han-qi(胡汉起), et al. 半固态铝硅合金非枝晶固相的形成与演变[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1999, 9(Suppl. 1): 270–274.
- [9] Taha M A, Mahallawy-N A EL. Control of the continuous rheocasting process. Part I, Heat flow model [J]. J Mater Sci, 1998, 23: 1379–1384.
- [10] XING Shu-ming(邢书明), ZENG Da-ben(曾大本), HU Han-qi(胡汉起), et al. 半固态连铸过程的滞留层尺寸预测[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 2000, 10(4): 800–803.
- [11] Kapranos P. Semi-solid metal processing an environmentally friendly process [J]. Materials World, 1994, 8: 465–467.
- [12] Taha M A. Control of the continuous rheocasting process. Part 2: Rheological behavior analysis [J]. J Mater Sci, 1998, 23: 1385–1390.
- [13] Molenaar J M M. Analysis of process limits for continuous thixotropic slurry casting [J]. Journal of Material Science, 1985, 20: 700–709.

Process parameter design of semisolid continuous casting

XING Shu-ming¹, ZENG Da-ben¹, HU Han-qi², 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] The obtained design principles of the major process parameters of the semisolid continuous process are: 1) the pouring temperature must make the temperature of the poured melt equal to the liquidus temperature; 2) the preheating temperature of the stirring chamber must make the melt temperature in the inner surface of the stirring chamber in the range from the critical temperature for stopping flow to the liquidus temperature of the alloy; 3) the beginning time for the withdrawal should be determined as short as possible in the condition of the withdrawal slipping free, and 4) the withdrawal rate is designed to provide a time long enough not only for the nondendritic structure forming, but also for the safety thickness forming.

[Key words] semisolid metals; continuous casting; process parameter

(编辑 黄劲松)