

铸拉工艺极限速度的计算^①

许光明 崔建忠 那兴杰

(东北大学金属压力加工系, 沈阳 110006)

摘 要 用结晶器壁内表面光洁度的假设, 提出了处理结晶器、铸件有间隙接触问题的方法, 避免了测定铸件表面温度或结晶器热流密度这一难题, 建立了铸拉时的温度场, 得到了铸件的温度分布、液穴形状及结晶器与铸件间间隙值与工艺参数的关系。同时, 提出了一种新的摩擦计算模型, 并求得了摩擦应力与间隙值、表面光洁度和铸件表面剪切强度之间的关系。然后根据限制铸拉速度的主要缺陷, 即凝固壳断裂和冷隔, 通过计算铸件截面承受的摩擦力、热应力和液穴形状, 得到了铸拉工艺的极限速度, 计算值与实测值吻合。

关键词 平均粗糙度 间隙 液穴 剪切变形 热应力

中图法分类号 TG290

在铸拉过程中有许多因素, 如铝液的浇铸温度、钢丝的预热温度及冷却强度等, 都会影响铸拉的速度。一般说来, 铝液的温度越高, 铸拉速度越慢; 铝液温度越低, 铸拉速度越快。同时, 铸拉速度也受钢丝的预热温度和其它条件的影响。如果铝液温度、钢丝的预热温度和铸拉速度等参数之间配合不当, 会出现冷隔、表面裂纹等, 甚至产生凝固壳拉断现象, 使铸拉工艺不能正常进行。因此, 必须对工艺条件进行计算, 确定铸拉工艺正常进行的极限条件, 以指导生产实践。

1 铸拉工艺极限速度的计算

铸拉工艺主要分表面处理、钢丝的预热、铸拉和后处理四个环节。其中, 铸拉是关键, 它决定着产品的质量, 包括三个部分: 保温、凝固和变形, 铸拉复合过程示意图如图1所示。

从实验和有关连续铸造的理论可以知道, 影响限制铸拉速度的主要因素为冷隔、表面裂纹和凝固壳拉断等, 但这些因素的产生都与铸

件在结晶器中的温度场和摩擦条件有关。因此, 必须首先计算铸件的温度场和摩擦情况。

为了简化计算过程, 作如下假设: (1) 假设铝液的浇铸温度、钢丝的预热温度、结晶器的冷却条件和铝液的高度不变; (2) 假设结晶

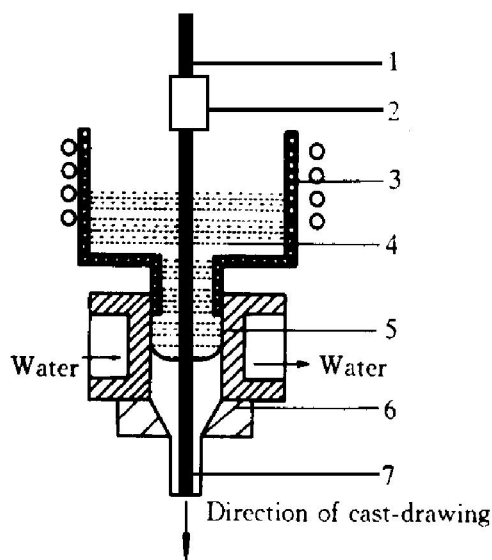


图1 铸拉工艺示意图

Fig. 1 A schematic showing cast-drawing

1—Steel wire; 2—Coil;

3—Heater; 4—Molten aluminum;

5—Crystallizer; 6—Drawing mould; 7—Coated wire

① 收稿日期: 1997-07-24; 修回日期: 1997-09-10 许光明, 男, 31岁, 讲师, 博士

器内表面的凹凸分布均匀,且都为等腰三角形;(3)铸件的热收缩优先形成间隙;(4)金属及间隙层的物性只与温度有关;(5)忽略结晶器壁与铸件间的滑动摩擦。

1.1 铸拉复合时温度场的计算

由于温度场的计算比较复杂,影响因素较多,如铸拉速度、铝液浇铸温度、钢丝预热温度、铝液高度、冷却水的温度和速度等。同时,边界条件较难测定,如液穴深度、铸件表面度及间隙尺寸等,不易通过已知表面温度或热流密度求温度场的方法来计算。因此,在计算温度场时,采用有限差分 and 格子运动法,即每过时间间隔 Δt 后,所有的格子向下运动 Δy ,在满足边界条件下,经过多次迭代计算,使温度场趋于稳定,所得的稳定温度场即为本问题的近似解^[1]。计算时对主要边界条件作如下处理。

1.1.1 钢丝-铝层边界

对于该边界,由于这两种材料的导热系数不同,因此在该边界上,需用等效导热系数代替,即

$$\lambda = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2) \quad (1)$$

式中 λ_1 和 λ_2 分别为钢与铝的导热系数。

1.1.2 铸件与结晶器之间的边界

由文献[2]可知,在此边界上,由于铝的凝固而产生间隙,但并非整个单元的表面都不

与结晶器壁接触,而是有一部分表面与结晶器壁接触,有一部分与结晶器壁脱离,如图2所示。同时,在边界的两边节点温差较大,必须考虑其热辐射的作用。因此,对有间隙边界的网格的传热计算可分解为两部分,即有间隙部分 L_1 的热辐射和接触部分 L_2 的热传导传热,其所占比例分别为

$$\begin{aligned} L_1\% &= 50\% - \delta/(2\bar{h}) \\ L_2\% &= 50\% + \delta/(2\bar{h}) \end{aligned} \quad (2)$$

1.1.3 潜热的处理^[3]

对于凝固潜热,本文采用温度回升法处理。假定单位体积、单位时间内固相率的增加率为 $\frac{\partial g_s}{\partial \tau}$,则因凝固而产生的潜热量为

$$q_s = \rho \cdot L \cdot \frac{\partial g_s}{\partial \tau} \cdot \Delta \tau \cdot \Delta V \quad (3)$$

考虑了这个发热量以后,温度将回升 ΔT , ΔT 与 Δg_s 的关系为

$$\Delta T = \frac{\Delta g_s \cdot L}{c_p} \quad (4)$$

1.2 铸件与结晶器壁之间间隙值的计算^[2, 4]

我们知道,影响间隙长大的因素很多,为了简化计算过程,作以下两点假设:(1)凝壳的冷却和收缩优先形成间隙;(2)铸件的收缩过程是从其表面温度到达凝固结束温度,即铝的凝固点开始的。

间隙值的变化过程是一复杂的现象,在最

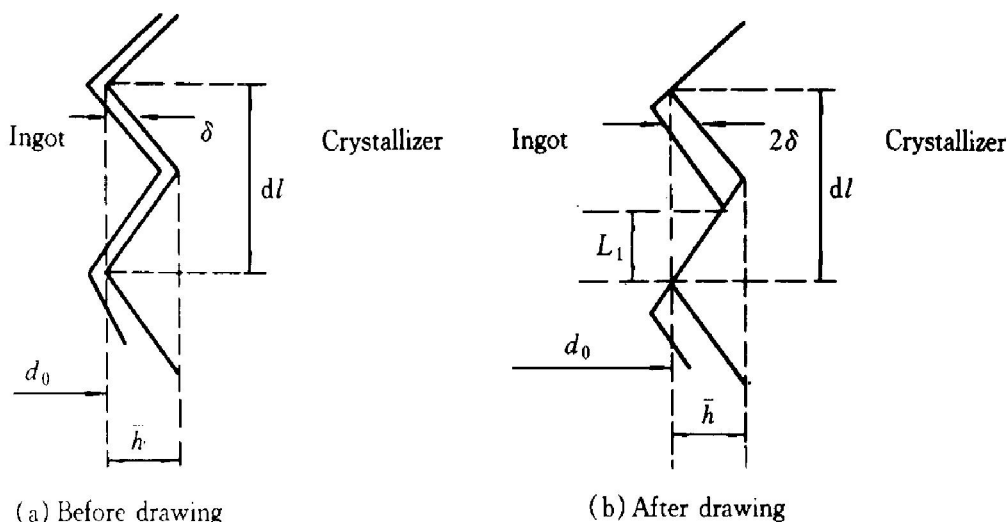


图2 结晶器与铸锭边界示意图

Fig. 2 A schematic showing contact condition between ingot and crystallizer

初的周边层的自由收缩条件下, 铸件尺寸的变化与其表面温度的变化成比例。但是, 凝壳内层与周边层相比, 冷却得更慢些, 这样, 就中断了周边层的自由收缩。结果, 在这些条件下, 铸件尺寸的变化与凝壳表面温度的降低不成比例, 而与凝壳的平均体积温度的降低成比例, 即 $\delta = 0.5 \phi (d_0 - d)$, 式中 ϕ 为修正系数, d_0 为结晶器内径, d 为铸件的直径。

在实际条件下, 除热收缩外, 在液体金属的静压力作用下, 凝壳中产生的热应力和与凝壳温度场不均匀性有关的热应力, 都会对凝壳变形有一定影响, 阻止凝壳周边层的自由收缩, 使 ϕ 值从 1.0 降低到 0.2^[2], 因此

$$\begin{aligned} \delta &= 0.5 \times 0.2 (d_0 - d) \\ &= 0.2 d r \sum_{j=1}^n \Delta T \alpha_T \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ΔT 为网格的温降, α_T 为温度 T 下的线收缩系数。

1.3 摩擦力的计算

由文献[5]知, 摩擦是滑动摩擦和粘着摩擦共同作用的结果。但根据本实验的实际情况, 真正的粘着摩擦是不可能存在的, 而有可能存在使铸件表面产生剪切变形的所谓粘着摩擦。在铝层刚刚凝固时, 铸件与结晶器壁之间的间隙值较小, 接触较为紧密, 它们之间的摩擦属于所谓的粘着摩擦。随着铸件的向下运动和温度的降低, 结晶器壁与铸件的间隙不断增加, 摩擦情况由所谓的粘着摩擦过渡到滑动摩擦, 摩擦应力不断减小。由于凝固壳的断裂发生在所谓的粘着区, 同时铸件与结晶器间的滑动摩擦很小, 因此忽略滑动摩擦。

如图2所示, 设铸件的直径为 d_0 , 结晶器内表面的平均粗糙度为 $\bar{h}$, 两表面的间隙值为 δ ($\delta < \bar{h}$), 两凸峰之间的间距为 dl , 两凸峰之间啮合的铸件的剪切强度为 τ_s , 则对于相互啮合的每一个凹谷, 发生剪切流动时, 铸件表面与结晶器表面产生犁削现象, 由几何知识可知, 发生剪切变形的截面积为

$$A_R = \pi d_0 \frac{\bar{h} - \delta}{h} dl \quad (6)$$

因此, 使啮合部分发生剪切变形所需力为

$$dF = A_R \tau_s = \pi d_0 \left(1 - \frac{\delta}{h}\right) dl \tau_s \quad (7)$$

摩擦应力为

$$\tau_f = \left(1 - \frac{\delta}{h}\right) \tau_s \quad (8)$$

1.4 极限铸拉速度的计算

由金属学知识可知, 造成裂纹的主要原因是铸件表面层金属所受的拉应力过大^[6], 而造成冷隔的主要原因是铸拉速度过慢, 使弯月面与绝热垫相互作用的结果^[7, 8]。因此, 要实现铸拉工艺, 就必须使铸拉速度满足以上几个基本条件。

1.4.1 由发生凝固壳破裂所限制的铸拉速度

由文献[6]知, 在分析钢锭的应力变形状态和凝固壳破裂时, 目前缺乏确定凝固壳破裂条件的统一办法, 常用的办法是计算摩擦力和凝固壳的强度。计算时, 不考虑结晶器出口处金属开裂, 或者直接在结晶器底部的凝固壳的薄弱部位和缺陷部位处金属开裂, 以及凝固壳周边层极不均匀的实际因素和凝固壳的减薄对产生凝固壳开裂的影响。

为了求得在离弯月面 L 处截面所承受的摩擦力总和, 必须对摩擦从弯月面到该截面进行积分, 得

$$\begin{aligned} F - \int_0^L dF &= \pi d_0 \int_0^L \left(1 - \frac{\delta}{h}\right) \tau_s dl \\ &= \pi d_0 dl \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{\delta(i)}{h}\right) \tau_s(i) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\delta(i)$ 为从凝固开始算起的第 i 个网格的间隙值, $\tau_s(i)$ 为从凝固开始算起的第 i 个网格的剪切强度, $\tau_s(i) = \sigma_s(i) / \sqrt{3}$ (其中 $\sigma_s(i)$ 为铸件的屈服强度, 其大小与温度的关系见文献[7])。

离液穴顶端的距离 L 处截面凝固壳所能承受的最大力为

$$F' = \pi dr \sum_{j=1}^n d(j) \cdot \sigma_s(j) \quad (10)$$

式中 n 为发生凝固壳破坏截面已凝固的网格总数, $\sigma_s(j)$ 为截面上各网格的屈服极限, $d(j)$ 为第 j 网格处的直径, dr 半径方向的长度步长。离弯月面距离为 L 处, 满足凝固壳不

破坏的条件为 $F \leq F'$, 即

$$\sum_{j=1}^n d(j) \sigma_s(j) \geq d_0 \frac{dl}{dr} \sum_{i=1}^m (1 - \frac{\delta(i)}{h}) \tau_s(i) \quad (11)$$

1.4.2 由产生表面裂纹所限制的极限速度

拉应力的产生主要是由于摩擦和热应力的缘故, 关于由摩擦引起的部分已经在上部分中求得, 下面计算由温度不均匀引起的热应力。

(1) 热应力的计算

对于同一截面上的两个相邻网格, 设它们与上一截面的网格相比, 温度降分别为 ΔT_1 和 ΔT_2 。假设在上一时刻单元无应变, 由于不同的温度降而产生了不同的热收缩, 但由于这两个微网格是在一个整体中, 必须满足连续性条件, 因而就强加了不同的机械应变 ε_1 和 ε_2 , 使其保证连续性, 即

$$\bar{\alpha}_T \Delta T_1 + \varepsilon_1 = \bar{\alpha}_T \Delta T_2 + \varepsilon_2 \quad (12)$$

假设忽略铸件的塑性变形和蠕性变形, 即只考虑弹性变形, 则 $\varepsilon_i = \varepsilon_e \sigma_m / E_m$, 代入上式得

$$\bar{\alpha}_T \Delta T_1 + \sigma_{m1} / E_{m1} = \bar{\alpha}_T \Delta T_2 + \sigma_{m2} / E_{m2} \quad (13)$$

由于网格步长 Δr 较小, $T_1 \approx T_2$, 因此

$$\left. \begin{aligned} E_m &= E_{m1} \approx E_{m2} \\ \sigma_{\text{热}} &= \sigma_{m2} - \sigma_{m1} \\ &= E_m \bar{\alpha}_T (\Delta T_1 - \Delta T_2) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 E_m 为高温下的弹性模量, $\bar{\alpha}_T$ 为高温下的线收缩系数。

(2) 产生表面裂纹的条件

根据摩擦力的计算, 我们可以求出当间隙值为 δ , 铸件的剪切强度为 τ_s 时, 单位表面所承受的摩擦应力为 $\sigma_f = (1 - \delta/\bar{h}) \tau_s$, 而 $\tau_s = \sigma_s/\sqrt{3}$, 因此 $\sigma_f = (1 - \delta/\bar{h}) \sigma_s/\sqrt{3}$ 。

由于摩擦应力和热应力的作用, 铸件表面金属所受的拉应力为 $\sigma = \sigma_{\text{热}} + \sigma_f$ 。

由金属学知识, 在表面产生裂纹的极限条件应该是 $\sigma \geq \sigma_s$, 即在铸拉过程中不产生表面裂纹的边界条件应为

$$\bar{\alpha}_T E_m (\Delta T_1 - \Delta T_2) + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} (1 - \frac{\delta}{\bar{h}}) \leq \sigma_s \quad (15)$$

1.4.3 不产生冷隔的速度极限条件

冷隔的形成是一种复杂的瞬时热传导现象, 它与凝固壳生长的稳态凝固过程相叠合。冷隔凝固可分为两个单独的阶段, 即熔体与结晶器一接触就立刻凝固和出现空腔, 产生悬臂结构。由文献[8, 9]可知, 影响冷隔形成机理的有9个铸造参数: 结晶器内衬的几何形状、铸造速度、从凝固壳排出热的速度、结晶器中润滑剂的流速、金属静压差、结晶器长度、金属的凝固范围、有效结晶器长度和弯月面的氧化等。当凝固壳与内衬发生接触时就产生冷隔, 冷隔的深度等于结晶器与内衬衔接处凝固壳的厚度。以上9个参数只能在产生冷隔的条件下影响冷隔的轻重程度, 而当凝固壳不与内衬接触时, 不可能出现冷隔, 只能出现表面裂纹。因此, 可以说凝固壳是否与内衬接触是判断是否产生冷隔的主要依据。

2 计算框图

由于计算量较大, 需在计算机上进行, 计算时所用的数据取自文献[10, 11], 主要数据如下: 结晶器内径 13.5 mm; 钢丝直径 4.5 mm; 结晶器内表面平均粗糙度 3.0 μm ; 铝的线膨胀系数 $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [6]:

23.8 (293~373 K),

25.2 (373~473 K),

27.2 (473~573 K),

29.5 (573~673 K),

31.5 (673~773 K),

33.5 (773~873 K); 铝的熔化潜热 387.7

J/g; 铝的黑度 0.8; 铜的黑度 0.8。

计算框图如图3所示。

3 计算结果和实测值的比较

利用上述数学模型计算了铝液温度为 1123 K 和 1173 K 时的铸拉极限速度, 同时实验测定了在此温度下能铸拉出无缺陷试样的极限铸拉速度条件, 计算值与实测值的情况如图4所示。

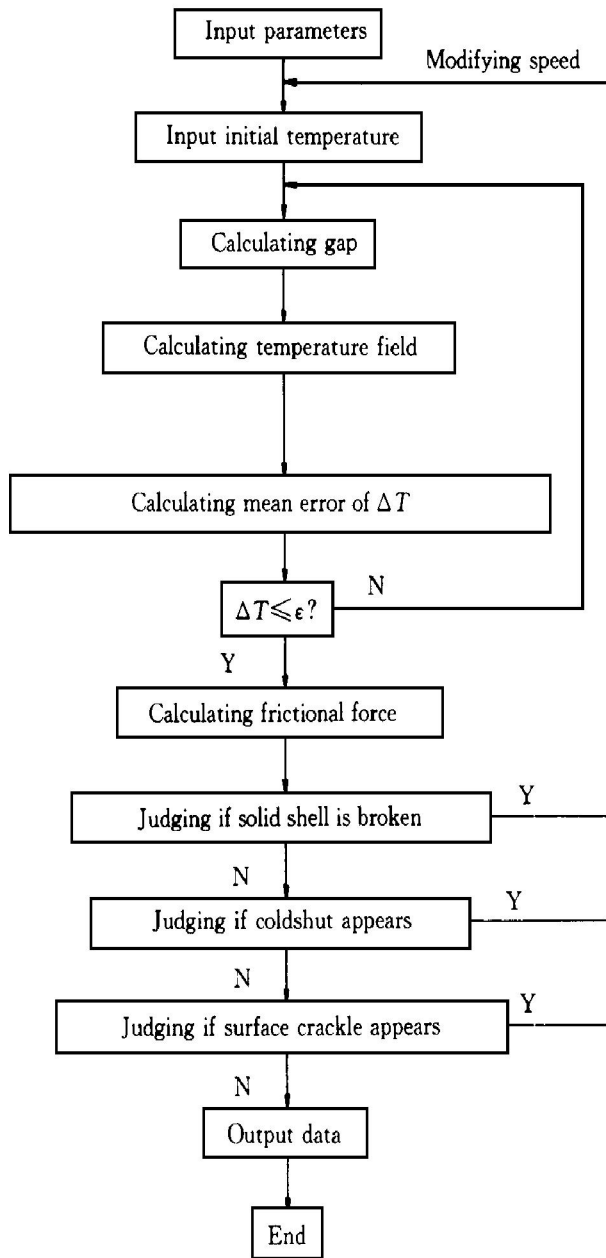


图3 计算程序框图

Fig. 3 Computing block diagram

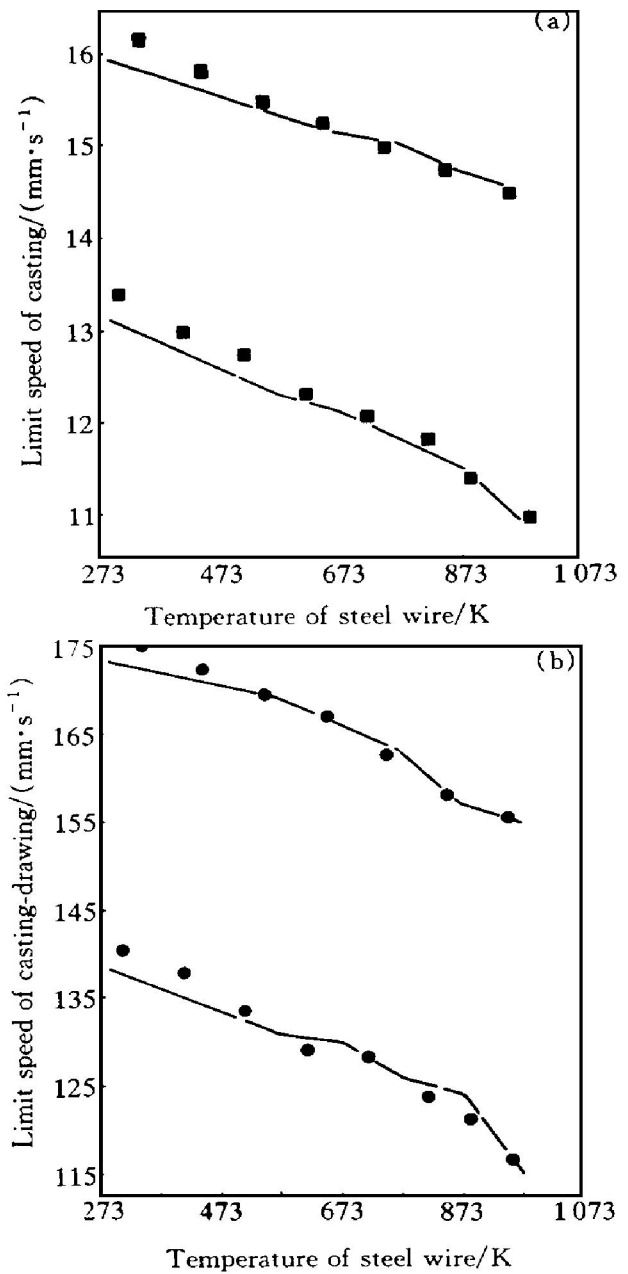


图4 铸拉极限速度的计算值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison of calculated limit speeds with measured speeds

(Solid line —calculated; Solid dot —measured)

(a) —Temperature of molten aluminium is 1173 K;

(b) —Temperature of molten aluminium is 1123 K

REFERENCES

- 1 Gabathuler L P. Light Alloy Fabrication Technology (轻合金加工技术), 1987, (4): 10–14.
- 2 Kats A U and Shazek E T. The Thermal Basis in Continuous Casting of Non-ferrous Metal and Alloys. Moscow: Metallurgical Press, 1983: 90–99.
- 3 Chen Haiqing(陈海清), Li Huaji(李华基) and Cao Yang(曹阳). The Simulant Calculation on the Solidification of Ingot (铸件凝固过程数值模拟). Chongqing: Chongqing University Press, 1989: 71–95.
- 4 Xu Guangming(许光明) and Cui Jianzhong(崔建忠). Foundry Technology(铸造技术), 1997, (3): 6–9.
- 5 Peng Yinghong *et al.* Trans Nonferrous Met Soc

- China, 1996, 6(2): 53– 56.
- 6 Xu Guangming(许光明) and Cui Jianzhong(崔建忠). Foundry Technology(铸造技术), 1997, (5): 3– 5.
- 7 Compilers of the Handbooks of Light Metal Forming(轻金属材料加工手册编写组). The Handbooks of Light Metal Forming(轻金属材料加工手册). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1979: 13.
- 8 Weckman D C. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术), 1986, (3): 7– 11.
- 9 Weckman D C. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术), 1986, (4): 5– 8.
- 10 Compilers of the Mechanical Design Handbooks(机械设计手册编写组). Mechanical Design Handbooks(机械设计手册). Beijing: Chemical Industry Press, 1987: 12, 732.
- 11 Wang Zhutang(王祝堂) and Tian Rongzhang(田荣璋) eds. Handbook of Aluminium Alloy and its Deforming(铝合金及其加工手册). Changsha: Central South University of Technology Press, 1988: 152– 155.

CALCULATION ABOUT LIMIT SPEEDS IN CAST-DRAWING

Xu Guangming, Cui Jianzhong and Na Xingjie

Department of Metal Forming, Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China

ABSTRACT By the assumption of the roughness about the inner of crystallizer, a way was proposed to deal with the contacting boundary between crystallizer and ingot, which resulted in avoiding measuring the surface temperature of ingot or the heat flow intensity of crystallizer; the temperature field in the cast-drawing process was established, which included the temperature distribution, the shape of liquid cave, and the gap size between crystallizer and ingot along vertical direction under different technological conditions. Also, a new model was proposed to calculate the friction between crystallizer and ingot, and the relation of frictional stress between the gap size, the roughness and the surface temperature of ingot was obtained. Then, the limit speeds of cast-drawing were calculated according to the main technical defects, i. e. the cold shut and the solid break, the calculation value corresponded with the measured results.

Key words mean roughness gap liquid cave shear deformation thermal stress

(编辑 彭超群)