

# 8.10.4.1 《连续铸钢手册》中的公式

陈家祥在1991年出版的《连续铸钢手册》第179页介绍了二次冷却区铸坯表面的换热系数与水量密度的关系式。

(1) E. Mitsutsuka 等。非稳态实验法。水平放置的碳钢平板，双面喷雾冷却，平板初始温度  $930^{\circ}\text{C}$ ，水温  $38^{\circ}\text{C}$ ， $h'_s(k)$  随  $T_s$  的增大而减小。水量密度  $V_s(k)$  较大时，Leidenfrost 温度为  $500^{\circ}\text{C}$ （莱顿弗罗斯特现象，当液体接触一块远超其沸点的物件，液体表面会产生出一层有隔热作用的蒸气，令液体沸腾的速度大大减慢，水的 Leidenfrost point 温度约为  $193^{\circ}\text{C}$ ）。

$$h'_s(k) = V_s(k)^n (1 - bT_w) \quad (2-8-237)$$

式中， $0.65 < n < 0.75$ ， $V_s(k) > 0.08\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ， $0.005 < b < 0.008$ ， $V_s(k) = 10 \sim 10.3\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

(2) M. Shimada、E. Mitsutsuka 等。与式 (2-8-237) 试验条件相同。

$$h'_s(k) = 1.57V_s(k)^{0.55} (1 - 0.0075T_w) \quad (2-8-238)$$

(3) E. Mizikar 等。非稳态实验法，垂直放置不锈钢平板单面冷却。平板初始温度： $1090^{\circ}\text{C}$ ，全锥形喷雾，压力： $0.069 \sim 0.62\text{MPa}$ ，喷射距离  $102 \sim 305\text{mm}$ 。未考虑辐射传热，随  $T_s$  增大  $h'_s(k)$  下降很小。

水压力为  $0.276\text{MPa}$  时

$$h'_s(k) = 0.0776V_s(k) \quad (2-8-239a)$$

水压力为  $0.620\text{MPa}$  时

$$h'_s(k) = 0.1V_s(k) \quad (2-8-239b)$$

$$0 < V_s(k) < 20.3\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

(4) H. Müller、Jechar 等。稳态实验法。电加热垂直放置钢板，两面冷却，全锥形和扇形喷嘴，压力升至  $1.1\text{MPa}$ ，喷射距离  $100 \sim 200\text{mm}$ ，计算喷射速度  $10 \sim 35\text{m/s}$ ，平板温度  $700 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，喷嘴直径  $0.8 \sim 3.3\text{mm}$ ，不考虑辐射换热， $h'_s(k)$  与喷嘴距离和喷嘴类型无关， $T_s$  对  $h'_s(k)$  有轻微影响。

$$h'_s(k) = 0.01u_c + (0.107 + 0.0068u_c)V_s(k) \quad (2-8-240)$$

式中， $0.3 \leq V_s(k) \leq 9.0\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； $11 \leq u_c \leq 32\text{m/s}$ ； $u_c$  为水流速。

(5) M. Ishiguro 等

$$h'_s(k) = 0.581V_s(k)^{0.451} (1 - 0.0075T_w) \quad (2-8-241)$$

(6) T. Nozaki 等

$$h'_s(k) = \frac{1.57V_s(k)^{0.55} (1 - 0.0075T_w)}{a} \quad (2-8-242)$$

矫直机处温度测定值， $a$  为与夹辊冷却有关的系数（蔡开科：《连续铸钢》第246页），书中给出  $a=4$  可能是错误的。

(7) E. Bolle 与 Moureu 等。稳态实验法。电加热水平放置的不锈钢板，上面和下面同时冷却， $T_s = 600 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，扇形喷雾，向下定位喷雾，不考虑辐射；向上定位喷雾，不考虑辐射。

当  $1\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) < V_s(k) < 7\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ； $627^{\circ}\text{C} < T_s < 927^{\circ}\text{C}$  时

$$h'_s(k) = 0.423 V_s(k)^{0.556} \quad (2-8-243a)$$

当  $0.8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) < V_s(k) < 2.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $727^\circ\text{C} < T_s < 1027^\circ\text{C}$  时

$$h'_s(k) = 0.360 V_s(k)^{0.556} \quad (2-8-243b)$$

(8) K. Sasaki 等。非稳态实验法。垂直放置不锈钢钢板，两面喷雾，扁平与全锥形喷嘴，初始温度  $700 \sim 1100^\circ\text{C}$ ，水流密度为  $1.67 \sim 41.67 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，压力  $0.196 \sim 0.490 \text{ MPa}$ ，喷射距离  $100 \sim 500 \text{ mm}$ ， $h'_s(k)$  单位为  $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

当  $1.67 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) < V_s(k) < 41.7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $700^\circ\text{C} < T_s < 1200^\circ\text{C}$

$$h'_s(k) = 708 V_s(k)^{0.75} T_s^{-1.2} + 0.116 \quad (2-8-244)$$

$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$ ,  $1 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.163 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

#### 8.10.4.2 《连续铸钢》一书中的公式

蔡开科在 1990 年出版的《连续铸钢》一书第 245 ~ 246 页介绍了二次冷却区铸坯表面的换热系数与水量密度关系式， $h'_s(k)$  单位为  $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ， $V_s(k)$  单位为  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

(1) E. Mizikar 等

当  $0 < V_s(k) < 20.3 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  时

$$h'_s(k) = 0.076 \sqrt{0.10 V_s(k)} \quad (2-8-245)$$

(2) T. Shimada 等

$$h'_s(k) = 1.57 V_s(k)^{0.55} (1 - 0.0075 T_w) \quad (2-8-246)$$

(3) Concast ?

$$h'_s(k) = 0.875 \times 5748 (1 - 0.0075 T_w) V_s(k)^{0.451} \quad (2-8-247)$$

(4) H. Müller 等

当  $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) < V_s(k) < 40 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时

$$h'_s(k) = 82 V_s(k)^{0.75} v_s^{0.4} \quad (2-8-248)$$

式中  $v_s$ ——喷水速度， $\text{m}/\text{s}$ 。

(5) BUIST

当  $4.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) < V_s(k) < 20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时

$$h'_s(k) = 0.61 V_s(k)^{0.395} \quad (2-8-249)$$

(6) 气水喷嘴

$$h'_s(k) = 0.35 V_s(k) + 0.13 \quad (2-8-250)$$

#### 8.10.4.3 《连续铸钢原理与工艺》一书中的公式

蔡开科、程士富在 1994 年出版的《连续铸钢原理与工艺》一书第 259 页介绍了二次冷却区铸坯表面换热系数与水量密度关系式。 $h'_s(k)$  单位为  $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ， $V_s(k)$  单位为  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

$$h'_s(k) = 2.25 \times 10^4 (1 - 0.00075 T_w) V_s(k)^{0.55} \quad (2-8-251)$$

$$h'_s(k) = 0.01917 V_s(k)^{0.66} \quad (2-8-252)$$

#### 8.10.4.4 《现代连续铸钢实用手册》一书中的公式

干勇等人在 2010 年出版的《现代连续铸钢实用手册》一书第 68 ~ 69 页介绍了二次冷却区铸坯表面的换热系数与水量密度关系式。



(1) 蔡开科、杨吉春

当  $3\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) < V_s(k) < 10\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $T_s = 800^\circ\text{C}$

$$h'_s(k) = 0.61 V_s(k)^{0.597} \quad (2-8-253a)$$

当  $3\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) < V_s(k) < 20\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $T_s = 900^\circ\text{C}$

$$h'_s(k) = 0.59 V_s(k)^{0.385} \quad (2-8-253b)$$

当  $3\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) < V_s(k) < 12\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $T_s = 1000^\circ\text{C}$

$$h'_s(k) = 0.42 V_s(k)^{0.351} \quad (2-8-253c)$$

(2) 张克强、田乃媛

当  $p_s = 0.25\text{MPa}$ ;  $T_s = 900^\circ\text{C}$

$$h'_s(k) = 0.37 + 0.35 V_s(k)^{0.954} \quad (2-8-254a)$$

当  $p_s = 0.30\text{MPa}$ ;  $T_s = 900^\circ\text{C}$

$$h'_s(k) = 0.28 + 0.35 V_s(k)^{0.939} \quad (2-8-254b)$$

当  $p_s = 0.35\text{MPa}$ ;  $T_s = 900^\circ\text{C}$

$$h'_s(k) = 1.09 + 0.03 V_s(k)^{0.960} \quad (2-8-254c)$$

8.10.4.5 王思中等人在工程硕士论文中的公式

王思中等人在2002年工程硕士论文“威海1号连铸机二冷制度的研究及高效化改造实践”第34页介绍了经过实测，回归计算得到的方坯二次冷却区铸坯表面的换热系数与水量密度关系式及收集到的换热系数与水量密度关系式。

(1) 方坯二次冷却区铸坯表面的换热系数与水量密度公式

$h'_s(k)$  单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

当  $T_s > 900^\circ\text{C}$  时

$$h'_s(k) = 1.095 \times 10^{15} \times T_s^{-4.15} \cdot V_s(k)^{0.75} \quad (2-8-255a)$$

当  $500^\circ\text{C} < T_s \leq 900^\circ\text{C}$  时

$$h'_s(k) = 3.78 \times 10^6 \times T_s^{-1.34} \cdot V_s(k)^{0.785} \quad (2-8-255b)$$

当  $T_s \leq 500^\circ\text{C}$  时

$$h'_s(k) = 3.78 \times 10^6 \times 500^{-1.34} \cdot V_s(k)^{0.785} \quad (2-8-255c)$$

(2) 1979年，佐佐木宽太郎ほか在《鉄と鋼》No1中给出的公式。

$h'_s(k)$  单位为  $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

$T_s = 600 \sim 900^\circ\text{C}$  时

$$h'_s(k) = 2.293 \times 10^8 \times V_s(k)^{0.616} \cdot T_s^{-2.445} \quad (2-8-256a)$$

$T_s = 900 \sim 1200^\circ\text{C}$  时

$$h'_s(k) = 2.830 \times 10^7 \times V_s(k)^{0.75} \cdot T_s^{-1.2} \quad (2-8-256b)$$

8.10.4.6 康卡斯特新闻期刊中给出的公式

康卡斯特新闻1988年第1期刊登了一篇由K·Thompson和M·Wolf博士写的论文“The Concast Heat Transter Model”介绍了二次冷却区气水雾化冷却时的Diener方程（根据Müllerjeschar关系式扩展出来），板坯表面直接喷水冷却区域的换热系数与水量密度关系， $h'_s(k)$  单位为  $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ， $V_s(k)$  单位为  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$

$$h'_s(k) = 9.0 \times p_w^{0.2} \cdot V_s(k)^{0.75} \quad (2-8-257)$$

式中  $p_w$  为冷却水压力, bar (1bar =  $10^5$  Pa)。

#### 8. 10. 4. 7 手嶋俊雄等人在日本《鉄と鋼》杂志中给出的公式

日本钢管手嶋俊雄等人在 1988 年《鉄と鋼》No7 “高温、高品質スラブ製造のための連続铸造二次冷却技術” 给出的二次冷却区气水雾化冷却时板坯表面直接喷水冷却区域的换热系数与水量密度关系,  $h'_s(k)$  的单位为 kcal/( $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ )

$$h'_s(k) = 280.56 \times W_a^{0.1373} \cdot V_s(k)^{0.75} \cdot K_T \quad (2-8-258)$$

式中  $W_a$ ——空气流量密度, NL/( $m^2 \cdot s$ );

$K_T$ ——季节系数,  $K_T = 0.9 \sim 1.0$ 。

#### 8. 10. 4. 8 新日铁 PMD 事业部讲课资料中给出的公式

新日铁 PMD 事业部 1986 年给出的二次冷却区气水雾化冷却时板坯表面直接喷水冷却区域的换热系数与水量密度关系的公式,  $h'_s(k)$  单位为 kcal/( $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ),  $V_s(k)$  单位为 L/( $m^2 \cdot min$ )

$$h'_s(k) = 9.0 V_s(k)^{0.85} + 100 \quad (2-8-259)$$

#### 8. 10. 4. 9 冈村一男等人在日本《鉄と鋼》杂志中给出的公式

住友金属工业 (株) 鉄鋼技术研究所冈村一男等人在 1989 年《鉄と鋼》No10 中给出的二次冷却区气水雾化冷却时板坯表面直接喷水冷却区域的换热系数与水量密度关系的公式,  $h'_s(k)$  单位为 W/( $m^2 \cdot K$ ),  $V_s(k)$  单位为 L/( $m^2 \cdot min$ )

$$h'_s(k) = 5.35 (T_s - 273)^{0.12} \times V_s(k)^{0.52} \cdot v_a^{0.37} + hrad$$
$$hrad = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.8 (T_s^4 - T_h^4) / (T_s - T_h) \quad (2-8-260)$$

式中  $v_a$ ——气水冲击速度, m/s;

$T_h$ ——环境温度, K;

$hrad$ ——辐射冷却换热系数, W/( $m^2 \cdot K$ )。

举例: 当  $T_s = 1000 + 273K$ ,  $T_h = 70 + 273K$ ,  $v_a = 20m/s$  时,  $hrad \approx 128W/(m^2 \cdot K)$ 。

#### 8. 10. 4. 10 日本鹿岛 3 号板坯连铸机使用的公式

《鉄と鋼》1988 年 No7 发表了日本鹿岛 3 号板坯连铸机实际使用的二次冷却区气水雾化冷却时板坯表面直接喷水冷却区域的换热系数与水量密度关系的公式,  $h'_s(k)$  单位为 kcal/( $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ),  $V_s(k)$  单位为 L/( $m^2 \cdot min$ )。

$$h'_s(k) = 10^{1.48} \cdot V_s(k)^{0.6293} \cdot T_s^{-0.1358} \cdot v_a^{2734} \cdot z \quad (2-8-261)$$

式中  $v_a$ ——气水冲击速度, m/s;

$z$ ——影响系数, 当  $T_s = 1000^\circ C$ ,  $v_a = 20m/s$  时,  $z = 1$ 。

#### 8. 10. 4. 11 《日立造船技报》期刊中给出的公式

日本《日立造船技报》1984 年 9 月第 45 卷第 3 号中, 大西邦彦、长井邦雄、若林勝等人发表了“連続铸造設備における高温出片技術の検討” 给出了二次冷却区气水雾化冷却时板坯表面直接喷水冷却区域的换热系数与水量密度关系的公式,  $h'_s(k)$  单位为 kcal/( $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ),  $V_s(k)$  单位为 L/( $m^2 \cdot min$ )

$$h'_s(k) = 70.4 V_s(k)^{0.31343} \quad (2-8-262)$$



## 11.5.6 连铸坯凝固传热的边界条件

### 11.5.6.1 结晶器边界条件

结晶器的热流密度有多种表达形式，大多数使用铸坯在结晶器内停留的时间作为参数，其中最著名的表达形式为：

$$\phi = A - B\sqrt{t} \quad (2-11-56)$$

式中  $\phi$ ——热流密度， $\text{W}/\text{m}^2$ ；

$t$ ——铸坯在结晶器中停留的时间， $\text{s}$ 。

其中  $A$ 、 $B$  视具体情况而定，对于板坯连铸机  $A = 2680$ ， $B = 276$ 。

由于本系统要实现板坯连铸温度场全程的动态跟踪，往往会涉及拉速较低甚至为零的状态。对于公式 (2-11-56) 来说，当  $t$  值过大时，热流密度  $\phi$  会变为负值，显然不符合实际，因此没有选用此公式。

在系统中采用了另一种结晶器内热流密度表达形式

$$\phi = 2.0 \cdot v_g^{0.56} e^{-1.5Z} \times 10^6 \quad (2-11-57a)$$

式中  $\phi$ ——热流密度， $\text{W}/\text{m}^2$ ；

$v_g$ ——拉坯速度， $\text{m}/\text{min}$ ；

$Z$ ——到结晶器液面的距离， $\text{m}$ 。

由于结晶器的铜板有厚有薄，浇注的钢种及保护渣也多种多样，不可能用一个表达式涵盖所有工况，因此对式 (2-11-57a) 进行修正，修正后如下：

$$\phi = K_1 \cdot 2.0 \cdot v_g^{0.56} e^{-1.5Z} \times 10^6 \quad (2-11-57b)$$

式中， $K_1$  可根据现场生产过程中通过结晶器铜板的实际水流量及进出口水的温度差来实时进行修正，修正方法如下

$$K_1 = \frac{3 \cdot Q_L \cdot \Delta T \times 4.18685}{4 \cdot B \cdot v_g^{0.56} \cdot (1 - e^{-1.5 \cdot L_M})} \quad (2-11-58)$$

式中  $Q_L$  ——内弧铜板的通水量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$\Delta T$ ——内弧铜板进出口水温差,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$B$ ——板坯宽度,  $\text{m}$ ;

$L_{\text{M}}$ ——实时结晶器有效长度,  $\text{m}$ 。

### 11.5.6.2 二冷区边界条件

连铸坯在二冷区的换热采用等效换热系数  $h$  来表示。

#### A 喷淋区的等效换热系数

喷淋水的传热公式有很多, 本数学模型使用如下公式

$$h = a \cdot T_{\text{w}}^m \cdot W^n \quad (2-11-59)$$

式中  $h$ ——等效换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$W$ ——水流密度,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;

$T_{\text{w}}$ ——铸坯表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

$a$ 、 $m$ 、 $n$  为常数, 可根据喷嘴特性和铸坯表面温度的实验数据进行多元线性回归得到。本系统中, 对于纯水冷却喷嘴,  $a$ 、 $m$ 、 $n$  取值分别为  $1.98 \times 10^9$ 、 $-2.295$ 、 $0.709$ ; 对于气水冷却喷嘴,  $a$ 、 $m$ 、 $n$  取值分别为  $1466.2$ 、 $-2.295$ 、 $0.815$ 。

3 个参数可根据现场实际情况做出适当调整。

#### B 辐射区和压缩空气冷却段的传热

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_{\text{w}} + 273)^4 - (T_{\text{f}} + 273)^4] \quad (2-11-60)$$

式中  $q$ ——辐射热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$\varepsilon$ ——发射率 (铸坯表面黑度系数),  $\varepsilon = 0.8$ ;

$T_{\text{f}}$ ——环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\sigma$ ——斯蒂芬·玻耳兹曼常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

压缩空气冷却的换热系数和压缩空气的温度及压缩空气的流动速度密切相关, 在连铸环境下压缩空气的流动速度为  $15 \sim 20 \text{m/s}$ , 该条件下的换热系数约为  $45 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

## 11.5.7 程序计算流程以及参数的输入输出

### 11.5.7.1 程序计算流程

程序计算流程 (见图 2-11-23)。

### 11.5.7.2 计算参数的输入与输出

程序的输入参数包括工艺及介质参数、钢种热物性参数及计算条件、设备参数三大类。其中时间步长和空间步长为程序的固化参数, 只能在程序中修改; 浇注钢种、结晶器热流密度修正系数、冷却区钢液是否流动、冷却水温度、换热系数参数、压缩空气换热系数、环境温度、压缩空气温度、液相线温度、固相线温度、热导率、比热容、密度、连铸坯断面、结晶器内钢液高度、各二冷区结构和连铸机长度在程序执行时一次性读入; 浇注温度、拉坯速度和二冷区各个区域的水流密度程序在每一个采样周期都要读入。

输出参数为连铸坯表面温度、连铸坯中心温度、连铸坯中心固相率和连铸坯坯壳厚度等, 如图 2-11-24 所示。