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℃,水温38℃,h'(k) 随 T. 的增大而减小。水量密度V.(k) 较大时，Leiden- frost温度为500℃(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℃)。

h'(k)=V,(k)"(1-bT) (2-8-237)

式中，0.65<n<0.75,V,(k)>0.08L/(m²·s),0.005<b<0.008,V.(k)=10~10.3L/

(m²·s)。

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

h:(k)=1.57V.(k)0.Ss(1-0.0075T 、) (2-8-238)

(3)E.Miikar 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℃,全锥形喷雾，压力：0.069~0.62MPa, 喷射距离102~305mm。未考虑辐射传热，

随T,增大h'. (k) 下降很小。

水压力为0.276MPa时

h'(k)=0.0776V.(k) (2-8-239a)

水压力为0.620MPa时

h'(k)=0.1V.(k) (2-8-239b)

0<V(k)<20.3L(m²·s)

(4)H.Muller 、Jeachar 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1.1MPa, 喷射距离100~200mm, 计算喷射速度10~35m/s, 平板温 度700~1200℃,喷嘴直径0.8~3.3mm, 不考虑辐射换热，h'(k) 与喷嘴距离和喷嘴类 型无关，T. 对 h'(k) 有轻微影响。

h'(k)=0.01u 。+(0.107+0.0068u.)V,(k) (2-8-240)

式中，0.3≤V.(k)≤9.0L/(m²·s);11≤u 。≤32m/s;u 。 为水流速。

(5)M.Ishiguro 等

h'(k)=0.581V,(k)°45(1-0.0075T) (2-8-241)

(6)T.Nozaki 等

 (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 Moureou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,=600~1100℃, 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 1L/(m²·s)<V,(k)<7L/(m²·s);627℃<T,<927℃ 时

h;(k)=0.423V.(k)°56 (2-8-243a)

当0 . 8L/(m²·s)<V.(k)<2.5L/(m²·s);727℃<T,<1027℃ 时

h,(k)=0.360V,(k)S⁶ (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700~1100℃,水流密度为1 .67~41 .67L/(m²·s), 压 力 0 . 1 9 6 0.490MPa, 喷射距离100-500mm,h'(k) 单位为kcal/(m²·h·℃)。

当1.67L/(m²·s)<V.(k)<41.7L/(m²·s);700℃<T,<1200℃

h,(k)=708V,(k)r¹²+0.116 (2-8-244)

lcal=4.1868J,1kcal(m²·h·℃)=1.163W/(m²·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:(k) 单位为kcal/(m² ·h · ℃),V. (k) 单位为L(m² · s)。

(1)E.Mizikar 等

当 0<V.(k)<20.3L/m² ·

(2-8-245)

(2)T.Shimada 等

h'(k)=1.57V,(k)°S(1-0.0075T.) (2-8-246)

(3)Concast?

h,(k)=0.875×5748(1-0.0075T)V.(k)°4S¹ (2-8-247)

(4)H.Maller 等

当 9L(m²·s)<V.(k)<40L/(m²·s) 时

 (2-8-248) 式中 v.——喷水速度，m/s。

(5)BUIST

当4.5L/(m²·s)<V,(k)<20L/(m²·s) 时

h'(k)=0.61V,(k)⁰395 (2-8-249)

(6)气水喷嘴

h'(k)=0.35V,(k)+0.13 (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'(k) 单位为kcal/(m²·h·℃),V.(k) 单位 为 L(m²·s)。

h'(k)=2.25×10⁴(1-0.00075T.)V.(k)⁰.5 h'(k)=0.01917V,(k)⁰.6

(2-8-251)

(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3L/(m²·s)<V,(k)<10L/(m²·s);T.=800℃  h'(k)=0.61V,(k)⁰57 | (2-8-253a) |
| 当3L/(m²·s)<V.(k)<20L/(m²·s);T,=900℃  h'(k)=0.59V.(k)°5 | (2-8-253b) |
| 当3L/(m²·s)<V.(k)<12L/(m²·s);T.=1000℃  h'(k)=0.42V,(k)⁰351 | (2-8-253c) |
| (2)张克强、田乃媛  当p.=0.25MPa;T.=900℃  h,(k)=0.37+0.35V,(k)⁰954 | (2-8-254a) |
| 当p.=0.30MPa;T,=900℃  h'(k)=0.28+0.35V.(k)⁰959 | (2-8-254b) |
| 当p.=0.35MPa;T.=900℃  h'(k)=1.09+0.03V.(k)0.900 | (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,(k) 单位为W/(m²·℃)

当T,>900℃时

h'(k)=1.095×10¹⁵×T.⁴¹⁵·V.(k)a⁷5 (2-8-255a)

当500℃<T,≤900℃ 时

h'(k)=3.78×10⁶×T-.34·V,(k)⁰.78 (2-8-255b)

当T,≤500℃时

h'(k)=3.78×10⁶×500-¹-4·V.(k)⁰788 (2-8-255c)

(2)1979年，佐佐木宽太郎ば力在《铁と钢》Nol 中给出的公式。

h'(k) 单位为kcal/(m²·h·℃)

T,=600~900℃时

h'(k)=2.293×10⁸×V.(k)⁰616.T-2445 (2-8-256a)

T,=900~1200℃时

h'(k)=2.830×10⁷×V,(k)°5·T¹2 (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 Millerjeschar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,(k) 单位为kcal/(m²·h·℃),V.,(k) 单位为L/(m²·min)

h'(k)=9.0×p°²·V.(k)°.75 (2-8-257)

式中 p、为冷却水压力,bar(1bar=10°Pa)。

<8.10.4.7> 手鸠俊雄等人在日本《铁と鋼》杂志中给出的公式

日本钢管手鸠俊雄等人在1988年《鉄と鋼》N7 “高温、高品質スラブ製造のための 連続銬造二次冷却技術”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:(k) 的单位为kcal/(m²·h·℃)

h:(k)=280.56×W·V,(k)⁰7·K₁ (2-8-258)

式中 W!——空气流量密度,NL/(m²·s);

K₁——季节系数,K₁=0.9～1.0。

<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!(k) 单位为 kcal/(m²·h·℃),V,(k) 单位 为 L/(m²·min)

h:(k)=9.0V,(k)⁰⁸+100 (2-8-259)

<8.10.4.9> 冈村一男等人在日本《铁と鋼》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:(k) 单位为W/(m²·K),V.(k) 单位为L(m²·min)

*h:(k)=5.35(T,-273)⁰²×V,(k)⁴3²·v”+hrad*

*hrad =5.67×10⁸×0.8(T⁴-T)/(T,-T₁)* (2-8-260)

式中 v.—— 气水冲击速度,m/s;

T₁——环境温度,K;

hrad ——辐射冷却换热系数,W/(m²·K)。

举 例 : 当T,=1000+273K,T₁=70+273K,ν,=20m/s 时 ,hrad≈128W/(m²·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;(k) 单位为 kcal/(m²·h·℃),V.(k) 单位为L/(m²·min)。

*h'(k)=10¹48·V.(k)⁰.6293·T-0.1358.v2734·z* (2-8-261)

式中 v,—— 气水冲击速度,m/s;

z——影响系数,当T,=1000℃,v₄=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“連続鑄造設備における高温出片技術的检討”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:(k) 单位为 kcal/ (m²·h·℃),V,(k) 单位为L/(m²·min)

h'(k)=70.4V.(k)⁰.31343 (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：

φ=A-B√i (2-11-56)

式中φ——热流密度，W/m²;

l—— 铸坯在结晶器中停留的时间，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φ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



(2-11-57a)

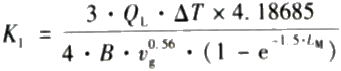
式中φ ——热流密度， W/m²;

v.——拉 坯 速 度 ，m/min;

Z—— 到结晶器液面的距离，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：

 (2-11-57b)

式中，K, 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

(2-11-58)

式中 Q₁ — —内弧铜板的通水量， m³/s;



△T——内弧铜板进出口水温差，℃;

B——板坯宽度， m;

L——实时结晶器有效长度， 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·Tw·W" (2-11-59)

式中 h——等效换热系数， W/(m²·℃);

W——水流密度，L(m²·s);

Tw——铸坯表面温度，℃。

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1.98×10°、-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=e·σ·[(Tw+273)⁴-(T₁+273)⁴] (2-11-60)

式中 q——辐射热流密度，W/m²;

E——发射率(铸坯表面黑度系数),e=0.8;

T₁——环境温度，℃;

σ——斯蒂芬 ·玻耳兹曼常数，σ=5.67×10-⁸W/(m²·K⁴)。

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15~20m/s, 该条件下的换热系数约为45W/(m²·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。