8.10 凝固计算常用公式

8.10.1 液相线及固相线温度

设液相线温度为Tu(℃); 固相线温度为T,(℃) (化学元素均为质量分数(%))。

(1)商家K 于1988年提供给某钢铁公司超低头板坯连铸机的Teetip公式 Tu=1536.6-188[C]+8[Si]+5[Mn]+5.5[Cu]+1.5[Cr]+

4[Ni]+2[Mo]+18[Ti]+1} (2-8-174)

在式(2-8-174)中，1℃是对P+S 而言。对气体和其他元素，必要时再减去2℃。88 [%C] 是当含碳量≤0.5%时的系数，当含碳量>0.5%时超出部分系数为76,例如0.6% C含量时，意味着温度降低为0.5×88+0.1×76=51.6℃。

(2)《宝钢技术》1997年第3期第20页，日本人的“平居公式” Tu=1538-{55[C]+80[C]²+13[Si]+4.8[Mn]+

1.5[Cr]+4.3[Ni]+30[P]+30[S]} (2-8-175) 当[C]≤0.09% 时

T=1538-{478[C]+20.5[Si]+6.5[Mn]+2.0[Cr]+

11.5[Ni]+5.5[Al]+500[P]+700[S]} (2-8-176)

当0.09%<[C]≤0.17% 时

T=1495-{20.5[Si]+6.5[Mn]+2.0[Cr]+

11.5[Ni]+5.5[Al]+500[P]+700[S]} (2-8-177)

当[C]>0.17% 时

T=1527-{187.5[C]+20.5[Si]+6.5[Mn]+2.0[Cr]+

11.5[Ni]+5.5[Al]+500[P]+700[S]} (2-8-178)

(3)《铁と鋼》1990年第2号第217页，長田修次等人给出的“平居正纯公式” T=θs-20.5[Si]-6.5[Mn]-2.0[Cr]-1.5[Ni]-

5.5[Al]-156[P]-700[S] (2-8-179) 当[C]≤0.10% 时

θs=1536-420[C]

当0.10%<[C]≤0.185% 时

θs=1494

当[C]>0.185% 时

θs=1525.2-168.8[C]

零塑性温度ZDT(Zero Ductility Temperature)

*ZDT =T。- △T。- △Ts* (2-8-180)

当[C]≤0.14% 时

△T.=12.86[C]-18

当0.14%<[C]≤0.18% 时

·448· 第2篇 直弧形板坯连铸总体技术

当0.18%<[C]≤0.24%

当 0 . 2 4 % <[C]≤0.50%

△T 。=700[C]-103 时

△T.=-466.7[C]+107 时

△T.=-5

△Ts=1007[P]+1411[S]([P]≤0.04%)

据报道，按照式(2-8-180)计算的ZDT 温度与实测值的误差在20℃以内。

(4)《连续铸钢手册》,1990年12月冶金工业出版社出版，第81页给出的公式 液相线温度见表2-8-3。固相线温度见表2-8-4。

**表2-8-3液相线温度**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 适应 钢种 | 计 算 公 式 | 准确度 | 附 注 |
| 各种 钢 | 式(2-8-181):Tμ=1539-|70[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+ 25[S]+[Cu]+4[Ni]+1.5[Cr]l  式(2-8-182):Tu=1534-{73[C]+12[Si]+3[Mn]+28[P]+ 30[S]+7[Cu]+3.5[Ni]+[Cr]+3[Al]  式(2-8-183):Tu=1539-|90[C]+6.2[Si]+1.7[Mn]+28[P]+ 40[S]+2.6[Cu]+2.9[Ni]+1.8[Cr]+  5.1[Al] | | +5~15℃  -1~6℃ | 式(2-8-183)中，[C ≤0.6%,而数字1539 在《现代连续铸钢实用 手册》第52页式(2-17) 中为1536。还说这三个 公式计算误差在±2- ±5℃之间 |
| 碳素 钢 | 式(2-8-184):Tu=1538-|f[C]+13[Si]+4.8[Mn]+  1.5[Crl+3.1[Ni]  f[C]=55[C]+80[C]² 当[C]<0.5%时 f[C]=44-21[C]+52[C]² 当[C]≥0.5%时  式(2-8-185):Tμ=1536-{78[C]+7.6[Si]+4.9[Mn]+34.4[P]+38  [S]+4.7[Cu]+3.1[Ni]+1.3[Cr]+3.6[Al] | ±3℃  ±4℃ | [C]≤0.5% |
| 主要 适应 特殊 钢种 | 式(2-8-186):Tu=1534-{91[C]+21[Si]+3.5[Mn]+4[Ni]+ 0.65[Cr]+3[Mo] |  式(2-8-187):Tu=1536-{100.3[C]-22.41[C]²-0.61+  13.55[Si]-0.64[Si]²+5.82[Mn]+  0.3[Mn]²+0.2[Cu]+4.18[Ni]+0.01[Ni]²+  1.59[Cr]-0.007[Cr]²  式(2-8-188):Tu=1536-[0.1+83.9[C]+10[C]²+12.6[Si]+  5.4[Mn]+4.6[Cu]+5.1[Ni]+1.5[Cr]- 33[Mo]-0[W]-30[P]-37[S]-9.5[Nb] | 良好  ±2℃  良好 | 式(2-8-186)和式 (2-8-187)为回归式， 式(2-8-187),若是普 通钢，代入[C][Si] [Mn]3种元素，从中 减去2~3℃即可。式 (2-8-188)[C]≤0.51% |

**表2-8-4** **固相线温度**

式(2-8-189):T.=Fe-C系的熔点(℃)-{20.5[Si]+6.5[Mn]+500[P]+700[S]+2[Crl+11.5[Ni]+5.5[Al]

式(2-8-190):T.=Fe-C系的熔点(℃)-{7.6[Si]+4.9[Mn]+34.4[P]+3.8[S]+3.1[Ni]+1.3[Cr]+3.6[Al] 式(2-8-191):T。=1536-{415.3[C]+12.3[Si]+6.8[Mn]+124.5[P]+183.9[S]+4.3[Ni]+1.4[Cr]+4.1[Al]F

式 注



)中，[C] 字1539 诗钢实用 式(2-17) 说这三个 在±2~





和式 日式， 是普 [Si] 从中 。式

1%



在M.El-Bealy,N.Leskinen,H.Fredriksson.Simulation of cooling conditions in secondary cooling zone in continuous casting process[J],Ironmaking and Steelmaking,1995,Vol.22 (3):169-184中所列的固相线温度计算公式和表2-8-4中式(2-8-191)有些许区别，其 中1536为1535,415.3为200。

(5)日本第34回特殊鋼部会S.43.3 给出的公式

Tu=1536-{-0.61+100.3[C]-22.41[C]²+13.55[Si]-0.64[Si]²+5.82[Mn]+

0.3[Mn]²+4.2[Cu]+4.18[Ni]-0.01[Ni]²+1.59[Cr]-0.007[Cr]²}

(2-8-192)

和式(2-8-187)相比，[Cu] 前面的系数式(2-8-187)是0.2,式(2-8-192)是4.2;

0.01 [Ni]²项前面，式(2-8-187)为正，式(2-8-192)为负。

(6)《日本广田连铸技术》1989年，武钢二炼钢刘良春等编译，第91页给出的公式

Tu=1536.6-{88[C]+25[S]+5[Cr]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+

2[Mo]+4[Ni]+18[Ti]+2[V]} (2-8-193)

固相线温度同式(2-8-189)。

(7)《连续铸钢原理与工艺》1994年，蔡开科等编，冶金工业出版社，第102～103 页，此公式也是商家K 于20世纪70年代培训商家A 所用到的。

Tu=1537-{88[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+5[Cu]+

4[Ni]+2[Mo]+2[V]+1.5[Cr]} (2-8-194)

(8)《连铸浇注工艺》1990年7月，倪满森编写技术报告，(1-6)~(1-7)页给出的 公式

Tu=1538-{f[C]+13[Si]+4.8[Mn]+1.5[Cr]+4.3[Ni]+30[P]+30[S]}

(2-8-195)

当[C]<0.5% 时： f[C]=55[C]+80[C]²

当0.5%≤[C]<1.0% 时： f[C]=44-21[C]+52[C]²

此公式来自《铁と鋼》1969,Vol,55。

Tu=1536.6-{88[C]+25[S]+30[P]+8[Si]+5[Mn]+18[Ti]+

2[Mo]+4[Ni]+5[Cu]+2[V]+1.5[Cr]} (2-8-196)

Tu=1534-{80.5[C]+33.5[S]+33.5[P]+17.8[Si]+3.75[Mn]+

3.4[Cu]+3.4[Al]+3[Ni]} (2-8-197)

(9)商家D 于20世纪90年初给S 钢铁公司不锈钢连铸机推荐的公式

Tu=1536.6-{90[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+1.5[Cr]+

4[Ni]+2[Mo]+5[Cu]+90[N]} (2-8-198)

(10)《冶金单元设计》1994年，范光前编，冶金工业出版社，给出的用于不锈钢的公式 Tu=1536-{78[C]+7.6[Si]+4.9[Mn]+34[P]+30[S]+5[Cu]+

3.1[Ni]+1.3[Cr]+3.6[Al]+2[Mo]+2[V]+18[Ti]} (2-8-199) 商家D于21世纪中期给S 钢铁公司不锈钢连铸机推荐的也是此公式。

(11)商家D于21世纪给T 钢铁公司不锈钢连铸机推荐的两个公式 Tu=1536.6-{90[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+3[Al]+

1.55[Cr]+4[Ni]+2[Mo]+18[Ti]+80[N]+5[Cu]l (2-8-200a)

Tu=1536.6-{90[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+5[Cu]+

4[Ni]+1.55[Cr]+2[Mo]+18[Ti]+80×0.0001([N]ppm-100)}

(2-8-200b)

(12)《武钢炼钢生产技术进步概况》2003年萧忠敏编，冶金工业出版社，第332页， 对硅钢

Tu=1539-{65[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+5[Cu]+

4[Ni]+2[Mo]+2[V]+1.5[Cr]} (2-8-201)

(13)商家B 于21世纪初给A 钢铁公司不锈钢连铸机推荐的公式

当[C]<0.2% 时

Tu=1536-{65[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+1.7[Al]+

5[Cu]+1.5[Cr]+4[Ni]+2[V]+[W]+1.7[Co]+12.8[Zr]+

7[Nb]+3[Ta]+14[Ti]+14[As]+10[Sn]} 当 [C]=0.2%~0.5% 时

Tu=1536-{88[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+1.7[Al]+

5[Cu]+1.5[Cr]+4[Ni]+2[V]} 当[C]>0.5% 时

Tu=1536-{9[C]+65[C]²+10[Si]+6[Mn]+30[P]+30[S]+

3[Al]+5[Cu]+1.5[Cr]+3.5[Ni]+2[V]} (2-8-202)

(14)商家D 在某钢铁公司碳钢板坯连铸机上采用下列公式计算液相线温度 Tu=1536.6-{Factor[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+2[Ti]+

2[Mo]+5[Cu]+4[Ni]+1.5[Cr]+5.1[Al]+90[N]} (2-8-203a)

系数Factor 见表2-8-5a。

**表2-8-5a式(2-8-203a)中与碳含量有关的系数Factor**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| [C]/% | Factor | [C]/% | Factor |
| 0.000<[C]≤0.025 | 90.0 | 0.500<[C]≤0.600 | 86.1 |
| 0.025<[C]≤0.050 | 82.0 | 0.600<[C]≤0.700 | 84.2 |
| 0.050<[C]≤0.101 | 86.0 | 0.700<[C]≤0.800 | 83.2 |
| 0.101<[C]≤0.500 | 88.4 | 0.800<[C]≤1.000 | 82.3 |

( 1 5 ) 商 家D 在另一钢铁公司提供的液相线温度计算方法

Tu=1536.6-Factorl[C]%-Factor2 [其他元素]% (2-8-203b)

系数Factor 1和系数Factor 2见表2-8-5b。

**表2-8-5b** **式(2-8-203b)中与碳含量和其他元素含量有关的系数Factor** **1、Factor** **2**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| [C]/% | Factor 1 | 其他元素代号 | 其他元素在钢中含量/% | Factor 2 |
| ≤0.025 | 90 | Si | 0~3.0 | 8 |
| 0.026~0.050 | 82 | Mn | 0~1.5 | 5 |
| 0.060~0.10 | 86 | P | 0~0.7 | 30 |
| 0.11~0.50 | 88.4 | S | 0~0.08 | 25 |
| 0.51~0.60 | 86.1 | Cr | 0~18.0 | 1.5 |

8 连铸板坯凝固计算 ·451 · 续表2-8-5b

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| [C]/% | Factorl | 其他元素代号 | 其他元素在钢中含量/% | Factor 2 |
| 0.61~0.70 | 84.2 | Ni | 0~9.0 | 4 |
| 0.71~0.80 | 83.2 | Cu | 0~0.3 | 5 |
| 0.81-1.00 | 82.3 | Mo | 0~0.3 | 2 |
|  |  | V | 0~1.0 | 2 |
|  |  | W | 0~18.0 | 1 |
|  |  | As | 0~0.5 | 14 |
|  |  | Sn | 0-0.03 | 10 |
|  |  | Al | 0~0.03 | 5.1 |
|  |  | Ti | 一 | 17 |
|  |  | 0 | 0~0.03 | 80 |
|  |  | N | 0~0.03 | 90 |
|  |  | H | 一 | 1300 |

当某钢种的化学成分为 [C]=0.20%;[Si]=0.17%;[Mn]=0.40%;[P]= 0.020%;[S]=0.015% 时，应用式(2-8-203b) 计算液相线温度举例：

Tu=1536.6-88.4×0.20-8×1.7-5×0.40-30×0.020-25×0.015 =1514.6℃

(16)《连续铸钢》1994年，冶金工业出版社，陈雷编，第74页



(2-8-204)

CE={80.5[C]+33.5[P]+33.5[S]+17.8[Si]+3.75[Mn]+3.4[Cu]+

3.4[Al]+1.5[Cr]+3[Ni]}/80.5

(17)《薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制》2006年，冶金工业出版社，康永林编， 第39页

Tu=1537-{65[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+

2.7[Al]+80[0]+90[N] (2-8-205)

T.=1537-{175[C]+20[Si]+30[Mn]+280[P]+

575[S]+7.5[Al]+160[0]} (2-8-206)

(18)《板坯连铸》1990年，冶金部工人技能视听教材编辑部编，第46页

Tu=1539-165[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+5[Cu]+

90[N]+80[0]+4[Ni]+1.5[Cr]} (2-8-207)

(19)《品种钢、优特钢连铸900问》2007年，中国科学技术出版社，干勇等编，第 65页

Tu=1539-{70[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+ 4[Ni]+2[Mo]+2[V]|

T=1534-2.29180.5[C]+17.8[Si]+3.75[Mn]+33.5[P]+

(2-8-208)

·452 · 第2篇 直弧形板坯连铸总体技术

33.5[S]+3[N]+1.5[Cr]+3.4[Cu]+3.4[Al]} (2-8-209)

(20)商家A 于1998年提供给A 钢铁公司板坯连铸机镀锡板计算公式 Tu=1536.8-{88[C]+5[Mn]+8[Si]+30[P]+25[S]+5[Cr]+

2[Mo]+4[Ni]+18[Ti]+2[V]} (2-8-210)

(21)《国外连铸新技术》译文集(二),20世纪80年代，第14页

Tu=1535-{78[C]+4.9[Mn]+3.6[Al]+7.6[Si]} (2-8-211)

(22)《钢铁》2012年，第10期，第28页

T=1536-{175[C]+20[Si]+30[Mn]+280[P]+575[S]+6.5[Cr]+4[V]+

4.75[Ni]+7.5[Al]+2.5[W]+40[Ti]+5[Mo]+60[Nb]+160[0]}(2-8-212)

(23)《炼钢》2013年，第5期，第66~67页

Tu=1539-{70[C]+8[Si]+5[Mn]+30[P]+25[S]+4[Ni]+1.5[Cr]}(2-8-213)

式(2-8-213)与式(2-8-181)相比较缺少 [Cu]。 此公式适应于一般钢种。

(24)铸铁液相线温度及共晶温度

液相线温度： Tu=1650-124.5[C]-26.7{[Si]+2.45[P]} (2-8-214)

白口铸铁共晶温度：Tsw=1104+9.8[C]-12.1{[Si]+2.45[P]} (2-8-215)

(25)《连续铸钢生产技术》2011年，化学工业出版社，杨吉春编著 T=1471-{25.2[C]+12[Si]+7.6[Mn]+34[P]+30[S]+5[Cu]+

3.1[Ni]+1.3[Cr]+3.6[Al]+2[Mo]+2[V]+18[Ti]} (2-8-216)

杨吉春在书中计算液相线温度时引用了式(2-8-183),但是“1539”变成了 “1536”。