

即矫直力矩  $M_i$  中本应该包括这一项,但由于该项对  $M_i$  影响不大,故予以忽略。

## 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  $T_{LL}$  (°C); 固相线温度为  $T_{ss}$  (°C) (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

$$T_{LL} = 1536.6 - \{88[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 5.5[Cu] + 1.5[Cr] + 4[Ni] + 2[Mo] + 18[Ti] + 1\} \quad (2-8-174)$$

在式 (2-8-174) 中,  $1^\circ\text{C}$  是对  $P+S$  而言。对气体和其他元素,必要时再减去  $2^\circ\text{C}$ 。 $88[\%C]$  是当含碳量  $\leq 0.5\%$  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  $0.5 \times 88 + 0.1 \times 76 = 51.6^\circ\text{C}$ 。

(2) 《宝钢技术》1997 年第 3 期第 20 页,日本人的“平居公式”

$$T_{LL} = 1538 - \{55[C] + 80[C]^2 + 13[Si] + 4.8[Mn] + 1.5[Cr] + 4.3[Ni] + 30[P] + 30[S]\} \quad (2-8-175)$$

当  $[C] \leq 0.09\%$  时

$$T_{ss} = 1538 - \{478[C] + 20.5[Si] + 6.5[Mn] + 2.0[Cr] + 11.5[Ni] + 5.5[Al] + 500[P] + 700[S]\} \quad (2-8-176)$$

当  $0.09\% < [C] \leq 0.17\%$  时

$$T_{ss} = 1495 - \{20.5[Si] + 6.5[Mn] + 2.0[Cr] + 11.5[Ni] + 5.5[Al] + 500[P] + 700[S]\} \quad (2-8-177)$$

当  $[C] > 0.17\%$  时

$$T_{ss} = 1527 - \{187.5[C] + 20.5[Si] + 6.5[Mn] + 2.0[Cr] + 11.5[Ni] + 5.5[Al] + 500[P] + 700[S]\} \quad (2-8-178)$$

(3) 《鉄と鋼》1990 年第 2 号第 217 页,長田修次等人给出的“平居正纯公式”

$$T_{ss} = \theta_s - 20.5[Si] - 6.5[Mn] - 2.0[Cr] - 1.5[Ni] - 5.5[Al] - 156[P] - 700[S] \quad (2-8-179)$$

当  $[C] \leq 0.10\%$  时

$$\theta_s = 1536 - 420[C]$$

当  $0.10\% < [C] \leq 0.185\%$  时

$$\theta_s = 1494$$

当  $[C] > 0.185\%$  时

$$\theta_s = 1525.2 - 168.8[C]$$

零塑性温度  $ZDT$  (Zero Ductility Temperature)

$$ZDT = T_{ss} - \Delta T_c - \Delta T_{ps} \quad (2-8-180)$$

当  $[C] \leq 0.14\%$  时

$$\Delta T_c = 12.86[C] - 18$$

当  $0.14\% < [C] \leq 0.18\%$  时

$$\Delta T_c = 700[C] - 103$$

当  $0.18\% < [C] \leq 0.24\%$  时

$$\Delta T_c = -466.7[C] + 107$$

当  $0.24\% < [C] \leq 0.50\%$  时

$$\Delta T_c = -5$$

$$\Delta T_{PS} = 1007[P] + 1411[S] \quad ([P] \leq 0.04\%)$$

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): $T_{LL} = 1539 - \{70[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + [Cu] + 4[Ni] + 1.5[Cr]\}$ 式(2-8-182): $T_{LL} = 1534 - \{73[C] + 12[Si] + 3[Mn] + 28[P] + 30[S] + 7[Cu] + 3.5[Ni] + [Cr] + 3[Al]\}$ 式(2-8-183): $T_{LL} = 1539 - \{90[C] + 6.2[Si] + 1.7[Mn] + 28[P] + 40[S] + 2.6[Cu] + 2.9[Ni] + 1.8[Cr] + 5.1[Al]\}$	+5 ~ 15℃   -1 ~ 6℃	式(2-8-183)中, $[C] \leq 0.6\%$ , 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 $\pm 2 \sim \pm 5^\circ\text{C}$ 之间
碳素钢	式(2-8-184): $T_{LL} = 1538 - \{f[C] + 13[Si] + 4.8[Mn] + 1.5[Cr] + 3.1[Ni]\}$ $f[C] = 55[C] + 80[C]^2$ 当 $[C] < 0.5\%$ 时 $f[C] = 44 - 21[C] + 52[C]^2$ 当 $[C] \geq 0.5\%$ 时 式(2-8-185): $T_{LL} = 1536 - \{78[C] + 7.6[Si] + 4.9[Mn] + 34.4[P] + 38[S] + 4.7[Cu] + 3.1[Ni] + 1.3[Cr] + 3.6[Al]\}$	±3℃   ±4℃	$[C] \leq 0.5\%$
主要适应特殊钢种	式(2-8-186): $T_{LL} = 1534 - \{91[C] + 21[Si] + 3.5[Mn] + 4[Ni] + 0.65[Cr] + 3[Mo]\}$ 式(2-8-187): $T_{LL} = 1536 - \{100.3[C] - 22.41[C]^2 - 0.61 + 13.55[Si] - 0.64[Si]^2 + 5.82[Mn] + 0.3[Mn]^2 + 0.2[Cu] + 4.18[Ni] + 0.01[Ni]^2 + 1.59[Cr] - 0.007[Cr]^2\}$ 式(2-8-188): $T_{LL} = 1536 - \{0.1 + 83.9[C] + 10[C]^2 + 12.6[Si] + 5.4[Mn] + 4.6[Cu] + 5.1[Ni] + 1.5[Cr] - 33[Mo] - 0[W] - 30[P] - 37[S] - 9.5[Nb]\}$	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) $[C] \leq 0.51\%$

表 2-8-4 固相线温度

式(2-8-189): $T_{ss} = \text{Fe-C 系的熔点}(^\circ\text{C}) - \{20.5[Si] + 6.5[Mn] + 500[P] + 700[S] + 2[Cr] + 11.5[Ni] + 5.5[Al]\}$
式(2-8-190): $T_{ss} = \text{Fe-C 系的熔点}(^\circ\text{C}) - \{7.6[Si] + 4.9[Mn] + 34.4[P] + 3.8[S] + 3.1[Ni] + 1.3[Cr] + 3.6[Al]\}$
式(2-8-191): $T_{ss} = 1536 - \{415.3[C] + 12.3[Si] + 6.8[Mn] + 124.5[P] + 183.9[S] + 4.3[Ni] + 1.4[Cr] + 4.1[Al]\}$



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

$$T_{LL} = 1536 - \{ -0.61 + 100.3[C] - 22.41[C]^2 + 13.55[Si] - 0.64[Si]^2 + 5.82[Mn] + 0.3[Mn]^2 + 4.2[Cu] + 4.18[Ni] - 0.01[Ni]^2 + 1.59[Cr] - 0.007[Cr]^2 \}$$

(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

$$T_{LL} = 1536.6 - \{ 88[C] + 25[S] + 5[Cr] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 2[Mo] + 4[Ni] + 18[Ti] + 2[V] \}$$

(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。

$$T_{LL} = 1537 - \{ 88[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + 5[Cu] + 4[Ni] + 2[Mo] + 2[V] + 1.5[Cr] \}$$

(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

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

(2-8-195)

当  $[C] < 0.5\%$  时:

$$f[C] = 55[C] + 80[C]^2$$

当  $0.5\% \leq [C] < 1.0\%$  时:

$$f[C] = 44 - 21[C] + 52[C]^2$$

此公式来自《鉄と鋼》1969, Vol. 55。

$$T_{LL} = 1536.6 - \{ 88[C] + 25[S] + 30[P] + 8[Si] + 5[Mn] + 18[Ti] + 2[Mo] + 4[Ni] + 5[Cu] + 2[V] + 1.5[Cr] \}$$

(2-8-196)

$$T_{LL} = 1534 - \{ 80.5[C] + 33.5[S] + 33.5[P] + 17.8[Si] + 3.75[Mn] + 3.4[Cu] + 3.4[Al] + 3[Ni] \}$$

(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

$$T_{LL} = 1536.6 - \{ 90[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + 1.5[Cr] + 4[Ni] + 2[Mo] + 5[Cu] + 90[N] \}$$

(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

$$T_{LL} = 1536 - \{ 78[C] + 7.6[Si] + 4.9[Mn] + 34[P] + 30[S] + 5[Cu] + 3.1[Ni] + 1.3[Cr] + 3.6[Al] + 2[Mo] + 2[V] + 18[Ti] \}$$

(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

$$T_{LL} = 1536.6 - \{ 90[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + 3[Al] + 1.55[Cr] + 4[Ni] + 2[Mo] + 18[Ti] + 80[N] + 5[Cu] \}$$

(2-8-200a)

$$T_{LL} = 1536.6 - \{90[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + 5[Cu] + 4[Ni] + 1.55[Cr] + 2[Mo] + 18[Ti] + 80 \times 0.0001([N]_{\text{ppm}} - 100)\} \quad (2-8-200b)$$

(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

$$T_{LL} = 1539 - \{65[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + 5[Cu] + 4[Ni] + 2[Mo] + 2[V] + 1.5[Cr]\} \quad (2-8-201)$$

(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

$$T_{LL} = 1536 - \{65[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + 1.7[Al] + 5[Cu] + 1.5[Cr] + 4[Ni] + 2[V] + [W] + 1.7[Co] + 12.8[Zr] + 7[Nb] + 3[Ta] + 14[Ti] + 14[As] + 10[Sn]\}$$

当 $[C] = 0.2\% \sim 0.5\%$ 时

$$T_{LL} = 1536 - \{88[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + 1.7[Al] + 5[Cu] + 1.5[Cr] + 4[Ni] + 2[V]\}$$

当 $[C] > 0.5\%$ 时

$$T_{LL} = 1536 - \{9[C] + 65[C]^2 + 10[Si] + 6[Mn] + 30[P] + 30[S] + 3[Al] + 5[Cu] + 1.5[Cr] + 3.5[Ni] + 2[V]\} \quad (2-8-202)$$

(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

$$T_{LL} = 1536.6 - \{\text{Factor}[C] + 8[Si] + 5[Mn] + 30[P] + 25[S] + 2[Ti] + 2[Mo] + 5[Cu] + 4[Ni] + 1.5[Cr] + 5.1[Al]_{\text{sol}} + 90[N]\} \quad (2-8-203a)$$

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
$0.000 < [C] \leq 0.025$	90.0	$0.500 < [C] \leq 0.600$	86.1
$0.025 < [C] \leq 0.050$	82.0	$0.600 < [C] \leq 0.700$	84.2
$0.050 < [C] \leq 0.101$	86.0	$0.700 < [C] \leq 0.800$	83.2
$0.101 < [C] \leq 0.500$	88.4	$0.800 < [C] \leq 1.000$	82.3

(15) 商家D在另一钢铁公司提供的液相线温度计算方法

$$T_{LL} = 1536.6 - \text{Factor1}[C]\% - \text{Factor2}[\text{其他元素}]\% \quad (2-8-203b)$$

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
$\leq 0.025$	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



续表 2-8-5b

[C]/%	Factor1	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	—	17
		O	0 ~ 0.03	80
		N	0 ~ 0.03	90
		H	—	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:

$$T_{LL} = 1536.6 - 88.4 \times 0.20 - 8 \times 1.7 - 5 \times 0.40 - 30 \times 0.020 - 25 \times 0.015 \\ = 1514.6^{\circ}\text{C}$$

(16) 《连续铸钢》1994 年, 冶金工业出版社, 陈雷编, 第 74 页

$$T_{ss} = \begin{cases} 1534 - 410 [CE] & ([C] < 0.1\%) \\ 1493 & (0.1\% \leq [C] \leq 0.2\%) \\ 1534 - 184 [CE] & ([C] > 0.2\%) \end{cases} \quad (2-8-204)$$

$$CE = \{ 80.5 [C] + 33.5 [P] + 33.5 [S] + 17.8 [Si] + 3.75 [Mn] + 3.4 [Cu] + \\ 3.4 [Al] + 1.5 [Cr] + 3 [Ni] \} / 80.5$$

(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

$$T_{LL} = 1537 - \{ 65 [C] + 8 [Si] + 5 [Mn] + 30 [P] + 25 [S] + \\ 2.7 [Al] + 80 [O] + 90 [N] \} \quad (2-8-205)$$

$$T_{ss} = 1537 - \{ 175 [C] + 20 [Si] + 30 [Mn] + 280 [P] + \\ 575 [S] + 7.5 [Al] + 160 [O] \} \quad (2-8-206)$$

(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

$$T_{LL} = 1539 - \{ 65 [C] + 8 [Si] + 5 [Mn] + 30 [P] + 25 [S] + 5 [Cu] + \\ 90 [N] + 80 [O] + 4 [Ni] + 1.5 [Cr] \} \quad (2-8-207)$$

(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

$$T_{LL} = 1539 - \{ 70 [C] + 8 [Si] + 5 [Mn] + 30 [P] + 25 [S] + \\ 4 [Ni] + 2 [Mo] + 2 [V] \} \quad (2-8-208)$$

$$T_{ss} = 1534 - 2.29 \{ 80.5 [C] + 17.8 [Si] + 3.75 [Mn] + 33.5 [P] +$$

$$33.5[\text{S}] + 3[\text{N}] + 1.5[\text{Cr}] + 3.4[\text{Cu}] + 3.4[\text{Al}] \quad (2-8-209)$$

(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

$$T_{\text{LL}} = 1536.8 - \{88[\text{C}] + 5[\text{Mn}] + 8[\text{Si}] + 30[\text{P}] + 25[\text{S}] + 5[\text{Cr}] + 2[\text{Mo}] + 4[\text{Ni}] + 18[\text{Ti}] + 2[\text{V}]\} \quad (2-8-210)$$

(21) 《国外连铸新技术》译文集(二), 20 世纪 80 年代, 第 14 页

$$T_{\text{LL}} = 1535 - \{78[\text{C}] + 4.9[\text{Mn}] + 3.6[\text{Al}] + 7.6[\text{Si}]\} \quad (2-8-211)$$

(22) 《钢铁》2012 年, 第 10 期, 第 28 页

$$T_{\text{ss}} = 1536 - \{175[\text{C}] + 20[\text{Si}] + 30[\text{Mn}] + 280[\text{P}] + 575[\text{S}] + 6.5[\text{Cr}] + 4[\text{V}] + 4.75[\text{Ni}] + 7.5[\text{Al}] + 2.5[\text{W}] + 40[\text{Ti}] + 5[\text{Mo}] + 60[\text{Nb}] + 160[\text{O}]\} \quad (2-8-212)$$

(23) 《炼钢》2013 年, 第 5 期, 第 66 ~ 67 页

$$T_{\text{LL}} = 1539 - \{70[\text{C}] + 8[\text{Si}] + 5[\text{Mn}] + 30[\text{P}] + 25[\text{S}] + 4[\text{Ni}] + 1.5[\text{Cr}]\} \quad (2-8-213)$$

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

(24) 铸铁液相线温度及共晶温度

$$\text{液相线温度: } T_{\text{LL}} = 1650 - 124.5[\text{C}] - 26.7\{[\text{Si}] + 2.45[\text{P}]\} \quad (2-8-214)$$

$$\text{白口铸铁共晶温度: } T_{\text{sw}} = 1104 + 9.8[\text{C}] - 12.1\{[\text{Si}] + 2.45[\text{P}]\} \quad (2-8-215)$$

(25) 《连续铸钢生产技术》2011 年, 化学工业出版社, 杨吉春编著

$$T_{\text{ss}} = 1471 - \{25.2[\text{C}] + 12[\text{Si}] + 7.6[\text{Mn}] + 34[\text{P}] + 30[\text{S}] + 5[\text{Cu}] + 3.1[\text{Ni}] + 1.3[\text{Cr}] + 3.6[\text{Al}] + 2[\text{Mo}] + 2[\text{V}] + 18[\text{Ti}]\} \quad (2-8-216)$$

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”。

### 8.10.2 碳当量

碳当量为  $C_{\text{eq}}$ , 其中元素均为质量分数 (%)。

(1) 《袖珍世界钢号手册》2003 年, 机械工业出版社, 林慧国等编, 日本工业标准 (JIS) 及日本焊接工程师学会推荐的公式。用于工程与焊接结构钢, 低合金调质钢 ( $\sigma = 500 \sim 1000\text{MPa}$ )。通常  $[\text{C}] \leq 0.2\%$ ,  $[\text{Mn}] \leq 1.5\%$ ,  $[\text{Si}] \leq 0.55\%$ ,  $[\text{Cu}] = 0.5\%$ ,  $[\text{Ni}] \leq 2.5\%$ ,  $[\text{Cr}] \leq 1.25\%$ ,  $[\text{Mo}] \leq 0.7\%$ ,  $[\text{V}] \leq 0.1\%$ ,  $[\text{B}] \leq 0.006\%$ 。如桥梁钢、普通结构用碳钢、焊接结构用碳钢、碳锰钢、焊接结构用铸钢、焊接结构用离心铸铁管等。商家 A、商家 H、商家 L 按照下面公式计算碳当量

$$C_{\text{eq}}(\%) = w(\text{C}) + \frac{w(\text{Mn})}{6} + \frac{w(\text{Si})}{24} + \frac{w(\text{Ni})}{40} + \frac{w(\text{Cr})}{5} + \frac{w(\text{Mo})}{4} + \frac{w(\text{V})}{14} \quad (2-8-217)$$

焊接裂纹敏感指数, 日本伊藤 (ITO) 公式, 见《焊管》2004 年 3 月, 第 27 卷第 2 期, 第 71 ~ 72 页

$$P_{\text{cm}}(\%) = w(\text{C}) + \frac{w(\text{Mn})}{20} + \frac{w(\text{Si})}{30} + \frac{w(\text{Cu})}{20} + \frac{w(\text{Ni})}{60} + \frac{w(\text{Cr})}{20} + \frac{w(\text{Mo})}{15} + \frac{w(\text{V})}{10} + 5\text{B} \quad (2-8-218)$$

适应范围  $[\text{C}] = 0.07\% \sim 0.22\%$ ,  $[\text{Mn}] = 0.4\% \sim 1.4\%$ ,  $[\text{Si}] \leq 0.6\%$ ,  $[\text{Cu}] = 0.5\%$ ,  $[\text{Ni}] \leq 1.2\%$ ,  $[\text{Mo}] \leq 0.7\%$ ,  $[\text{V}] \leq 0.12\%$ ,  $[\text{Nb}] \leq 0.04\%$ ,  $[\text{Ti}] \leq 0.5\%$ ,  $[\text{B}] \leq 0.005\%$ 。当钢板的焊接裂纹敏感指数  $P_{\text{cm}} \leq 0.20\%$  时, 防止冷裂纹的预热温度不会