

钢的碳当量公式及其在焊接中的应用

曹良裕 魏战江

摘 要 介绍了目前世界各国常用的碳当量公式及其适用的钢种、强度级别、化学成分范围及应用判据。

关键词 碳当量 焊接裂纹 低合金高强度钢

钢的碳当量就是把钢中包括碳在内的对淬硬、冷裂纹及脆化等有影响的合金元素含量换算成碳的相当含量。通过对钢的碳当量和冷裂敏感指数的估算,可以初步衡量低合金高强度钢冷裂敏感性的高低,这对焊接工艺条件如预热、焊后热处理、线能量等的确定具有重要的指导作用。

50年代初,当时钢的强化主要采用碳锰,在预测钢的焊接性时,应用较广泛的碳当量公式主要有国际焊接学会(IIW)所推荐的公式和日本JIS标准规定的公式。

60年代以后,人们为改进钢的性能和焊接性,大力发展了低碳微量多合金之类的低合金高强度钢,同时又提出了许多新的碳当量计算公式。

由于各国所采用的试验方法和钢材的合金体系不尽相同,所以应搞清楚各国所使用的碳当量公式的来源、用途及应用范围等,以免应用不当。

1 国际焊接学会推荐的碳当量公式 CE(IIW):^[1]

$$CE(IIW)=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15 \quad (\%) \quad (1)$$

(式中的元素符号均表示该元素的质量分数,下同。)

该式主要适用于中、高强度的非调质低合金高强度钢($\sigma_b=500\sim 900$ MPa。当板厚小于20 mm, $CE(IIW)<0.40\%$ 时,钢材淬硬倾向不大,焊接性良好,不需预热; $CE(IIW)=0.40\%\sim 0.60\%$,特别当大于0.5%时,钢材易于淬硬,焊接前需预热。

2 日本推荐的碳当量公式

2.1 日本JIS和WES标准规定的碳当量公式:^[2]

$$Ceq(JIS)=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14 \quad (\%) \quad (2)$$

该式主要适用于低碳调质的低合金高强度钢($\sigma_b=500\sim 1000$ MPa)。

当板厚小于25 mm,手工焊线能量为17 kJ/cm时,确定的预热温度大致如下:

钢材 $\sigma_b=500$ MPa, $Ceq(JIS)\approx 0.46\%$, 不预热

$\sigma_b=600$ MPa, $Ceq(JIS)\approx 0.52\%$, 预热 75 °C

$\sigma_b=700 \text{ MPa}$, $C_{eq}(\text{JIS}) \approx 0.52\%$, 预热 100°C

$\sigma_b=800 \text{ MPa}$, $C_{eq}(\text{JIS}) \approx 0.62\%$, 预热 150°C

(1)、(2)式均适用于含碳量偏高的钢种($C \geq 0.18\%$), 即

$C \leq 0.20\%$; $\text{Si} \leq 0.55\%$; $\text{Mn} \leq 1.5\%$; $\text{Cu} \leq 0.50\%$; $\text{Ni} \leq 2.5\%$; $\text{Cr} \leq 1.25\%$; $\text{Mo} \leq 0.70\%$; $\text{V} \leq 0.1\%$; $\text{B} \leq 0.006\%$ 。

2.2 P_{cm} 公式

日本伊藤等人进行了大量试验后, 提出了冷裂敏感指数(P_{cm})的计算公式:

$$P_{cm} = C + \text{Si}/30 + (\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr})/20 + \text{Ni}/60 + \text{Mo}/15 + \text{V}/10 + 5\text{B} \quad (\%) \quad (3)$$

该式适用于 $C=0.07\% \sim 0.22\%$, $\sigma_b=400 \sim 1000 \text{ MPa}$ 的低合金高强度钢。

适用化学成分范围: $C \ 0.07\% \sim 0.22\%$; $\text{Si} \ 0 \sim 0.60\%$; $\text{Mn} \ 0.40\% \sim 1.40\%$; $\text{Cu} \ 0 \sim 0.50\%$; $\text{Ni} \ 0 \sim 1.20\%$; $\text{Cr} \ 0 \sim 1.20\%$; $\text{Mo} \ 0 \sim 0.70\%$; $\text{V} \ 0 \sim 0.12\%$; $\text{Nb} \ 0 \sim 0.04\%$; $\text{Ti} \ 0 \sim 0.05\%$; $\text{B} \ 0 \sim 0.005\%$ 。

伊藤等又根据 P_{cm} 、板厚 h 或拘束度(R), 建立了冷裂敏感性(P_w)、冷裂敏感指数(P_{cm})及防止冷裂所需要的预热温度的计算公式:

$$P_w = P_{cm} + [H] / 60 + h / 600 \quad (3-1)$$

$$\text{或 } P_w = P_{cm} + [H] / 60 + R / 40000 \quad (3-2)$$

式中, $[H]$ 熔敷金属中扩散氢含量($\text{ml}/100\text{g}$, 甘油法)

R 接缝拉伸拘束度($\text{kg}/\text{mm} \cdot \text{mm}$)

h 板厚(mm)

P_{cm} 冷裂敏感指数

当 $P_w > 0$ 时, 即有产生裂纹的可能性。

利用(3-1)、(3-2)两公式可以计算出无裂纹焊缝所需预热温度:

$$T_0 = 1440P_w - 392 \quad (^\circ\text{C})$$

(3-1)、(3-2)两式适用条件: 扩散氢含量 $[H]$ 为 $1.0 \sim 5.0 \text{ ml}/100\text{g}$; 板厚为 $19 \sim 50 \text{ mm}$; 线能量为 $17 \sim 30 \text{ kJ}/\text{cm}$; 化学成分范围同(3)式。

(3-1)、(3-2)两式不仅考虑了钢中化学成分的影响, 还考虑到钢板厚度或拘束度, 以及熔敷金属中含氢量, 利用这两式可以计算出防止冷裂纹所需的预热温度。

3.3 新日铁的碳当量公式

日本新日铁公司近年来为适应工程需要提出的新的碳当量公式: ^[5~6]

$$CE = C + A(C) \{ \text{Si}/24 + \text{Mn}/16 + \text{Cu}/15 + \text{Ni}/20 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V} + \text{Nb})/5 + 5\text{B} \} \quad (\%) \quad (4)$$

该 CE 公式是新日铁公司近年提出的，适用于 $w(C)$ 为 0.034%~0.254% 的钢种，是目前应用较广、精度较高的碳当量公式。

式中， $A(C)$ 碳的适用系数

$$A(C)=0.75+0.25\text{tgh}\left[20(C-0.12)\right]$$

$A(C)$ 与钢中含碳量的关系见表 1。

表 1 $A(C)$ 与钢中含碳量的关系

$w(C)/\%$	0	0.08	0.12	0.16	0.20	0.26
$A(C)$	0.50	0.584	0.754	0.916	0.98	0.99

日本新日铁碳当量 (CE) 公式、碳的适用系数 $A(C)$ 、国际焊接学会碳当量 CE (IIW) 公式与碳含量的关系见图 1、图 2。

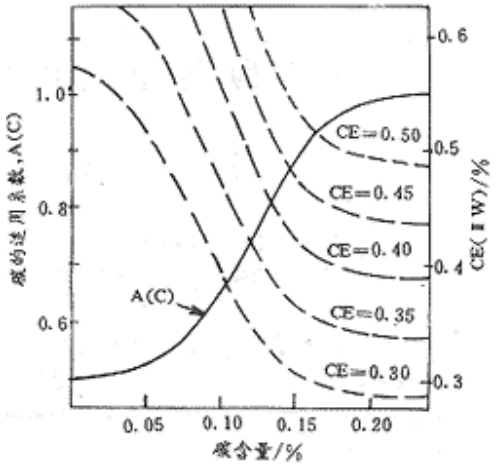


图 1 日本新日铁 CE、 $A(C)$ 与碳含量的关系

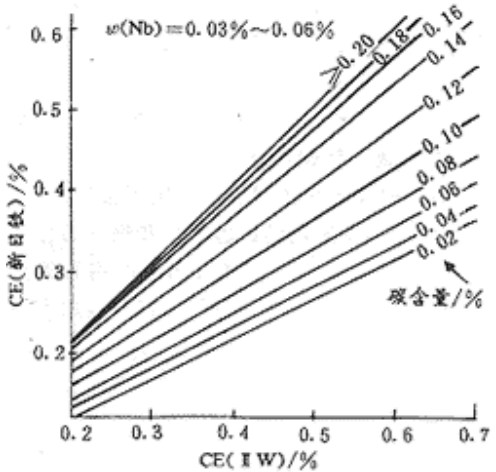


图 2 CE (IIW) 和新日铁 CE 的对应关系

3 美国推荐的碳当量公式

3.1 计算预热温度的碳当量公式

美国金属学会提出的用于计算预热温度的碳当量 CE 经验公式：^[3]

$$CE=C+Mn/6+Ni/15+Mo/4+Cr/4+Cu/13 \quad (\%) \quad (5)$$

当 CE<0.45%时，可不预热；当 CE 在 0.45%~0.60%之间时，预热 100~200℃；当 CE>0.60%时，预热 200~370℃。
该式适用于碳钢和低合金高强度钢。

3.2 评定焊接性的碳当量公式

美国金属学会提出的用于评定淬火碳钢和低合金钢的焊接性的碳当量公式：

$$CE=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Si+Ni+Cu)/15 \quad (\%) \quad (6)$$

该式考虑了钢中 Si 的影响，当 CE<0.35%时，通常不需预热和后热；当 CE 在 0.35%~0.55%之间时，一般需预热；当 CE>0.55%时，可能既要预热，又要后热。

3.3 美国焊接学会(AWS)提出的碳当量公式：^[4]

$$CE=C+Mn/6+Si/24+Ni/15+Cr/5+Mo/4+Cu/13+P/2 \quad (\%) \quad (7)$$

该式适用于碳钢和低合金钢，适用的化学成分范围如下：C<0.60%；Mn<1.6%；Ni<3.3%；Cr<1.0%；Mo<0.6%；Cu 0.50%~1.0%；P 0.05%~0.15%（当 Cu<0.50%和 P<0.05%时可不计）。

碳当量及所对应的板厚的焊接性和施焊条件分别见图 3 和表 2。

表 2 钢的焊接性与施焊条件

焊接性分类	普通酸性焊条	低氢焊条	消除应力	敲击处理
I 优良	不需预热	不需预热	不需	不需
II 较好	预热 40~100 ℃	-10 ℃以上不需预热	任意	任意
III尚好	预热 150 ℃	预热 40~100 ℃	希望	希望
IV难焊	预热 150~200 ℃	预热 100 ℃	必要	希望

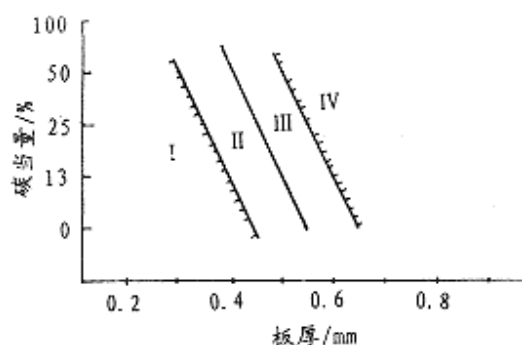


图 3 焊接性与板厚、碳当量的关系

由图 3 可查得 I、II、III、IV 类钢的最佳施焊条件。

3.4 美国海军的碳当量公式

美国海军船体结构钢用低合金高强度钢碳当量公式：^[6]

$$CE = C + (Mn + Si) / 6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Ni + Cu) / 15 \quad (\%) \quad (8)$$

碳当量、碳含量与钢的冷裂敏感性的关系见图 4。

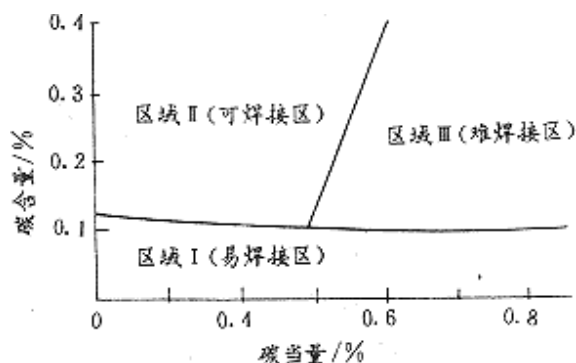


图 4 碳当量、含碳量与冷裂敏感性的关系

如图 4 所示，按含碳量和碳当量的不同，可把钢的焊接性划分为易焊区（I 区）、可焊区（II 区）和难焊区（III 区）3 个区域，含碳量为 0.10%~0.12% 以下的区域，为易焊区，含碳大于 0.10%~0.12%，且碳当量 $CE < 0.49\%$ 的区域，为可焊区，含碳量大于 0.10%~0.12%，碳当量 $CE > 0.49\%$ 的区域，为难焊区。

4 其它国家推荐的碳当量公式

4.1 前苏联提出的碳当量公式：^[4]

$$CE = C + Mn / 6 + Cr / 3 + V / 5 + Mo / 4 + Ni / 15 + Cu / 13 + P / 2 \quad (\%) \quad (9)$$

前苏联用(9)式计算碳当量，认为一般低合金高强度钢，当 $CE \leq 0.45\%$ 时，焊接厚度为 25 mm 以下的钢板可不预热。此外，他们还从钢的合金元素总含量和碳当量对钢的焊接性作了评定，结果见表 3。

表 3 合金元素含量与焊接性的关系

w (Mn+Si+Cr+Mo) /%	w (C) /%	焊接性
<1%	<0.25	优良
	0.25~0.35	较好
	0.35~0.45	尚可
	>0.45	不良
1%~3%	<0.20	优良
	0.20~0.30	较好
	0.30~0.40	尚可
	>0.40	不良
>0.30%	<0.18	优良
	0.18~0.28	较好
	0.28~0.38	尚可
	>0.38	不良

4.2 捷克采用的碳当量公式：

$$CE=C+Mn/6+Cr/5+Ni/15+Mo/4+Cu/13+P/2 \quad (\%) \qquad (10)$$

当碳当量 $\leq 0.35\%$ 且 $C \leq 0.22\%$ 时，碳钢和低合金高强度钢的焊接性良好。

4.3 英国的碳当量公式

英国迪尔登 (Dearden) 和奥尼尔 (O neill) 为评定热影响区的裂纹而提出的碳当量公式：^[4]

$$CE=C+Mn/6+Ni/15+Cr/5+Mo/4+V/5+Cu/13+Co/150 \quad (\%) \qquad (11)$$

该式适用于下列化学成分范围的钢材：

C 0.1%~0.30%；Mn 0.26%~1.56%；Ni 0~5.38%；Cr 0~1.73%；Mo 0~0.64%；Cu 0~0.65%；V \leq 0.14%；Co 2.3%.

为了获得良好的焊接热影响区，应将碳当量限制在 0.45% 内。

一般可用碳当量预测某种钢种的焊接性，表 4 给出了碳当量公式中合金元素及系数的关系，通过碳当量的计算可以看出，当碳当量增加时，钢材的淬硬倾向增大，硬度增加，这时钢材焊接热影响区就容易产生冷裂纹。

表 4 碳当量公式中合金元素对应的系数

碳当量公式	合金元素											
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Cu	B	P	Co	Nb
CE (IIW)	1	1/6	—	1/5	1/15	1/5	1/5	1/15	—	—	—	—
Ceq (JIS、WES)	1	1/6	1/24	1/5	1/40	1/4	1/14	—	—	—	—	
CE (AWS)	1	1/6	—	1/4	1/15	1/4	—	1/13	—	1/2	—	—
CE (美, 预热)	1	1/6	—	1/4	1/15	1/4	—	1/13	—	—	—	—
CE (美, 焊接性)	1	1/6	1/15	1/5	1/15	1/5	1/5	1/15	—	—	—	—
CE (英)	1	1/6	—	1/5	1/15	1/4	1/5	1/13	—	—	1/150	—
CE (俄)	1	1/6	—	1/3	1/15	1/4	1/5	1/13	—	1/2	—	—
CE (捷)	1	1/6	—	1/5	1/15	1/4	—	1/13	—	1/2	—	—
CE (美, 海军)	1	1/6	1/6	1/5	1/15	1/5	1/5	1/15	—	—	—	—
CE (新日铁)	1	1/16*	1/24*	1/5*	1/20*	1/5*	1/5*	1/15*	5*	—	—	1/5*

注：*表示乘以 A(C)。

用上述的碳当量公式评定钢的焊接性时，大致有以下几种类型：第Ⅰ类只考虑到钢中化学成分的影响，根据碳当量数值的大小，确定是否需要预热或预热温度范围；第Ⅱ类除考虑到化学成分外，还考虑了熔敷金属扩散氢含量、试板的厚度或拘束度等因素，然后再计算防止开裂的预热温度；第Ⅲ类是根据碳当量和含碳量的大小把钢的焊接性划分为可焊、易焊和难焊 3 个区域，这 3 个区分别有不同的施焊要求，如对预热等的要求也不同。

曹良裕：男，59 岁，高级工程师，主要从事焊接材料与工艺的研究。

作者单位：洛阳船舶材料研究所 洛阳 471039

参考文献

- 1 斯重遥等. 焊接手册 (第二卷). 北京：机械工业出版社，1992. 59~65
- 2 铃木春义. 钢材的焊接裂纹. 梁桂芳译. 北京：机械工业出版社，1981
- 3 金属手册 (第六卷). 第九版. 北京：机械工业出版社，1994
- 4 吴世初. 金属可焊试验方法. 上海：上海科技文献出版社，1982. 327~328
- 5 付积和, 孙玉林. 焊接数据资料手册. 北京：机械工业出版社，1994. 12~14
- 6 Yurioka N, et al. Welding Journal, 1983, 62(6):1475~1535

收稿日期：1998-10-19