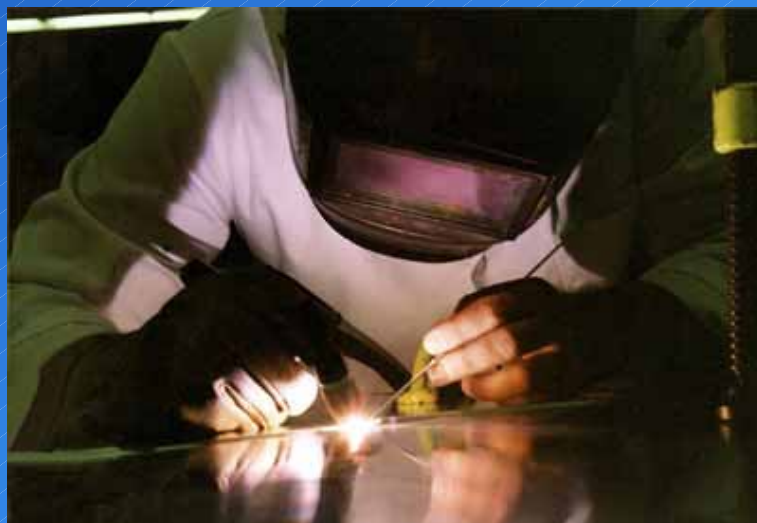


《焊接过程建模基础》

焊接电弧物理 Welding Arc Physics

林三宝 博士
2006年2月20日



金属和保护气体的物理性能

- 电阻率：
 - GMAW和SMAW中焊条(丝)的预热；
 - 随着温度的升高而线性增加，不同金属增加的斜率不同；
- 热导率(Thermal conductivity)
 - 随着温度的升高，热导率下降
 - 纯金属的热导率最高，添加合金元素后热导率下降
- 膨胀系数
 - 分析焊接结构的焊接变形特别重要
 - 随着温度的变化而变化

金属和保护气体的物理性能

表2.5 部分金属的物理性能 (20℃)

金属	熔化温度 ^① (℃)	电阻率 ($10^{-8}\Omega\cdot m$)	热导率 ($W\cdot cm^{-1}\cdot K^{-1}$)	膨胀系数 ($10^{-6}K^{-1}$)	密度 ($g\cdot cm^{-3}$)
铝					
纯度99.9+%	660.37	2.65	2.37	23.1	2.70
锻造合金	630~650	2.8~6.7	1.2~2.1	22~23	2.6~2.8
铸造合金	500~650	3.0~7.0	1.2~1.8	22~23	2.6~3.0
钴					
纯度99.9+%	1494	4.3	1.01	13.0	8.86
Co-Cr-W合金	1320~1370	8.5~17.6	0.12~0.25	11.2	8.0~9.0
铜					
纯度99.9+%	1084.4	1.68	4.01	16.5	8.93
90Cu, 10Al (铝青铜)	1050~1070	12~14	1.60	17	8.34
90Cu, 10Zn (工业青铜)	1050~1070	3.92	1.92	18	8.92
铁					
纯度99.9+%	1538	9.69	0.808	11.8	7.87
低合金钢	1430~1500	10~20	0.32~0.66	11.4	7.8~8.0
马氏体不锈钢	1480~1540	54~69	0.25	9~10	7.6~7.8
奥氏体不锈钢	1370~1450	71~79	0.16	14~15	7.8~8.0

金属和保护气体的物理性能

金属	熔化温度 ^① (°C)	电阻率 ($10^{-8}\Omega\text{m}$)	热导率 ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	膨胀系数 (10^{-6}K^{-1})	密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
镁					
纯度99.9+%	649	4.30	1.58	24.8	1.74
锻造合金	500~650	4.5~12.5	0.6~1.4	25~28	1.8
铸造合金	450~660	4.5~18	0.46~1.4	25~28	1.8~1.9
钨	2021	5.09	1.38	4.8	10.24
镍					
99.95%Ni+Co	1455	7.47	0.915	13.4	8.9
60Ni, 33Cu, 6.5Fe	1300~1350	48	0.26	13	8.4
Ni-Cr-Mo-铁合金(哈氏合金系列)	1120~1350	110~140	0.10~0.29	11~12	7.8~9.1
钼	3020	12.8	0.575	6.3	16.6
钛合金	1530~1670	43~230	0.024~0.24	7~9	4.4~4.8
钙	3387	5.42	1.76	4.5	19.3

① 根据1968年国际实用温标测定：熔化温度可用单点或温度区间表示。

注：表2.5是普陀大学(Purdue Univ.)热物理性能研究中心为美国国家标准局的标准资料办公室制定的。

金属和保护气体的物理性能

• 金属氧化物

- 合金元素通过电弧过渡的难易程度，以及焊缝金属中易否性能氧化物夹杂，直接随着合金元素的氧化速度以及焊接过程中形成的金属氧化物的高温稳定性而变化

表2.9 金属氧化物

氧化速度 (1号最快, 而9号最慢)	相对稳定性 (1号最稳定, 而10号最不稳定)
1. 铝	1. CaO
2. 镁	2. MgO
3. 钴和钛	3. Al ₂ O ₃
4. 钨	4. TiO ₂
5. 锰	5. SiO ₂
6. 钒	6. V ₂ O ₅
7. 钼	7. MnO
8. 铁	8. Cr ₂ O ₃
9. 铬	9. WO ₃ 或MoO ₃
	10. Fe ₂ O ₃

金属和保护气体的物理性能

• 比热

- 单位重量的材料提高1度所需要的热量($J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
- 作为物体或者气体吸收或者存储热量的尺度

表2.11 几种元素的比热

元 素	符 号	原 子 量	温 度① (°C)	比 热 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
铝	Al	26.98154	20	0.898
			100	0.937
			660.37②	1.250
碳 (气)	C	12.011	20	0.69④
			500	1.731
			1000	1.731
			2000	1.756
			3000	1.822
钴	Co	58.9332	20	0.410
			417	0.524 (α)
			417	0.517 (β)
			1122③	0.986
			1494②	0.640
铬	Cr	51.996	20	0.483
			1000	0.705
			1500	0.870
			1860②	0.974

金属和保护气体的物理性能

铌	Nb	92.9054	20 500 1000 2000 2471 ^②	0.273 0.290 0.313 0.358 0.381
铁	Fe	55.847	20 ^③ 769 911 911 1394 1394 1538 ^②	0.444 1.498 0.742 (α) 0.608 (γ) 0.679 (γ) 0.737 (δ) 0.763
镁	Mg	24.305	20 100 500 649 ^②	1.019 1.102 1.253 1.327
钛	Ti	47.90	20 883 883 1673 ^②	0.519 0.707 (α) 0.611 (β) 0.782
钨	W	183.85	20 1000 2000 3387	0.135 ^⑤ 0.479 0.537 0.617

焊接传热

- 为了控制焊接冶金过程，必须确定焊缝及其临近部位的传热状态
- 焊接热影响区峰值温度的分布
- 焊接和热影响区的冷却速度
- 焊缝金属的凝固速度
- 焊接热循环.....

焊接传热

峰值温度

- 阐明焊缝附近固态金属中某一点的金属学转变,需要了解该点的峰值温度或最高温度

对于单道焊,如薄板全熔透对接焊,近缝区母材的峰值温度分布:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13\rho CtY}{H_n} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad H_n = f_1 UI/v$$

- 用途：
 - 确定热影响区附近特定部位的峰值温度
 - 估算热影响区宽度
 - 表明预热对热影响区宽度的影响

焊接传热

例如在钢板单道全熔透焊接，采用下列参数：

$U=20V$, $\rho C=0.0044 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$, $I=200A$, $t=5\text{mm}$,
 $V=5\text{mm/s}$, $f_1=0.9$, $T_0=2\text{ }^\circ\text{C}$, $H_n=720 \text{ J/mm}$,
 $T_m=1510\text{ }^\circ\text{C}$

$Y=1.5\text{mm}$ 处： $T_p=1184\text{ }^\circ\text{C}$

$Y=3\text{mm}$ 处： $T_p=976\text{ }^\circ\text{C}$

峰值温度随着离开焊缝的距离增加而降低

焊接传热

热影响区宽度的计算

- 用具体的峰值温度来明确热影响区HAZ的外端边界，而峰值温度又是和组织或者性能某些特征变化相联系。
- 大多数碳钢或者低合金钢有很清楚的浸蚀边界，相当于730 °C的峰值温度，因此需要求解在 $T_p=730\text{ °C}$ 时的 $Y=5.9\text{mm}$
- 若是淬火钢和回火钢，经过430度的回火，可以认为这个变质区就是热影响区。此时计算 $Y=14.2\text{mm}$

焊接传热

- 如果工件经过预热，其热影响区的宽度要增大，例如预热温度为**200度**，则 **$Y=28.4\text{mm}$** 。
- **HAZ宽度同线能量成正比**。前例 **$H_n=1080\text{J/mm}$** 的时候， **$Y=21.3\text{mm}$** ；
- 该公式适合穿透全板厚的单道焊接或者切割过程，无论其板厚大小。
- 也适用于少于**4条**焊道完成的完全熔透的电弧焊，应针对每一条焊道应用该公式，但是可以把层间温度作为 **T_0** 的准确值代入峰值温度的公式。

焊接传热

冷却速度

- 对钢的组织、性能有影响，对铝没什么作用。用来确定钢板的预热温度和临界冷却速度

厚板的冷却速度

$$R = \frac{2\pi k(T_c - T_0)^2}{H_n}$$

薄板的冷却速度

$$R = 2\pi k \rho C \left(\frac{t}{H_n}\right)^2 (T_c - T_0)^3$$

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_n}}$$

相对板厚，0.75分界

焊接传热

凝固速度

- 焊缝金属的凝固速度对其金相组织、性能、对热处理的反应以及致密度有深远的影响。
- 取决于线能量

$$S_t = \frac{LHn}{2\pi k \rho C (T_m - T_0)^2}$$

- **St:** 焊缝金属某一点从凝固开始到结束的时间间隔
- 是线能量和初始温度的函数
- 如在钢板上堆焊一条焊道，线能量为**800J/mm**，初始温度为**25度**，则**St=0.94s**
- 与铸造过程不同

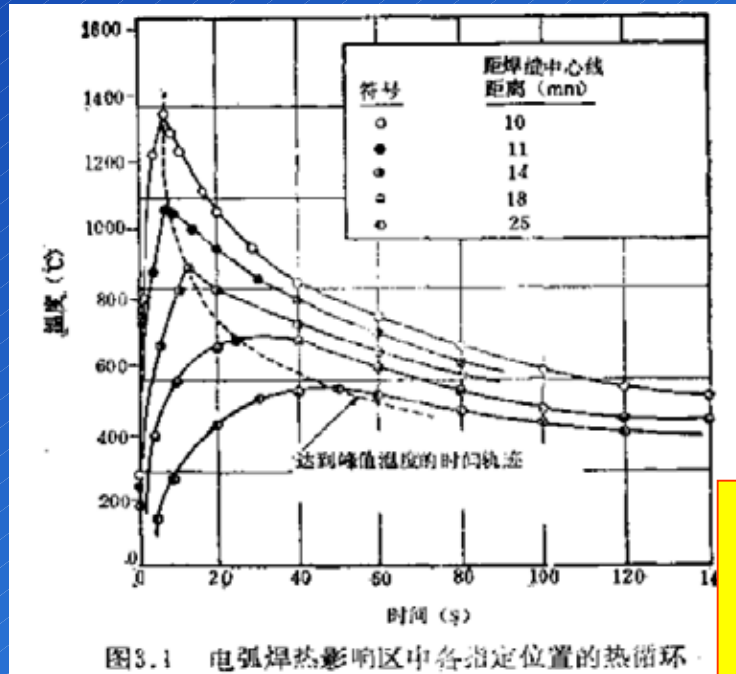
枝晶间距的影响

- 凝固时间与线能量成正比，**St**直接影响焊缝的金属组织。大多数技术上重要的合金是呈树枝状凝固的，焊缝金属的重要组织特征是枝晶间距。
- 与凝固时间的平方根成正比。
- 较大的线能量将产生较粗大的组织
- 较小的枝晶间距对焊缝的强度、塑性和韧性都有较好的影响。

焊接传热

- 线能量影响
 - 峰值温度的分布
 - 冷却速度
 - 凝固时间
 - 焊道尺寸和轮廓
- 并不是决定焊缝质量的唯一因素，却是影响热作用的独特决定性因素。
- 小的线能量在冶金上有明显的好处
- 大焊道熔敷率和生产率高，焊接一些特殊的材料如淬火钢等需要。

焊接热循环

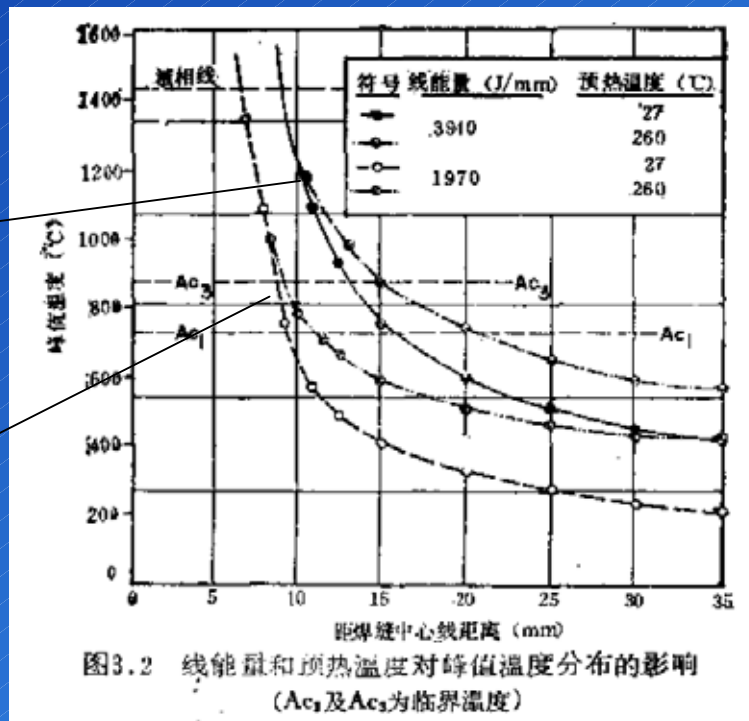


初始温度：27度

线能量：3940J/mm

- 峰值温度随着离焊缝中心线距离的增大而迅速下降；
- 达到峰值温度所需的时间随着离焊缝中心线距离的增大而增大
- 加热速度和冷却速度都随着离焊缝中心线距离的增大而下降

焊接热循环—线能量和预热温度的影响



3940J/mm

1970J/mm

- 降低线能量或降低预热温度都会使焊接热影响区的峰值温度分布变得陡峭；
- 提高预热温度，由焊缝中心线到曾处于某一具体峰值温度的那一点之间距离增大，增大程度同峰值温度的高低成反比
- 提高线能量，焊缝中心线到曾处于某一具体峰值温度的那一点之间距离增大

焊接热循环—线能量和预热温度的影响

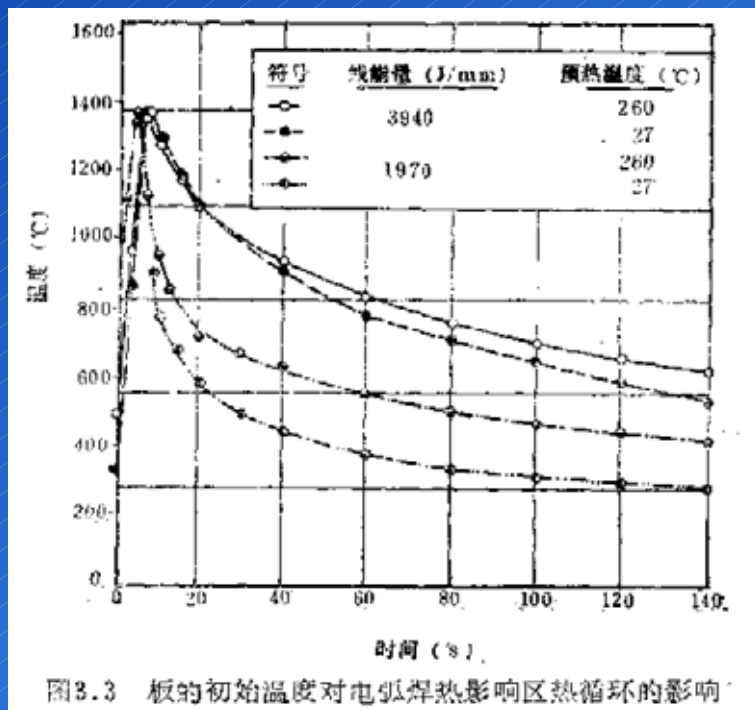
表3.2 温度和离中心线距离的关系

焊接线能量 (J/mm)	预热温度 (°C)	焊缝中心线到指定点距离 (该点加热到下列温度)		
		1480°C (液相线)	870°C (Ac ₃)	705°C (Ac ₁)
3940	27	9.4	13.2	15.5
3940	260	9.4	15.2	20.6
1970	27	7.4	9.1	9.4
1970	260	7.4	9.4	10.7

表3.3 高温停留时间和冷却速度

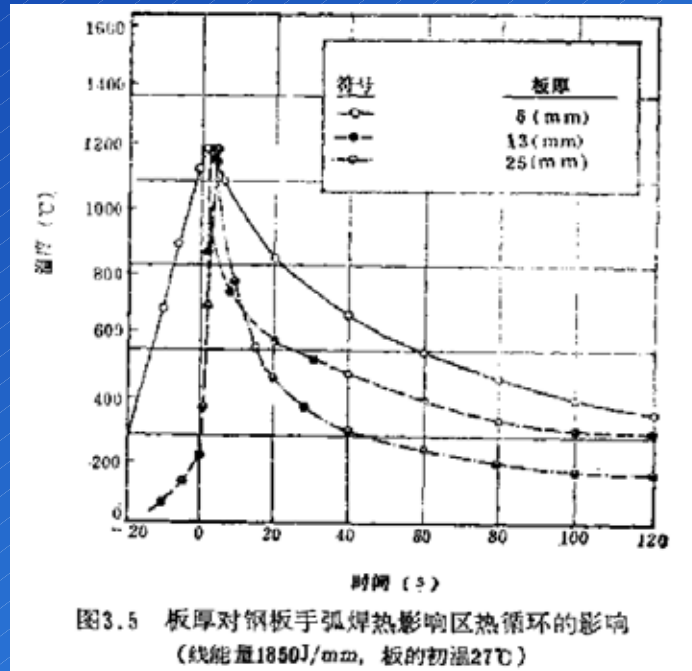
焊接线能量 (J/mm)	预热温度 (°C)	峰值温度 (°C)	1095°C以上 停留时间 (s)	冷却速度 (在650°C) (°C/s)
3940	27	1365	16.5	4.4
3940	260	1365	17	1.4
1970	27	1365	5	14
1970	260	1365	5	4.4

焊接热循环—线能量和预热温度的影响



- 预热温度一定时，增加线能量会增加在峰值温度附近的停留时间，而降低冷却速度
- 线能量一定，提高预热温度会降低冷却速度，但不会显著影响在峰值温度附近停留的时间。

焊接热循环—板厚的影响



- 冷却速度随板厚而增大
- 高温停留时间随板厚而减小

焊接热循环—其它热学特性的影响

- 材料的热导率越小，峰值温度的分布越陡；
- 热导率越大，对于一定峰值温度的热循环来讲，冷却速度就越大；
- 热导率越大，对于一定峰值温度的热循环来讲，高温停留时间越短