

《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



Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

概述

授课内容

- 焊接热源强度
- 电弧等离子体
- 电弧的导电机制
- 电弧的温度
- 电弧力
- 母材的熔化和焊缝成形
- 焊接传热

Stresses theoretical knowledge of the underlying physics that govern welding arc processes

Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

参考书籍

- 日本《焊接电弧现象》
- 杨春利、林三宝编著，《电弧焊基础》
- 美国《焊接手册》第一卷
- Prof. Thomas Eagar, MIT <Welding and Joining Process>
<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Materials-Science-and-Engineering/3-37Welding-and-Joining-ProcessesFall2002/coursehome/index.htm>

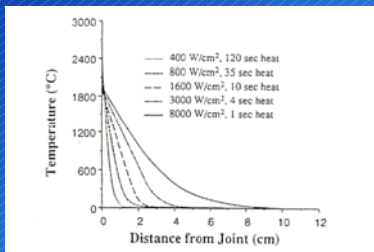
Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

焊接热源/heat intensity

- 在熔化焊(fusion welding)中焊接热源用于熔化被焊金属
- 热源强度与熔化焊过程中的温度分布、熔深、HAZ等有关，是关键的因素
- 在低于 100 W/cm^2 的功率密度(power density)下，金属不可能被熔化，只是加热和传导
- 至少需要 $500 - 1000 \text{ w/cm}^2$ 的功率密度才能熔化金属
- 如果功率密度过高，大约 10^7 w/cm^2 ，工件在导热之前直接汽化，形成气孔和切割，例如激光束(Laser Beam)和电子束(Electron Beam)

Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

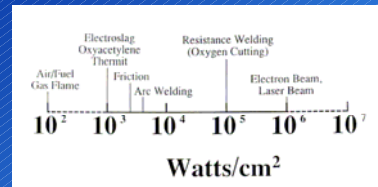
焊接热源/heat intensity



厚板经过一定加热时间后的温度分布(室温20度)

Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

焊接热源/heat intensity



熔化焊接中各种方法常用的功率密度

- 任何热源都在此坐标上

Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

焊接热源/heat intensity

功率密度的增加将会:

- 提高热效率
- 降低HAZ的宽度
- 降低作用时间(Interaction time): 10s ~ 10³s
- 提高焊接速度: 0.1cm/s ~ 100cm/s
- 增加了对焊接自动化的需要
- 增加设备成本
- 增加熔透深度
- 增加生产过程中额外的要求

焊接热源/heat intensity

提高热效率

- 功率密度低: 2-10% 热效率
- 电弧焊的热效率为 30-70% (图中所示)
- 功率密度高 (10⁶ watts/cm²): 99% 热效率

焊接热源/heat intensity

热效率(电弧焊):

- 线能量: 单位长度从移动热源输入的能量, J/mm

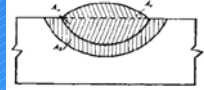
$$H = UI/v, H_n = f_1 H$$

- 比热量: 熔化单位体积的金属所需要的热量

$$q = \frac{(T_m + 273)^2}{300000} (J/mm^3)$$

- 熔化效率: 有效线能量中用于熔化金属能量的百分率

$$f_2 = \frac{qA_w}{H_n} = \frac{qA_w v}{f_1 P} = \frac{qA_w v}{f_1 UI}$$



焊接热源/heat intensity

- 熔化效率同焊接方法、被焊材料、接头形状、板厚等都有关系:

- 氧乙炔焊接 铝合金.....
- Laser: 99%
- Arc: 40%

常用金属的热扩散(导热)系数

Table 1 Thermal diffusivities of common elements from 20 to 100 °C (68 to 212 °F)

Element	Density		Heat capacity		Thermal conductivity		Thermal diffusivity cm ² /s
	g/cm ³	lb/in. ³	J/kg K	cal/g °C	W/m K	cal/in. ² °C	
Aluminum	2.699	0.098	900	0.213	221	0.53	91
Antimony	6.65	0.236	205	0.049	19	0.046	14
ArylBlau	1.848	0.067	1880	0.45	147	0.35	42
Bismuth	9.80	0.34	122	0.0294	8	0.020	7
Caststeel	8.45	0.313	520	0.125	52	0.125	15
Carbon	2.25	0.081	495	0.119	24	0.059	15
Cerium	8.85	0.320	414	0.099	49	0.145	19
Copper	8.96	0.324	385	0.092	39	0.103	14
Gold	19.32	0.688	131	0.0312	297	0.71	118
Germanium	5.323	0.192	386	0.093	39	0.14	26
Gold	19.32	0.688	131	0.0312	297	0.71	118
Indium	13.09	0.472	147	0.0351	22	0.055	12
Indium	7.31	0.264	239	0.057	24	0.057	14
Iridium	22.5	0.813	129	0.0307	59	0.14	20
Iron	7.87	0.284	460	0.11	75	0.18	21
Lead	11.36	0.420	129	0.0309	35	0.085	26
Magnesium	1.74	0.063	1025	0.245	154	0.385	86
Mercury	10.22	0.369	276	0.066	142	0.34	50
Nickel	8.905	0.322	485	0.116	92	0.22	27.5
Niobium	8.57	0.310	268	0.064	54	0.129	21.6
Polonium	12.05	0.434	244	0.0584	70	0.168	24
Platinum	21.45	0.775	131	0.0314	69	0.165	24.5
Polonium	19.84	0.717	138	0.033	8	0.020	5.8
Rhodium	12.44	0.449	247	0.059	88	0.21	29
Silver	10.49	0.379	234	0.0559	418	1.0	170
Sodium	9.702	0.345	225	0.054	144	0.35	112
Tantalum	16.6	0.600	142	0.034	54	0.139	23
Tin	7.26	0.264	226	0.054	65	0.159	26
Tungsten	4.507	0.163	519	0.124	22	0.052	9
Tungsten	19.3	0.697	139	0.033	166	0.377	62
Vanadium	19.07	0.689	243	0.0279	30	0.071	13
Zinc	6.1	0.22	408	0.119	71	0.074	10
Zirconium	6.113	0.220	283	0.0674	115	0.27	41
Zirconium	6.409	0.234	280	0.067	21	0.050	12

焊接热源/heat intensity

- 焊缝金属同线能量之间的关系:

$$A_w = f_2 \frac{H_n}{q} = \frac{f_1 f_2 H}{q}$$

- 假设在钢板上堆焊一个焊道, U=20V, I=200A, v=5mm/s, f1=0.9, f2=0.3, q=10J/mm³

$$A_w = \frac{0.9 \times 0.3 \times 20 \times 200}{5 \times 10} = 21.6 \text{ mm}^2$$

焊接热源/heat intensity

Table 2 Thermal diffusivities of common alloys from 20 to 100 °C (68 to 212 °F)

Alloys	Density		Heat capacity		Thermal conductivity		Thermal diffusivity cm ² /s
	g/cm ³	lb/in. ³	J/kg K	cal/g °C	W/m K	cal/in. ² °C	
Aluminum alloys							
1100	2.71	0.098	963	0.23	212	0.53	85
2014	2.80	0.101	963	0.23	195	0.46	71
3002	2.68	0.097	963	0.23	138	0.33	54
6061	2.70	0.098	963	0.23	172	0.41	66
7075	2.80	0.101	963	0.23	121	0.29	45
Copper alloys							
Commercial brass	8.80	0.318	377	0.09	188	0.45	57
Cartridge brass	8.23	0.308	377	0.09	121	0.29	38
Naval brass	8.41	0.303	377	0.09	117	0.28	37
Beryllium copper	8.23	0.297	419	0.11	84	0.20	24
95% Aluminum/5% Cu	7.58	0.273	435	0.104	60	0.144	18
Magnesium alloys							
AZ-31	1.78	0.064	1090	0.25	84	0.20	43
AZ-91	1.83	0.066	1035	0.24	84	0.20	46
ZW-1	1.8	0.065	1035	0.24	134	0.32	74
AZ-3	1.84	0.066	993	0.23	113	0.27	64
Nickel alloys							
Type 301	7.9	0.285	502	0.12	15	0.039	4.1
Type 304	7.9	0.285	502	0.12	15.1	0.036	3.8
Type 316	8.0	0.289	502	0.12	15.3	0.037	3.9
Type 410	7.7	0.278	460	0.11	24	0.057	6.7
Type 430	7.7	0.278	460	0.11	26	0.062	7.3
Type 303	7.7	0.278	460	0.11	37	0.098	10
Nickel-base alloys							
Ni-based 80A	8.19	0.296	460	0.11	11	0.027	3.0
Inconel 600	8.42	0.304	460	0.11	15	0.035	3.8
Weld 600	8.63	0.319	419	0.10	22	0.052	5.8
Steel alloys							
A3	0.160	0.01	1.146	5.9	0.044	2.1	0.021
A6	0.161	0.01	460	0.11	6.3	0.045	3.1

合金的热扩散(导热)系数

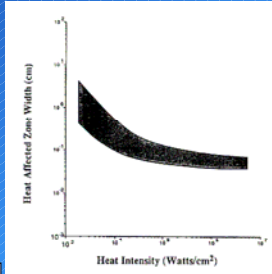
焊接热源/heat intensity

降低热影响区HAZ(Heat Affected Zone)宽度

- 功率密度低, 热传导作用大, 热影响区宽
- 反之.....

- < 10⁴ w/cm², 与熔化所需时间有关,
- > 10⁴ w/cm²时, HAZ宽度与时间无关, 在冷却阶段增加, 正比于熔化区宽度

热影响区宽度同功率密度的关系



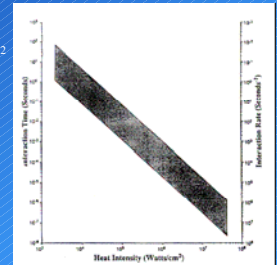
焊接热源/heat intensity

降低熔化金属所需时间(Interaction time)

- 使钢表面熔化所需时间

$$t_m = \left[\frac{5000}{H.I.} \right]^2$$

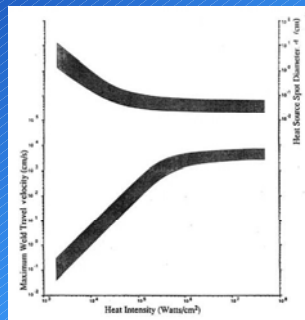
Heat intensity



焊接热源/heat intensity

提高焊接速度

- 从0.1cm/s - 100cm/s
- 人的反应时间约0.1s
- 氧乙炔焊接开始练习
- 弧焊需要较多的培训和实践
- 激光、电子束必须自动化焊接, 成本高



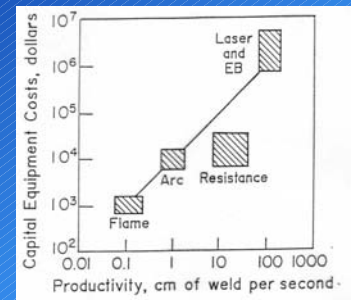
焊接热源/heat intensity

增加焊接成本

- 汽车: 电阻焊
- 航天航空: 电子束

提高深宽比

- 0.1-10



气体放电现象

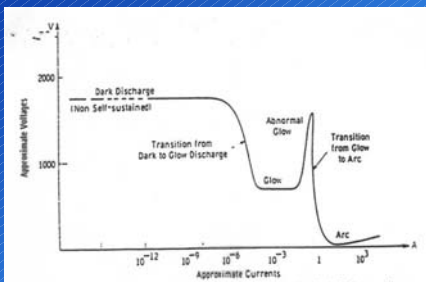


Fig. 1. Approximate voltage vs. current characteristics of the electrical discharge without tips or edges.

气体放电现象

- 气体放电分为非自持放电和自持放电
- 电弧的本质是气体放电, 气体放电是指气体电离
- 为了产生电弧, 必须使气体分子或原子电离成阳离子和电子。气体一旦发生电离, 在阴极和阳极的电场作用下, 电子向阳极运动, 阳离子向阴极运动, 形成电流。
- 电弧具备所有放电形态中电压最低、电流最大、温度最高的特征(0.1A到1×10⁴A)

电弧中带电粒子的来源

- 电离气体具有与通常状态下的气体所不同的性质，被称作等离子体(Plasma)
- Plasma为物质的第4种存在状态
- Plasma由几乎数量相等的电子和离子以及中性粒子组成
- 电源通过电极（阴极）向电弧区发射电子
- 气隙中的中性粒子被电离产生电子和离子



气体的电离

电离(Ionize)

- 中性粒子存在于电弧空间（气隙中），当处于高能量状态时，其电子轨道上的电子脱离约束，分离成电子和离子

激励(Excite)

- 原子中的电子接受外部能量，从较低能级跃迁到较高能级

以氢原子为例，电子围绕原子核做圆周运动，根据离心力和静电力相平衡的原则，以及量子理论，有：

$$\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad 2\pi r \cdot mv = nh$$

H: 普朗克常数

气体的电离

- 电子的位能

$$W_p = -\frac{e^2}{r}$$

- 电子的动能

$$W_k = \frac{e^2}{2r}$$

- 总能量

$$W = W_k + W_p = \frac{e^2}{2r} - \frac{e^2}{r} = -\frac{e^2}{2r}$$

气体的电离

- 激励能:

$$W_{ex} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

- 电离能:

$$W_i = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2}, n = \infty$$

- 电离电压和激励电压

- 对于氢原子 $U_i = 13.6V$

$$U_i = \frac{2\pi^2 m e^3}{h^2}$$

气体的电离

原子	电离电压 U _i (V)	原子	电离电压 U _i (V)	原子	电离电压 U _i (V)
H	13.60	Al	5.99	Cr	6.77
He	24.59	Si	8.15	Mn	7.44
Li	5.39	P	10.49	Fe	7.87
C	11.26	S	10.36	Co	7.86
N	14.53	Cl	12.97	Ni	7.64
O	13.62	Ar	15.76	Cu	7.73
F	17.42	K	4.34	Zn	9.39
Ne	21.56	Ca	6.11	Ge	7.90
Na	5.14	Ti	6.82	Se	9.75
Mg	7.65	V	6.74	Kr	14.00

原子的电离电压，惰性气体的U_i高，碱性金属的U_i低

气体的电离

表1.2.3 多原子气体的电离电压和最小激发电压(V) (J.D. 拜耳格^{①②})

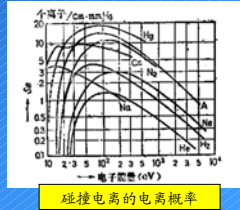
气体	激发电压	电离电压
H ₂	7.0	15.4
N ₂	8.3	16.6
O ₂	7.9	16.5
CO	8.9	16.1
CO ₂	8.0	16.0
NO	8.4	9.5
H ₂ O	7.8	12.0

表1.2.4 多原子气体的电离电压 (W. 芬克尔伯格^① Finkelberg, W), W. 罗巴赫^② (Hambach, W) (P^②)

元素	I	II	III
2 He	24.6	54.4	—
6 C	11.3	24.4	47.3
7 N	14.5	23.6	47.4
8 O	13.6	32.2	54.9
18 Ar	16.8	27.8	49.9
19 K	4.8	31.6	45.3
20 Ca	6.1	11.9	51.5
28 Fe	7.9	16.2	56.4

电离的种类

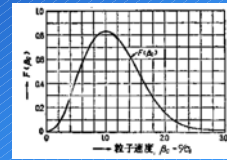
- 碰撞电离(Ionization by collision)
 - 电子具有大于Wi的能量, 因其质量小, 可能与中性粒子发生非弹性碰撞, 传递能量, 使中性粒子电离或者激励
 - 但并不是所有具有大于电离能的电子都能够使中性粒子电离, 存在电离概率。电离电压越高的气体, 电离概率越低;
- 光电离(Photo-Ionization)
 - 光子具有能量
 - 当能量大于电离能的时候, 可能使中性粒子电离



电离的种类

- 热电离(Thermal Ionization)
 - 在高温气体状态下, 一部分粒子由于碰撞而发生的电离现象
 - 粒子的运动速度是温度的函数, C为方根速度

$$C = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$



$$C_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} C$$

电离的种类

- 场致电离
 - 电场的作用下, 电子加速, 与其他粒子发生碰撞而使粒子电离
 - 电子平均自由程(Mean Free Path)

$$\lambda = \frac{1}{\pi r^2 n}$$

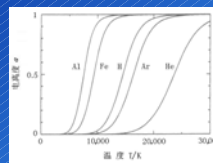
表1-1-2 标准状态 (0K, 1.013 × 10^5 Pa) 下的平均自由程(λ)和碰撞数 (Z) (D.R. Gahan) 单位

气体	λ (cm)	Z (1/cm)	碰撞数 (1/cm)
空气	8.8	113	39
Ar	19.6	270	49
Cl ₂	4.87	196	71
CO	9.27	108	39
CO ₂	4.39	249	44
H ₂	18.3	28	3
He	28.3	89	4
H ₂ O	7.22	168	16
H ₂	3.39	—	262
N ₂	9.44	119	39
O ₂	6.45	137	39

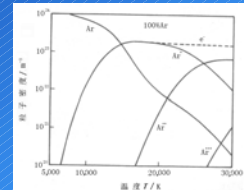
气体的电离—电离度

- 萨哈公式

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = \frac{2z_+}{z_-} \left[\frac{2\pi m_e}{h^2} \right]^{3/2} \frac{(kT)^{5/2}}{p} \exp\left[-\frac{eU_+}{kT}\right]$$



等离子体的电离度 (大气压下)



单一气体的电离平衡组成

气体的电离

- 混合气体的电离度
 - 混合气体的电离平衡不是各气体各自独立的, 而是电离所产生的所有电子共用, 并与正负两种离子相平衡。各气体的电离程度取决于U_i。

$$X = \frac{\sum n_i(k)}{\sum n_i(k) + \sum n_e(k)} = \frac{n_e}{\sum n_i(k) + n_e} \log_{10} \left[\frac{x_e}{1-x_e} + \frac{X}{1+X} P \right]$$

$$= -\frac{5040}{T} \gamma_i(k) + 2.5 \log_{10} T - 6.50 \quad (1-2-28)$$

混合气体的平均电离度

粒子的扩散和复合

- 电弧空间的带电粒子在电场作用下总体进行着定向运动, 同时由于密度分布的差异也在进行着扩散运动
- 方向: 密度高的区域 -> 密度低的区域
- 带电粒子在定向运动过程中出现从电弧内部向外部周边区域的移动, 扩散系数D

$$D = \lambda \bar{c} \propto \frac{1}{nQ} \sqrt{T} = \frac{kT}{PQ} \sqrt{T} \propto \frac{T^{3/2}}{P}$$

- 电子与正离子相遇后重新结合成中性粒子称为复合
- 复合主要出现在电弧温度较低的区域, 以电弧外周区域表现更为频繁

电子发射

- 电弧的稳定性同阴极电子发射的难易程度有关
- 自由电子(Free electron): 金属中的电子可以在离子晶格内自由移动, 无规则
- 电子飞出金属表面必须具有一定的能量, E_w : 逸出功, 对应的电压称为逸出电压: U_w .

表1.3.2 金属和氧化物的功函数(ϕ_w), 热电子发射系数(A) 及其熔点和沸点时的电子流密度(W.J.格林 (Green, W.J.))^①

物 质	ϕ_w (eV)	A (A/cm ² -K ²)	熔 点		沸 点	
			(K)	(K)	(K)	(K)
W	4.54	60	3690	3690	490	487,000
Mo	4.15	55	2890	3077	38	4,700
Ta	4.04	34	3000	3278	383	35,000
Th	3.35	4	2100	2778	3	6,000
Al	4.20	60	930	2770	10 ⁻¹⁰	0.5
Fe	4.48	38	1800	2808	10 ⁻⁹	33
Cu	4.33	50	1360	2868	10 ⁻⁸	1
Mg	3.78	60	928	1375	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹
MgO	3.21	60	2078	3070	2130	45,000
Al ₂ O ₃	5.80	60	2323	2970	1	4

① Green, W.J., Physical Phenomena in Ion-Optical Tubes, Air Radiation Co., Inc., U.S.A., 1961.

电子发射

- 热电子发射(Thermionic Emission)
 - 当温度升高时, 金属内部的自由电子克服吸引力逸出到金属表面
 - 电流密度: 单位时间内逸出的电子数, 道尔曼公式

$$j = \frac{4\pi mek^2}{h^3} T^2 e^{-\frac{U_w}{kT}}$$

- A为热电子发射系数, 120.4 (A/cm²K²), 但是实际中很多时候恰好为一半60.2, 不同物质A差别较大。
- 热电子发射是一种金属表面的电子汽化现象, 阴极以汽化潜热损失的功率为:

$$P = I * U_w$$
- 这些能量造成阴极表面的冷却, 阳极以凝回热的形式吸收P。
- 直流反接焊丝通常为阳极, TIG焊钨极通常为阴极。

电子发射

表1.3.1 纯金属及复合阴极的功函数 ϕ_w 和热电子发射系数A^①

物 质	质	符 号	ϕ_w (eV)	A (A/cm ² -K ²)
(原子序数3) 锂		Li	2.1~2.0	—
(原子序数6) 碳		C	2.5~4.7	0.50~30
(原子序数19) 钾		K	1.76~2.0	—
(原子序数20) 钙		Ca	2.34~3.2	60
(原子序数28) 镍		Ni	5.01~5.05	1000~20,000
(原子序数42) 钨		Zr	4.2	330
(原子序数55) 铯		Cs	1.80~1.96	162
(原子序数82) 铅		Pb	3.11	60
(原子序数80) 汞		Hg	4.52	—
氧化钨涂层		CaO	1.77	120~240
氧化钡涂层		SrO	1.87	4.1~250
氧化钨涂层		BaO	0.99	2.9~272
钨铯		W-Cs	1.36	3.2
钨钡		W-Ba	1.68	1.5
钨钨钡		W-O-Ba	1.34	0.18
钨锆		W-Zr	3.14	5.0
钨钨钨		W-Th	2.53	3.0

电子发射

表1.3.2 金属和氧化物的功函数(ϕ_w), 热电子发射系数(A) 及其熔点和沸点时的电子流密度(W.J.格林 (Green, W.J.))^①

物 质	ϕ_w (eV)	A (A/cm ² -K ²)	熔 点		沸 点	
			(K)	(K)	(K)	(K)
W	4.54	60	3690	3690	490	487,000
Mo	4.15	55	2890	3077	38	4,700
Ta	4.04	34	3000	3278	383	35,000
Th	3.35	4	2100	2778	3	6,000
Al	4.20	60	930	2770	10 ⁻¹⁰	0.5
Fe	4.48	38	1800	2808	10 ⁻⁹	33
Cu	4.33	50	1360	2868	10 ⁻⁸	1
Mg	3.78	60	928	1375	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹
MgO	3.21	60	2078	3070	2130	45,000
Al ₂ O ₃	5.80	60	2323	2970	1	4

电子发射

- 场致发射(Field Emission)
- 如果没有电场, 使电子逸出需要做功 $W_w = eU_w$. 若在阴极外面加上场强为E的电场, 省掉了静电引力功 $e(eE)^{1/2}$, 其电子电流密度为:

$$j' = AT^2 e^{-\frac{U_w - \sqrt{eE}}{kT}} = j_0 \frac{\sqrt{eE}}{kT}$$

- J'为没有电场时J的n倍, 称为Schottky Effect

如果 $X = 10^6 \text{V/cm}$, $T = 2500 \text{K}$, 则 $n \sim 6$, 如果 $X = 10^7 \text{V/cm}$, 则 $n \sim 250$

电子发射

- 外加电场相当于降低了金属的位能曲线, 处于费米能级的部分电子将穿过势垒跑出去
- Schottky Effect是阴极的热电子借助于外部电场的作用变得容易发射, 而场致发射则不同于热电子发射, 只要外部电场足够强, 即使金属温度是0, 电子也可以向外逸出。
- 没有带走P热量, 不会冷却阴极。

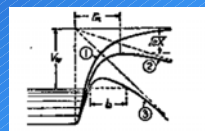


图1.3.8 外加电场引起阴极附近位能曲线的变化

电子发射

表1.3.4 强电场作用下的电子发射^[7-11] ($V_w(V)$, $X(V/cm)$, $i_x(A/cm^2)$, i_x 用十进制数表示)

$V_w = 2.0$		$V_w = 4.5$		$V_w = 6.3$	
X	$\log_{10} i_x$	X	$\log_{10} i_x$	X	$\log_{10} i_x$
1.0×10^7	2.58	2.0×10^7	-3.33	2.0×10^7	-12.90
1.4	5.49	4.0	4.06	6.0	3.25
1.8	6.89	6.0	6.62	10.0	6.66
2.2	7.82	8.0	7.94	14.0	8.16
2.6	8.45	10.0	8.78	18.0	9.04

光发射 (几乎没有贡献)

- 当光子进入阴极表面后, 使电子飞出
- 通常发生在放电空间浮游的金属尘埃或者微粒的表面。

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - eU_w$$

为飞出电子具有动能, 通常低于此值, 增加入射光子, 只能使电子数量增加, 速度不变。

电子发射

碰撞发射

- 电子或离子从外部高速撞击金属表面, 把能量传递给金属内部的自由电子时, 会有电子发射出来。也称为二次电子发射。
- 二次电子的数目通常可达到一次电子数的10倍。
- 阳离子轰击阴极引起电子发射的必要条件:

$$U_{ki} + U_i > 2U_w$$

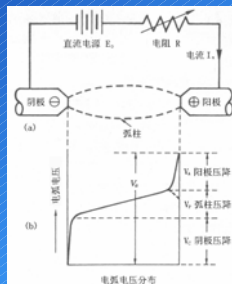
电弧的导电机构

Anode, Cathode, Arc column / arc plasma

Cathode Voltage Drop, Anode Voltage Drop, Positive Column Voltage Drop

$$U_a = U_c + U_p + U_a$$

$$P_a = I \cdot U_a = I \cdot (U_a + U_c + U_p)$$



电弧的导电机构—弧柱区

弧柱区

- 温度处于5000-50000K之间, 处于热平衡状态
- 弧柱中的全部或大部分双原子气体分解为原子, 其中较大比率的原子又进一步分解为电子和阳离子, 其空间密度是相当的, 弧柱空间呈现为电中性。
- 弧柱的电流就是由上述带电粒子的移动形成, 电子流占99.9%, 离子流占0.1%。
- 以热电离为主
- $P_c = EI$, 产热=散热

当采用He, H作为气体介质, 质量轻, 速度快, 散热大, 产热相应增大, E增加。多原子气体做为介质时也有同样现象, Ar为单原子气体, 质量大, 散热小, E较小

电弧的导电机构—弧柱区

最小电压原理

- 当散热增加, 产热需要增加, 而弧柱本身又要维持其电压最小的特性, 因此要收缩其截面, 增加产热, 维持热平衡

电弧形态

- 小电流时, 弧柱截面较大
- 大电流时, 由于有电磁收缩效应, 弧柱变成紧缩的形状。碳极电弧的临界值为80A。
- 小电流电流密度: $10-300A/cm^2$, 温度低于7000K; 而大电流可达 $10^3-10^4 A/cm^2$, 温度超过10000K

电弧的导电机构—弧柱区

电流密度

表2.3.3 弧柱电流密度(之二)(C.G. 修改)^[8-9]
(电流为1~10A时的值)

气体	气体压力(atm)	电流密度(A/cm ²)
N ₂	1	6.3~5.7
	5	11.8~13.3
	10	18.3~24.6
H ₂	30	60~70
	1	500~570
He	1	48~46
A	1	42~25

用热平衡来解释

电弧的导电机构—弧柱区

· 弧柱温度测定

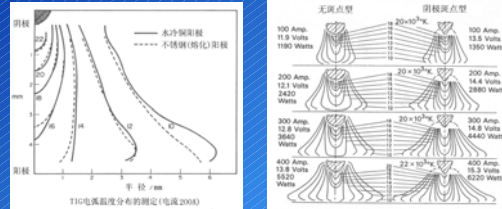
研究者	测定条件	测定方法	温度(℃)
L. S. 奥蒂斯(1911) 1931	大气中, 铜电极 1~12 A	CN管伏光镜	6500±300
A. V. 盖格, M. 斯廷贝克(1919) 1931	大气中, 钨钨电极 2 A	X射线吸收	5000±400
R. C. 约翰逊, N. R. 梅德(1917) 1932	大气中, 钨电极 4~9 A	多普勒效应	4900~5300
C. G. 穆茨(1941) (1943) (1947) 1935	大气中, 钨钨电极 3~25 A 各种电极	声速	4100±300 4000~6440
R. W. 拉格(1914) 1951	水蒸汽中, 500 A	光谱分析	34000
G. 布兹, W. 苏克(1918) 1954	氩气中 W-Cu 500 A	光谱分析	30500

电极	电流(A)	1	5	10
氩气中		950	820	600
氦气中		650	700	1000

Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

电弧的导电机构—弧柱区

· 弧柱的温度分布



Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

电弧的导电机构—弧柱区

影响温度分布的因素:

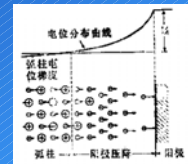
- 电弧电流
- 电极斑点
- 电弧长度
- 阳极材料
- 保护气成分
-

Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

电弧的导电机构—阳极区

阳极

- 弧柱的高温气体没有接触到阳极, 阳极本身不发射阳离子, 电子堆积
- 阳极区域, 电子发生碰撞电离
- 产生阳离子供给弧柱区
- 阳极区将近99.9%的电子进入阳极
- 加热阳极, 大电流时, 阳极熔化



$$P_A = I \cdot U_a = I \cdot (U_T + U_w + U_A)$$

- 增大电流, U_A 减小, 此时阳极区热电离增加

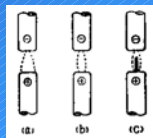
<1V

Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

电弧的导电机构—阳极区

阳极斑点

- 小电流时, 电流流入阳极表面大致等于弧柱截面, 不会产生阳极斑点;
- 增大电流, 金属原子的电离电压低, 一旦阳极产生金属蒸汽, 很容易在附近形成弧柱, 电弧集中于此, 同时阳极表面集中于一, 形成阳极斑点, 电流密度比弧柱区高得多。
- 跳动性和粘着性



Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

电弧的导电机构—阴极区

阴极

- 对于钨、碳等高熔点的阴极, 热发射起主导地位, 向弧柱区提供电子
- 对于Fe, Cu等低熔点的阴极, 热发射不足, 阴极区形成正离子堆积, 形成强电场, 导致场致发射。
- 阴极区的碰撞电离产生电子, 共同向弧柱区提供
- 热阴极: 大电流 $>10^3 A/cm^2$, 高熔点阴极
- 等离子体阴极: 钨极, 小电流, 在阴极前面形成高亮度空间, 放电在该空间以热电离形式
- 冷阴极: Fe, Cu, 产生阴极斑点



Copyright © 2005, SKI-AWPT Dr. Lin Sanbao www.weld.labs.gov.cn

电弧的导电机构—阴极区

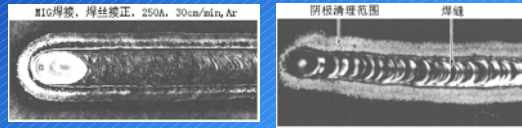
阴极斑点

- 电弧导电通道将主要集中在一个较小的区域，该区域电流密度、温度、发光强度远高于其它区域，称作阴极斑点区。
- 低熔点材料作为阴极（焊丝）时，也就是冷阴极情况下，如果使用氧化性气氛作为保护气，保护气对电弧（包括阴极和阳极区）有较强烈的冷却作用，电弧电场强度较高，从自身减小能量消耗的角度，电弧更趋于集中，难以全面积包围焊丝熔化金属（熔滴），电弧导电通道集中在熔滴下方较小的区域。
- 电弧阴极斑点随条件的变化而产生跳动，自动选择有利于发射电子的区域，电弧通过该区域提高电子时阴极区消耗能量最小。

电弧的导电机构—阴极区

铝合金

- 电子发射能力低，
- 本身导热性能好，对电弧能量的消耗大，不利于熔池的形成
- 由于表面氧化膜的存在，氧化物与纯金属相比，电子逸出功低，更具备电子发射的能力，电弧导电点更多集中在有氧化膜的地方，从而形成阴极斑点
- 在焊丝作为阴极时也有表现（铜焊丝或铝焊丝等）。
- 正离子撞击破碎氧化膜



电弧的导电机构

GTAW DCEN Straight Polarity



GMAW DCEP Reverse Polarity



电弧的导电机构

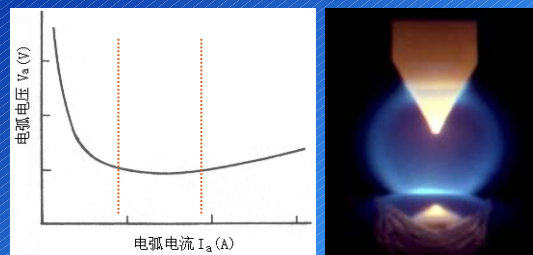
- 从阴发射的电子对阴极由冷却作用(逸出功)
 - 电子汽化带走热量
- 反极性: 电子冷却阴极也就是冷却了工件
 - 阳极受热将会熔化焊丝(在焊接过程中送进)
 - 有利于填充坡口
 - 熔滴过渡频率可以达到100滴/秒
 - 焊条电弧焊采用此极性接法(工件为阳极)
- GTAW 是焊接铝合金最常用的方法
- 术语
 - 欧洲: TIG = tungsten inert gas, MIG = metal inert gas
 - 美国: GTAW 和 GMAW

电弧的导电机构

Q: TIG焊中为什么采用He比Ar效率高?

- He的热导率是Ar的三倍左右，导热效率高于Ar 40%
- 质量轻

焊接电弧的静特性



Q: 解释这三种特性的原因

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	变化温度 ⁽¹⁾ (℃)	电阻率 ⁽²⁾ (10 ⁻⁸ Ω·cm)	热导率 (W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)	膨胀系数 (10 ⁻⁶ /K)	密度 (g·cm ⁻³)
铝					
纯度99.99%	658.37	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	600~650	3.0~7.0	1.2~1.8	22~23	2.6~2.8
铜					
纯度99.99%	1484	4.3	1.01	13.0	8.86
Co-Cr-W合金	1320~1370	8.5~17.6	0.12~0.26	11.2	8.0~8.9
镍					
纯度99.99%	1084.4	1.85	4.01	16.5	8.93
90Cu, 10Al (软焊料)	1050~1070	12~14	1.60	17	8.34
90Cu, 10Zn (工业黄铜)	1030~1070	3.92	1.92	18	8.93
铁					
纯度99.99%	1538	9.69	0.808	11.5	7.67
低合金钢	1450~1500	16~20	0.32~0.66	11.4	7.8~8.0
马氏体不锈钢	1400~1440	54~69	0.25	9~10	7.8~7.8
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	变化温度 ⁽¹⁾ (℃)	电阻率 ⁽²⁾ (10 ⁻⁸ Ω·cm)	热导率 (W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)	膨胀系数 (10 ⁻⁶ /K)	密度 (g·cm ⁻³)
铁					
纯度99.99%	649	4.30	1.56	24.6	1.74
锻造合金	600~650	4.5~12.5	0.5~1.4	25~28	1.8
铸造合金	450~650	4.5~16	3.48~1.4	25~28	1.8~1.9
铝	2021	5.09	1.38	4.8	10.24
镍					
99.98%Ni+Co	1455	7.47	0.916	13.4	8.9
88Ni, 10Co, 0.5Fe	1300~1350	48	0.28	13	8.4
Ni-Cr-Mo合金 (镍基合金基 ⁽³⁾)	1120~1350	110~140	0.10~0.20	11~12	7.8~8.1
铜	2020	12.8	0.975	0.3	16.6
钛合金	1530~1610	43~250	0.024~0.24	7~9	4.4~4.8
钙	3387	5.47	1.75	4.5	19.3

(1) 根据1988年国际实用温标测定；变化温度可用单点或温度范围表示。
注：表2.5由普华大学 (Fordham Univ.) 热物理性能研究中心为美国国家标准局的材料资料办公室提供。

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2.3 金属氧化物

氧化速度 (1号最快, 10号最慢)	相对稳定性 (1号最稳定, 10号最不稳定)
1. 铝	1. CaO
2. 镁	2. MgO
3. 硅和钛	3. Al ₂ O ₃
4. 铜	4. TiO ₂
5. 锰	5. SiO ₂
6. 铁	6. V ₂ O ₅
7. 钴	7. MnO
8. 镍	8. Cr ₂ O ₃
9. 钨	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·kg⁻¹·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	熔点 ⁽¹⁾ (℃)	比热(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
铝	Al	26.98154	20	0.898
			100	0.937
			650.37 ⁽²⁾	1.256
			20	0.88 ⁽³⁾
碳(气)	C	12.011	900	1.191
			1000	1.194
			2000	1.706
			1600	1.877
钴	Co	58.9332	20	0.419
			417	0.524 (α)
			1120 ⁽²⁾	0.811 (β)
			1434 ⁽²⁾	0.806
铬	Cr	51.996	20	0.483
			1900	0.705
			1800	0.870
			1860 ⁽²⁾	0.914

金属和保护气体的物理性能

铌	Nb	92.9064	20	0.273
			900	0.300
			2000	0.298
			2471 ⁽²⁾	0.281
铁	Fe	55.847	20	0.444
			118 ⁽²⁾	1.498
			911	0.142 (α)
			1594	0.686 (γ)
镁	Mg	24.305	100	0.679 (α)
			600	0.737 (β)
			646 ⁽²⁾	0.763
			1327	1.207
钛	Ti	47.88	20	0.519
			883	0.707 (α)
			883	0.611 (β)
			1673 ⁽²⁾	0.782
钨	W	183.85	20	0.180 ⁽²⁾
			2000	0.479
			2070	0.587
			3387	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:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13\rho C t Y}{H_n} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad H_n = f_1 U I / v$$

- 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:

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

$Y=1.5mm$ 处: $T_p=1184^\circ C$

$Y=3mm$ 处: $T_p=976^\circ C$

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寒风热影响区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 $730^\circ C$ 的峰值温度,因此要求解在 $T_p=730^\circ C$ 时的 $Y=5.9mm$
- 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 $Y=14.2mm$

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 $Y=28.4mm$ 。
- HAZ宽度同线能量成正比。前例 $H_n=1080J/mm$ 的时候, $Y=21.3mm$;
- 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

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

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_n}} \quad \text{相对板厚, 0.75分界}$$

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

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

- 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

焊接传热

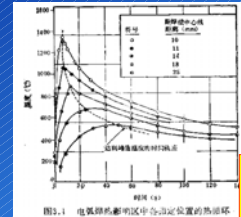
枝晶间距的影响

- 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。

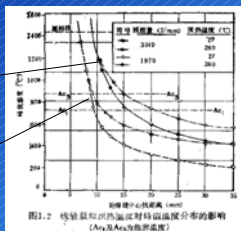
焊接热循环



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



- 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前距离增大，增大程度同峰值温度的高低成正比;
- 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前距离增大。

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

焊道线能量 (J/mm)	预热温度 (°C)	焊缝中心线到曾处于下列温度的那一点之前距离 (该点加热到下列温度)		
		1490°C (液相线)	810°C (Ac ₁)	706°C (Ac ₃)
3940	27	9.4	13.2	15.5
3940	200	9.4	16.2	20.0
1970	27	7.4	9.1	9.4
1970	200	7.4	9.4	10.7

表3.3 高温停留时间和冷却速度

焊道线能量 (J/mm)	预热温度 (°C)	峰值温度 (°C)	1093°C以上 停留时间 (s)	冷却速度 (在560°C) (°C/s)
3940	27	1365	16.5	4.4
3940	200	1365	17	1.4
1970	27	1265	5	14
1970	200	1365	5	4.4

焊接热循环—线能量和预热温度的影响

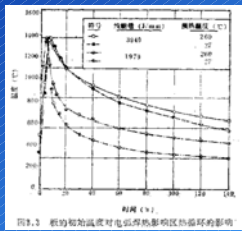


图2.3 预热温度对电弧焊热影响区热循环的影响

- 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

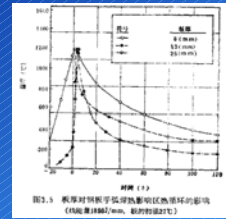


图2.5 板厚对电弧焊热影响区热循环的影响 (线能量1000J/mm, 预热温度20°C)

- 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