

焊缝中的气体

И. К. 帕豪德涅 著

机械工业出版社

焊缝中的气体

И. К. 帕豪德涅 著

赵鄂官译 尹士科校



机械工业出版社

本书收集了电弧焊时的焊条金属熔化、过渡过程、金属热含量和温度等方面的研究成果，其中包括氮与氢被熔融焊条金属吸收的过程和电弧中气体成分、焊接材料及熔池结晶对焊缝中气体含量的影响等内容。

对于不同类型的涂料焊条和管状焊丝焊接时的焊缝气孔的形成条件，给予了注意并提出了防止气孔产生的方法，同时对新焊接材料的基本特性也进行了研究。

本书可供从事电弧焊冶金、工艺问题研究及焊接材料制造的科技人员参考。

И. К. Походня

Газы в сварных швах

根据苏联 Изд. 《Машиностроение》1972年版译

* * *

焊缝中的气体

И. К. 帕豪德涅著

赵鄂官译 尹士科校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $1/32$ ·印张9·字数192千字

1977年6月北京第一版·1977年6月北京第一次印刷

印数 00,001—23,000 定价0.72元

*

统一书号：15033·4369

目 录

第一章 焊接电弧及焊条熔化的某些特性

1. 焊接电弧的某些特性 1
2. 焊接电弧的温度 9
3. 焊条的熔化 11

第二章 电弧焊时金属的热含量及温度

1. 焊条金属熔滴及焊接熔池温度的试验数据 15
2. 涂料焊条焊接时的熔滴温度 19
3. 在惰性气体及其与氮的混合气体中焊接时,
金属熔滴的热含量 27
4. 在二氧化碳气中焊接时金属熔滴的热含量 38
5. 管状焊丝焊接时金属熔滴的热含量 41
6. 焊接熔池温度及其分布 44

第三章 焊条金属的熔化及过渡

1. 焊条金属过渡的研究方法 53
2. 保护气体中焊接时的金属过渡 58
3. 涂料焊条焊接时的金属过渡 68
4. 涂料焊条的熔化动力学 74
5. 涂料焊条焊接时金属过渡的研究 81
6. 碳的氧化在金属过渡中的作用 95
7. 埋弧焊的金属过渡及其与熔渣的相互作用 102
8. 管状焊丝焊接时的金属过渡 106

第四章 金属与氮的相互作用

1. 液态钢及焊缝中的氮 112

2. 氮被不锈钢熔滴吸收的研究	122
3. 氮被低碳钢熔滴吸收的研究	135
4. 熔化极焊接时, 氮在阴极上的吸收	140
5. 氧在氮被金属吸收中的作用	148

第五章 金属与氢的相互作用

1. 液态钢及焊缝中的氢	158
2. 电弧气氛成分及焊缝含氢量	167
3. 焊接条件对焊缝金属含氢量的影响	181
4. 焊接熔池结晶条件对氢在液相及固相间分布的影响	191

第六章 焊缝中气孔的形成及防止

1. 形成焊缝气孔的热力学和动力学	207
2. 用矿物-酸性涂料焊条焊接时焊缝中的气孔	216
3. 用金红石型涂料焊条焊接时焊缝中的气孔	226
4. 用碳酸盐-萤石型及金红石-碳酸盐-萤石型涂料 焊条焊接时的焊缝气孔	235
5. 管状焊丝焊接时的气孔	242

第七章 新的焊接材料

1. 低毒高效及通用焊条	257
2. 管状焊丝	266

结束语	271
-----------	-----

参考文献	275
------------	-----

第一章 焊接电弧及焊条熔化的某些特性

电弧焊时,金属与气体相互作用的过程,在很大程度上取决于焊接电弧特性及其温度。与电弧特性有密切关系的,是焊条金属的熔化与过渡特性。这里将择其主要的进行研究。

1. 焊接电弧的某些特性

在熔化着的焊条间的电弧,属于具有“冷”阴极发射的电弧。弧柱理论得到了最广泛的研究。

弧柱的基本公式如下:

1. 经赫列诺夫 (Хренов) ^[147,148] 修正后,确定弧柱气体电离度的萨克 (Sack) 公式为:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} P = 3.2 \times 10^{-2} a^2 T^{5/2} e^{\left(-\frac{A_i}{kT}\right)} \quad (1)$$

式中 α —— 气体的电离度;

P —— 气体压力 (牛顿/米²);

T —— 气体温度 (°K);

A_i —— 电离能 (尔格);

k —— 波茨曼常数 1.37×10^{-16} 尔格/度;

a^2 —— 离子 (g_i) 及中性原子 (g_0) 的统计重量比;

$$a^2 = 2 \frac{g_i}{g_0}。$$

● 文中[]内的数字为参考文献的序号,下同——译者注。

门捷列夫周期表中各元素的 α^2 值由赫列诺夫算出。铁的 $\alpha^2 = 12/5$ ；对于第一族元素为 1；对于第二族元素为 4。

根据焊接电弧低电离度 ($\alpha \ll 1$) 的特点, Г. И. 列斯柯夫 (Лесков) 将公式 (1) 简化如下^[142];

$$\alpha = 0.18 \alpha P^{-1/2} T^{5/4} e^{\left(-\frac{A_i}{2kT}\right)} \quad (2)$$

2. 由 K. K. 赫列诺夫提出的有效电离电位 U_{i*} 与弧柱温度 T 间的关系式^[143]。

$$T = 800 U_{i*} \quad (3)$$

3. О. П. 赛麦诺娃 (Семёнова) 关于电弧气体 U_{i*} 的计算公式。此时它被当作 n 组元的组合^[125]。

$$U_{i*} = \frac{kT}{e} \sum_n \frac{N_i}{N} (1 - \alpha_i) e^{\left(-\frac{A_i}{kT}\right)} \quad (4)$$

借助公式 (1) ~ (4) 得到了金属极时电离着的涂料和焊剂^[146] 及在惰性气体中电弧燃烧时的金属极蒸气^[126, 64] 相互作用的解释。

考虑到撞击截面, Г. И. 列斯柯夫对电弧公式进行了修正^[64]。他将弧柱视为半径为 r_* 的圆柱体, 柱上每一点的温度 T 均相同。当 $P = 1$ 大气压 (约 100 千牛顿/米²) 及透光系数 $\alpha = 0.6$ 不变值时, 据公式 (2), 弧柱场强 E 为:

$$E = 2.05 \times 10^{-8} \frac{U_i^{29/12} g_e}{\alpha^{1/3} I^{1/3}} \text{ (伏特/米)} \quad (5)$$

弧柱的平均电流密度

$$i_{*} = 5.5 \times 10^{-8} \frac{U_i^{38/12} \alpha^{2/3}}{g_e^{2/3} I^{1/3}} \text{ (安培/米}^2\text{)} \quad (6)$$

式中 U_i —— 电离电位 (伏特);

g_e —— 原子与电子的撞击截面 (米²);

α —— 离子与中性原子的统计重量比；

I —— 电流强度(安培)。

从上述公式中看出，确定弧柱场强和电流密度的主要因素是电弧气氛中气体的电离电位，其次才是电子与原子的撞击截面积、电流强度及统计重量比。

采用熔化极气体保护焊时，弧柱特性基本上是由电极蒸气所决定的，因此在计算公式中引入了与电极材料蒸气相应的数值 U_i ， g_e 及 α 。气体的热物理性能——导热性、分解能等，具有很大的意义。

紧靠焊条的电弧区中出现的过程，在金属与气体的相互作用中具有重大作用。

据现有的概念，在焊条的焊接电弧中，流向阳极的主要是电子流。阳极区的宽度通常取作电子自由运动的距离值。

阴极区的情况极为复杂。沸点显著低于热电子发射温度的金属“冷”阴极的特点是：极大的阴极电流密度；电弧斑点沿阴极表面无规则的运动；阴极斑点的时隐时现；几个阴极斑点的同时存在。

阴极表面的电子发射，是由于其表面的加热，向阴极移动的正离子流电荷组成的高强度电场及光电效应作用的结果。

关于哪种过渡机理为主，还存在分歧。很多人认为，阴极温度对热电子发射来说是不够的^[64,122]。主要由于静电发射导致阴极释放电子而形成阴极电流过渡的观点被较普遍地接受。为此，由阴极电压降区的正离子的空间电荷所建立的电场是十分必要的^[122]。

В. С. 格沃兹介茨基 (Гвоздецкий) 在计算基础上得出结论：根据电弧近阴极区的电离度及电子逸出所需能量的不

同，不管是在冷或热的阴极上，当电流密度为 $10^9 \sim (0.5 \sim 1.0) \times 10^{11}$ 安培/米² 时，电弧中电子自动发射是可能的^[24]。有些研究人员预计，在焊接电弧中存在着两种类型的发射——热电子发射及自动电子发射。

A. 英戈尔(Engel)及 A. E. 罗伯逊(Robson)提出了关于在背离阴极扩散的金属蒸气受激原子的作用下，从冷阴极释出电子的假说^[18]。阴极材料的蒸发是由于在阴极区被加速的正离子轰击其表面而产生的。

Г. И. 列斯柯夫认为，阴极温度对于热电子发射是不够的，而对于静电发射（电子自动发射）——则是阴极表面的场强^[64]。为了解释阴极现象，他提出了光子假说。

靠近焊条区，最重要的特征是：电流密度，电压降的大小，活动斑点尺寸。由于焊接电弧的高温及区域较小，还有阴极斑点的活动性，使得这些数据的精确测量成为困难。

阴极和阳极的电压降 $U_{\text{阴}}$ 和 $U_{\text{阳}}$ 的总值是通过试验测定的。金属极电弧在空气气氛中用试探法测得的试验数据 $U_{\text{阴}}$ 为 4~11 伏，并与阳极材料有关^[64]。在空气中，电极间电弧的 $U_{\text{阴}} + U_{\text{阳}}$ 总和为 17~19 伏。加入离化剂—— K_2CO_3 ， Na_2CO_3 ， $Ba(NO_3)_2$ ， Li_2CO_3 及 $CaCO_3$ 后，使总和 $U_{\text{阴}} + U_{\text{阳}}$ 相应降低至 9.8；13.8；13.85；13.5 及 15.95 伏。 $U_{\text{阴}}$ 及 $U_{\text{阳}}$ 值主要是在测热实验及阴极与阳极熔化速度测量的基础上进行的。这类数据的精确性不高。

Д. М. 拉布金(Рабкин)提出了简化的阳极能量平衡式：

$$U_{\text{阳}} + \varphi = W_{\text{热}}$$

将气流向阳极的热传导及辐射损耗忽略不计。按 Б. Е. 巴东(Патон)的数据，此类损耗占总损耗的 25%^[85]。文献^[116]的基本结论是： $U_{\text{阳}}$ 与阳极电流强度及材料关系很小。

文献^[282]列举了电极间电弧的 $U_{\text{阴}} = 6 \sim 9$ 伏, $U_{\text{阳}} = 16 \sim 17$ 伏。根据Г. И. 列斯科夫的计算, $U_{\text{阳}}$ 与电弧气体的电离电位关系很小, 计为 $4 \sim 5$ 伏^[64]。

用涂料焊条手工焊接时的阴极和阳极的总电压降为 $18 \sim 25$ 伏, 而弧柱电压降为 $3 \sim 5$ 伏^[39]。А. Г. 马瑟尔 (Мазель) 测定了多种牌号工业用焊条及试验焊条的 $U_{\text{阴}} + U_{\text{阳}}$ 值^[69]。并根据熔化速度对 $U_{\text{阴}}$ 和 $U_{\text{阳}}$ 值进行了计算。对于不同焊条得到的计算值 $U_{\text{阴}} = 8 \sim 26$ 伏, $U_{\text{阳}} = 6 \sim 8$ 伏。 $U_{\text{阴}}$ 随着电弧名义电压的增大而上升。

在气体保护焊时, 弧柱压缩及活性斑点效应, 对近焊条区 $U_{\text{阴}}$ 及 $U_{\text{阳}}$ 值有较大影响。В. И. 嘉特洛夫 (Дятлов) 认为, 在自由燃烧的电弧中, $U_{\text{阴}}$ 是随电流的增加而降低的, 而在过渡到压缩电弧规范时, 则急剧上升^[8]。对于阴极斑点半径为1毫米, 电流强度为400安时的铁蒸气中的压缩电弧, 计算出的 $U_{\text{阴}}$ 值约为 $25 \sim 28$ 伏, 即与实际值接近。根据А. И. 阿库洛夫 (Акулов) 的意见, $U_{\text{阴}}$ 及 $U_{\text{阳}}$ 不能保持恒定, 而是随着焊接电流和焊条直径的增大而上升。当用直径为1毫米的СВ-08Г₂С焊丝进行氩气保护焊时, $U_{\text{阳}}$ 的计算值随着电流从150安增大到250安而 $U_{\text{阳}}$ 值从2.5增至3.5伏, $U_{\text{阴}}$ 则从8.5增至9伏^[22]。

阴极斑点的电流密度 $i_{\text{阴}}$ 取决电弧燃烧条件 (电弧气体的压力, 温度、成分), 并据Г. И. 列斯科夫的意见, 它与弧柱电流密度无关^[64]。电流密度值与气体的电离度有关。

在电离度为1的极限值情况下, 计算得到的数值 $i_{\text{阴}} = (1 \sim 3) \times 10^9$ 安/米²。对于熔化和蒸发的电极的电弧, 阴极区的电离度 $\alpha_{\text{阴}}$ 目前还不清楚, 而与实验相符的 $i_{\text{阴}}$ 值是在 $\alpha_{\text{阴}}$ 等于 $0.01 \sim 0.02$ 时取得的, 亦即与弧柱气体电离度相接近时

得到的。

既然在容易蒸发的阴极斑点区不断供给大量中性原子，那么就可以设想，这类材料的阴极区的电离度和电流密度 $i_{\text{阴}}$ 较小，而阴极斑点的面积则较大^[64]。

采用熔化电极焊接时，有关活性斑点电流密度值的试验数据尚不多。А. А. 阿洛夫 (Алов) 根据短时间燃烧的电弧所保持的斑点面积大小，确定了斑点的电流密度^[4]。就焊条而言，阴极斑点的电流密度 $i_{\text{阴}}$ 随电流从 60 增至 190 安而从 4.4×10^7 降至 1.2×10^7 安/米²。阳极斑点的电流密度 $i_{\text{阳}}$ 与电流强度无关，并保持在 8×10^6 安/米²。

根据 И. Д. 库拉金 (Кулагин) 及 А. В. 尼古拉也夫 (Николаев) 的数据——他们对曝光时间为 $(3 \sim 10) \times 10^{-6}$ 秒拍摄的照片进行了斑点尺寸的测定，对焊条来说，阳极斑点电流密度 $i_{\text{阳}}$ 保持在 $(1.5 \sim 1.8) \times 10^7$ 安/米²，且随电流的增大而上升得不显著^[62]。弧长对 $i_{\text{阳}}$ 的影响小，而气体介质成分的影响则大。燃烧于 CO_2 中的 $\text{Fe} + \text{Fe}$ 电极间的电弧，阳极斑点的电流密度为 2.72×10^7 安/米²，而在氮，氩及空气中则相应为 $(1.43; 1.44; 1.50) \times 10^7$ 安/米²。在钢的阴极斑点中心，电流密度等于 3.5×10^7 安/米²。

Г. И. 列斯柯夫认为：如果阳极蒸气电离电位不低于阴极蒸气的电离电位，则对既定的阴极材料说来，电弧电压与阳极材料无关^[64]。因此，在对其蒸气中含有稳弧元素的金属极电弧研究时，可以采用石墨阳极。测量结果列于表 1。阴极斑点中的电流密度较阳极为高。离化剂的加入使斑点及弧柱的电流密度同时降低。

被研究的试验数据主要与自由燃烧的电弧有关。В. И. 嘉特洛夫认为，在压缩电弧的情况下，如埋弧焊，气体保护

表 1 焊接电弧弧柱及活性斑点的电流密度

电 极		离化剂	$i_{\text{均}} \times 10^{-7}$	$i_{\text{阳}} \times 10^{-7}$ (安/米 ²)		$i_{\text{阴}} \times 10^{-7}$ (安/米 ²)	
阴极	阳极		(安/米 ²)	弧柱摄影法	印迹法	弧柱摄影法	印迹法
Fe	Fe	无	1.6~2.5	1.6~2.0	1.3~1.8	2.0~2.5	1.8~2.3
Fe	C	无	1.4~2.5	1.4~1.7	—	2.0~2.5	1.2~2.4
Fe	C	K ₂ CO ₃	0.2~1.2	0.2~0.4	—	0.8~1.2	0.9~1.2
Fe	C	Ba(NO ₃) ₂	0.5~2.0	0.5~0.8	—	1.5~2.0	1.2~1.8
Fe	C	CaCO ₃	1.0~2.2	1.0~1.5	—	1.7~2.2	1.4~1.9

焊及某些涂料焊条焊接时的电弧相互间关系将不同^[81]。对于压缩电弧来讲,将受 $r_{\text{弧}} = \text{常数}$ 的限制($r_{\text{弧}}$ ——弧柱半径)。在这种情况下,当电流强度增大时,其密度将按比例上升。弧柱气体的有效电离电位愈小,自由燃烧电弧转变为压缩电弧时的电流强度也愈小。И. Д. 库拉金及 A. B. 尼古拉也夫以前的试验数据证实了这一观点。当电流强度相同时,在 CO₂ 中燃烧的电弧将有较大的电流密度。试验是在静止气氛中进行的。可以预料,在气流中焊接时,其压缩影响更大。

在电弧中出现了由活性斑点逸出的粒子流。其速度在一个大范围内波动,可以达到 10³ 米/秒。采用焊条焊接的电弧中,这一粒子流的速度为 75~150 米/秒^[84]。

阳极和阴极气流的总作用,依电流的大小而改变,因此,使阳极和阴极间电弧的热量重新分配。气流引起了作用于焊条和工件上的力;使金属过渡及熔深得到了改变。气流的出现与电极的蒸发及由电弧自身磁场引起的压缩力有关^[188]。当电流强度不变时,压缩力及压力与电流密度成正比。因此,在电弧压缩区(例如阴极区)形成了从电极向其表面呈垂直方向的压力梯度,并导致气流的形成。气体由斑点周围区被吸入气流,并由于电极材料蒸气的收容而被驱向弧柱一

边。气体的吸收现象可以对金属与气体的相互作用过程产生巨大影响。蒸发及压缩力在气流形成时的作用至今还不能通过试验进行正确评价。一种意见认为, 气流对电弧放电的基本过程没有重大影响, 虽然有助于它的稳定化并在很大程度上确定着弧柱气体的成分^[64]。

气体数量取决于电极金属的性能, 焊接规范及极性。它也可通过试验和计算方法进行确定。按 A. B. 彼得洛夫 (Петров) 的数据, 采用熔化极在惰性气体中焊接时, 有 10~25% 的电极金属变为蒸气状态。较大的气化金属量与较大的电流相对应。И. Д. 库拉金及 A. B. 尼古拉也夫发现, 气化金属量与电流及电弧燃烧的时间成正比, 后者在试验中比熔滴存在的时间短。直径为 5 毫米的铁电极在正极性及电流强度为 100~200 安时的比例系数约为 0.2×10^{-3} 克/安·秒, 而在 300~1300 安的范围内约为 0.6×10^{-3} 克/安·秒。根据 A. A. 叶洛辛 (Ерохин) 的意见, 在上述电流值下, 蒸发的与熔化的电极金属量之比在 0.05~0.15 范围内^[39]。几种焊接方法计算得到的这一比值不超过 0.15。按 Г. И. 列斯柯夫的计算, 电流强度为 200 安及正极性时, 气化金属量占 12%^[64]。

所列举的文献数据可以作出下列结论:

自由燃烧电弧的阳极电压降及斑点电流密度 i_{an} 与焊接规范及钢焊条的成分关系很小。阳极斑点很少活动。电弧的压缩导致 U_{an} 及 i_{an} 的提高。

Fe + Fe 自由电弧阴极电压降 U_{c} 及斑点电流密度 i_{c} 高于 U_{an} 及 i_{an} 。阴极斑点很活跃, 常常被分成几个斑点。当电流增大到一定数值时, 出现了 i_{c} 的降低。当电流强度增大时, 转变为压缩电弧状态, 导致了 U_{c} 及 i_{c} 的增大。

焊条涂料成分的改变及阴极表面上经常存在的杂质, 导

致了 $U_{\text{阴}}$ 及 $i_{\text{阴}}$ 的明显改变, 离化剂的加入使得阴极斑点被稳定化, 电弧向无斑点电弧过渡, 并导致 $U_{\text{阴}}$ 及 $i_{\text{阴}}$ 的降低。

电弧气氛及流量对弧柱及斑点的压缩程度产生很大影响。气体的分解能愈小及导热性愈大, 则弧柱及斑点的压缩程度也愈大。

2. 焊接电弧的温度

电弧及熔化金属温度——这是确定焊接物理化学及冶金过程的主要因素之一。电弧中气体的分解与电离度、气体在金属中的溶解度、气体, 金属及熔渣间作用过程的特性、焊条熔化特性及金属过渡等均与温度有关。

电弧温度与电流强度、涂料(气体)、电极成分及其它因素有关。

И. Б. 拜拉柯夫-包金 (Беляков-Бокин) 及 С. Л. 芒介尔什达姆 (Мандельштам) 测量了铁电极间的电弧温度为 5300°K [14]。К. К. 赫列诺夫 [146] 指出, 电弧温度可用简单的关系式 (3) 确定。

В. И. 嘉特洛夫导出了气体在压缩弧柱中的温度 ($^{\circ}\text{K}$) 与弧柱半径及电流密度的关系式 [81] :

$$T^{7/4} \alpha^{1/2} = \frac{\delta r_{\text{柱}}^{1/2} i}{A} \quad (7)$$

式中 α —— 电离度;

δ —— 气体分子的有效直径(厘米);

$r_{\text{柱}}$ —— 弧柱半径(厘米);

i —— 电流密度(安/厘米²);

A —— 常数, 等于 1.46×10^{10} 。

电流强度为 200 及 400 安时, 在铁蒸气中燃烧 ($U_i = 7.9$

伏)的情况下,半径为0.1厘米时的弧柱温度相应为6400及6600°K。在钙蒸气($U_1 = 6.1$ 伏)中的电弧温度显著降低,在相同电流强度时为5000及5200°K。

根据М. Я. 布洛文 (Броун) 及Г. И. 帕告金 (Погодин) 的数据,电流强度为280安时,铁电极间的电弧温度为6100°K^[10]。当焊芯上涂有 Na_2CO_3 及 K_2CO_3 时,在相同电流强度情况下,电弧温度相应降低至4800及4300°K。当电流强度为115安[●]时,电弧温度为5300°K;280安时为6100°K;420安时为6500°K。希尔什法尔德 (Хиршфельд) 及瓦英星克 (Вайншеник) 认为,采用直径为3.25~5毫米的涂料焊条焊接时,当电流从115增大至280安时,电弧温度随其增大得不显著,即从5400°K增至6040°K^[145]。研究结果列于表2。

表2 采用涂料焊条焊接时的电弧平均温度 (°K)

焊 条 涂 料	焊条直径(毫米)			该类焊条 的平均值
	3.25	4	5	
矿物-酸性薄涂料	—	5930	—	5930
金红石型薄涂料	—	5820	—	5820
金红石型厚涂料	5600	5840	5800	5750
金红石型中等厚度涂料	5800	5700	5710	5740
矿物-酸性铁粉型	5830	5560	5680	5960
金红石铁粉型	5650	5680	5660	5660
矿物-酸性厚涂料	5640	5590	5590	5620
碳酸盐-萤石型	5450	5400	5480	5440

从表2中可以看出,各类焊条的电弧平均温度处于比较狭窄的范围内。

埋弧焊时,当电流强度从300增至800安时,据И. В. 基尔道 (Кирдо) 的数据,弧柱温度从6500°K提高到7250°K,

● 原文为5安,可能为115安之误——译者注。

但在电流强度继续增长时，则改变不大^[46]。在相应条件下，正极性时的电弧温度大约比反极性时低 500°K 。本书作者在自己的研究工作中同样发现，正极性时的电弧辉光强度显著低于反极性时。

气体介质对温度的影响在文献^[189]中进行了研究。已得出，采用铁电极在 CO_2 、 N_2 、空气、Ar 及 He 等介质中焊接时，电弧温度相应为 5900；5520；5490；5200；4900 $^{\circ}\text{K}$ 。电弧温度随电极间电压的增大而降低。根据上述数据以及文献^[188, 140]中的数据，涂料焊条和气体保护焊时的电弧温度在 4500~7800 $^{\circ}\text{K}$ 范围内。

3. 焊条的熔化

在单位时间内熔化的焊条（焊丝）量或长度所表示的生产率或速度是焊条熔化的主要特性。

熔化速度取决于焊丝及涂料（熔剂，保护气体）的成分、焊接规范、电流密度和极性、伸出长度及一系列其它因素。

一切熔化极弧焊法的焊丝及焊条熔化速度，随电流强度的增大而上升。在一定的电流范围内，存在着电流及熔化速度的正比关系。在更小和更大的电流区域内，这一正比关系被打破，这与电弧能量特性，活性斑点尺寸及其电流密度的变化有关，同时也与焊条受到电流的加热有关系^[89, 203]。

焊丝伸出部分的加热与电流强度的平方，焊丝的电阻及伸出长度成正比。高电阻率材料伸出长度的影响特别显著，对于铜及铝焊丝则不明显^[203]。

焊条的熔化速度主要取决于电弧的阳极和阴极区的热分配和热交换，且与极性有关。在阴极上消耗的电能仅部分转变为热能，部分通过电子传给阳极。直接分配在阴极区的热

能为^[88]：

$$P_{\text{阴}} = I \left[U_{\text{阴}} - \left(\frac{3}{2} kT + \varphi \right) \right] \quad (8)$$

式中 φ —— 释出电子的有效功，

k —— 波茨曼常数。

公式 (8) 方括弧中的式子，是分配在阴极区的，被称为有效阴极电压降的热能的伏特当量 $U_{\text{阴}}^{\text{热}}$ 。

分配在阳极上的热能为^[89]：

$$P_{\text{阳}} = I \left[U_{\text{阳}} + \left(\frac{3}{2} kT + \varphi \right) \right] \quad (9)$$

式中 $\frac{3}{2} kT + \varphi$ —— 由电子带给阳极的能量。

方括弧中的式子称为有效阳极电压降 $U_{\text{阳}}^{\text{热}}$ ：

$$U_{\text{阳}}^{\text{热}} + U_{\text{阴}}^{\text{热}} = U_{\text{阳}} + U_{\text{阴}}$$

曾测定过焊接低碳钢的各种牌号焊条的 $U_{\text{阴}}^{\text{热}}$ 及 $U_{\text{阳}}^{\text{热}}$ ^[89]。考虑到熔滴的热含量，将正、反极性时的焊条熔化速度进行了比较。因为 $U_{\text{阳}}$ 及 $U_{\text{阴}}^{\text{热}}$ 与焊丝（涂料、熔剂）成分及其表面的状态关系很小，因此，反极性时的焊条熔化系数实际上也与这些因素无关^[38, 211, 89, 203]。气电焊时的气体气氛同样不会显著影响焊丝的熔化速度。在阴极上的热交换随电极直径及电流强度的增大而上升。此时，焊丝的熔化速度也被提高了^[203]。

根据焊丝成分及其表面状态、涂料、熔剂、保护气体的成分，正极性时的熔化系数在较大范围内变化。与此同时，电弧电压也发生变化。A. A. 叶洛辛引入了一个术语——电弧的名义电压 $U_{\text{名}}$ ，它可以被理解成，对于一定牌号的焊条（焊丝，熔剂，气体）在工作弧长情况下的电压^[38, 89]。焊条熔化速度与 $U_{\text{名}}$ 成正比，它等于

$$U_{\text{名}} = U_{\text{阴}} + U_{\text{阳}} + U_{\text{柱}} \quad (10)$$

在焊丝及一般厚度的涂料焊条熔化时，分配在近电极区