

电弧加热器中的放电

吴 承 康

一 引 言

1. 电弧加热器的应用与发展

十九世纪就在实验室中发现了电弧现象。从本世纪以来, 电弧在工业和科学技术中的应用一直在不断增长。在一些老的技术领域如电光源、焊接、熔炼、化工中, 电弧的应用不断有新的发展, 而近十多年来空间技术的发展(主要是高温模拟试验设备), 又促使电弧加热器的研制提高到新的水平。现在, 单台电弧加热器的电弧功率已高达50兆瓦, 气体焓已高达 9×10^8 焦耳/千克。空间技术中电弧技术的发展, 也促进了各种工业中电弧加热器技术的应用和研究。现在, 除了高速飞行模拟试验设备之外, 电弧加热在材料加工工艺、化工生产、冶金、采掘、电源、电推进、原子能、激光等技术领域内都有新的应用和研究^[1-5]。

随着电弧加热技术的发展, 也开展了不少有关的电弧和等离子体现象的基本研究(这方面研究与总电压大容量的断路器发展有关)。应该指出, 气体放电和等离子体的研究是极其广泛的, 这里所指的只是与电弧加热器有比较直接联系的研究。这方面有电极现象, 电弧特性, 电弧、磁场、气流相互作用, 电弧对电极和气流的加热过程, 电弧等离子体探测技术等。

由于电弧加热器中的气流是高温(相对于普通温度而言), 复杂(有电子

和各种离子、原子、分子)，有碰撞，有磁场（自身或外加），不均匀的，所以它的理论和实验研究都有相当大的困难。可以说，到目前为止，电弧加热器的应用和发展还是走在理论之前。有关的理论研究还是零碎而不系统，定性而不是定量的。

2. 电弧加热器中放电的性质

气体放电的形式和应用很多，即使是用于增加气体能量（热能或动能）的放电，也还有高频感应加热、电磁加速和低气压下的各种辉光和弧光放电。在这里讨论的，只是一般的电弧加热器中的放电，即在较高的气压下（几分之一大气压以上）连续的（几分之一秒以上）弧光放电，主要是利用电流的欧姆加热来产生几千度到一、二万度以至几万度的等离子体的加热器中的某些问题。这一类放电的基本特征是高气压弧光放电，由于频繁的碰撞而使弧柱中的各种粒子基本上处于热力学平衡状态。电场的能量使电子加速，在很短的自由程中，通过碰撞，而将能量输送给其他重粒子（离子、原子、分子）。由于弧柱中气体的高温，保持一定的电离度，使弧柱有足够的电导率。弧柱的温度分布，则是由能量平衡（焦耳热的产生和传热导、对流、辐射损失的平衡）和扩散（在此为次要的）所决定。

在考虑电弧加热器的放电时，可以独立控制的参数是：气体种类、流量、压力、流动形式和电流。被定的参数是电弧电压（电场强度）、温度分布和电弧形状。必须指出，电弧电压（或弧压梯度）是由其他条

件所决定而不是可以任意确定的,但决定电压的各条件中,又有与电压梯度有密切关系的如温度场。电弧中各参数之间存在着复杂和互相依赖的关系。

三 电弧加热器的分类

可以按照几种不同的原则将各种各样的加热器分为大的类别,下面简述几种分类及各类的特点。

1. 直流和交流电弧加热器

最基本的特点当然是:直流电弧的电流是连续、不换方向,而交流的则在每半周要有一次熄弧和再燃,并且电流方向变换。由此可见,两种加热器对电源特性的要求有所不同,加热器结构形式也会有不同。一般说来交流加热器的电极结构具有对称性。直流加热器可以做到气流与电弧接触时间较长,出口气流焓值较高,而交流不易做到。

直流电弧加热器容易稳定,焓值可以较高,比较容易控制,因而在小型设备和性能要求高的大型设备中多用之。新建的大型电弧风洞用的加热器往往是用饱和电抗器控制的整流电源。一些初期使用的电源如蓄电池、直流发电机等在新建设中已不多见。

交流电弧加热器的主要特点是电源系统投资较低,因而在大型电弧风洞中仍有一定意义。曾有不少地方研制大功率的三相交流电弧风洞。但近年来高性能的加热器仍采用直流。即使如此,三相交流加热器仍应有它的发展前途,如在设备投资必须降低的工业应用和中焓大型电弧风洞中使用。

目前的问题是热效率还比较低。交流加热器用于风洞气流有一特点，由于电弧的往复运动，出口气流基本上是不旋转的。这对减少热损失和改进试验流场都是有好处的。

2 “纵”式和“横”式电弧加热器

所谓“纵”或“横”是指被加热的气流方向与电弧电流的方向基本上平行或垂直。一般管道的束型电弧加热器和长弧电弧加热器属于“纵”式。其特点是气流和电弧接触较密切，焓值较高，而且由于流动和加热的情况比较简单而有规律，所以这类加热器往往可以按照一定的规律进行放大或缩小，这是一个很有利的条件。

一般磁旋式和交流电弧加热器属于“横”式。电弧横过气流而运动，气流接触电弧时间较短，因此焓值较低。电弧规律比较复杂，因而不易放大和缩小。这类加热器的发展多凭经验和试验。理论只起到一般性指导的作用。

3. 根据电弧基本运行方式分类：磁稳、气稳、壁稳、自由电弧。

这只是大体上的区别，实际上各种型式不可能绝然分开，往往互有交叉。几种分类的名称也还有不够确切之处。

(1) 磁稳电弧加热器。主要用比较强的磁场使电弧在电极上高速旋转，以免烧坏电极。如图1的(a) — (e)。(a),(c),(d),(e)是利用外加磁场，强度可达几个韦伯/米²，一般为 < 1 韦伯/米²。(b)是利用电弧电流本身产生的磁场使电弧运动，需要 10^4 安以上的电流才能有效地旋转电弧。

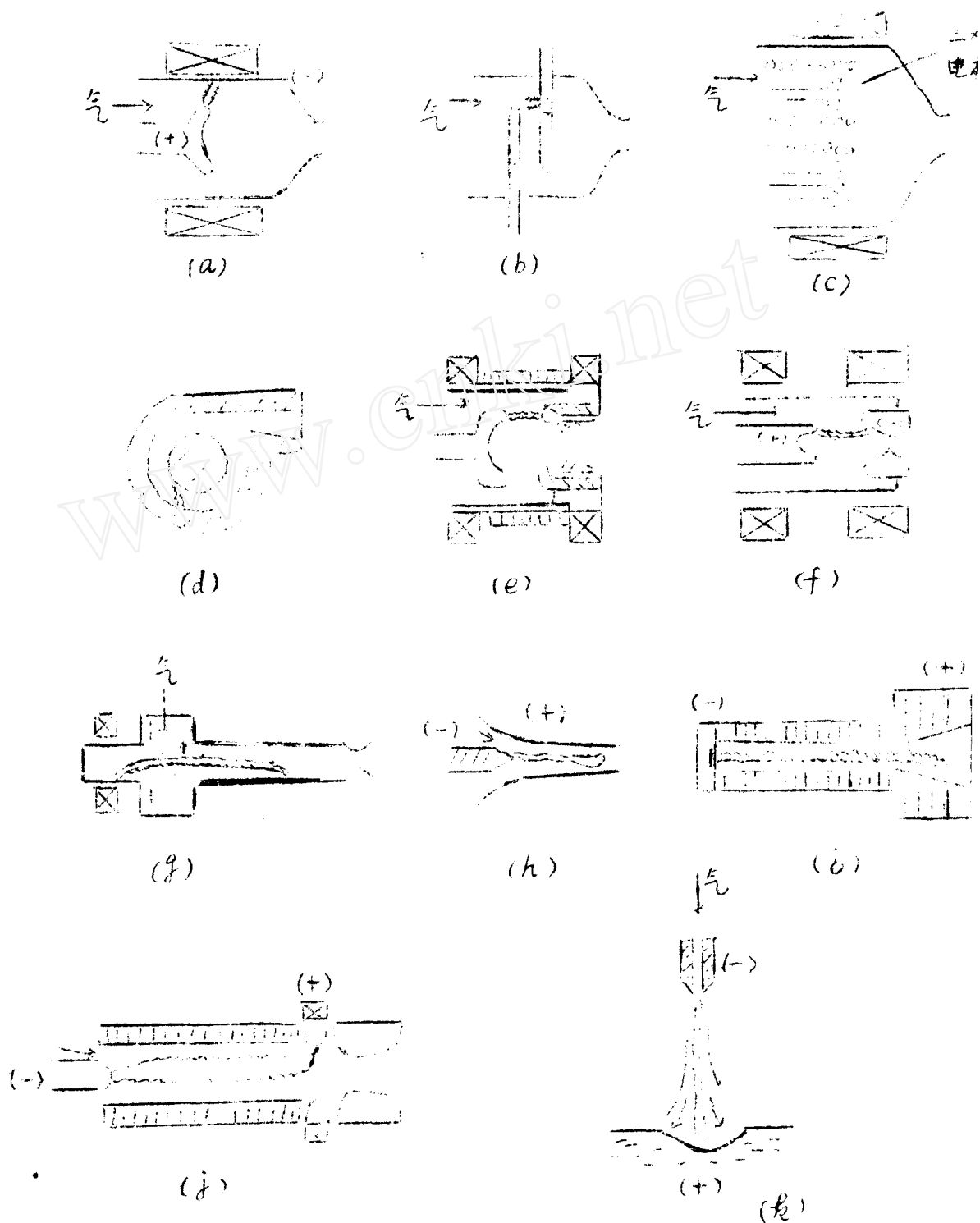


图 1 几种电弧加热器的形式

~ 20 ~

可看出这类加热器电弧不能很长,因此基本上是低电压,大电流的(相对于其他类型)。典型的参数范围是:气体焓 $\leq 15 \times 10^6$ 焦耳/千克,气压 $1-100^{(+)}$ 大气压,电流 ≤ 20000 安,电压 ≤ 100 伏,电弧功率 $\leq 10 \sim 20$ 兆瓦。高压下辐射和对流热损失增加很快,效率变得很低。

(2)气稳电弧加热器。主要依靠气体的旋转使电弧保持在轴线上。如图 1 (g)。磁场的作用主要是使弧根旋转,以免电极烧坏。这类加热器属于直流、长弧、高电压、低电流。典型参数是:气体焓 $\leq 50 \times 10$ 焦耳/千克,气压 $1-100^{(+)}$ 大气压,电流 ≤ 2500 安,电压 ≤ 20000 伏,电弧功率 ≤ 50 兆瓦。这类加热器在高气压下散热损失的增加不象磁稳式那么大,因而能保持较高的效率。

这类加热器主要优点之一是可以按照简单的规律放大。基本的设想是:在几何相似的加热器中,若保持气体的焓 h 和压力 p 不变,则弧压梯度 E 和热效率 η 基本不变。要做到 h 和 p 不变,要求 $\dot{M}/D^2, (VI)/\dot{M}$ 不变($\dot{M}$ 是质量流量),而由 $E \approx const$,可知 $V/L \approx const$,因而 $I/D \approx const$ 。因此,在按比例尺寸放大的加热器中,若尺寸放大倍数为 n ,则按 $\dot{M} \sim n^2, V \sim n, I \sim n$ 的规律来运行,则加热器的参数 h, p 和 η 不变。这一规律已被实践证明是基本正确的。

(3)壁稳电弧加热器。图 1 (d), (j) 属于这一类。电弧由阴极拉到阳极,二者之间有多层水冷绝缘片组成的约束管道。弧柱的长度是确定

~21~

的, 气流与电弧平行, 被加热到高焓。由于边界条件比较明确, 这类电弧较易分析。对于层流的情况 (低压、小流量), 热损失主要是热传导, 可以推出气体焓 $h = C_1 \left(\frac{I}{D} \right) (1 - e^{-C_2 z / m})$, 气流能达到很高的焓值。在实验中亦已确实达到高焓。对于阳极处于超音速段的加热器, 气流中心最高焓值达 4×10^8 焦耳/千克 (连续) 和 9×10^8 焦耳/千克 (半秒钟)。(气压范围 ≤ 5 大气压, 连续功率 ≤ 5 兆瓦, 短时间的功率 ≤ 20 兆瓦)。同样原理的加热器用于高压大功率也是可以的。其功率和参数范围与上述的气稳加热器类似, 但发展尚不如气稳加热器成熟。已有 $p \leq 200$ 大气压, 功率 ≤ 12 兆瓦的加热器。

(4)自由电弧。实际上电弧炉一类的设备都是用自由电弧的。最近的发展如等离子体熔炼, 如图 1(k) 的设备中, 气流平行于电流, 电弧不依靠旋气, 约束壁、或磁场的稳定作用。高温气体射流本身起着稳定电弧的作用。这不同于一般的所谓自由电弧。

有些加热器很难归于上述那一类, 而可能是各类的混合。

三、各种加热器的电弧稳定机理

所谓电弧稳定, 即电弧能保持连续而有规律的正常工作而不自行熄灭或失去控制。工作中亦可能有高频的脉动, 但总的说来被加热气体的参数还是稳定的。

1. 电源特性和电弧特性

电弧加热器的电源是与加热器本身有密切关系的设备, 加热器的功率、效率、稳定性和运行特性在相当大的程度上与电源特性有关。电弧的伏安

~ 22 ~

特性，在一般情况下是稍有下降或基本水平的线。电源的外特性在电弧特性相交处必须具有比电弧特性更陡的下降率（图2）。如电焊机的特性是比较适宜的。大功率的电弧加热器用蓄电池或发电机作电源时，

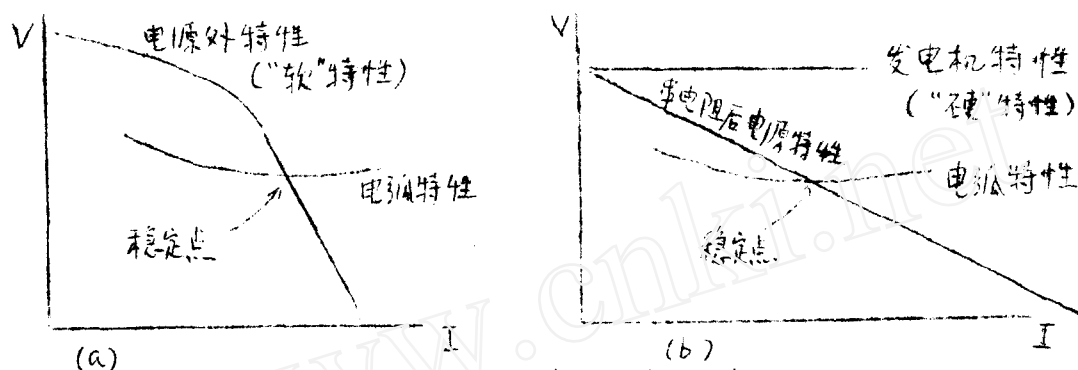


图2. 电源外特性与电弧特性

串以电阻以产生下降的外特性，但这种方法在高效率和加热器稳定性、启动性能之间有很大矛盾。交流电弧由于电弧再燃的需要，不能用纯电阻的方法，而需用串联电抗器（电感）来达到降压和移相的两重作用。

近年来较理想的电源是用饱和电抗器控制的整流器，可以得到如图2(a)的特性。大小功率的加热器都用它。

用可控硅整流器配以一套控制线路以得到所需要的电源外特性原则上也是可行的。但这方面工作目前还不太成熟。将来肯定能研究出适用的电源。

2. 磁稳电弧加热器

现以图1(a)的加热器为例说明稳定机理。总的来说，是一个有磁场、电场、气流的放电现象问题，原则上可以从基本理论来解决，但实际上很复杂。这里主要有两个现象，一是电弧在横向磁场作用下的旋转，一是旋转的电弧在磁场分布的作用下稳定在某一位置。第一个作用可理解

为轴向磁场 B_z 对径向运动的电子流 $-I_r$ 的洛伦兹力作用。在气压不太低的情况下，弧柱旋转是在洛伦兹力的方向，在弧柱较长的情况下，可以把电弧看作一个导电的柱体，迎着流体阻力运动。其规律为 $BI = C_D \rho U^2 d/2$ ，但式中 C_D 的数值和 d 的数值还不易确定。在磁场很强，气体较稀薄的情况下，放电可能变为圆盘形，即所谓扩散电弧。第二个作用表现为当加热器极性如图 3(a) 所示时，弧根的位置趋向于 $B_r = 0$ 的一点。这可

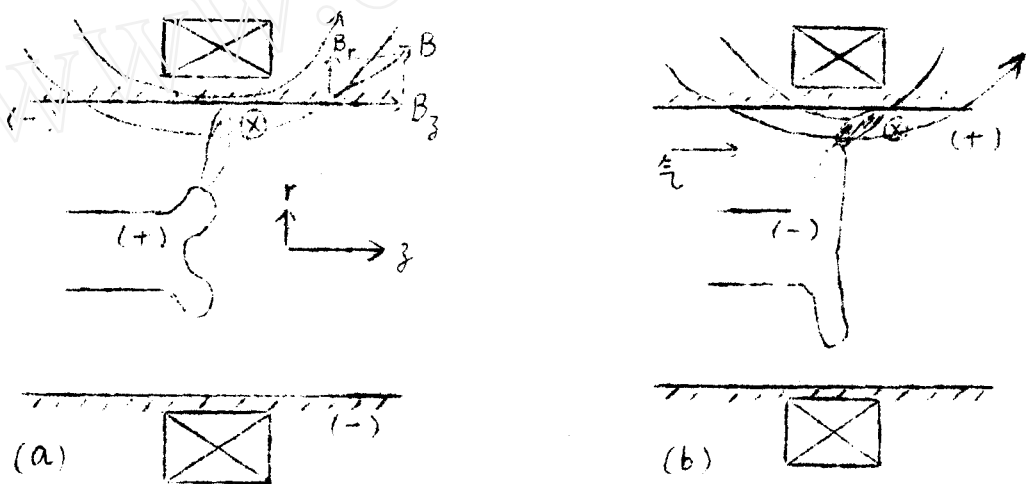


图 3 磁稳电弧加热器电弧稳定的两种情况

以解释如下：旋转的弧柱中有电子和离子， B_z 对旋转带电粒子的作用是沿电流方向的，而 B_r 对旋转带电粒子的作用力是轴向的，并且使电子和离子向反方向移动。其中对电子的作用是主要的，因为电子是电弧中传送能量的主要粒子。电子所到之处，亦即电弧所到之处。而其结果是使图 3(a) 的阴极弧根趋向 $B_r = 0$ 的一点。若将正负极反过来，则发现电弧向前倾斜，在极间距离较大时，往往发生熄灭现象。进一步弄清

并定量地说明这一作用是需要研究的课题。

在中心为负的情况下也可出现稳定的旋转电弧如图 3(b)。这时热气的作用都是不利于稳定的。是什么作用使电弧稳定？可以认为是由于电场分布所造成的电弧本身的收缩倾向。这种机理需要进一步从定量方面说清楚。

在强磁场中，电弧有顺磁力线方向走的趋势，这与加热器的电弧稳定也有关系。

3. 气稳电弧加热器 (图 1(g))

这类加热器电弧稳定的主要机理是旋转气流造成中心的低压区并使热气趋向中心的作用和电弧的稳定位置是最小能量的位置这一原则。需要弄清的是电弧直径、弧长和电流以及旋气参数之间的关系。要解决当电流值给定时在一给定角动量的旋转气体中温度场和电导率分布的问题。在离心力作用下，冷气（密度大）挤到边上，热气保持在中心。弧柱长度则是由弧柱到电极表面的电击穿所确定（与电压、电流、气体流量、旋转强度、几何尺寸有关）。

后电极上的磁场线圈使弧根旋转以防电极烧坏。这类加热器在国外已比较成熟，有一系列的产品供研究部门采用。

4. 磁—气稳定

图 1(f) 的加热器中电弧稳定机理与上二种类型都有关系。磁场对阴极和阳极弧根附近的旋转电弧作用，使电弧稳定在所示的位置。可

以看出, 阴极上磁场分布应向下游方向增强, 才能保持电弧阴极部分的稳定。由进气旋转和磁场引起的气旋使电弧稳定位置趋向轴线。增强了气体与弧柱的对流传热。被加热气体与壁面接触面积较小, 热效率较高。这种加热器要求各项条件配合较好, 因此运行范围较窄, 调试比较困难。

5. 壁稳电弧加热器 (图 1(i), (j))

依靠电极的几何位置来固定电弧的长度。依靠中间的电绝缘管道约束电弧 (使电弧外边冷却, 因而直径变细, 内部温度增高)。这里一个关键问题是防止“串弧”, 即电弧由阴极跳到中间垫片上, 形成一系列短电弧, 最后到达阳极。“串弧”的出现与中间垫片的厚度, 垫片间的绝缘, 气流的层流或湍流, 进气的位置和方式, 冷却的程度等有关。为了达到高焓和防止串弧, 一般使气流为层流, 沿约束管逐渐进气, 用多个较薄的垫片。电极用多个钨电极时, 采用每个电极串联镇流电阻和情气保护等措施。

6. 热阴极约束电弧加热器 (可属于壁稳或气稳型式)

小型的电弧加热器多为此种型式, 图 1(k)。进气旋转。弧柱与气流平行。阴极在管壁上的位置如何确定, 是这类加热器电弧稳定的主要问题。实验证明, 有两种基本运行形式。一是“稳定式”, 即弧柱与弧根的位置都是不变的。另一种是“再燃式”, 阳极弧根不断向下游移动, 弧柱拉长, 弧压增高, 到某一时刻弧柱的某点与管壁击穿放电, 弧柱缩

短。此过程反复进行,形成高频的波动。但加热器的运行仍为正常的。这两种稳定的机理也是不少研究工作的对象。

四其他有关的电弧研究

与电弧加热器放电有关的研究大体上有以下几类:

1. 约束型电弧参数的理论。从理论上建立电弧的模型,推算电弧各参数如弧压、温度分布、被加热气体焓等;例如一种约束电弧理论^[4]考虑一维圆柱形的弧柱,利用简化的能量方程和气体参数表达式,推出厂气体焓、沿弧柱的散热量、电压梯度、热效率等表达式。如气体焓的分布为

$$h = C \left(\frac{c_p}{k A^{1/2}} \right) \left(\frac{I}{r_e} \right) \left(1 - e^{-11.5 z / z_0} \right)^{1/2} J_0 \left(2.4 \frac{r}{r_e} \right)$$

式中 A 为电导率随 $\varphi \equiv \int_0^T k dT$ 变化式中的一个常数,

$z_0 \equiv \dot{w} c_p / \pi k$ 是与流量有关的一个定性长度,其余符号是一般常用的。这个理论的某些结果已得到定性的证实。理论结果与实验的直接比较还较少,这主要是由于理论分析大多是定性的,而实验条件一般又比较复杂。

2. 电弧、磁场、气流的相互作用。这方面有两种实验方法,一种是运动电弧,一种是静止电弧。运动电弧研究是在环形或平行轨道电极间形成电弧,用垂直方向的磁场使电弧在电极上运动,研究运动速度、电弧形状、电极表面和材料影响(如文献[7])。静止电弧是在气流中

垂直方向放电, 用横向磁场使电弧稳定, 研究流速、电流、磁场等参数间的关系 (如文献 [8])。通过实验观察, 形成物理模型, 进行理论分析。如文献 [9] 考虑在气流和磁场作用于电弧上的力相平衡时的弧柱模型, 作简化假定后得出:

$$U_{\infty} = \text{const} \times I^{0.15} B_{\infty}^{0.58} \quad (\text{平衡时的气流速度})$$

$$E_{\infty} = \text{const} \times B_{\infty}^{0.21} I^{-0.58} \quad (\text{弧压梯度})$$

$$\hat{r} = \text{const} \times I^{0.70} B_{\infty}^{-0.15} \quad (\text{弧柱半径})$$

$$T_0 = \text{const} \times I^{0.12} B_{\infty}^{0.06} \quad (\text{中心线温度})$$

在同一作者的其他报告中得出 (见文献 [7]):

$$U_{\infty} \propto I^{0.15} B_{\infty}^{0.58} p^{-0.42}$$

$$\hat{r} \propto I^{0.70} B_{\infty}^{-0.15} p^{-0.15}$$

在文献 [10] 中, 考虑了各种影响电弧的参数, 用量纲分析的方法得出了相似电弧在磁场中运动时诸参数间的某些关系, 如

$$U d p^{1/2} / I \mu_0^{1/2} = \phi \left[\frac{\mu_0 I}{B d}, \frac{B^2}{\mu_0 p} \right]$$

(式中 μ_0 为磁导率), 这对归纳实验结果有用处。

在电弧参数的研究中, 也有从半经验的方法得出计算电压的公式,

如文献 [11] 中给出

$$V_{CO} = \frac{3849 p^{0.5} L^{0.5}}{I^{0.25}} - \frac{3785 B^{0.5} D I^{0.15} L^{0.5}}{p^{0.25}} + 946 \left(\frac{M}{A} \right)^{0.5} \frac{L^{0.5}}{I^{0.25}}$$

~ 28 ~

式中符号的解释见原文。在适当选取式中各参数时,计算结果与各种形式加热器实验结果比较,误差在30%以内,可供设计加热器参考。

3. 电弧传热的研究。包括高温气体热物性的测定,弧柱与气体的热交换,弧柱的热辐射,电弧对电极的传热机理和规律等(如文献[2, 13])。这方面的研究对电弧加热器有重要意义。

4. 电弧区域的等离子体探测技术。要深入研究电弧现象,必须有测量电弧内部各参数的手段。在电弧的高温中,这是相当困难的。这方面研究工作还差得较远。在气体稀薄的情况下,可以用电探针的方法测一些数据,但在常压电弧中,电探针就不能用了。一般来说,光谱测量还是一个基本的手段^[14]。高速摄影对研究电弧也是重要的。

五、关于今后研究工作的一些讨论

根据我国科技工作现状和国民经济和国防事业发展的需要,在电弧研究方面应该结合生产的需要做深入一步的研究工作。应该做到理论与实验研究相结合,基本研究与推广应用、实验室研究与工厂试验相结合。在实验室内着重机理和规律性研究以及新原理、新方法的探索,在工厂试验中着重推广应用。研究所的科研人员要经常到厂里和工人相结合,接受工人阶级的再教育,从工人群众中得到启发,从实际中体会到需要解决的理论和实际问题。同时要运用专业所长,发挥实验室和理论工具的作用,认真解决一、两个有意义的问题。

例如在等离子体熔炼的新技术中,若能深入研究一下转移性电弧

和钢料的加热机理和规律,探寻这种加热方法的最佳条件,则应能
和推广这种技术做出一定贡献,同时也应能提高在电弧和等离子体
面的理论和实验水平,为以后进一步指导实践和开展科学实验打下

等离子体化工、等离子体加工工艺、高性能加热器研究等方面也可
类似方式的工作。在选择题目时要考虑到生产需要,各种理论和实
验的平衡,对学科的促进作用,人员和设备条件,外单位力量的发挥
。通过若干年的努力和积累,一定能对提高我国科学技术一个具体
水平做出一定的贡献。

上讨论的内容有不少是很不成熟的,希望大家指正,并通过今后的
高认识。

参 考 文 献

Plasma Jet Technology, NASA SP5033, Oct.1965

John, R.R., "Techniques for the generation of continuous high-temperature gas flows", The Application of Plasmas to Chemical Processing, Baddour, Timmins, ed., 1967, P.13

Sheer, C., "Arc jets in science and technology", Vistas in Science, Arm, D.L., ed. AD679198, Dec.1968, P.135

Folck, J.L., Smith, R.T., "Hypersonic flow diagnostic studies in a large arc-heated wind tunnel," AIAA J., Vol.8, 8, Aug.1970, P.1470

Shepard, "Advanced high-power arc heaters for simulating entries into the atmospheres of the outer planets," AIAA paper 71-263, AIAA 6th Aerodynamic Testing Conference, Mar. 1971

Stine, Watson, "The theoretical enthalpy distribution of air in steady flow along the axis of a d.c. electric arc", NASA TN-D-1331, 1962

Guile, et al., "Column effects in the interaction of arcs with transverse magnetic fields", Proc. 7th Int.

Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Vol.1, 1966, P.745

8. Myers, et al., "Experimental investigation of a magnetically balanced arc in a transverse argon flow", J. Engr. for Power, Trans. ASME, Vol.88, 1, (Jan. 1966) P.27

9. Lord, W.T., "Some magneto-fluid dynamic problems involving electric arcs," Fluid Dynamic Trans., Vol.2, Feiszdon, ed., 1965, P.183

10. Даутов, Жуков, "Некоторые обобщения исследований электрических дуг", ПМТФ, No.2, 1965, стр.17

11. Boatright, et al., "Stored arc-heated air—a concept for a high Reynolds Number, Mach Number 8-10, true temperature test facility", AIAA Paper 71-254, AIAA 6th Aerodynamic Testing Conference, Mer., 1971

12. Schoeck, P.A. "An investigation of the anode energy balance of high intensity arcs in argon", Modern Developments in Heat Transfer, Ibele, ed., 1963, P.353

13. Emmons, H.W., "Recent developments in plasma heat transfer", Ibele, ed., 1963, P.401

14. Huddleston, B.H., Leonard, S.L., ed., Plasma Diagnostic Techniques, 1965