

# 电弧加热技术的研究与发展

吴 承 康

## 一、 引 言

自本世纪以来,电弧的应用不断增加。50年代末期以来,由于空间技术的发展(主要是高温环境模拟设备的需要和高比冲空间推进器的研究),电弧加热技术的水平有很大提高。这也促进了电弧加热技术在各种科学技术领域中的研究和应用。现在除了在空间技术中的应用以外,电弧加热在加工工艺、高强度光源、化工、石油、金属冶炼、钻岩、激光等领域内都有新的研究和应用。有关的基本研究,如电弧和等离子体的研究,物理气体动力学和化学气体动力学也大量开展。表1列出了目前电弧加热技术的某些应用,包括已推广使用的和正在研究发展的项目。

电弧加热技术的本质,就是利用气体(或液体)中的放电产生温度为几千度到几万度的气体,其压力由几分之一大气压到一、二百大气压,流速由低速到十几公里/秒。这样一种气体可以在很多地方产生特殊的和有意义的效果。例如化学反应在这样的高温下将极其迅速地进行,以致有可能使某些化工生产的设备变得小型化,生产成本得到降低,或者生产出一些用其他办法不能生产的化学品种;又如有可能利用高温高速的气流制成高速破碎岩石的新工具。现在已经进行了不少这些方面的试验。

这种高温技术的产生方法和参数测量,它在各种技术领域中的应用,以及有关的基本研究,是目前世界上正在大量开展的研究课题。

这项技术具有高度的综合性,牵涉到的学科领域面很广,如气体放电、等离子体动力学、物理气体动力学和化学气体动力学、耐高温材料、各种工艺过程,等等。其中心的学科可以说是“有放电的高温气体动力学”。

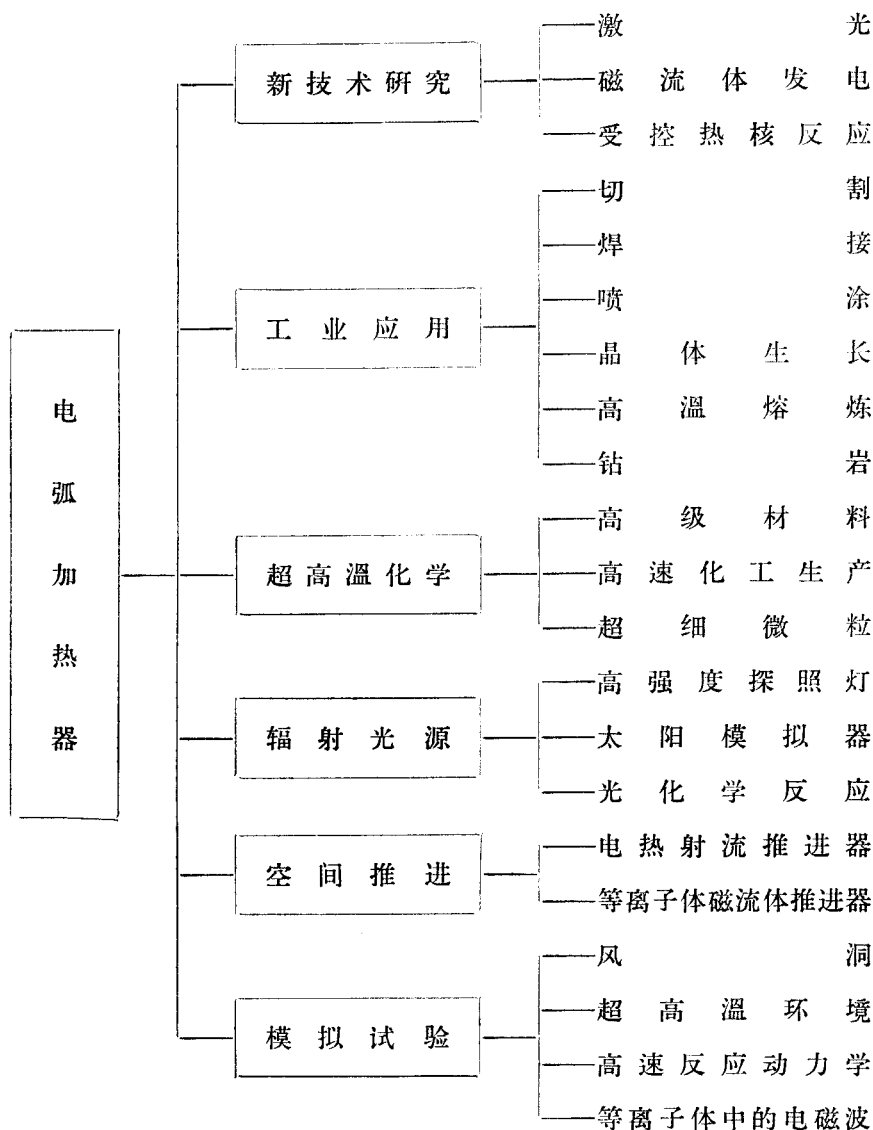
我国十多年来在电弧加热技术方面开展了一些工作,但是比较分散,工作也还不够深入,还缺少对电弧加热技术集中地、全面地从理论到实践都进行研究的单位,需要给予适当的安排,以加强这一工作。

## 二、电弧加热技术发展现状

### 1. 加热器的研制

国外大功率、高熔电弧加热器已达到较高水平。单台加热器电弧功率高达50兆瓦,气体熔高达 $9 \times 10^8$ 焦耳/千克。各种型式的加热器种类极多。根据其中电弧稳定的机理大致可分四类:

表1 电弧加热技术的应用



①磁场稳定——用外加磁场或电流本身产生的磁场使电弧稳定运行，一般是使电弧在电极上高速旋转运动。气流速度基本垂直于电弧。可以是直流或交流电弧。

②旋气稳定——利用进气的高速旋转所产生的径向压力梯度使电弧稳定在旋气中心。气流方向基本平行于电弧。基本上是高电压、长弧、直流。上述50兆瓦加热器属于这一类。

③壁面稳定——利用冷壁（约束管道）使电弧保持在管道中心。气流平行于电弧。用电极的固定位置确定电弧长度。当下游电极处于超音速段时，气流中心焓值可达到很高。上述  $9 \times 10^8$  焦耳/千克焓值的加热器属于这一类。

④自由电弧——不用磁场、旋气或壁面的稳定方法，依靠电极间的电场，或由电极（包括渗透性电极）喷出的气体固定电弧位置。后者，尤其是用渗透性阳极的电弧加热器，可得到很高的热效率。

实际的电弧加热器往往是上述几种型式的混合。各种加热器都有特点,在此不作详述。

除了一般的直流或交流电弧加热器之外,还有用高频感应产生纯净的等离子体的加热器。这种加热器在科学技术中也有重要的发展前途。

用电磁加速的方法对气体加能量,也是一种达到高焓、高速的方法,在空间推进方面尤其重要。

目前虽已进行了大量的加热器研究工作,但是,适合于各种特殊用途的、高性能、长寿命、高效率、使用维护方便的电弧加热器的研制,仍然是需要着重解决的课题。对于各种加热器内部规律和机理也还研究得很不够,以致现在加热器的设计还较多地依靠经验。

## 2. 电弧加热技术的应用

根据表 1 的几个方面,分别简述如下:

①模拟试验方面——为了导弹、人造卫星等飞行器再入大气层的防热、气动、通讯等问题的地面模拟试验,需要创造高温、高速和电离气体等环境,因而发展了各种电弧加热射流、管流和风洞试验装置以及相应的测试技术。这方面国外现有电弧加热器的性能已达到较高的水平,但仍满足不了全部需要。还在不断探寻新的方法,如各种新的电弧加热器和电磁加速器。模拟试验的方法本身也是值得研究的问题。

②空间推进——电弧加热射流或磁流体加速等离子体推进器都是有可能使用的高比冲推进方式。它们适合于配合原子能发电的空间推进装置,在空间推进器中有独特的地位。正在进行不少加速原理和推进器研制方面的研究工作。

③强光源——用强大的电弧加热微小的气流,能产生很强的集中的光辐射。可用于高强度照明,模拟对高速飞行器的气动辐射加热,或模拟太阳对物体和材料的照射。亦可用于激发光化学反应。

④超高温化学——利用电弧加热的高温气流使化学反应极其迅速地进行,或者产生一些在普通温度下不能生成的产物。在流动过程中的适当位置快速冷却气流,可得到所要的产物。国外正进行大量这方面的研究。由天然气制造乙炔的过程已投入工业生产。空气中氮的固定是早已用过的过程,近来正研究更好的流程。其他如石油裂解的各种过程,氰化物、氯化物、氟化物、热解石墨的制造,以及耐高温金属的还原等都正在研究。用高温气流生产超细微粒的过程在生产上也有重要价值。可以预计,用电弧加热的超高温化学在生产中的应用,今后将有巨大发展。

⑤各种工业应用——等离子体切割、焊接、喷涂等工艺过程已经在生产中大量应用,但科研工作仍在积极进行,技术水平不断提高。用高频感应加热等离子体生长单晶体,可以在控制成分的气体环境中,在高温下得到特殊的晶体。等离子体炉用于金属熔炼,可以在不少地方代替真空炉和电弧炉,其特点是速度较快,用电较省,杂质较少,设备投资较低,并可熔炼某些耐高温金属。用电弧加热的高速射流来钻岩石,能达到比机械钻机更高的速度。这些应用,有的已在工业上小规模推广(如熔炼),有的正在积极研究试验(如钻岩)。

⑥科研和新技术中的应用——在磁流体发电的试验研究中,用电弧加热的气体作为试验介质是一种方便的办法。在激光研究中,电弧加热器可用作气动激光器的加热源。在受控热核反应的研究中,脉冲式放电的等离子体加热和聚焦装置是近来发展的一种产生高温、高密度等离子体的方法。由于电弧加热器能产生连续的几千度到几万度的气流,它在很多新技术中将能得到应用。

### 3. 有关的基本研究

结合电弧加热技术的发展,亦已进行了不少有关的基本研究。在国外, Maecker 等进行了多年电弧现象的研究。随着高速飞行对电弧加热技术的促进,大量开展了电弧理论、电弧实验、电弧—磁场—气流相互作用、电弧传热、气流参数测量、高温气流中的化学反应和传热等方面的研究。例如对约束管道中有轴向气流的电弧进行了理论分析,并进行了相应的实验测量。对磁场中电弧运动的速度进行了较多实验,对其机理进行了探讨。还进行了一些用横向磁场平衡气流对电弧作用力的实验。在测量技术方面,用光谱、量热、电子束、激光等方法测量等离子体流的各种参数。

结合电弧加热技术的应用,开展了高温化学气体动力学和物理气体动力学的研究。对于高温气体非平衡流动(有弛豫过程、有化学反应,或有辐射现象的流动)、电磁波和等离子体相互作用、高温气体对固体或液体的传热,以及烧蚀问题等,都进行了大量工作。

总的看来,电弧加热器本身的基本研究还进行得较少。电弧现象比较复杂,理论上不易精确解决,而由于电弧的高温,也不易做好细致的实验。应该用理论和实验结合的方法来深入理解电弧加热器中的过程,把加热器的设计运行提高到理性认识的水平。由于高温气流中有各种物理和化学现象,存在着很多需要研究了解的问题,深入研究这些问题,将进一步推动电弧加热技术在各方面的应用。

### 4. 国内开展工作情况

我国自1958年以来,在利用电弧加热技术模拟高速飞行器的高温高速环境,进行材料烧蚀和气动试验等方面进行了工作。最近全国各地的工厂和产业部门研究单位在等离子体熔炼、等离子体化工、等离子体钻岩等方面进行了不少试验,但比较着重于具体的生产试验,尚没有进行比较基本和系统的研究。对于其中有共同性的电弧加热技术往往是从头开始试验,比较费力。从全国需要来看,不论是国民经济发展或国防的需要,都有必要加强这方面的研究力量,形成一个能从理论到应用进行比较深入的研究,结合生产需要,推动电弧加热等离子体技术在各领域中发展的单位。

## 三、应开展的研究项目

**1. 电弧加热器的研制** 总结加热器研制经验和设计方法,试验新的途径,和有关厂矿等单位结合协作,研制出一系列适合于各种用途的加热器,提供有关单位使用。要求做到性能好,效率高,寿命长,操作维护简单,气流参数经过细致测定,达到定型产品的程度。例如为化工生产用的加热器必须解决长寿命电极和高热效率的问题。为模拟试验用的加热器必须达到高焓、高压等参数要求。

**2. 各种电弧加热器工作过程和内部规律的研究** 要求弄清内部的放电、气体流动、传热等过程,掌握各参数的变化规律,总结出加热器设计的方法和模化法则。例如研究磁旋电弧加热器中电弧稳定的机理和定量规律,各种气流中电弧的理论模型和实验验证,电弧对电极和气体的传热,电弧等离子体的辐射,等等。

**3. 结合应用方面开展有关的基本研究** 例如可根据任务需要,进行以下方面的研究:

①高温气流在喷管中的非平衡流动(风洞、气动激光);

- ②有化学反应的高温气体流动（等离子体化工）；
- ③高温高速气流（包括转移性电弧）对固体和液体的加热和冲刷作用（等离子体熔炼、等离子体钻岩、烧蚀、渗透冷却等）；
- ④高温气流辐射（光源、加热器热损失、飞行器辐射加热）；
- ⑤电磁波与等离子体相互作用（通讯问题）。

4. 电弧加热气流的测试技术研究（包括电弧内部参数的测量）用力学、热学、光学、声学、电磁学的各种方法，测出需要的各个物理量，如温度、密度、流速、化学成分、电子密度、热流、作用力等。

### 参 考 文 献

- [1] 岡田実, 荒田吉明, プラズマ工学 (1965).
- [2] Plasma Jet Technology, NASA SP-5033(1965).
- [3] Sheer, C., Arcjets in Science and Technology, D. L. Arm, ed., Vistas in Science, AD679198(Dec. 1968).
- [4] 力学情报, 1972年第8, 9, 11期。