

热等离子体与能源

清华大学 过增元

1. 热等离子体及其应用概述

等离子体按温度分类是一种较常用的分类方法：粒子温度范围为 10^6 — 10^8 °K的等离子体称为高温等离子体，如太阳、聚变等离子体等；粒子温度范围为 3×10^2 — 10^5 °K的等离子体称为低温等离子体，其中按重粒子温度(即气体温度)水平和热力学平衡的程度还可分为热等离子体与冷等离子体。所谓热等离子体是指重粒子温度在 3×10^3 — 10^5 °K范围，各种粒子成分间基本上达到热力学平衡时的电离气体。如电弧等离子体，高频等离子体和燃烧等离子体均属于热等离子体。

自1808年Davy和Ritter在历史上第一次在两个水平碳电极间炽燃了电弧以来，由于热等离子体的形成、稳定和控制比较容易实现，所以长期以来它一直是等离子体在工业生产和科学研究应用中的主要形式。50年代稳定可靠等离子体炬的出现，为等离子体切割、焊接和等离子体喷镀等工业应用开辟了广阔的前景。由于电弧和热等离子体的高温、反应气氛可变和磁可控的特点，再加上60年代大功率、长寿命等离子体发生器的发展，采用等离子体工艺制备各种难熔金属、金属陶瓷(氮化物、碳化物和氧化物)及其超细粉末取得了很大成功，从而对材料科学的发展作出了贡献。如美国离子弧公司用锆英砂($ZrO_2 \cdot SiO_2$)为原料在直流等离子体弧中一步裂解制二氧化锆(ZrO_2)，70年代已建成年产5000吨的装置。西德海尔曼公司以六氯化钨(WCl_6)为原料在直流等离子体弧中($H_2 + CH_4$)制备碳化钨超细粉等。但是，某些等离子体工艺却因为耗电多，成本高而不能广泛应用和大量推广，如西德Huls和Höchst工厂，美国杜邦公司、西屋电气公司等早在60年代已建成工业性规模的等离子体裂解制乙炔的装置，但近年来未见到大规模推广使用。我国对等离子体裂解制乙炔和制碳黑的工业性试验也有十几年的历史，终因耗电较多，成本较高而看不出具有工业化的前景。因此，长期来普遍的看法是：等离子体工艺仅适用于一些特殊要求的热加工工艺和某些特殊材料的制备；而对于常规的工业加热过程和普通的冶金、化工工艺，从节能的角度来看(由于热等离子体的产生和维持需消耗电能)，等离子体工艺常被认为是不可取的。

热等离子体应用的另一十分重要方面是磁流体发电(MHD)——流动的燃烧等离子体通过强磁场时把热能直接转化为电能。由于这种直接发电的装置可使火电站的热效率由30—40%提高到50—60%；所以多年来强烈吸引着科研和工业部门从事这方面的研究和工业规模的试验。但由于需要巨额的投资和某些技术上的原因，磁流体发电的科研和发展经历了几起几落。就是在目前，是否进一步发展和研究磁流体发电装置仍然是一个争论的问题，如苏联、波兰正在积极推进磁流体发电的发展计划，苏在1980年筹建500兆瓦的电站；美国能源部则在1982年预算里取消了每年提供7000万美元的计划，日本等国则采取观望和稳妥发展的态度。

2. 电能经济

由于对能源需要量的日益增加，以及石油和天然气储量的快速消耗，70年代初形成了

世界性的能源危机。文献〔1〕提供了世界主要能源储量的估计值(见表1)。目前,天然气和石油的用量在美、英、日、德等国家占总能耗的65—75%。如果能源结构不改变,美国的天然气和石油估计将于2000年用完,世界的天然气和石油预计将于2025年枯竭。另一方面核聚变作为新能源的工业应用,一般预测在近二、三十年很难实现,而太阳能、增殖堆和其他代用能源的开发,虽然目前世界各国正大力投资进行研究,但仍不能作为主要能源。1977年3月国际能源会议提供的2000年采用新技术后替用能源的百分数见表2。

表1 世界主要能源

(单位: 10^{30} Btu)

煤	170
石油	33
天然气	10
铀(裂变)	70
增殖堆	420,000
聚变	10,000,000,000

石油的用量在美、英、日、德等国家占总能耗的65—75%。如果能源结构不改变,美国的天然气和石油估计将于2000年用完,世界的天然气和石油预计将于2025年枯竭。另一方面核聚变作为新能源的工业应用,一般预测在近二、三十年很难实现,而太阳能、增殖堆和其他代用能源的开发,虽然目前世界各国正大力投资进行研究,但仍不能作为主要能源。1977年3月国际能源会议提供的2000年采用新技术后替用能源的百分数见表2。

表2 2000年使用新技术后节省油气使用的百分数

所用新技术	比利时	加拿大	丹麦	西德	爱尔兰	日本	荷兰	挪威	西班牙	瑞典	瑞士	英国	美国
太阳能加热	0.38	0.07	4.85	1.16	2.65	2.11	1.25	6.1	0.43	0.32	0.75	0.65	6.41
绝热	2.26		17.12	0.93	12.83		2.03	2.6			0.76	3.37	0.60
废热利用		1.15	4.36	1.86	3.10		0.2				2.37		
快中子反应堆	2.96					0.80						8.99	3.96
风能		0.18	0.73		2.43		0.42	0.14				1.22	1.51
热泵			1.86		1.88			0.4			0.59		
钢铁工业		0.89					0.33			0.86			
煤流态化						9.04				6.07		3.17	7.99
地热						7.27			0.37				
波浪能						2.41		0.09				1.98	

以美国为例,到2000年时太阳能加热也只能替代6.41%,增殖堆仅为3.96等。所以普遍认为近二、三十年内的主要能源应是煤和铀。其措施为尽可能以煤代油(包括发展流态化燃煤技术和燃煤磁流体发电)和扩大核电站能力(预计到2000年美国核电力占总电力的31%,日占33%,法国则将高达48.8%〔2〕)。这里需说明的是,自美国三里岛事件之后,西方工业国家中公众反核电力的呼声十分强烈,但政府决策部门仍决心发展核电,因为从根本上解决主要能源问题的其它出路是不多的(如1982年4月西德在慕尼黑召开的社会民主党的代表大会上拒绝了核电站缓建两年的提案)。

由于石油价格的上涨和以煤及铀作为今后二、三十年内的主要能源,西方开始提出了一种所谓“电能经济”〔3〕的观点。它的主要内容为:

(1) 电能是使用最方便最清洁的二次能源,煤和铀的能量利用今后主要不是以热的形式出现而是以电力形式出现;

(2) 高温电加热工艺可以提高能量利用率;

(3) 高效、合理地使用电能和电能的节省在一定意义上比一次能源的节省更为重要。

由于热等离子体温度高、能量集中和易于控制等特点，热等离子体过程控制、各种等离子体加热工艺就成了实现电能经济的最重要的手段。

3. 热等离子体在能源有效利用与能源开发中的作用

(1) 工业过程加热 工业上所消耗大量能源主要用于过程加热。电弧加热器是最有用最有效的高温电加热装置，它可以把气体介质(空气、蒸汽或惰性气体)加热到燃烧设备或普通电加热设备所不能达到的温度，从而能达到较高的加热效率。图1是空气电弧加热器、天然气+空气燃烧炉二者在不同工作温度下加热效率的比较。天然气理论燃烧温度为 3560°F (1960°C)。燃烧产物的焓值仅为 1300Btu/lb ，当炉子工作温度较高时，只有小部分能量用于有效的加热。而在电弧加热器中，空气可以很容易加热到 4000Btu/lb 的高焓值，所以在相同的工作温度条件下可以得到高得多的加热效率。图2是电弧等离子体加热和燃烧产物加热效率转换成价格的比较曲线。从图中可以看到，当工作温度愈高，愈有利于采用等离子体加热工艺，即容许电力价格高一些时，采用等离子体加热仍比采用一次能源加热更为经济。所以电弧加热器在工业上应用相当广泛，如陶瓷工业炉、铸造行业预热和固化炉、钢坯

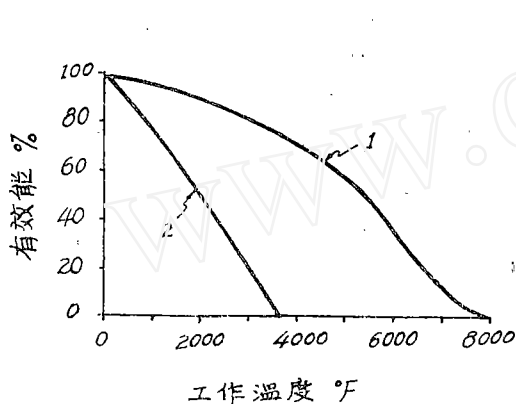


图1 加热效率比较

1. 弧加热空气(4000Btu/lb)
2. 天然气火焰

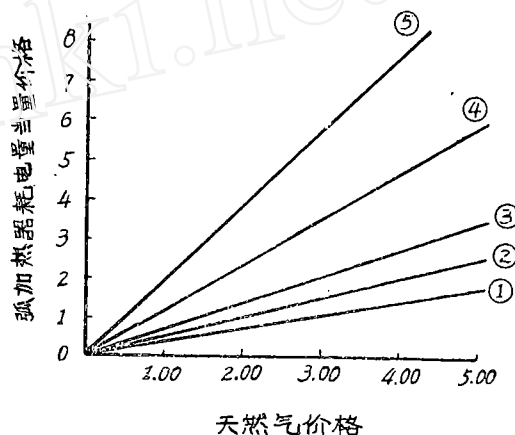


图2 高温加热成本比较

- 弧加热介质：空气 出口焓：4000Btu/lb
效率：85% 加热过程温度($^{\circ}\text{F}$)：①1000
②2000③2500④3000⑤3250

加热和铝熔化炉等，它们的工艺过程工作温度均在 2000°F (1093°C)以上，并消耗大量能源。如一大型多区连续式加热炉，加热厚度6英寸以上的板料，炉子容量为65000千瓦时就可以应用空气电弧加热器，如用燃料产物加热，价格将会更高。

图3是工业规模的电弧加热器，单相交流功率可达到3500千瓦。图4是功率可达10000千瓦的

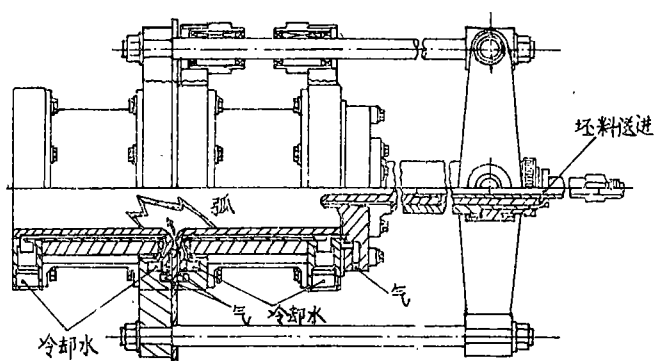


图3 交流弧加热器

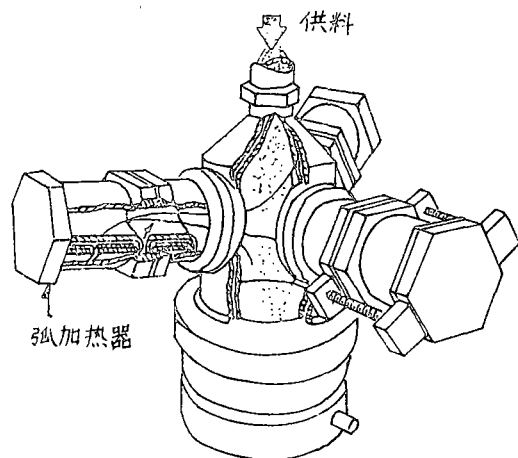


图4 三相电弧等离子体反应器

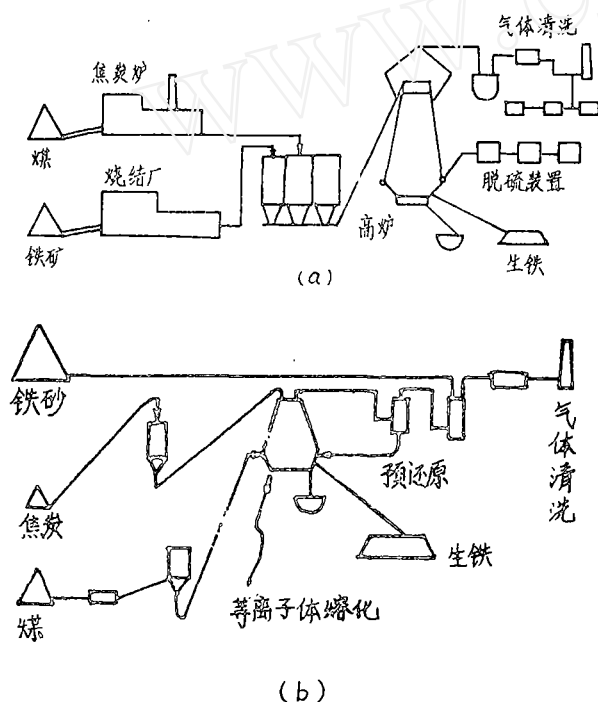


图5 等离子体工艺与高炉炼铁流程示意图
(a) 高炉工艺 (b) 等离子体工艺

三相交流电弧等离子体发生器。

(2) 冶炼 在钢铁部门, 各种各样的直接炼铁的方法一直具有很大的吸引力, 今天, 等离子体直接炼铁工艺已被证明为既节省能源又降低成本的新炼铁工艺。图5是等离子体炼铁工艺和高炉炼铁的示意图。新工艺省去了焦化厂、烧结厂、高炉和去硫装置, 所以可减少能耗和环境污染而降低成本。瑞典的SKF钢铁公司一直在研究发展等离子体工艺, 并声称将用等离子体工艺替代高炉炼铁。因为 (i) 等离子体熔化过程所消耗的矿物燃料仅为高炉的 $1/3$; (ii) 等离子体工艺的排气量仅为高炉、焦化、烧结工艺排气量的 5% , 污染问题大为缓和; (iii) 生铁成本可降低 20% ; (iv) 初投资仅为高炉炼铁工艺的 $1/3$ 。另一好处是, 等离子体工艺可在原有高炉上经改造而实现, 从而进一步降低初投资。

SKF 公司还发展了生产海绵铁的等离子体工艺。1978年一座原海绵铁厂曾因成本太高而关闭, 1979年经采用等离子体工艺, 主要由于大大减少了能耗, 这个厂不久将重新开工⁽⁴⁾, 而且产量还可大幅度地增加。表3给出了海绵铁生产原Wiberg-Soderfors方法与等离子体工艺的能耗比较。

等离子体工艺制备合金钢(耐热、耐腐蚀钢、高速钢和工具钢)的优越性则更为明显。与普通电弧熔锻炉相比其优点为: (i) 省电 $1/4-1/3$; (ii) 添加合金回收率高; (iii) 熔炼质量可与高频真空炉媲美; (iv) 噪声小, 少污染, 劳动条件好。

由东德与苏联合作的研究所发展的等离子体炼钢工艺已进入奥地利的市场, 日本、美国和西德也与之签订了冶金过程中的应用的详细评述可参考文献^[6]

同^[5]。至于等离子体加热工艺在有机和无机化学、

表3 Wiberg-Soderfors方法与等离子体工艺生产每吨海绵铁的能耗比较

Wiberg-Soderfors方法	等 离 子 体 工 艺			
	LPG	重 燃 油	蒸 汽 + 煤	天 然 气
电(千瓦) 960	630	830	825	550
焦炭(公斤) 210	—	—	—	—
重燃油(公斤)	—	130	—	—
LPG(公斤) —	120	—	—	—
煤(公斤) —	—	—	180	—
天然气($\times 10^9$ 米) —	—	—	—	100
总能量($\times 10^{12}$ 焦) 9.6	8.4	8.8	9.2	8.0
[($\times 10^{12}$ 卡) 2.3	2.0	2.1	2.2	1.9]

(3) 等离子体点火 随着油、气燃料储量的快速消耗,以煤替代油、气作为主要燃料成为不可避免的现实。但是燃煤技术比燃油技术复杂,当各种大型蒸汽发生器以煤粉作为燃料时,仍然需要油或天然气作为辅助燃料。一是煤粉锅炉起动点火时必须应用天然气或轻柴油,二是当锅炉在低负荷运行时,煤粉燃烧不稳定,必须喷油进行助燃。对于12.5万千瓦机组(400吨/时锅炉)每次起动需用100—200吨燃油,90万千瓦机组的锅炉,每次起动需耗330吨左右。据统计美国2亿千瓦烧煤电厂每年消耗于点火用燃料油为205万吨⁽⁷⁾。而低负荷运行助燃用油量则更多。我国1980年供应电站锅炉点火用轻柴油也达15万吨。如能把这些用油节省下来那将具有很大的经济意义。

美国西屋电气公司已经研制成一种气体电弧加热器,用于燃煤电站点火⁽⁷⁾。该点火装置已在美国联合碳化物公司所属马里塔电厂试验(其功率为20万千瓦),从而从取消了点火用油,降低了运行费用。美国CE公司(燃烧工程公司)1978年研制成高能电弧点火装置以代替用油点火和助燃,其特点是采用预燃筒,其中并有二次风所形成的强回流以稳定燃烧。此种点火装置可以在机组的15%的负荷下运行。美国CE公司还声称,对于一台60万千瓦机组采用这种系统在运行30年期间可节约燃料油70万吨左右⁽⁸⁾。正在研制中的高能电弧点火装置,最大每小时可提供1500万大卡的能量。

我国自1980年起在安徽、山东和北京等地电厂进行等离子体点火代替用油点火的试验。1981年山东潍坊电厂的75吨/时炉(与湖南矿冶所合作),安徽合肥电厂120吨/时炉(与清华大学协作)等采用等离子体点火试验成功。1982年4月安徽淮南电厂在400吨/时炉(12万5千千瓦机组)(与清华大学协作)等离子体点火工业性试验成功,一次起动节省了轻柴油200吨左右。

(4) 煤的气化 为了更好地更方便地利用煤,常常需要把煤进行气化。用等离子体进行煤的气化是近几年来正在研究和发展的崭新技术。它和其它各种常规煤气化方法相比,其最大的特点是煤的气化效率很高。经典的煤气发生器效率是40—50%,而用等离子体工艺则煤的气化效率可高达80—90%,因此,它起到了能源开发的作用。当然,由于等离子体发生器需要用电,所以其经济上的可行性得到公认为时较晚。

美国和日本对煤的等离子体气化研究已进行了多年。美国技术应用服务公司(TASC)

提出了用等离子体炬把煤转换成合成气的新方法^[9]，它具有能量利用率高、合成气成本低、环境污染少和初投资低等优点。TASC 正在计划进行研制利用等离子体炬气化各种含炭材料，以产生低热值或中等热值的通用气化系统。气化对象包括煤、汽车轮胎、城市垃圾等。苏联在 1971 年就开始了这方面的研究。最近苏联科学院通讯院士 Кружилин 对煤的等离子体气化在苏联大规模应用的可能性进行了论证^[10]。他认为应用等离子体工艺将西伯利亚煤进行气化，可获得合成天然气(甲烷或烃类液体燃料)便于用管道输送到中心地区。图 6 给出了等离子体煤

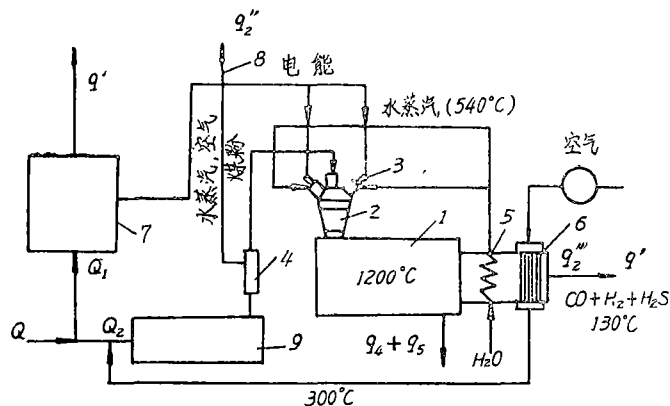


图 6 煤的等离子体气化示意图

- | | |
|-------------|-------------|
| 1. 煤气发生器气化室 | 2. 等离子体反应器 |
| 3. 等离子体发生器 | 4. 煤粉分离器 |
| 5. 蒸汽过热器 | 6. 空气预热器 |
| 7. 等离子体电源 | 8. 煤粉系统空气排出 |
| 9. 燃料制备 | |

气流中发生强烈的气化，形成 $CO + H_2 + H_2S$ 。

等离子体煤气化装置单位容量可达到相当于 500—1000 吨/时的现代煤粉炉的容量。而清除硫化氢 H_2S 要比由煤粉锅炉排气中清除 SO_2 ， SO_3 要容易得多，因为由气体混合物中排除 H_2S 的工艺已经掌握。正是由于等离子体煤气发生器巨大的单位容量，以及污染问题容易解决等优点，等离子体煤气化用于大规模加工西伯利亚煤是有前途的。文献^[10]中还较详细地比较了把煤从西伯利亚直接运输到苏联欧洲中心区，或在当地烧掉以电能形式输送出来等方案，经济上都是行不通的。等离子体煤气化还可用于大型蒸汽燃气装置中，后者热效率可达 45%。文中还列举了有关估算数字，认为建造 100 万千瓦的蒸汽燃气装置，与同样功率带除硫设备的燃煤装置相比可以节省几千万卢布。

(5) 高电压断路器 高压输电线路的能量损失主要决定于输电电压等级和输电距离。由于我国现有高压输电线仅为 220 千伏，而且大型电力基地一般都远离负荷中心，如三峡水电站离北京、上海和广州均有 1000 公里，山西电力基地也离北京有 500 公里左右。因此，据估计我国的输电损耗竟高达 17% 左右。而工业国一般都采用 500 千伏或 1000 千伏以上的超高压输电线，所以输电损耗仅 3—4%。

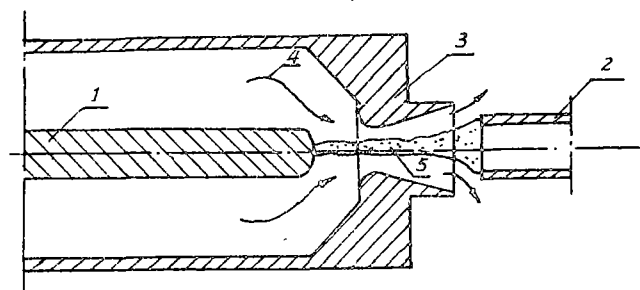


图 7 气吹断路器示意图

- | | |
|--------|------------------|
| 1. 定触头 | 2. 动触头 |
| 3. 喷管 | 4. 空气或 SF_6 气流 |
| 5. 电弧 | |

料，以产生低热值或中等热值的通用气化系统。气化对象包括煤、汽车轮胎、城市垃圾等。苏联在 1971 年就开始了这方面的研究。最近苏联科学院通讯院士 Кружилин 对煤的等离子体气化在苏联大规模应用的可能性进行了论证^[10]。他认为应用等离子体工艺将西伯利亚煤进行气化，可获得合成天然气(甲烷或烃类液体燃料)便于用管道输送到中心地区。图 6 给出了等离子体煤

气发生器的示意图。在等离子体发生器中加热水蒸汽和氧，然后进入反应器 2，煤粉由管路经分离器 4 也进入反应器 2，在高温蒸汽、氧

气流中发生强烈的气化，形成 $CO + H_2 + H_2S$ 。

提高高压断路器的开断能力是提高输电电压等级关键问题之一。如果说，前述热等离子体的应用是为了稳定和有效加热，则在断路中

是要求在触头脱离时，如何有效地冷却和熄灭触头间的电弧。气吹断路器的基本原理如图7所示，它具有一定气压的空气或六氟化硫流过拉伐尔喷管，对电弧进行强烈的冷却，当电流过零点附近时，就可把电弧熄灭。所谓磁吹断路器（如图8所示），就是利用强磁场使触头间电弧弧柱受洛楞次力驱动下，在灭弧介质（空气或SF₆）中进行高速旋转，其后果是电弧受到强烈的冷却，从而使电弧熄灭。显然，提高高压断路器的开断能力和提高输电电压等级，从而节省二次电能，是具有很重要意义的。

4. 热等离子体应用中的技术问题和理论研究

技术问题：

(1) 等离子体发生器 等离子体发生器是等离子体加热工艺中的关键问题之一。国内外都花很大力量研制各种结构、各种型式、不同功率的等离子体发生器以适应不同工艺的需要。其研究方向都是围绕着大功率、高焓值、高效率 and 长寿命等方面进行。例如研究不同的发生器结构，各种电极材料、有效的冷却方式、特殊的气流结构和采用不同的等离子体源等。

(2) 等离子体对原料的加热效率 虽然等离子体电弧、等离子体射流的温度很高，但对流动颗粒原料的加热由于下面两个原因不易取得很高的加热效率：一是所谓热压效应，即气流中温度梯度的存在，使得粉末颗粒从高温处斥向低温处。颗粒直径愈小，气流的温度梯度愈大，热压作用就愈明显。这对粉末的加热和蒸发是不利的，即降低了等离子体的加热效率。另一原因是颗粒在等离子体流中的停留时间很短，一般只有 10^{-3} — 10^{-4} 秒，这也造成了有效加热的困难。

(3) 提高等离子体条件下的反应产物的收率 因为等离子体化工、化冶的特点，主产品常常在极不平衡的条件下产生，而且主产品常是中间产物。因此，在确定的位置和确定的时间，以极高的冷却速度把在高温条件下所得产物固定（冷冻）下来——激冷技术，是等离子体化工、化冶工艺是否成功的关键问题之一。

理论研究：

(1) 等离子体输运性质的研究 等离子体中的输运现象，包括各种驱动力（电场、温度、压力、密度和速度的梯度）作用下各成分（电子、离子、中性粒子和光子等）的运动情况。为了描述质量、动量、能量和电荷的传输，必须知道电导、热导、粘性和扩散系数等输运性质。由于等离子体输运的机制和普通气体不同，因此，它的输运性质与温度、压力等热力学参数的关系也与普通气体有很大的不同。对于单种气体如Ar, N₂, H₂, O₂等的高温输运系数的实验和理论研究已比较成熟和可靠。对于混合气体的输运性质，无论是理论或实验都还研究得不够，特别是混合气体等离子体中的“去混合”现象的机制还不十分清楚。

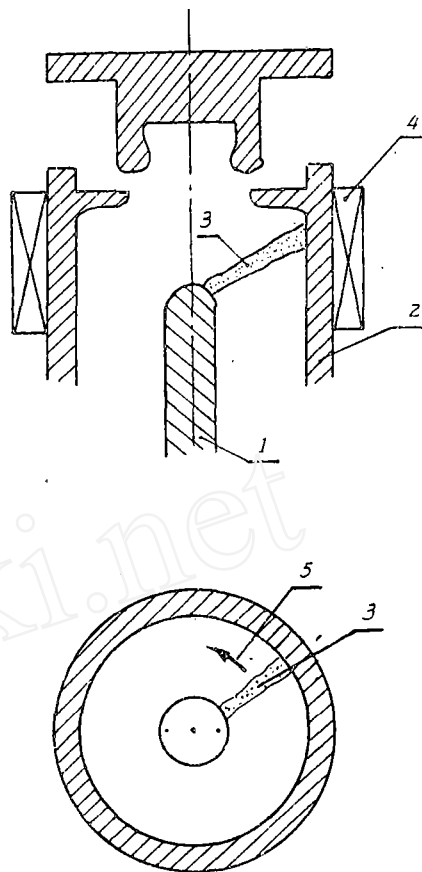


图8 磁吹断路器示意图

- | | |
|---------|---------|
| 1. 动触头 | 2. 灭弧室 |
| 3. 电弧 | 4. 磁场线圈 |
| 5. 旋转方向 | |

(2) 等离子体条件下的传热传质规律 它是能否充分利用等离子体加热的优点的重要问题。等离子体条件下,除了输运系数差别很大之外,传热的机制也有所不同。特别是在等离子体与固壁接触附近的区域,除流动边界层、温度边界层和浓度边界层外,还存在着一个等离子体鞘层(其中准中性特点不再成立),它对换热、换质有影响。等离子体中粒子的加热主要取决于粒子表面的热交换,通常采用气体薄膜热导模型。此外还需知道粒子的轨迹。细颗粒在气流中还存在滑动现象,这时就不能简单地把它当作连续介质来处理。

(3) 电弧等离子体与磁场、气动力因素的相互作用 为获得高焓值、高效率 and 长寿命的等离子体发生器,运用磁场、气动力控制电弧等离子体的行为是十分重要的。理论和实验研究的主要问题为:

磁场、气动力作用下弧柱的旋转运动;

电弧弧柱的磁稳定和气动稳定的问题;

湍流对等离子体稳定的影响;

磁场对热等离子体的压缩或冷却作用;

等离子体发生器中的“双弧”或“串弧”现象等。

(4) 等离子体强化燃烧 等离子体条件下的化学反应速度将被大幅度提高。不仅是由于其温度高,而且还由于在等离子体中存在着正、负离子源作为中间反应过程的介质,从而加速了反应速度。

当运用气体放电来强化燃烧时(称电强火焰),它可使燃烧强度提高30—50%,在一定条件下,传热强度可提高200%左右。

在火焰周围按一定条件施加电场后,形成正、负离子的迁移——所谓离子风,研究它对控制污染有重要的意义。

综上所述,完全可以期望热等离子体的应用和研究将在能源科学技术中起着愈来愈重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Fey, M.G.(1976), Electric arc(plasma)heaters for the process industry, *Industrial Heating*, 43, 6.
- [2] 世界一次能量的消耗组成情况(1976), 火力原子力发电, 27, 10.
- [3] Ross, P.N.(1973), Development of the Nuclear Electric Energy Economy, Westinghouse Electric Corporation.
- [4] ——(1980), Ionmaking with plasma technology promises energy savings and overall economy, *Industrial Heating*, 47, 10.
- [5] ——(1980), Alloy steelmaking with plasma technology promises high efficiency and enviromental advantages, *Industrial Heating*, 47, 10.
- [6] Sayce, I.G.(1971), Plasma process in extractive metallurgy, *Advances in Extractive Metallurgy and Refining*.
- [7] *Electrical Review*, 5(1979).
- [8] Ignition system for large steam generator burns pulverized coal, *Power*(Aug.1978): 86.
- [9] Douglas, B.(1976), Gas from coal, *Textile World*, 10.
- [10] 煤的等离子体气化, 力学进展, 11, 4(1981)(周力行译自: Кружилин, Г.Н. (1980), Плазменная газификация углей, *Вест.АН СССР*, 12).