

热等离子体科学技术的现状和发展*

樊友三

清华大学工程力学系, 北京(邮政编码100084)

提要 概述了热等离子体科学技术的现状和发展, 介绍了一些工业应用和等离子体发生器.

关键词 热等离子体; 冶金; 合成; 等离子体发生器

热等离子体具有很多特点, 如高温(3000—20000K), 气氛可控制为氧化、还原、中性气氛, 电弧的行为可以用磁场进行控制, 等等. 因此, 它在科学技术上具有广阔的应用远景. 从70年代到现在, 热等离子体科学技术无论在中国还是在欧美发达国家, 都得到了迅速的发展.

1 热等离子体科学技术现状

1.1 热等离子体科学技术应用现状

就目前所知, 热等离子体科学技术的应用领域主要有以下四个方面, 即等离子体冶金; 等离子体合成; 热等离子体在加工中的应用; 等离子体的其它应用. 在这几个领域中, 最近几年, 等离子体冶金发展得尤为迅速, 已经进入工业规模生产和试验阶段.

1.1.1 等离子体冶金 近几年, 等离子体冶金发展很快. 在美国, 联邦德国, 民主德国, 法国, 苏联, 瑞典, 南非, 加拿大等国, 已经有工业规模的等离子体装置投入生产, 并已取得了巨大的经济效益. 据不完全统计, 在等离子体冶金领域, 应用于工业规模生产与试验为2MW以上的发生器共有: 2—3MW, 30个; 4—5MW, 5个; 6—8MW, 25个. 至于500kW—2MW的发生器应用得就更多了.

在等离子体冶金领域, 国际上著名的公司或工厂见表1.

等离子体冶金的应用领域主要是: 炼铁工业中的生产还原气和为高炉提高高温, 炼钢工业中的熔炼、回收及钢包加热, 铁合金生产中用来生产铬铁, 锰铁, 等等. 典型装置如图1—3.

在我国, 等离子体冶金起步不久, 但已取得了一些成果, 如等离子体冶炼不锈钢已经投入小规模生产, 并对等离子体冶炼铬铁、钼铁、硅铁、钨铁、铌铁、钛铁等进行了探索. 与

* 第5届全国等离子体科学技术会议(1989年10月21—25日, 大连)大会综述报告.

表 1

| 公司或工厂 | 所用发生器 | 功率 | 生产能力 |
|----------------------------|------------------|---------|-------------------|
| Swede chrome A. B. (瑞典铬铁厂) | SKF 发生器 | 8×7MW | |
| SFPO (巴黎锰铁公司) | Aerospatiale 发生器 | 9×2MW | |
| Scandust A. B. (瑞典) | SKF 发生器 | 3×6MW | 年处理 7 万吨金属氧化废物 |
| Samancor 公司 (南非合金公司) | Freital 发生器 | 12—24MW | 年产 5 万吨锰铁 |
| Middleburg (南非钢铁与合金公司) | 中空石墨电极 | 8MW | 年产 5 万吨铬铁 |
| Freital 钢厂 (民主德国) | Freital 发生器 | 3×6MW | 年产 6 万吨合金钢 |
| Linz 钢厂 (奥地利) | Freital 发生器 | | 年产 7—10 万吨钢 |
| USCO (南非联合钢铁公司) | Huls 发生器 | 3×7MW | |
| Texas Chaparral 钢厂 (美国) | PEC 发生器 | 2×4.5MW | 用于 150 吨钢包加热 |
| Lorlain 钢厂 (美国) | PEC 发生器 | 2×6MW | 用于 220 吨钢包加热 |
| Krupp 公司 (联邦德国) | 装有 10MW 等离子体炉 | | |
| Daido 钢铁公司 (日本) | 多个 1MW 发生器 | | 用以代替真空电弧熔炼和真空感应熔炼 |

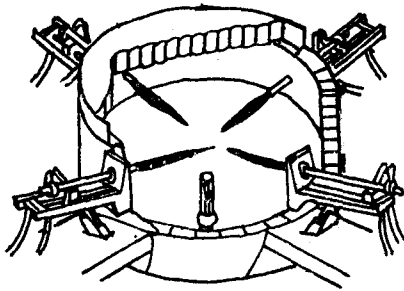


图 1 等离子体炉

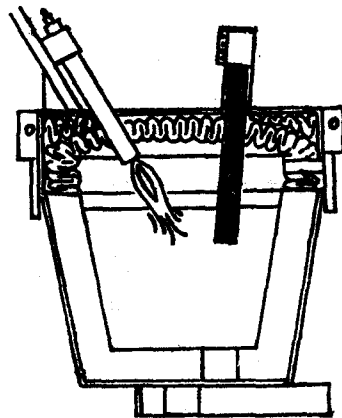


图 2 等离子体钢包加热

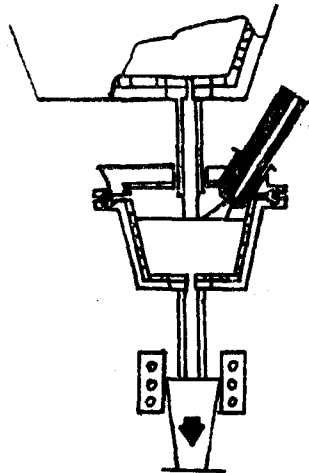


图 3 中间包等离子体加热

国际上先进国家相比，主要差距表现在：工业规模生产和试验少，探索的领域少。

1.1.2 等离子体合成 在热等离子体条件下进行合成有很多优点：①高温与高的冷却速率；②气氛可控；③快的反应速率或生产率。因而在等离子体高温区中可以进行氧化、氮化、碳化等反应，从而制备出各种超细粉末。这些超细粉末有各种用途，如催化剂，弥散强化材料等。用这些超细粉末还可以烧结成各种功能和结构材料。目前国内

外已经用直流高频等离子体制备了 Si_3N_4 , Sb_2O_3 , W , Al_2O_3 , TiO_2 , AlN , TiN , BN , SiC , ZrO_2 , BC 等超细粉末, 但是这些研究大都处于探索试验阶段, 投入大规模工业生产的很少。

进入等离子体高温区的原料可以是气态的, 液态的, 或者固态的。对于液态和固态的颗粒原料, 当尺度范围为 $10\text{--}15\mu\text{m}$ 时, 由于惯性, 可以很容易进入到等离子体高温中心区, 而小于 $10\mu\text{m}$ 的粒子, 由于等离子体的粘性, 却很难进入高温区。

粒子进入等离子体高温区后经历了物理过程(粒子的熔化、气化相变过程, 或晶体结构变化过程)及化学反应过程。目前国内外对等离子体反应器中的两相流换热、温度场、速度场、浓度场等进行了一定的研究, 但对反应器中的高温化学反应动力学及成核机理则研究甚少。

另外, 工程上最关心的反应所生成的粉末在反应器内壁上的结疤问题, 尚未得到解决。

1.1.3 热等离子体在机械加工中的应用 热等离子体在机械工业中应用极为广泛, 如喷涂, 焊接, 切割, 喷铸, 烧结, 球化等。等离子体喷涂已经在工业中广泛应用, 在普通材料基体上喷涂上一层耐腐蚀、耐磨、绝缘或导电涂层。为了提高涂层的结合力, 以及扩展等离子体喷涂的应用领域, 等离子体喷涂的最近发展是: ①高频喷涂; ②低压喷涂; ③喷涂超导薄膜及金刚石涂层; ④喷涂复合涂层。

等离子体切割与焊接已经在工业中广为应用。最新的发展是空气等离子体切割, 在切割尺度较大钢材时可以节约氧气和电石。此外, 等离子体球化法生产流动性较好的球形粉末, 用等离子体喷铸法生产各种难熔金属的形状复杂零件, 用等离子体处理凸齿轮表面使其硬化等, 也得到了发展。

在加工中的一个新应用是等离子体烧结。等离子体烧结过程是一个无压烧结过程。和传统工艺相比, 等离子体烧结可以限制颗粒长大, 缩短烧结时间, 增大致密度。已经用高频等离子体和微波等离子体烧结出 MgO , Al_2O_3 。

1.1.4 等离子体的其它应用 等离子体的应用正在不断拓宽, 如航天工业中电弧加热风洞的应用, 磁流体发电的研究, 开关电弧中的等离子体, 等离子体煤气化, 等离子体凿岩, 刚玉熔炼炉的等离子体排放, 等离子体化工造气, 医药卫生领域中的等离子体手术刀, 等离子体在三废处理方面的应用等。总之, 无论在国外还是在国内, 各种新应用正在不断发展。

1.2 实验研究与理论研究

1.2.1 发生器研究 等离子体技术的发展, 某种意义上说主要取决于发生器的水平。工业化装置要求发生器大功率, 长寿命, 高效率, 安全可靠, 而实验室研究要求参数调节范围大。在国际上有很多单位对等离子体发生器进行了研究。喷枪的功率范围是 $2\text{kW--}60\text{MW}$ 。美国航空航天局 Amcs 研究中心用于重返大气层热防护材料模拟试验的发生器功率为 60MW , 但寿命只有几分钟。目前国际市场上已经有 $2\text{--}8\text{MW}$ 工业用水冷电极等离子体发生器在出售。水冷电极等离子体发生器的类型有:

- 1) 空心电极型 (Hollow Electrode), 简称 HE (图 4)。
- 2) 实心电极型 (Solid Electrode), 简称 SE (图 5)。
- 3) 无电极型 (Electrodeless), 简称 NE (图 6)。

HE发生器和SE发生器又分为转移型 (transferred mode) 简称T型和非转移型 (Non-transferred mode) 简称 NT 型。

在应用中比较有影响的等离子体发生器有以下几种。

1) Hüls 型 (图 7), HE, NT, 8.4MW (7000V×1200A), 有磁场线圈, 寿命 100—1000小时。

2) Linde 型 (图 8), HE, NT, 750kW (250V×3000A), 寿命为 200 小时。

3) Westinghouse 型 (图 9), HE, NT, 2MW (1000V×2000A), 有磁场线圈, 寿命为 200—600小时。

4) Tioxide 型 (图 10), HE, NT, 5MW, 有磁场线圈, 寿命为 1000 小时。

5) PEC型 (美)(图11), HE, NT, T, 4.5MW (900V×5000A), 寿命180小时。

6) Aerospatiale 型 (法国)(图12), HE, NT, 5MW(2630V×1900A), 寿命为350小时。

7) SKF型 (图13), 分段, 固定弧长, 7MW(3500V×2200A), 寿命为 100—600 小时。

8) Daido型 (图14), SE。

9) Voest-Alpine 型 (图 15), SE, 寿命为几十小时。

10) Krupp 型 (图16)。

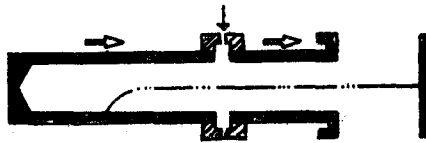


图 4



图 5

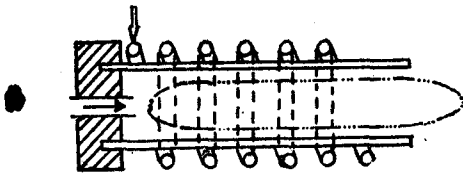


图 6

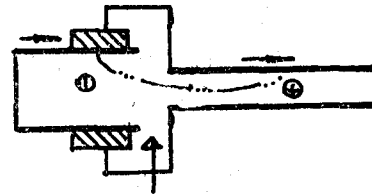


图 7

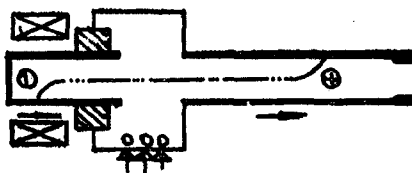


图 8

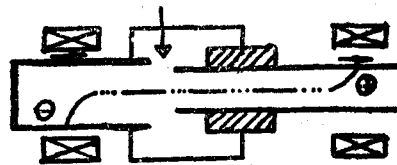


图 9

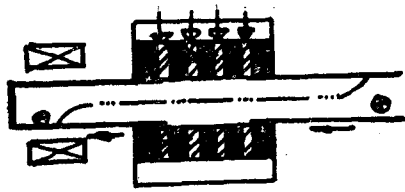


图 10

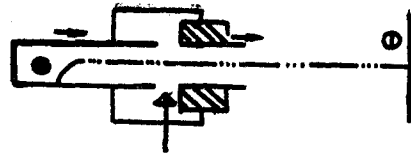


图 11

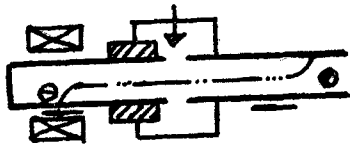


图 12

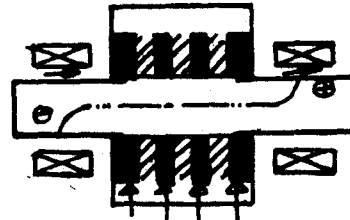


图 13

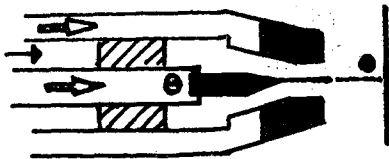


图 14

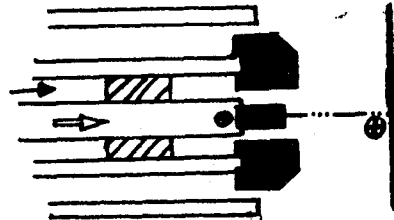


图 15

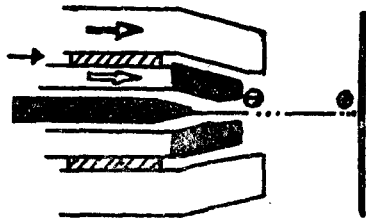


图 16

等离子体发生器的研究，在50—60年代侧重点是保证航天航空研究的需要。人类登上月球之后，等离子体发生器研究的重点又转回到满足工业应用方面。

工业用直流等离子体发生器的主要问题是电弧的稳定与电极寿命。为了达到大功率条件下的长寿命与高效率，国内外对电弧与固壁的相互作用，电弧与磁场的相互作用，

电弧与气流的相互作用，高温气体的电击穿过程等进行了深入的研究。到80年代，在欧美发达国家，这些问题得到了基本解决，从而投入到工业规模的应用与试验中。据不完全统计，冶金上用：25×(6—7MW)，6×(4—5MW)，30(2MW)。用于化工造气(2—8.3MW)共30个。

在我国，小功率的发生器，NE，SE，HE三种类型全有。工业和实验室研究用的基本上是150kW以下的小功率发生器。

1.2.2 数值模拟与诊断 对于等离子体电弧及其射流中的温度场，速度场，浓度场，能量，动量，质量，电量的传输，等离子体与粒子之间的相互作用，发生器及反应器中的流动与传热等，国内外的学者进行了大量的数值模拟，取得了一定的成果，为发生器及反应器的设计提供了极有价值的参考。有些领域正期待人们进一步探索，如高温反应动力学，骤冷

对化学反应动力学的影响, 等离子体中粒子成核长大的规律等。

等离子体参数的诊断, 是一个极为困难的课题。国内外学者采用光谱法, 动态热偶法, 焓探针法, 皮托管等对等离子体的温度场, 速度场, 浓度等进行了诊断研究, 取得了很多成就。

2 等离子体科学与技术发展预估

科学技术的发展, 总要受到经济的制约。根据我国的国情, 工业, 经济, 技术水平, 即投资的可能性及技术的可达性, 有必要对我国热等离子体科学与技术的发展进行预估。但是, 由于笔者水平有限, 加上对国内等离子体科技工作者的工作缺乏全面深入的了解, 对发展的预估可能不正确, 因此这些发展预估仅供参考。

①等离子体冶金。无论在国内还是在国际上, 等离子体冶金将会加快步伐。在国内, 在铁合金, 钢包加热, 精炼, 提高风温, 萃取金属等领域将会有较大的进展。在三四年之内, 可望有1MW级的等离子体炉及水冷电极等离子体发生器投入工业规模的生产或试验。

②等离子体合成。等离子体合成所需要的等离子体发生器及辅助系统的技术已经解决, 而且投资不大, 因而最近几年将会有较大的发展, 表现在: 将会有小规模工业化装置投入生产; 应用领域将会进一步扩展; 等离子体合成的超细粉+冷热等静压技术+新型烧结技术(微波等离子体烧结, 高频等离子体烧结, 辉光等离子体烧结)可能制备出新型, 高强, 高效的结构和功能材料。

③等离子体在机加工中的应用。几年内应用领域将会扩大, 其中高频喷涂, 低压喷涂, 金刚石及超导薄膜的喷涂将会逐步开展, 等离子体烧结技术将会发展, 并有可能投入应用。

④热等离子体的其它应用。应用领域将会拓宽, 有可能出现令人感兴趣的新领域, 如用热等离子体对三废进行处理等。

⑤理论研究 with 实验研究将会更加深入。

由于计算技术的发展, 发生器及反应器中过程的数值模拟将会有较大的进展, 发生器的试验研究将会加强, 由于投资的不足, 诊断技术的发展将不会太快。

THE PRESENT STATUS AND FUTURE DEVELOPMENTS OF THERMAL PLASMA SCIENCE AND TECHNOLOGY

Fan You-san

Department of Engineering Mechanics, Qinghua University (Tsinghua University)

Abstract An overview of the present status and future developments of thermal plasma science and technology is given. Some industrial applications and thermal plasma generators are described.

Keywords *thermal plasmas; metallurgy; synthesis; plasma generators*