

等离子体熔融技术在核电站废物处理中的应用

宋 云 , 刘夏杰 , 陆 杰 , 陈明周 , 吕永红
(中科华核电技术研究院有限公司 , 深圳 518124)

摘 要: 简述了等离子体技术的应用背景和等离子体技术的原理; 详细介绍了国内外等离子体熔融技术中的处理废料种类、等离子体熔融炉结构、尾气处理工艺等; 归纳了国内外所应用的等离子体熔融技术的几个特点: 等离子体熔融处理技术由于具有处理速度快和减容比高等优势, 在中低放废物的处理领域是最具前途的技术之一。

关键词: 等离子体; 熔融技术; 核电站; 废物处理

中图分类号: X824

文献标识码: A

Application of Plasma Melting Technology in the Radioactive Wastes Treatment of Nuclear Power Station

SONG Yun , LIU Xia - jie , LU Jie , CHEN Ming - zhou , LV Yong - hong
(China Nuclear Power Technology Research Institute Co. , Ltd , Shenzhen 518124 , China)

Abstract: The application background and principle of Plasma technology was briefly addressed. Waste types , plasma melting furnace structure , and tail gas treatment process in the application of plasma melting technology at home and abroad were introduced. The application of plasma melting technology characteristics were summarized: plasma melting technology had the advantages of fast processing speed and higher reduction ratio and so on. It is one of the most promising technologies in the field of low - intermediate - level radioactive waste treatment.

Key words: fusion technique; nuclear power station; waste treatment

前 言

伴随着商业运营核电机组的增加,放射性固体废物处理与处置成为核电行业的共性问题。采用适当的减容处理方法能够提高处置的安全性与降低处置成本,并带来显著的社会安全效益与环境效益。核电站中低放固体核废物分为有机废物和无机废物。有机废物包括:吸水纸、棉布、木材、塑料、橡胶、离子交换树脂、过滤器芯子等。无机废物包括:金属、砂石、灰渣、混凝土块、石棉等^[1]。目前,国内核电站对于中低放固体核废物主要采取的处理措施有:水泥固化、混凝土固定、压缩减容、暂存等方法。

1 等离子体技术

所谓等离子体就是离子化呈电中性的气体,是物质固、液、气3种存在状态之外的第四种形态,又称为第四态。它由大量的正负带电粒子和电中性

的粒子组成,粒子的能量一般为几个到几十电子伏特。因此可以将固体废弃物中的分子彻底分解,再重新组合,这时有害物质被分解,重金属被分离开来,其余部分被熔融后固化成玻璃体^[2]。目前,等离子体领域内有工业价值的连续的等离子体流的产生方法主要有2类:采用电弧等离子炬(电弧等离子体发生器)和自由电弧。目前,国外将等离子体熔融技术应用于处理核电站的固体废物的研究。该技术能够达到高减容比与玻璃化,以满足核电站对于减容与安全处置的需求。

2 等离子体熔融技术在国内外固废处理的应用

目前,在国内核电站的中低放固体废物处理中,主要采用的是压缩减容和水泥固化,这两种方

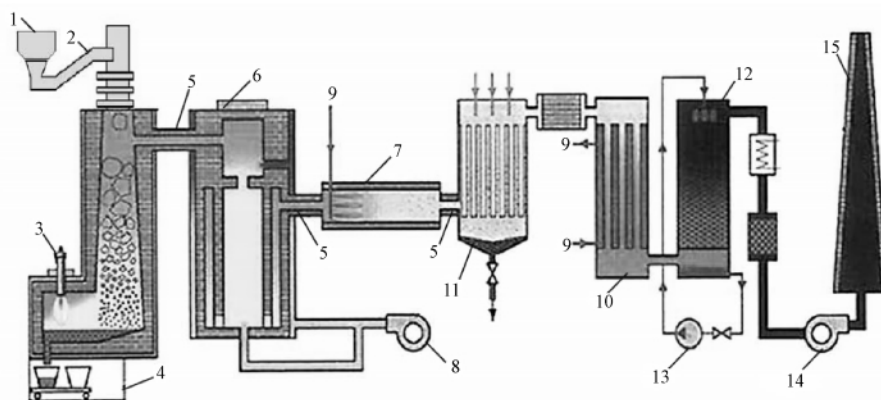
收稿日期: 2011 - 12 - 29

作者简介: 宋 云(1983—),男,四川荣县人,助理工程师,硕士,研究方向为核电站三废处理技术研究。

式的减容比都不高,等离子体高温焚烧熔融处理技术是近十多年发展起来的一项新技术,因等离子体弧温度极高、能量集中、熔融产物稳定、投资运行费用相对较低等优势成为低放废物处理领域最有发展前途的技术之一。在国外,俄罗斯、日本等国都已将等离子体熔融技术运用到中低放固废减容工艺中。

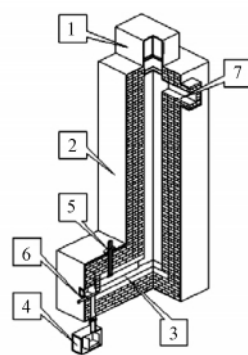
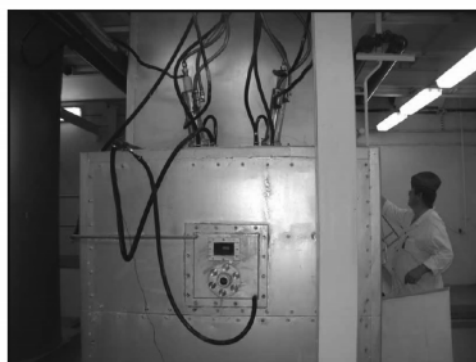
2.1 俄罗斯等离子体气化熔融废物处理技术^[3]

俄罗斯 Kurchatov 研究所与俄罗斯 SIA RA-DON 共同研究开发了等离子体气化熔融废物处理技术,该技术用于处理包括城市固体废物、医疗废物、低中放废物、工业废物等。设施处理能力为 350 kg/h,已于 2002 年正式运转。图 1 为该技术的系统流程,图 2 为等离子体炉。



1、废物储存;2、进料装置;3、等离子体炬;4、玻璃体排出;5、绝热气体导管;6、副燃室;7、蒸发冷却器;8、鼓风机
9、进出水;10、布袋除尘器;11、热交换器;12、精细过滤器;13、泵;14、引风机;15、烟囱

图 1 系统流程



1、废物进料单元;2、竖型炉;3、熔炉;4、融渣收集室;5、等离子体炬;6、门;7、尾气出口

(1) 实物图

(2) 结构图

图 2 等离子体竖型炉结构示意图

整个系统在负压下运行,炉内的运行压力为低于大气压 200 ± 100 Pa。该系统主要包括竖型炉、副燃烧室和烟气处理系统。

竖型炉内衬难熔耐火砖及耐火纤维绝热材料,熔融炉外层由钢板构成,顶部设置水冷法兰安装等离子体炬,熔融炉底部有卸料口,在加热过程中和卸料完毕后由塞子堵塞。熔融炉的顶部逐渐变细,转变为竖型炉。竖型炉的进料装置为有两个气闸的气密室,位于竖型炉上方。废弃物进料时经气密

室,防止空气进入竖型炉,废弃物利用重力进入竖型炉,此时废弃物被烟道气加热。由于竖型炉顶部处于乏氧环境,废弃物在这里进行干燥及热解,并产生大量的热解气体。未气化的废弃物进入熔池,高温熔融后形成熔渣,由熔渣排放口排放至接收容器,冷却后送到处置场处置。

竖型炉所产生的热解气体送至副燃室,副燃室温度控制在 $1\,000 \sim 1\,200$ °C,使可燃气体及气溶胶成分完全燃烧。副燃室包括一个预混合室和一个反

应室,等离子体炬垂直安装在预混合室的顶部,空气以阶梯方式送入副燃室,一半进入预混合室,另一半进入反应室。梯级供气可以减少氮氧化物的产生,保证烟气的停留时间。副燃室出来的烟道气经热交换器将温度降至 400℃ 以下。

烟道气处理系统主要包括蒸发冷却器、热交换器、袋式过滤器、洗涤塔、气体分离器及最后过滤器等。烟道气自副燃室出来后经蒸发冷却器及热交换器,将温度降低后再经袋式过滤器去除颗粒物,已去除颗粒物的烟道气送至洗涤塔去除酸性气体,经洗涤后烟道气通过气体分离器去除湿气,再经最后过滤器过滤后由烟囱排放。

2.2 川崎重工等离子体减容设备

日本川崎重工业公司开发的等离子体减容设备,以高温等离子体弧为热源,可同时熔融不燃物及分解难燃物。处理对象主要是核电站贮存的杂项固体废物,比如:不锈钢和碳钢、混凝土及保温材料等无机物,还有焚烧可燃物产生的灰烬等。

本套处理系统主要由预处理、分选装置、减容装置(等离子体熔化炉)、尾气处理系统、以及冷却固化装置构成,如图 3 所示^[4]。

在预处理和分选装置中,对金属和无机物进行大致分类、计量,并把大块的废物适当地切割、破碎。另外,还将难燃物和不燃物进行分类,并用进料器连续地供给废料。

等离子体熔化炉采用铜作为电极,并对铜电极进行水冷却。由于放电时铜会产生损耗,经过对电极形状和运行条件优化后,熔炬电极的寿命达到了 2 000 h 以上。载体使用的是空气。熔炉为内径约 2 m、高约 1 m 的耐火炉。熔融物的排放采取从炉底排放口倾斜炉体的方式,接收排放熔融物的容器为内衬耐火材料的钢制桶。在冷却固化装置中,把接收容器中的熔融物慢慢冷却,固化体冷却后把每个接收器中的废物分别装入 200 L 桶中,并将桶内缝隙用固化材料(灰浆)填充,最后制成适合于处置的废物体。

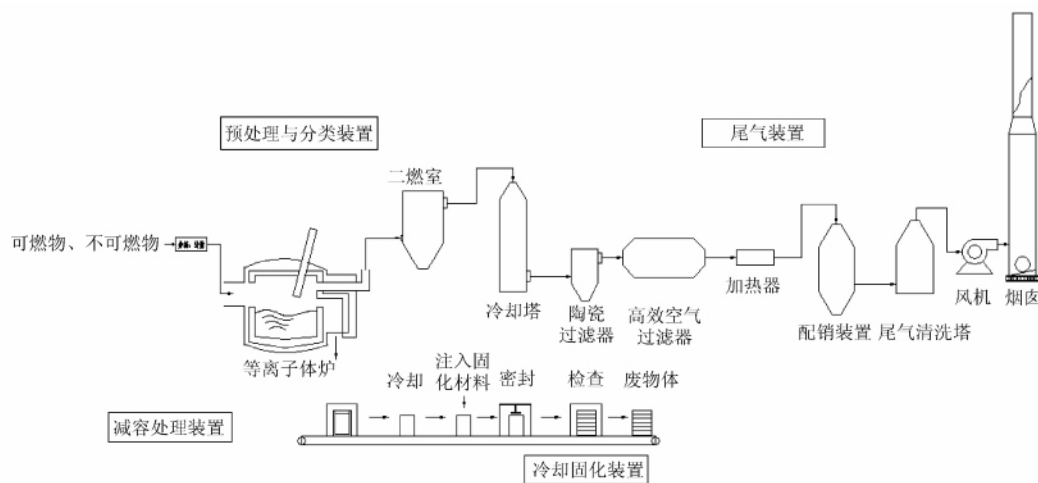


图 3 等离子体减容系统

在尾气处理系统中,处理由等离子体熔化炉产生的有害气体(氮氧化物)和难燃物燃烧时产生的有害气体(氯化氢及二氧化硫)。从熔炉排出的尾气(1 200℃)中未燃烧的成分则在二次燃烧室完全燃烧。燃烧完后的废气经过冷却塔使气体快速冷却,这样就可防止二恶英类重新合成。该系统采用陶瓷过滤器和高效空气过滤器来除去放射性,可确保 107 以上的去污系数。氮氧化物通过氨选择催化方式的脱硝装置消除;氯化氢、二氧化硫则以去除效率高、应用广泛的湿法(排放气体清洗塔)去除。经过上述处理,尾气通过风机排至烟囱。

2.3 台湾的等离子体熔融技术

台湾核能研究所开发的等离子体焚化熔融处理系统,处理对象为低放射性废弃物中的可燃物质和不可燃物质。

该系统的处理能力为 250 kg/h。主燃室的最高操作温度为 1 650℃,副燃室的操作温度通常为 1 100℃。该套系统由进料系统、等离子体熔融炉、二燃室和尾气处理系统组成。该系统的流程如图 4 所示。进料系统由料桶输送机、推杆进料机构、提升机、料桶夹具装置、进料室组成。

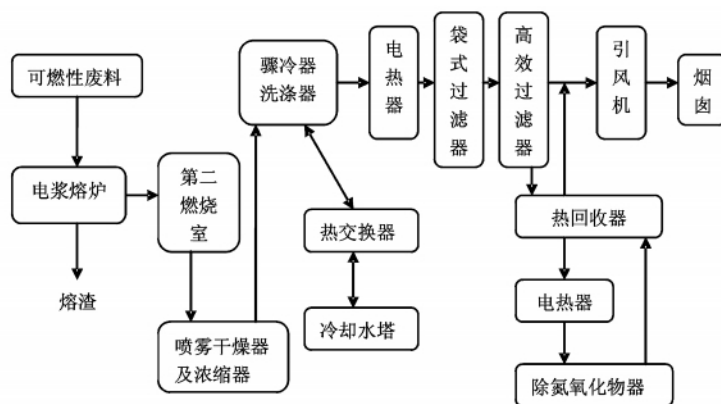
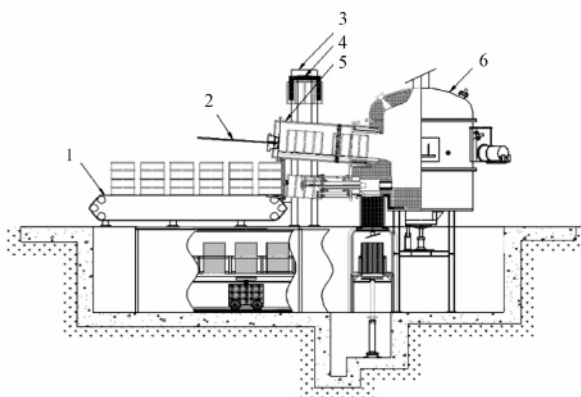


图 4 放射性废物等离子体焚化熔融系统流程图

在进料室中,为防止气爆,对废料桶盖子和底部进行刺孔后被推杆推入炉膛内,如图 5 所示。



1、料桶输送机;2、螺纹推杆进料机构;3、提升机;4、废料桶夹具;5、进料室;6、等离子体熔融炉

图 5 等离子体熔融炉图

等离子体炉为圆柱形结构,外径 244 cm,高度 337 cm,可以分为 3 段。最底段由 50 cm 厚的高铝难熔耐火材料构成,炉子的设计为连续运行,最底段可以横向侧移以方便检修。等离子体炬作为等离子体熔融炉的电弧加热器,以氮气作为主工作气体。等离子体炬安装在炉子顶部,配有一个三维操作机构,可以实现上下和圆周旋转。

当熔融处理完成后,熔渣排放到一个 45 加仑的铁桶中,冷却后装入 55 加仑的铁桶内最终处置。在处理放射性废物时,为了减少辐射暴露,熔渣处理系统安装在地下室,其由空桶输送机、装料台、熔渣桶转移通道、熔渣桶冷却通道、熔渣桶转移到储存桶机构以及压差隔离室组成。当空的接收桶被放置在水冷夹套的卸料台上后,排料系统开始卸料,闭路电视和红外传感器可以监控桶内熔渣的液

位,使它不会超过 90%。接收桶装满后,先退出卸料台,然后被推入冷却通道,在冷却通道末端,接收桶被转入储存桶。冷却通道装有水冷板,并通入大量空气来加速料桶的冷却。

尾气处理系统由急冷器、洗涤器、加热器、高效过滤器和袋式过滤器组成,如图 4 所示。为了减少二次液体污染,在第二燃烧室与急冷器之间加装了喷雾干燥器,用以去除洗涤器产生的溶液。另外,为了减少尾气中由于等离子体过程产生的氮氧化物,在高效过滤器后安装了加热器和选择性催化还原(DeNO_x)单元。喷雾干燥器产生的盐粉末连同袋式过滤器产生的飞灰一起被收集在 55 加仑的铁桶中,然后回炉熔融处理。

2.4 徐州润博的等离子体熔融裂解技术

徐州润博等离子体环保设备有限公司研制了

适用于金属冶炼、危险废弃物、电路板等多种废物处理的系列等离子体弧裂解设备。整个系统由进料装置、等离子体弧熔融裂解炉和尾气处理装置组成^[5]。如图 6 所示。废料经过破碎,由皮带输送机传送进炉膛内,废料利用石墨电极产生热等离子体的高温,在缺氧的环境中将废料中的有机物分解成富氢气体以及少量的酸性气体,无机物熔化后排出炉体冷却成为类熔岩玻璃体,对有毒有害的重金属具有良好的包裹性。排渣采用炉体整体倾倒的方式,利用渣液自重快速排渣,防止渣液堵塞。生成的尾气进行二次燃烧、急冷、脱酸、除尘、吸附净化系统,达标后排放。设备经过中试,对熔渣及尾气系统进行了正式检测,各项指标均符合国家相关环保标准。系统流程如图 7 所示。

2.5 核工业西南物理研究院废树脂等离子体处理技术

核工业西南物理研究院自上世纪八十年代开始进行热等离子体在材料、环保方面的应用研究,通过多年的应用研究和开发,积累了丰富的实践经验。目前,已经完成等离子体高温冷试验装置的设计建造,正在进行系统实验,图 8 为等离子体高温冷试验装置设备示意图。

整个系统主要包括混合物进料、等离子体熔融、玻璃体冷却固化、尾气净化几个部分。



图 6 等离子体弧裂解设备

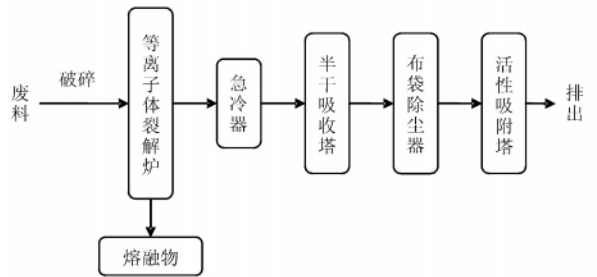


图 7 等离子体弧裂解系统流程图

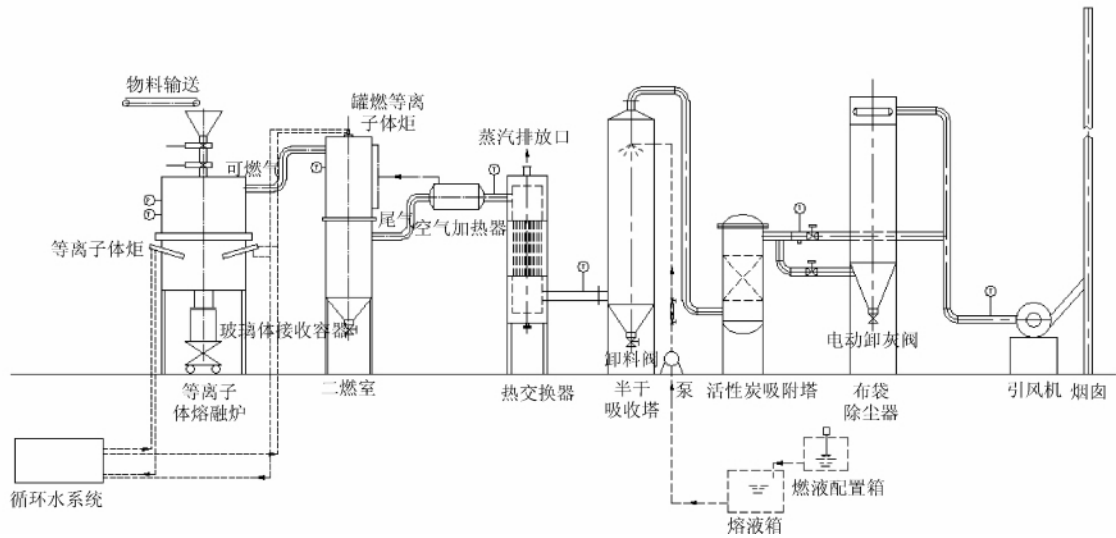


图 8 等离子体高温冷试验装置设备示意图

玻璃形成剂和废树脂按一定比例在混合进料器中混合均匀后,分包投入等离子体熔融炉。等离子体熔融炉为多层圆筒型结构,内衬耐火隔热材料,壳体采用碳钢板焊接而成。熔融系统配备三套电弧等离子体炬及高频开关电源,氮气作为等离子体炬的工作气体,经电弧放电后产生高温等离子体

弧。在等离子体高温反应区里高温等离子体对进入反应区的有机物质分解气化,形成可燃性气体,无机物质被转化成熔融状的类玻璃体物质。有机废物热解产生的可燃性气体及挥发分物质进入第二燃烧室,气体分离装置分离出的氧气与空气一起

(下接第 15 页)

瞬时流量和累计流量。废水处理系统的运行与维护基本以就地控制为主,以主控室监控为辅。接至主控室的开关量信号有 19 个,可以监控 11 台计量泵及 8 台机械式搅拌器的运行;同时还接若干个 4~20 毫安信号,以监控 pH 计、雷达料位计、污泥界面仪、超声波液位计、电磁流量计的即时状态,一旦出现异常,主控室操作人员立即通知废水处理系统的管理人员进行处理。

4 结果与讨论

荆门热电厂脱硫废水中悬浮物浓度很高,有时高达 25 000 mg/L 以上,且颗粒细小。废水中加入石灰乳和絮凝剂后,很快形成沉降性较好的大颗粒,在澄清池中固体颗粒被浓缩成污泥。另外考虑到加入药剂后,沉降性较好,即使有搅拌器不停搅动,也会在三联反应箱中沉积不少淤泥,因此,在该系统中,外加了一套工业水反冲洗系统,较好的解决了这个问题。

由于 FGD 的废水中含有很多细小的石膏和石灰石粉等杂质(实际的 SS 值较高),在系统运行中,发现无需澄清浓缩池中的污泥返回至三联反应箱去加速反应,就能在反应池中很好地形成矾花,为此,在运行中基本不需要污泥回流。

综上所述,该系统采用的改进型化学沉淀法处

理脱硫废水具有如下特点,并被证明是一种有效的脱硫废水处理技术:

(1) 适用于烟气脱硫废水的处置,出水可满足排放要求。

(2) 节省投资、操作简单、管理方便、运行费用低,系统无一次提升,进水和出水均靠自流方式输送。

(3) 系统具有防腐、防磨、防结垢、防堵塞等功能。

(4) 运行维护方便,可在 FGD 装置连续运行的情况下更换易损件,拆卸和重装不改变原设计结构。

(5) 可配备在线测试仪表和人工取样装置。

(6) 设备具有自我保护等功能,并提供设备故障报警,整个系统基本以无人值守方式操作。

[参考文献]

- [1] 周祖飞. 湿法烟气脱硫废水的处理[J]. 电力环境保护, 2002, 18(2): 37-39.
- [2] 郭峰. 湿法脱硫废水处理技术[J]. 电力环境保护, 2004, (9): 49-50.
- [3] 胡将军, 谢非, 李英柳, 等. 脱硫废水处理试验研究[J]. 环境保护科学, 2002, 28(5): 11-13.
- [4] 封志飞, 王丽华, 张媛. 电厂石灰石-石膏法烟气脱硫废水处理. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25: 321-323.

(上接第 9 页)

被加热后送入二燃室,与可燃性气体一起燃烧,二燃室顶部安装了一个小功率的等离子体炬,起点火和稳燃的作用。无机物质在熔融炉内被转化为熔融状的类玻璃体物质,从熔融炉底部经过一个高温热阀门间歇排放到接收容器,待玻璃体冷却后取出,最后进行固定处理。

从二燃室出来的烟气和其它灰质进入尾气净化系统,尾气净化系统主要由加热器、热交换器、半干吸收塔、活性炭吸附塔、布袋除尘器、引风机、烟囱组成。

3 结 语

通过对国内外实际应用的几种等离子体熔融系统分析,可以看出:

各种处理系统的尾气处理工艺和尾气处理设备较为一致

两种等离子体热源(电弧等离子炬和自由电弧)都能顺利的运用在混合废料上;对于等离子体熔融炉,由于处理废料的种类和熔融处理工艺不同,直接影响着等离子体熔融炉的结构形式。等离子体炉是等离子体处理系统的核心,它是整个工艺能否成功的关键。相对于

传统废物处理方式,等离子体处理温度更高、热负荷更为集中,因此炉体的内衬材料选择、废料的进料方式、高温熔融体的排出等问题都还有待进一步完善。

等离子体熔融技术在国外已经得到了工业应用,在国内也顺利地运用在普通工业废物处理技术上。随着国内核电大发展,相信等离子体熔融技术将在核电站废物处理方面大有作为。

[参考文献]

- [1] 黄来喜, 何文新, 陈德淦. 大亚湾核电厂放射性固体废物管理[J]. 辐射防护, 2004, 24(3-4): 211-226.
- [2] 林小英. 等离子体技术在固体废弃物处理中的应用[J]. 能源与环境, 2005, 1: 46.
- [3] Sobolev I A, Dmitriev S A, Lifanov F A, et al. High Temperature Treatment of Intermediate - Level Radioactive Wastes - via Radon Experience [C]. Tucson, AZ: WM 2003 Conference, 2003.
- [4] 刘胜吾(译). 放射性废物等离子体减容设备的开发[J]. 国外核动力, 2000, 4: 59-61.
- [5] 丁恩振, 丁家亮. 等离子体弧熔融裂解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009: 129-137.