

等离子体技术处理放射性废物的研究进展*

王 兰, 陈顺彰, 侯晨曦, 樊 龙, 马登生, 舒小艳

(西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室, 绵阳 621010)

摘要 等离子体技术处理放射性废物具有高效、环保、节能等特点, 符合放射性废物处理的技术理念, 具有广阔的应用前景。简述了等离子体技术处理放射性废物的原理及特点, 详细介绍了等离子体技术在矿山开采放射性废水、核工业放射性废物和医疗放射性废物方面的应用, 并着重分析了该技术的优势, 最后就目前等离子体技术处理放射性废物过程中的问题进行了阐述。

关键词 等离子体技术 放射性废物 烧结

中图分类号: TL941

文献标识码: A

Research Progress on Radioactive Waste Treatment by Plasma Technology

WANG Lan, CHEN Shunzhang, HOU Chenxi, FAN Long, MA Dengsheng, SHU Xiaoyan

(Key Subject Laboratory of National Defense for Radioactive Waste and Environmental Security, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010)

Abstract The disposal of radioactive waste by plasma technology with the features of efficiency, energy-saving and environment-friendly, which is in line with the concept of treating radioactive waste, has a wide application prospects. This paper briefly introduces the principle and the features of plasma technology disposal radioactive waste, and then the details of the research status of plasma technology in the treatment of mining radioactive waste water, nuclear waste and medical radioactive waste are presented. Moreover, the advantages of this technology are mainly analyzed. Finally, the problems existing in the process of radioactive waste treatment by plasma technology are also stated.

Key words plasma technology, radioactive waste, sintering

0 引言

随着核技术的迅速发展, 放射性物质在核能发电、医学治疗等领域得到了日益广泛的应用, 对促进国民经济和科学技术的发展发挥着不可取代的作用。放射性物质在为人类的进步做出巨大贡献的同时, 不可避免地带来了大量放射性废物。这些放射性废物一旦处理不当就会对周围环境造成污染, 危害人类自身健康。因此, 在走可持续发展之路的今天, 如何安全高效处理放射性废物已经成为世界各国关注的焦点。

等离子体技术 (Plasma technology) 是近年来发展起来的一种物理、化学、微观电子学相结合的新型技术, 具有工艺简单、高效、能耗低、适用范围广等优点, 在环境污染治理尤其是放射性废物的处理方面取得了良好的效果。相对而言, 常规的处理技术已经显现出了许多不足之处, 例如体积庞大、二次污染、运行费用高、处理周期长、能源消耗高等, 特别是在放射性核素、受放射性核素污染的特殊废弃物处理方面, 常规技术往往不能达到预期的目标, 并且会带来二次污

染问题。放电等离子体技术因其不会带来二次污染问题, 并且处理时间短, 进一步显现出其环保性和高效性, 成为处理放射性废物领域中最具有发展前途、最引人瞩目的一项新型科学技术。

本文主要介绍了放电等离子体处理技术的原理、优势, 以及处理矿业开采、核工业和医疗领域放射性废物的国内外研究现状, 并展望了其在放射性废物处理方面的应用前景。

1 等离子体技术简介

1.1 等离子体技术工作原理

等离子体 (Plasma) 是除固体、液体、气体以外, 物质存在的第四种状态, 是一种含有电子、自由基、离子和中性粒子的电离气体, 整体呈电中性, 容易受磁场、电场的影响。按照粒子密度和粒子温度, 等离子体分为热等离子体 (Thermal plasma) 和非热等离子体 (Non-thermal plasma)。热等离子体具有很高的能量密度, 能够到达热力学平衡。然而, 非热等离子体的能量密度较低, 通常是由电晕放电、介质阻挡放电、滑动弧放电、辉光放电或火花放电形式产生。非热等离

* 国家自然科学基金青年基金 (21507105); 西南科技大学博士研究基金 (10zx7126); 西南科技大学大学生创新基金项目 (CX15-013)

王兰: 女, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为高放废物人造岩石固化处理 E-mail: wanglan_only@163.com 舒小艳: 通讯作者, 女, 1983 年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为核废物处理与环境修复 E-mail: shuxiaoyanmvp116@163.com

子体的特点是具有较高的电子温度,很容易与其他粒子发生反应,产生二次电子、光子、离子和自由基^[1]。

物质受外部系统的加热,从固态变为液态,最终变为气态分子^[2]。气态分子受到激励源磁场、电场、电磁场的作用,获得高于自身电离的能量,核外电子摆脱原子核的束缚成为自由电子,电子与气体分子发生非弹性碰撞,气体分子获得能量,发生激发和电离,成为活性基团,这些活性基团即为等离子体。等离子体技术处理放射性废物的过程主要有3种:一是活性基团引发难处理的污染物分子裂解成简单小分子,从而降低其危害性,达到处理的目的;二是利用粒子间相互碰撞产生的热能使污染物分子键断裂,形成简单氧化物;三是通过等离子体技术制备固化基材来包容放射性废物^[3,4]。图1是固体通过加热、电场或磁场作用形成等离子体过程的示意图。

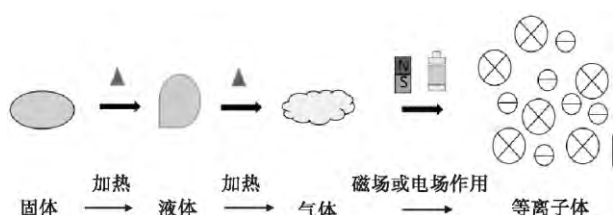


图1 等离子体形成示意图

Fig. 1 The schematic diagram of plasma formation

1.2 等离子体技术的特点

与常规处理方法相比,等离子体技术处理放射性废物具有以下4个突出的特点:

(1)等离子体技术具有高效性。等离子体中含有大量化学活性粒子,在高温条件下可加速反应,对大量难处理的放射性废物有着良好的处理效果。等离子体设备升温速度快,最高可以到达1000℃/min,高电流密度提高了处理效率^[5]。

(2)等离子体技术具有环保的特点。传统的焚烧需要使用木头、焦炭、天然气或者柴油作为辅助燃料,易产生一氧化碳、氟化氢、呋喃类化合物、二噁英等对环境和人类健康有害的物质。而等离子体技术不使用化学试剂,不会产生二噁英,可大大减少烟尘的排放,能够达到最严格的国际排放标准。同时,等离子体技术容易获取高温焚烧条件,使绝大部分有毒有害废物在焚烧下彻底分解。

(3)等离子体技术应用范围广,能够完全地、安全地适用于机械加工、材料制备、表面改性、电子刻蚀、点火技术、医疗、食品、纺织印染等方面以及气体、液体、固体废物的无害化处理。

(4)该技术还具有较高的安全性。设备装置操作简单,启动停机时间短,可全部实现自动控制,且能在常温常压下进行,工艺简单,运行安全,可靠性较高。

2 研究现状

2.1 矿业放射性废物的等离子体处理

矿山开采过程中,不可避免地会产生放射性废水,这些放射性废水由于组分复杂、浓度高等原因成为处理的难点。

放射性废水最主要来自铀矿山的开采,含有铀(U)、镭(Ra)及其子体。这些放射性物质能稳定存在于自然界中,通过水循环提高放射性含量^[6]。当人类通过食物链富集这些放射性物质时,健康就会受到严重威胁。处理放射性废水的方法主要有物理吸附法(Adsorption)、膜处理方法(Membrane)、生物处理法(Biological treatment)、化学沉淀法(Chemical precipitation)、离子交换法(Ion exchange)。物理吸附法利用多孔性的吸附剂处理放射性废水,能够吸附分子、离子,并对不同类型的核素有选择性吸附的作用^[6],但吸附剂昂贵,并且存在解吸现象^[7];膜处理技术具有出水水质好,浓缩倍数高,运行稳定可靠等特点^[8],但存在膜被堵塞、被污染、断丝等现象,必须经常清洁^[9];生物法中特定微生物的培养对环境条件的要求很苛刻,并存在占地面积大、管理复杂、废水达标难度大等缺点^[10];化学沉淀法是通过投放絮凝剂将其与放射性核素共沉淀并转移至小体积的沉淀底泥中,该法污泥产量大,同时固液分离困难^[11];离子交换法只适用于量少的放射性废水处理,并且会产生大量具有放射性的废弃树脂^[12]。

等离子体水处理技术是近年来引起人们极大关注的一项利用高电压放电处理废水的新技术,能处理其他方法难于处理的一些工业污水,它对污染物兼具物理作用和生化作用,具有流程简洁、净化彻底、广谱高效、无二次污染,能在常温常压条件下进行操作等优点,特别是在处理难降解有毒废水方面有明显的优越性^[13]。目前直接应用等离子体技术处理铀矿山放射性废水的工艺路线较少,主要是由于相关工艺尚不成熟,无法工业处理大批量的工业废水,因此国内外的学者对等离子体处理放射性废水这一课题开展了大量的研究。如利用等离子体技术产生活性基团,与废水作用,达到降解目的;或是利用等离子体技术制备固化体包容放射性废物。等离子体熔融法(Plasma melting technology)能够在高温时不受废物物理化学性能的影响,为废物提供充足的能量。Yasui等^[14]探究了气体对等离子体熔融法处理放射性废物渣层性能的影响及各元素的迁移行为。实验选用钴(Co)、镍(Ni)、锶(Sr)、铌(Nb)和铯(Cs)来代替高放射性核素,实验表明改变加热气体的成分会同时改变含废物渣层的质量,Cs的迁移行为会受到强高还原剂的影响。王瑾瑜等^[15]用电晕放电等离子体去除水中铬(Cr),实验装置如图2所示,实验表明Cr的去除率高达98.8%,并且适当增加苯酚可以提高铬的去除率。江贻满等^[16]采用直流电弧等离子体对模拟有机低水平放射性废物进行了减容减重处理,实验表明在1400℃热等离子体处理条件下,模拟放射性核素Sr、Co和Cs的捕集率分别为99.7%、44.5%和18.6%。Patzay等^[17]曾利用水下等离子体炬反应堆(UPTR)破坏废水中有机物组分后使用硝酸酸化无机硼酸盐的结晶体,经Cs选择性交换剂处理,酸化后分离的无机沉淀包含15%~30%的放射性核素。此外,经离子交换法处理放射性废水后,所产生的废树脂也可应用等离子体技术处理。放射性废树脂经等离子体氧化技术减容处理后,体积减小到处理前的5%~10%,灰分的减重率超过20%^[18]。曹骥等^[19]探究了放射性废树脂的等离子体焚烧玻璃固化用配方,实验表明利用等离

子体氧化技术,以硼硅酸盐玻璃与模拟放射性废物所烧结的固化体将废物包容率由 20% 提高至 30% 后,仍然能够满足指标所要求的密度、均匀性、机械稳定性和化学稳定性。

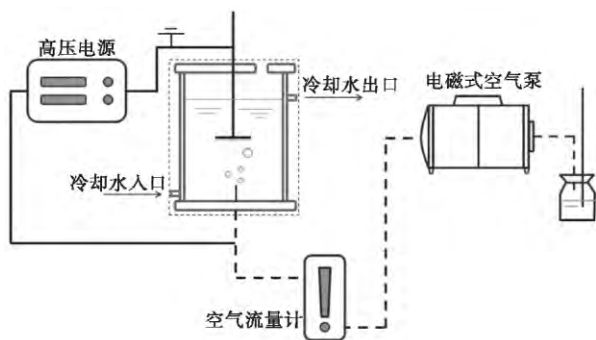


图 2 电晕放电等离子体技术处理装置

Fig. 2 High-voltage pulsed corona discharge plasma equipment

2.2 核工业放射性废物的等离子体处理

随着核工业的高速发展,放射性废物的数量和种类日益增多,同时也带来了放射性废物的处理问题。安全有效地处理放射性废物是将其固定在稳定的固体介质中,经过地下埋葬、多重隔离屏障等处理手段后,使固化体中的核素不渗漏到生物圈。对于固化体的制备,常常采用热压烧结法(Hot pressed sintering)、微波烧结法(Microwave sintering)、热等静压烧结法(Hot isostatic pressing)、反应烧结法(Reaction sintering)、自蔓延高温合成法(Self-propagation high-temperature synthesis)和爆炸烧结法(Explosive sintering)。然而,热压烧结法存在成本高、生产率低的缺点^[20];微波烧结法自控加热时,难以维持在某一精确温度值^[21];热等静压烧结法制备的样品内部会形成空洞,降低样品的力学性能^[22];反应烧结所制得的样品烧结坯密度低,材料力学性能不高^[23];自蔓延高温合成法制备样品过程难以控制^[24];爆炸烧结法对于小尺寸的样品烧结难度大^[25]。

放电等离子体烧结(Spark plasma sintering)是一种新型的粉体快速固结成形技术。该技术将等离子体活化、热压、电阻加热相结合,通过将直流脉冲电压直接均匀加到粉体上,使其瞬间变为等离子体,通过自身的均匀发热而实现表面活化^[26]。目前,放电等离子体烧结技术已经在制备固化基材上取得一定的成就。锆石(ZrSiO_4)是一种良好的固化基材,其中的 Zr 位可以被放射性核素铀(U)、钍(Th)、钚(Pu)取代。此外,锆石还具有良好的化学稳定性、较小的热膨胀系数和优良的抗辐照性。Rendtorff 等^[27]用放电等离子体烧结技术在 $100\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速度下达到 $1400\text{ }^\circ\text{C}$,保温 10 min 后,再在 100 MPa 的单轴压力下静置 10 min,成功制备了锆石。这种设计方案与传统方法相比,有效地减少了锆石的分裂,得到的固化基材具有良好的致密性和力学性能。Xu 等^[28]用放电等离子体烧结技术在 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 成功烧结出含有模拟放射性核素 CeO_2 的 ZrO_2 ,通过扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)和透射电子显微镜(Transmission electron microscope, TEM)观察了该样品的微观形貌,发现该类样品具有增加固化基材稳定性的四方相 ZrO_2 (Tet-

ragonal ZrO_2)。Brien 等^[29]用放电等离子体烧结技术在 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结 20 min,烧结出含有 CeO_2 的钨金属陶瓷,并通过增加应力来增加样品的致密度,减少样品的开裂情况。Lee 等^[30]用 ZrN 处理放射性核素铪(Hf),实验用放电等离子体烧结制备 $\text{ZrN}_{0.99}\text{O}_{0.3}\text{Hf}_{0.01}$ 和 $\text{ZrN}_{0.87}\text{O}_{0.28}\text{Hf}_{0.01}$ 样品,结果表明 ZrN 能稳定地固化 Hf,并且所得的固化体有较高的致密性。大量文献表明^[27-30],运用放电等离子体烧结技术制备的固化基材致密度较高。图 3 为放电等离子体烧结不同样品的扫描电镜照片,可以看出,样品表面清晰,形状比较规则。

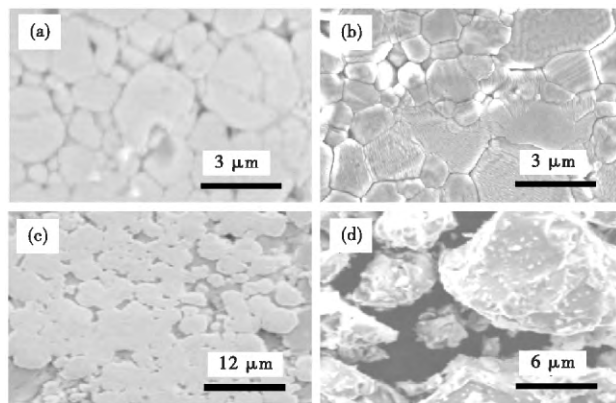


图 3 放电等离子体烧结锆石(a)、掺铈锆英石(b)、掺铈钨金属陶瓷(c)和掺铪氮化锆(d)的扫描电镜照片^[27-30]

Fig. 3 Scanning electron micrographs of ZrSiO_4 (a), CeO_2 -doped ZrO_2 (b), CeO_2 -doped tungsten ceramics (c) and Hf-doped ZrN (d) fabricated by spark plasma sintering^[27-30]

近年来国内外大型研究中心对等离子体处理放射性废物的技术给予了高度重视。例如,韩国原子能研究中心(Korean Atomic Energy Research Institute)^[31]在 2006 年已经建立了一组基于等离子体电弧熔融(Plasma arc melter)技术处理核废料污染物的装置,并得到了商业运行。该装置首先将 200 L 桶装放射性废物进行压碎预处理,然后通过进料器送入熔融处理室,熔融室的电极材料通过电火花产生高温气体,提供高能量,使大块放射性废物小块化。最后将其固化于玻璃体中,进行深地质处置。处理过程中产生的尾气会通过多个高效微粒空气过滤器(High efficiency particulate air filter),达到环保要求后,排入大气。此方法在减重、减容、稳定固化放射性废物及处理周期方面有着明显的优势。图 4 为等离子体技术处理放射性废物的流程图。

除了上述等离子体固化技术,还可以采用等离子体汽化技术处理放射性废物。该技术主要运用亚稳态的氟化物使铀(U)、钚(Po)粒子汽化,再使用吸收装置吸收汽化的 U、Po 粒子^[32]。此外,各国也开展了大量计算机模拟等离子体处理技术的相关课题。Ghiloufi^[33]用计算机模型研究了用热等离子体技术处理²³⁹Pu、¹⁴⁴Ce 和⁹⁰Sr 的汽化现象,研究表明当温度约为 $1727\text{ }^\circ\text{C}$ 时,²³⁹Pu、¹⁴⁴Ce 和⁹⁰Sr 均未汽化;当温度范围为 $1727\sim 2227\text{ }^\circ\text{C}$ 时,升高温度会加速²³⁹Pu、¹⁴⁴Ce 和⁹⁰Sr 的汽化,但是汽化速度缓慢;当温度高于 $2327\text{ }^\circ\text{C}$ 时,升高温度会提升²³⁹Pu 和⁹⁰Sr 的汽化速度和汽化数量。对于电解现象,增加等离子体电流会增加²³⁹Pu、¹⁴⁴Ce 和⁹⁰Sr 的汽化速度和汽化

数量。Marder 等^[34]运用数值模型研究放电等离子体烧结不导电陶瓷粒子致密性问题。实验模拟放电等离子体烧结技术在 100 MPa 单向压力下、1100~1400 °C 之间烧结钽铝石榴石固化基材,结果表明大约在 1200 °C 能够得到致密性良好的样品。

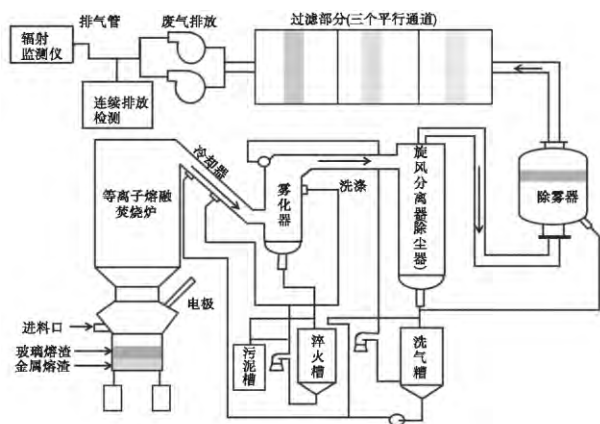


图 4 等离子体技术处理放射性废物的流程图

Fig. 4 The flow diagram of plasma technology to deal with radioactive waste

2.3 医疗放射性废物的等离子体处理

医疗放射性物质在肿瘤、癌症治疗等方面起着非常重要的作用,但是因此产生的医疗放射性废物不仅污染环境、危害人类自身的健康,并且含有细菌和传染性病毒,有着较高的处理难度,也是当下放射性废物的主要来源之一。医疗放射性废物一般包括医疗服务中所使用的半衰期较短的放射性核素以及被其污染过的固态、液态和气态材料^[35,36]。同时,医疗机构中使用的放射性物质的类型有所限制,因此医疗产生的放射性废物一般会导致低层次的放射性污染。目前,医疗放射性废物的处理方法主要包括贮存以及高温焚烧固化等手段^[37,38]。贮存主要针对短半衰期核素,含有长半衰期核素的放射性废物则需要焚烧减容后进行固化处理。传统焚烧固化手段不仅耗能高,焚烧不彻底,会产生有害气体,带来空气污染问题,而且放射性废物的固化烧结效果不够理想^[39]。

等离子体技术具有高热焓以及极高的电热转换效率,在处理可燃放射性废物时,焚烧彻底并且没有二次污染^[40]。在处理医疗放射性废物这一领域,因放射性核素的特殊性,外部手段无法干扰其衰变进程,所以等离子体技术的应用主要集中在可燃放射性废物的焚烧减容以及含长衰变期核素废物的固化处理两个方向。对于医疗放射性废物,一般会将其分类后,把大块废物切割成小块,再运用热等离子体产生的高温,将有机物进行焚烧,并使无机物成为熔融状态,选择适合的固化基材包容放射性废物,待冷却后形成稳定的固化体。研究发现,利用等离子体技术对固化体进行烧结的最终效果也比较理想^[41]。相较于传统处理方式整个过程的总耗能也有显著降低。浙江大学的张璐等^[42,43]用热等离子体技术在熔融状态下固化处理不同组成成分的模拟医疗废物。实验主要利用 TCLP 法 (Toxicity characteristic leaching pro-

cedure) 研究了熔融过程中各元素的迁移特性、浸出特性和处理效果,结果表明玻璃固化体致密性良好且无空隙,所有元素的浸出浓度均远远低于国家的相关规定。宋晔等^[36]采用 N₂ 等离子体 V 型电弧等离子体固化处理含钴 (Co) 和铯 (Cs) 的放射性废物。实验表明在结构致密的玻璃固化体中,Co 的最大捕集量约为 85%,Cs 的最大捕集量高达 90%。Tzeng 等^[44]用热等离子体技术将可燃的放射性废物进行焚烧减容处理,不可燃烧的放射性废物进行玻璃固化处理。可燃放射性废物先在反应室热解成小分子,然后在第二燃烧室充分氧化。不可燃放射性废物在反应室中熔化 (高于 1600 °C),再将其用硫酸钠水泥固化处理,最终对放射性废物的处理达到了无害水平。Chu 等^[45]设计了一种针对医疗废物的热等离子体处理系统,将等离子体焚烧与放射性废物固化体的烧结融合在一起,最终制成玻璃固化体,如图 5 所示,该系统可直接对放射性医疗废物进行处理。

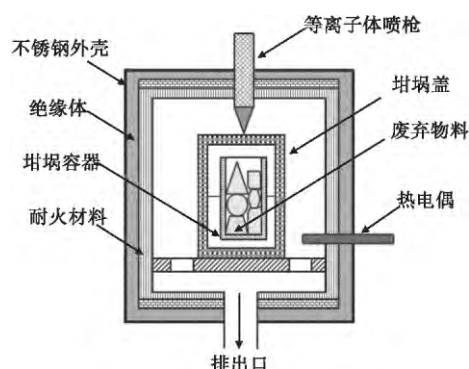


图 5 等离子体玻璃化处理系统核心部分示意图

Fig. 5 The schematic diagram of the plasma vitrification system

3 结语

等离子体技术是近年来发展起来的一种新型技术,具有环保、节能等特点,是处理放射性废物的重要途径之一。目前,运用等离子技术处理放射性废物主要集中于固化体的制备,实现了较高的致密度,达到了减容化、减重化和无害化的处理目的,同时克服了传统制备方法烧结时间长等不足。但等离子体熔融技术、气化技术、裂解技术处理放射性废物存在能源消耗大、关键技术不成熟等问题,应进一步开展深入研究,逐步完善等离子体技术的理论体系及其应用。随着等离子体技术的不断发展,这些问题都将得到彻底解决,等离子体技术也将得到更加广泛的应用。

参考文献

- Bo J, Zheng J, Shi Q, et al. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation[J]. Chem Eng J, 2014, 236 (2): 358
- 任煜, 邱夷平. 低温等离子体对高聚物材料表面改性处理时效性的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(1): 56
- Bormashenko E, Whyman G, Multanen V, et al. Physical mechanisms of interaction of cold plasma with polymer surfaces[J]. J

- Colloid Interf Sci, 2015, 448: 175
- 4 巩建英. 辉光放电等离子体技术处理难降解有机污染物及机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008
- 5 Antou G, Pradeilles N, Gendre M, et al. New approach of the evolution of densification mechanisms during spark plasma sintering: Application to zirconium (oxy-)carbide ceramics[J]. Scripta Mater, 2015, 101: 103
- 6 吴振宇, 刘峙嵘, 等. 放射性废水吸附行为的研究[J]. 读写算: 教研版, 2012(16): 206
- 7 Lakshmi P, Lingamdinne J R, Koduru H, et al. Adsorption removal of Co(II) from waste-water using graphene oxide[J]. Hydrometallurgy, DOI:10.1016/j.hydromet.2015.10.021
- 8 高永, 顾平, 陈卫文. 膜技术处理低浓度放射性废水研究的进展[J]. 核科学与工程, 2003(2): 173
- 9 Kaya A, Onac C, Alpoguz H K, et al. Removal of Cr(VI) through calixarene based polymer inclusion membrane from chrome plating bath water[J]. Chem Eng J, 2016, 283: 141
- 10 贾金平, 王文华. 含染料废水处理方法的现状与进展[J]. 上海环境科学, 2000(1): 26
- 11 宋均轲, 王静, 高波. 放射性废水处理技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2013, 27(2): 4
- 12 左蕊, 梁小平, 朱孟府, 等. 离子交换法制备 Ce-NaX 沸石分子筛及其结构表征[J]. 材料导报: 研究篇, 2013, 27(10): 40
- 13 朱元右. 等离子体技术在废水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2004(9): 13
- 14 Yasui S, Adachi K, Amakawa T. Influence of atmospheric gases on the treatment of miscellaneous solid wastes by plasma melting technology[J]. Prog Nucl Energ, 1998, 32(3): 493
- 15 王瑾瑜, 孙亚兵, 缪虹, 等. 电晕放电等离子体同时去除水中 Cr(VI) 和苯酚的实验研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10): 2415
- 16 江贻满, 倪国华, 宋晔, 等. 热等离子体对模拟有机低放射性废物固化处理试验分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1750
- 17 Patzay G, Weiser L, Feil F, et al. Modification of the radioactive wastewater treatment technology in the Hungarian PWR[J]. Appetite, 2013, 321(1): 72
- 18 陈斌. 核电厂低中放废树脂处理工艺[J]. 辐射防护通讯, 2010(1): 13
- 19 曹骥, 李已才, 冯伟伟, 等. 放射性废树脂等离子体焚烧玻璃固化用配方的优化研究[C]// 中国核动力研究设计院科学技术年报. 2014
- 20 李瑜煜, 张仁元. 热电材料热压烧结技术研究[J]. 材料导报, 2007, 21(7): 126
- 21 马国芝, 陈鼎, 陈振华. 微波陶瓷用钛酸锌的研究进展[J]. 材料导报: 综述篇, 2011, 25(6): 21
- 22 Belov N A, Belov V D. Influence of the temperature of hot isostatic pressing of TiAl-based cast alloys on the phase structure and composition[J]. Russ J Non-Ferr Met, 2015, 55(6): 627
- 23 Chen J, Yu L, Sun J, et al. Synthesis of hercynite by reaction sintering[J]. J Eur Ceram Soc, 2011, 31(3): 259
- 24 Macedo Z S, Ferrari C R, Hernandez A C. Self-propagation high-temperature synthesis of bismuth titanate[J]. Powder Technol, 2004, 139(2): 175
- 25 Li X J, Zhao Z, Qu Y D, et al. Producing CuCr alloy by explosive sintering[J]. Combust Explo Shock Waves, 2005, 25(3): 251
- 26 Chraska T, Pala Z, Musalek R, et al. Post-treatment of plasma-sprayed amorphous ceramic coatings by spark plasma sintering[J]. J Therm Spray Tec, 2015, 24(4): 1
- 27 Rendtorff N M, Grasso S, Hu C, et al. Dense zircon (ZrSiO₄) ceramics by high energy ball milling and spark plasma sintering[J]. Ceram Int, 2012, 38(3): 1793
- 28 Xu T, Wang P, Fang P, et al. Phase assembly and microstructure of CeO₂-doped ZrO₂ ceramics prepared by spark plasma sintering[J]. J Eur Ceram Soc, 2005, 25(15): 3437
- 29 O'Brien R C, Ambrosi R M, Bannister N P, et al. Spark plasma sintering of simulated radioisotope materials within tungsten cermets[J]. J Nucl Mater, 2009, 393(1): 108
- 30 Lee G, Yurlova M S, Giuntini D, et al. Densification of zirconium nitride by spark plasma sintering and high voltage electric discharge consolidation: A comparative analysis[J]. Ceram Int, 2015, 41(10): 14973
- 31 Min B Y, Kang Y, Song P S, et al. Study on the vitrification of mixed radioactive waste by plasma arc melting[J]. J Ind Eng Chem, 2007, 13(1): 57
- 32 林真绿. 应用等离子体清除污染物[J]. 广东科技, 1998(6): 12
- 33 Ghiloufi I. Study of ²³⁹Pu, ¹⁴⁴Ce, and ⁹⁰Sr behavior during radioactive wastes treatment by thermal plasma technology[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2009, 29(4): 321
- 34 Marder R, Estournes C, Chevallier G, et al. Numerical model for sparking and plasma formation during spark plasma sintering of ceramic compacts[J]. J Mater Sci, 2015, 50: 4636
- 35 李慧平, 王小万. 国际医疗废物分类及基本特点[J]. 中国医院管理, 2004, 24(3): 18
- 36 宋晔, 江贻满, 倪国华. 热等离子体处理低、中水平放射性废物实验研究[C]// 全国等离子体医学研讨会会议. 2013
- 37 Woolridge A C, Phillips P S, Denman A R. Developing a methodology for the systematic analysis of radioactive healthcare waste generation in an acute hospital in the UK[J]. Resour Conserv Recy, 2008, 52(10): 1198
- 38 Kayabali K. Engineering geological aspects of replacing a solid waste disposal site with a sanitary landfill[J]. Eng Geol, 1996, 44(1): 203
- 39 Wey M Y. Dynamic simulation of a high-temperature slagging incineration process[J]. Comput Chem Eng, 1993, 17(17): 859
- 40 Mayne P W, Mulholland J A. Proceedings of the international symposium on environmental technologies: Plasma systems and applications[R]. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA (United States), 1995
- 41 张振德, 金宗君. 国产等离子体设备在医疗废物焚烧处理工艺中的应用[C]// 四川省医疗废物处理工艺与设备开发. 2005
- 42 张璐. 利用热等离子体熔融处理模拟医疗废物的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012
- 43 张璐, 严建华, 杜长明, 等. 热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究[J]. 环境科学, 2012, 6(6): 2104
- 44 Tzeng C C, Kuo Y Y, Huang T F, et al. Treatment of radioactive wastes by plasma incineration and vitrification for final disposal[J]. J Hazard Mater, 1998, 58: 207
- 45 Chu J P, Hwang I J, Tzeng C C, et al. Characterization of vitrified slag from mixed medical waste surrogates treated by a thermal plasma system[J]. J Hazard Mater, 1998, 58(1): 179