

模拟不可燃放射性废物 等离子体熔融处理试验研究

刘春雨, 周东升, 李丽丽

中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000

摘要: 在自制的等离子体熔融试验台架上对玻璃纤维、混凝土、土壤的单体玻璃固化配方及三元混合废物玻璃固化配方开展等离子体熔融处理和同位素示踪实验。四种样品在1 100~1 300 °C条件下熔融1 h均可得到玻璃固化体, 经检测, 玻璃固化体的密度、抗浸出性能以及机械性能均满足放射性废物玻璃固化体性能要求。示踪实验结果表明, 等离子体熔融系统对示踪元素 Co、Cs 和 Sr 有较高截留率, 且玻璃固化体对 Co 和 Sr 的固化能力较高、对 Cs 固化能力相对较低。在工程应用中, 建议在熔融炉系统前端增设造粒等预处理系统, 减少物料直接进入烟气净化系统的比例, 以提高物料固化效率。

关键词: 模拟不可燃放射性废物; 等离子体; 熔融处理; 示踪实验

中图分类号: TL941.113 文献标志码: A 文章编号: 0253-9950(2022)05-0542-07

doi: 10.7538/hhx.2022.YX.2022039

Experimental Study on Plasma Melting Treatment of Simulated Non-Combustible Radioactive Waste

LIU Chun-yu, ZHOU Dong-sheng, LI Li-li

China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China

Abstract: The melting treatment and isotopic tracing experiments were carried out on a self-designed plasma bench melting test with glass solidification formulas of single waste as well as mixed waste of glass fiber, concrete and soil. After melting at 1 100-1 300 °C for 1 h, all the four samples were turned into glass waste-forms. The density, leaching and mechanical performance of resultant glass waste-forms were tested, showing the comparable requirement with the radioactive waste glasses. The results of the tracer experiment show that the plasma melting system has high interception rate for the tracer elements Co, Cs and Sr. In addition, the glass waste-forms has higher curing capacity for Co and Sr, but lower for Cs. In engineering application, it is suggested to add a pretreatment system such as granulation at the front of the melting furnace system to reduce the proportion of material directly entering the flue gas purification system and improve the solidified efficiency of the materials.

Key words: simulated non-combustible radioactive waste; plasma; melting treatment; tracer experiment

在核能开发利用等核工业生产、研究过程中,会不可避免地产生很多不可燃的放射性废物。放射性核素采冶加工、反应使用、存放处置等环节会导致铀、钚、钍、锶、铯等放射性元素不可避免地进入一些地区的土壤环境中^[1];防辐射混凝土作为原子能反应堆、粒子加速器及含放射源装置的保护材料,它能有效地屏蔽原子核辐射,同时也会受到放射性核素的沾污,因此在核设施退役过程中会产生较多放射性混凝土^[2];玻璃纤维过滤器是放射性厂矿、科研等单位中常用的净化放射性污染气体的高效过滤器,在其失效后,放射性核素将主要分布在玻璃纤维中^[3]。上述受到放射性核素沾污的土壤、混凝土、玻璃纤维均属于不可燃放射性废物,由于这些废物体积庞大、贮存困难,管理不妥易污染环境,寻找安全经济的处理方法具有重要意义^[3-4]。

我国常见的固体放射性废物处理工艺为水泥固化技术,其劣势为增容比过大。目前,我国可供使用的低放废物处置场和暂存库很匮乏,在废物最小化原则指导下,核电行业普遍接受了每台机组每年废物产生量小于 50 m³ 的目标值。而玻璃固化法的优势为最小化、稳定化和无机化,废物减容比能够达到 20~30,其增容比远小于水泥固化技术^[5-6],玻璃固化技术恰恰克服了上述水泥固化的缺点。

基于玻璃固化技术显著的优点及国家废物管理策略的选择,韩国、美国等国家采用了玻璃固化技术处理低、中放废物,我国也在大力发展废物玻璃固化技术^[7-12]。在低放废物玻璃固化配方方面,我国在核电站放射性可燃废物玻璃固化配方研究方面已取得进展,且已完成等离子体熔融处理冷试台架试验研究^[10-11]。在玻璃固化设施建设方面,正在建设的东方瑞龙 1 000 t/a 低放废物减容处理设施和海南核电 3、4 号机组放射性废物处理设施均采用玻璃固化技术进行低水平放射性废物处理。

目前,中广核研究院有限公司已建成了一套等离子体熔融中试试验系统,并完成了棉制品、吸水纸、橡胶、塑料、岩棉、离子交换树脂等 8 种核电站常见固体废物玻璃固化配方的验证,制取了玻璃固化体的样品,并开展同位素示踪实验,完成了示踪元素在系统内的分布分析^[10-12]。但尚未开展不可燃放射性废物等离子体处理的实验。

本工作拟在自制的等离子体熔融试验台架上

对玻璃纤维、混凝土、土壤的单体玻璃固化配方^[13]及三元混合废物玻璃固化配方开展熔融处理试验研究和初步同位素示踪实验,对废物玻璃固化效果和示踪元素截留分布进行测试分析,从而判断等离子体熔融处理技术用于不可燃废物玻璃固化处理的适用性。

1 实验部分

1.1 实验样品

选取国内某核设施未沾污的玻璃纤维、混凝土、土壤,作为模拟不可燃放射性废物。玻璃纤维经过初步破碎呈片状,破碎后尺寸约为 1 cm × 1 cm;混凝土经过破碎机破碎后呈颗粒状,破碎后粒径约为 1 mm。玻璃纤维、混凝土、土壤样品置于恒温干燥箱中,在 105 °C 下干燥 1 h 以上,以消除实验样品中水分的影响。采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)及 X 射线荧光光谱法(XRF)分析实验样品成分,结果列入表 1。

表 1 模拟不可燃放射性废物成分

Table 1 Simulated non-combustible radioactive waste composition

玻璃纤维		土壤		混凝土	
氧化物	w/%	氧化物	w/%	氧化物	w/%
SiO ₂	56.83	SiO ₂	65.17	SiO ₂	17.27
CaO	10.57	Al ₂ O ₃	17.29	CaO	69.98
K ₂ O	7.60	Fe ₂ O ₃	5.42	MgO	4.85
Na ₂ O	7.13	CaO	3.44	Al ₂ O ₃	5.25
Al ₂ O ₃	6.11	K ₂ O	2.99	Fe ₂ O ₃	1.26
B ₂ O ₃	4.94	MgO	2.60	SO ₃	0.44
BaO	3.27	Na ₂ O	1.70	K ₂ O	0.25
ZnO	2.61	TiO ₂	0.75	Na ₂ O	0.17
MgO	0.37	P ₂ O ₅	0.48	P ₂ O ₅	0.06
SO ₃	0.33	SO ₃	0.16	TiO ₂	0.33
TiO ₂	0.13			SrO	0.14
Fe ₂ O ₃	0.11				
合计	100.00	合计	100.00	合计	100.00

根据已有玻璃固化配方试验研究经验,基础玻璃配方将决定所得到的玻璃固化体性能,在此选择硼硅酸盐玻璃为基础配方,并根据实验样品的原始成分,选择合理的添加剂,通过改变添加剂的种类和含量,在实验室制备得到固化体样品,通过固化体样品性能测试比选,完成了前期实验室

玻璃固化配方研究,获得玻璃纤维、混凝土、土壤三种模拟不可燃放射性单体废物及其三元混合废物的玻璃固化配方,其编号及配方组成列入表 2^[13],推荐熔融温度控制在 1 150~1 300 °C 内,熔融时间为 1~2 h^[13]。

采用模拟放射性元素进行同位素示踪,主要考虑模拟核设施运行、维护期间产生的放射性核素包括裂变产物¹³⁷Cs、⁹⁰Sr和活化产物⁵⁸Co、⁶⁰Co,故示踪元素暂定为非放射性的 Sr、Co、Cs。由于不同来源的废物所含放射性核素含量波动范围较

大,为了确保不同取样点示踪元素均能达到检测限,且不会引起实验对象化学组成的显著变化,基于前期台架试验研究经验,所添加示踪元素 Sr、Co、Cs 的质量分数均为 0.50%。玻璃固化体配方及示踪元素添加量详见表 2,其中,示踪元素可用同等元素质量的碳酸盐或氧化物 Co₂O₃、SrCO₃和 Cs₂CO₃ 进行替换。

按照表 2 成分配比进行物料称量、混合均匀及装包,得到最终入炉的模拟废物玻璃固化配方混合样品,单包质量为 5 kg,便于分批次进料。

表 2 玻璃固化配方及示踪元素添加量^[13]

Table 2 Vitrification formula and addition of tracer elements^[13]

样品编号	ω(玻璃固化配方)/%								ω(示踪剂)/%		
	玻璃纤维	混凝土	土壤	SiO ₂	B ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	Li ₂ O	Co	Sr	Cs
BX-14	84.45					9.97	4.08		0.50	0.50	0.50
HN-2		53.87		25.51	12.75		6.37		0.50	0.50	0.50
TR-16			66.01			19.70	10.84	1.97	0.50	0.50	0.50
BX-HN-TR-3	33.01	21.46	33.02				11.00		0.50	0.50	0.50

1.2 试验装置和仪器

试验所用装置为中、低放射性废物等离子体熔融处理冷试台架,主要包括进料系统、等离子体炉、烟气净化系统和控制系统,设计处理能力为 10 kg/h。熔融炉配备 1 支额定功率为 150 kW 的电弧等离子体发生器。可处理对象包括土壤、混凝土、过滤器芯等典型模拟不可燃放射性废物。

图 1 给出了等离子体熔融系统流程图。混合物料经进料口进入熔融炉装置,经高温熔制产生玻璃熔体,玻璃熔体经出料装置出料后冷却形成玻璃固化体,气体则依次经过臭氧催化还原系统、喷淋洗涤塔、活性炭吸附床净化处理后,最终由烟囱排出。为了简化实验,在整个系统中选取熔融炉、烟囱连接管道共 2 个部位作为取样点,分别采集玻璃固化体和烟气样品进行分析,计算玻璃固化体、烟气中的示踪元素截留率。

D8 Advance X 射线衍射仪(XRD),Bruker

公司;烘箱,升温速率由可控硅控制器控制,上海实验电炉厂;iCAP 7000 Plus 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)、ICS-600 离子色谱仪(IC)、Thermo Scientific iCE 3300 原子吸收光谱仪(AAS),美国赛默飞公司;Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),美国安捷伦公司;AUY120 电子天平,精度为 0.1 mg,日本岛津;STX-202A 型金刚石线切割机,沈阳科晶自动化设备有限公司;NYL-300D 型压力测试机,上海五久自动化设备有限公司。

1.3 实验方法

将等离子体发生器功率设置为 120 kW,待熔融炉升温至 1 150 °C 时,分批次总计投入 10 kg 模拟废物玻璃固化配方混合物,将熔融温度维持在 1 150~1 300 °C 内,约熔融 60 min 后,模拟废物配方混合物已转变为具备较好流动性的均匀熔融物料,通过加热出料管道至 900 °C,熔融物料通过

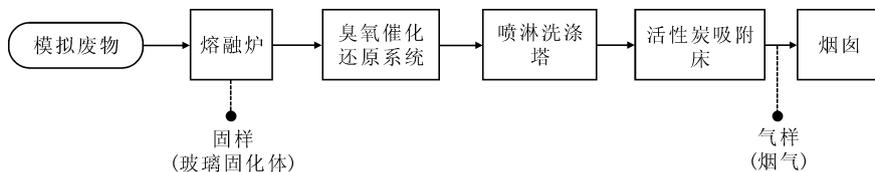


图 1 等离子体熔融系统流程图及取样示意点

Fig. 1 Flow chart and sampling points of plasma melting system

侧面出料道出料,将熔融物料接收至取样容器内空冷至室温,形成固化体。出料完毕后投入10 kg 启炉玻璃料进行洗炉,将洗炉玻璃料熔制60 min 后排出,减少上批次实验物料成分对下批次其他种类实验物料的影响。如此反复,直到做完所有种类模拟废物的熔融实验。

在每个批次物料的熔融实验中,当系统处于运行状态时进行气体样品的采集,在烟气管道连接处开孔,外接气体采样泵和流量计,通过三级吸收瓶将采集的气体吸收到溶液中。当熔融玻璃体出料后,参考 GB 475—2008^[14] 中静态煤采样方法,对冷却后的玻璃固化体,以交叉原则,取四个象限中心点的样品,共4组,对每一批次样品至少取3个平行样本。

1.4 样品测试分析

1) 玻璃固化体性能测试

玻璃固化体的性能对于工艺处理以及产品质量至关重要,本研究主要测试的性能包括密度、抗压强度、抗冲击强度、化学稳定性等。

(1) 密度测量

参考 GB/T 5432—2008^[15] 规定,采用浮力法测定固化体密度。

(2) 机械性能

① 抗压试验:参照 GB/T 8489—2006^[16] 要求测定固化体抗压强度,将样品利用切割机切成规格为5 mm×5 mm×12.5 mm 标准件,采用压力测试机对玻璃样品的抗压强度进行测试;② 抗冲击试验:参照 EJ 1186—2005^[17],采用重锤自由落体冲击试验方法测定固化体抗冲击强度。

(3) 物相分析

利用 X 射线衍射仪分析 800、900、1 000、1 100 °C 下样品的物相。测试过程中,额定电压 40 kV,额定电流 40 mA,使用 Cu K α 靶材辐射,入射波长 $\lambda=0.15418$ nm,在 10°~70° 范围内以 0.02° 步长、2°/min 的扫描速度进行慢扫。

(4) 抗浸出性能

利用 ASTM C1285-02 产品一致性测试方法 (product consistency test, PCT) 对玻璃固化体的化学稳定性进行检测,实验步骤如下:玻璃破碎后于玛瑙研钵中研磨,保证玻璃粉末样品过 100 目筛,但不过 200 目筛,保证得到颗粒的直径为 75~150 μm ;于超声振荡器内采用去离子水洗涂样品至上清液澄清,再用无水乙醇清洗 3~5 次,之后置于 105 °C 烘箱中保温 24 h;准确称取

1.500 0 g 烘干后的样品,置于可溶性聚四氟乙烯 (PFA) 溶样罐中,注入 15 mL 去离子水,迅速放入 90 °C 烘箱中保温;7 d 后利用带 0.45 μm 过滤器的针筒抽取上清液,利用 ICP-OES 检测浸出液中的元素含量。

各元素 PCT-7 归一化浸出值 ($r_i, \text{g}/\text{m}^2$) 计算如式(1)。

$$r_i = \frac{\rho_i V}{w_i S} \quad (1)$$

为了便于与 EJ 1186—2005^[17] 中的归一化元素浸出率进行比较,将各元素 PCT-7 归一化浸出值与浸出时间的比值作为各元素归一化浸出率 ($R_i, \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$),计算如式(2)。

$$R_i = \frac{r_i}{t} \quad (2)$$

式中: ρ_i ,元素 i 在浸出液中的质量浓度,mg/L 或 g/m^3 ; w_i ,元素 i 在玻璃固化体中的质量分数; S ,颗粒表面积, m^2 ; V ,浸出液体积, m^3 ; t ,浸出时间, d。

玻璃固化体的单位表面积总失重计算如式(3)。

$$NL = \frac{m_1 - m_2}{S'} \quad (3)$$

式中: S' ,玻璃固化体浸出前的表面积, cm^2 ; m_1 、 m_2 ,玻璃固化体浸出前、后的质量, g; NL ,玻璃固化体的单位表面积总失重, g/cm^2 。

2) 示踪元素含量测试及截留率计算

为了获得示踪元素在等离子体熔融系统内的截留情况,需对采集的样品进行预处理和成分分析。对玻璃固化体,首先进行粉碎混匀,再加酸溶解、过滤,得到的溶解溶液用于固化体中的示踪元素成分及含量分析;气体样品经采集吸收至溶液中,对吸收溶液进行示踪元素成分及含量分析。

对于元素 Co,使用 AAS 进行分析;当样品中 Co 质量浓度在 mg/L 量级时,选择火焰原子吸收法;当 Co 质量浓度在 $\mu\text{g}/\text{L}$ 量级时,选择石墨炉原子吸收法。对于元素 Cs:当样品中 Cs 质量浓度为 mg/L 量级时,使用 IC 或 AAS 进行分析;当 Cs 质量浓度在 $\mu\text{g}/\text{L}$ 量级时,使用 ICP-MS 进行分析。对于元素 Sr:当样品中 Sr 质量浓度为 mg/L 量级时,使用 ICP-OES 进行分析;当 Sr 质量浓度为 $\mu\text{g}/\text{L}$ 量级时,使用 ICP-MS 进行分析。

通过玻璃固化体样品中示踪元素总质量与入炉物料中示踪元素总质量的比值计算玻璃固化体元素的截留率(式(4))。

$$B_i = \frac{m_{i,液} \cdot m_{总}}{m_{测} \cdot m_{i,总}} \quad (4)$$

式中： B_i ，元素 i 在玻璃固化体中的截留率； $m_{i,液}$ ，元素 i 在玻璃固化体测试样品溶解溶液中的质量，g； $m_{测}$ ，玻璃固化体测试样品的质量，g； $m_{总}$ ，玻璃固化体出料样品总质量，g； $m_{i,总}$ ，熔融试验入炉物料中的元素 i 总质量，g。

通过取样点烟气样品中示踪元素总质量与入炉物料中示踪元素总质量的比值计算烟气中的元素截留率(式(5))。

$$Q_i = \frac{m'_{i,液} \cdot v \cdot t'}{V_{气} \cdot m_{i,总}} \quad (5)$$

式中： Q_i ，元素 i 在烟气中的截留率； $m'_{i,液}$ ，元素 i 在烟气采集样品吸收溶液中的质量，g； $V_{气}$ ，烟气采集样品的体积， m^3 ； v ，运行期间的烟气流量， m^3/h ； t' ，烟气采样时长，h。

假定其余示踪元素全部截留在台架各系统中，则台架各系统的元素截留率(T_i)计算如式(6)。

$$T_i = 1 - B_i - Q_i \quad (6)$$

2 结果与讨论

2.1 熔融温度

图2为实验中熔融炉炉膛及出料道的运行温度随运行时间的变化曲线。由图2可知：熔融炉

温度在1 100 °C 附近时，主要为一批次模拟废物混合物料全部熔融完毕并完成出料的时刻，在在这种情况下，短暂关闭等离子枪并进行下一批次实验前准备，熔融炉温度会出现100~200 °C 的降温波动，除此之外，在物料熔制运行期间熔融炉温度基本保持在1 250 °C 左右。

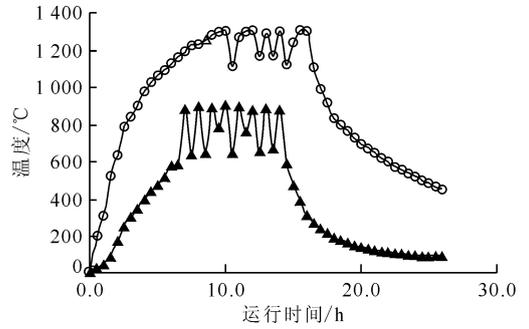
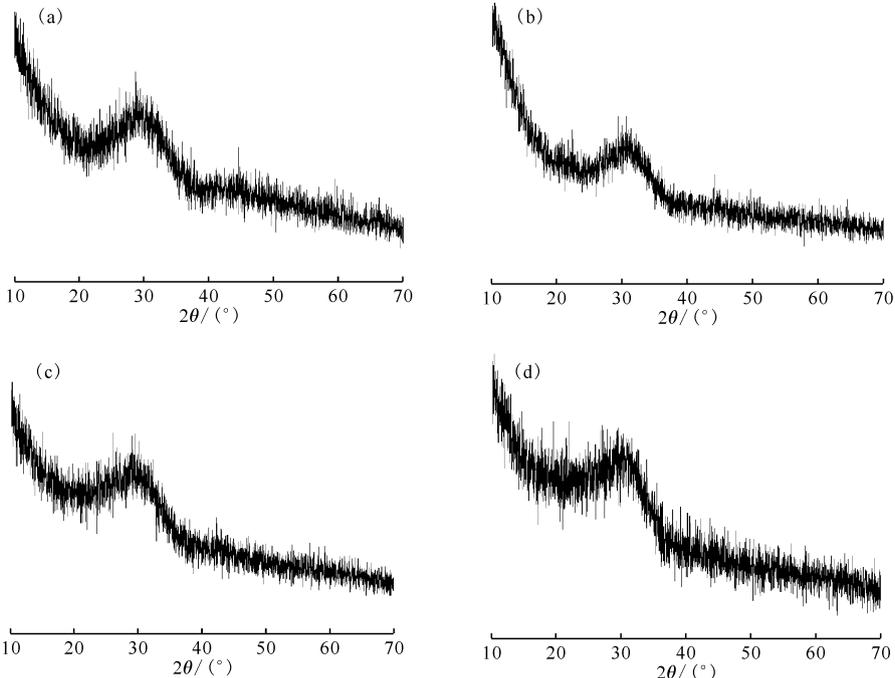


图2 熔融炉及出料道温度随运行时间的变化曲线
Fig. 2 Variation of temperature of melting furnace and outlet pipe with time

2.2 玻璃固化体

2.2.1 XRD 分析 四种模拟废物玻璃固化体外观呈现明显的玻璃形态。玻璃固化体的 XRD 衍射谱示于图3。由图3可知：四种玻璃固化体的



(a)——混凝土，(b)——土壤，(c)——玻璃纤维，(d)——三元混杂废物

图3 玻璃固化体的 XRD 衍射谱

Fig. 3 XRD patterns of glass waste-forms

衍射峰呈现典型的非晶态谱,说明四种模拟废物经等离子体熔融后得到的固化体均为完全玻璃态。

2.2.2 固化体性能分析 鉴于我国尚无与低、中放废物玻璃固化体相关的标准,本工作借鉴其他研究工作确定固化体应需达到如下指标:① 密度:参考高放玻璃固化体,≥2.5 g/cm³^[17];② 浸出性:在 90 °C 去离子水中,静态浸泡 28 d 单位面积的总失重应小于 15.0 g/m²,Si、B、Na、Cs、U 的归一化元素浸出率应小于 1 g/(m²·d)^[17];③ 抗压强度:优于水泥固化体,即≥7 MPa^[18];④ 抗冲击

性能:参考高放玻璃固化体,应不大于 12 cm²/J^[17]。经检测四种模拟废物等离子体熔融得到的玻璃固化体性能参数列入表 3 和表 4。由表 3、4 可知:台架试验得到的玻璃固化体,密度均不小于 2.61 g/cm³,静态浸泡 28 d 单位面积总失重均小于等于 6.804 4 g/m²,示踪元素 Cs、Co 和 Sr 归一化元素浸出率均低于 1 g/(m²·d),抗压强度均大于等于 35.45 MPa,抗冲击性能均不大于 5.15 cm²/J,各性能均满足 EJ 1186—2005^[17]、GB 14569.1—2011^[18] 中放射性废物玻璃固化体的性能要求,玻璃固化体化学稳定性好。

表 3 玻璃固化体性能
Table 3 Properties of glass waste-forms

样品编号	密度/(g·cm ⁻³)	28 d NL/(g·m ⁻²)	抗压强度/MPa	抗冲击性能/(cm ² ·J ⁻¹)
BX-14	2.65	2.519 6	99.21	5.15
TR-16	2.70	5.096 4	47.10	3.58
HN-2	2.69	5.718 0	38.78	3.82
BX-HN-TR-3	2.61	6.804 4	35.45	4.43

表 4 玻璃固化体归一化元素浸出率
Table 4 Normalized element leaching rate of glass waste-forms

样品编号	归一化元素浸出率/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)					
	Si	B	Na	Cs	Co	Sr
BX-14	0.005 5	0.010 9	0.012 9	0.050 2	0.000 1	0.005 7
TR-16	0.009 7	-	0.025 7	0.011 5	0.000 2	0.006 8
HN-2	0.006 9	0.013 8	0.015 7	-	0.000 1	0.007 7
BX-HN-TR-3	0.010 7	0.022 5	-	0.005 7	0.000 3	0.003 7

注:-表示未检出

2.3 示踪元素截留率分析

表 5 为等离子体熔融系统示踪实验的初步测量分析结果。由表 5 可知:玻璃固化体对示踪元素的截留率最高,对 Co 和 Sr 的截留率约为 75%~91%,对 Cs 的截留率约为 67%~75%,证明各玻璃固化配方对示踪元素具有较好的固化能力,玻璃固化体对 Cs 固化能力低于 Co 和 Sr,主要原因是 Cs 在高温下更易挥发。示踪元素在台架各系统中的截留率远大于烟气的,证明整个熔融炉系统对 Co、Cs 和 Sr 有较高的截留率。

BX-14、BX-HN-TR-3 固化体相较于 HN-2、TR-16 样品对 Cs 的固化能力更低、对 Co 和 Sr 固化能力更高,可能主要因为两样品中含有大量片状玻璃纤维,玻璃纤维在进料过程中容易在进料管道高温段(700~900 °C)中软化熔融而粘连在管道壁上,导致模拟废物混合物料先在进料管

表 5 示踪元素截留情况

Table 5 Interception of tracer elements

样品编号	示踪元素	截留率/%		
		玻璃固化体	烟气	台架各系统
HN-2	Co	74.76	0.30	24.94
	Cs	66.75	0.20	33.05
	Sr	77.43	0.05	22.52
TR-16	Co	81.00	0.24	18.76
	Cs	69.30	0.30	30.40
	Sr	83.70	0.07	16.23
BX-14	Co	88.35	0.21	11.44
	Cs	76.26	0.19	23.55
	Sr	86.49	0.04	13.47
BX-HN-TR-3	Co	90.24	0.19	9.57
	Cs	75.20	0.18	24.62
	Sr	91.18	0.04	8.78

道高温段中反应形成熔体再流出到熔融炉,进而减少混合物料进入烟气净化系统的比例,提高熔融炉的物料利用率和示踪元素截留率。在实际工程应用中,建议在熔融炉系统前端增设造粒等预处理系统,减少物料直接进入烟气净化系统的比例,以便提高物料固化效率。

3 结 论

本工作在自制的不可燃等离子体熔融试验台架上对玻璃纤维、混凝土、土壤的单体玻璃固化配方及三元混合废物玻璃固化配方开展熔融处理试验研究和初步同位素示踪实验,对模拟不可燃放射性废物玻璃固化效果和示踪元素截留分布进行测试分析,得到以下结论。

(1) 四种模拟废物玻璃固化配方混合物在 1 100~1 300 °C 条件下熔融 60 min 均可得到玻璃固化体。

(2) 台架试验得到的玻璃固化体,密度均不小于 2.61 g/cm³,静态浸泡 28 d 单位面积总失重均小于等于 6.804 4 g/m²,示踪元素 Cs、Co 和 Sr 归一化元素浸出率均低于 1 g/(m²·d),抗压强度均大于等于 35.45 MPa,抗冲击性能均不大于 5.15 cm²/J,各性能均满足 EJ 1186—2005^[17]、GB 14569.1—2011^[18] 中放射性废物玻璃固化体的性能要求,玻璃固化体化学稳定性好。

(3) 等离子体熔融系统对示踪元素 Co、Cs 和 Sr 有较高的截留率,且玻璃固化体对 Co 和 Sr 的固化能力较好、对 Cs 固化能力相对较差。

(4) 在实际工程应用中,建议在熔融炉系统前端增设造粒等预处理系统,减少物料直接进入烟气净化系统的比例,以便提高物料固化效率。

参考文献:

[1] 江云,倪金弟,韩友道,等.放射性沾污的玻璃纤维过滤器的焚烧试验[J].核技术,1983,4(1):59-60.

[2] 刘坤,李洪刚,程敏,等.放射性核素污染土壤修复方法及技术研究进展[J].环境影响评价,2021,43(4):75-79.

[3] 丁庆军,张立华,胡曙光,等.防辐射混凝土及核固化材料研究现状与发展[J].武汉理工大学学报,2002,24(2):16-19.

[4] 徐凯.核工业可持续发展的基石:核废料科学管理

与处置[J].中国材料进展,2015,34(2):173.

[5] 曹骥,陈云明,张劲松,等.低中放可燃废物玻璃固化过程关键工艺参数优化研究[J].核动力工程,2017,38(3):172-175.

[6] 徐凯.核废料玻璃固化国际研究进展[J].中国材料进展,2016,35(7):481-488.

[7] 陈明周,白冰,刘夏杰,等.核电厂放射性可燃废物等离子体玻璃固化配方初步研究[J].辐射防护,2015,35(5):262-266.

[8] Womack R K, Shuey M W. Development and use of the dualmode plasma torch[C]. Proceedings of the Waste Management Conference, Tucson, Arizona, USA, 2002: 200-208.

[9] Park J K, Song M J. Feasibility study on vitrification of low- and intermediate-level radioactive waste from pressurized water reactors[J]. Waste Management, 1998, 18(3): 157-167.

[10] 林鹏,陆杰,刘夏杰,等.核电厂典型中低放射性废物等离子体熔融处理试验研究[J].中国材料进展,2016,35(7):504-508.

[11] 徐文兵,吕永红,陈明周,等.热等离子体处理模拟放射性废物试验研究[J].核动力工程,2015,36(6):175-179.

[12] 林鹏,秦余新,吕永红,等.放射性废物热等离子体处理熔融炉温度分布数值模拟及渣液玻璃化配方初步研究[J].辐射防护,2013,33(4):206-211.

[13] 林鹏,刘春雨,李丽丽.不可燃放射性废物三元混杂玻璃固化配方研究[J].辐射防护,待出版.

[14] 煤炭科学研究总院煤炭分析实验室. GB 475—2008 商品煤样人工采取方法[S].北京:中国标准出版社,2008.

[15] 东华大学、国家眼镜玻璃搪瓷制品质量监督检验中心. GB/T 5432—2008 玻璃密度测定浮力法[S].北京:中国标准出版社,2008.

[16] 中国建筑材料科学研究院、深圳新三思计量技术有限公司. GB/T 8489—2006 精细陶瓷压缩强度试验方法[S].北京:中国标准出版社,2006.

[17] 核工业标准化研究所. EJ 1186—2005 放射性废物体和废物包的特性鉴定[S].北京:中国标准出版社,2005.

[18] 环境保护部核与辐射安全中心、中国辐射防护研究院. GB 14569.1—2011 低、中水平放射性废物固化体性能要求:水泥固化体[S].北京:中国环境科学出版社,2011.