

工业化的高放废液玻璃固化工艺

现行的废液处理与玻璃固化工艺技术概况

W. Baehr

在进行核燃料后处理的国家中，对高放废物（HLW）的管理，主要就是把高放废物溶液固化。有些国家在 30 多年前就开始了裂变产物浓缩溶液固化的研究与开发。初期的工作主要是确定合适的基体材料，后来才开始开发工业规模的固化技术。

曾经考虑过的用来包封裂变产物的材料很多，从简单的脱硝煅烧产物到玻璃、晶状陶瓷。或采用更复杂的形式把裂变产物包起来，比如做成用耐久材料和玻璃包起来的小球或嵌在惰性基体内的瓷珠等。最近几年，逐渐形成了一种共同的想法，即玻璃的综合性能最好，易于制作且经验丰富。曾研究过几种类型的玻璃，结果只选中了硅酸盐玻璃或硼硅酸盐玻璃。

从全世界来看，已经开发和验证过的固化工艺很多，并已达到了相当可观的规模，但由于种种原因，许多固化工艺没有被正式采用。不管怎么说，从此类装置上获得的经验，为目前这些装置的设计提供了大量的数据。世界上目前正在运行的工业规模的固化装置，使用的只是玻璃固化工艺。

玻璃固化工艺的主要步骤是：使水和硝酸蒸发，将高放液体废物（HLLW）溶液浓缩；烘干和煅烧，将硝酸盐分解成氧化物；将氧化物与玻璃块放在一起熔合成高放废物玻璃。

这几个步骤既可独立进行又可合起来进行，即一步法或多步法。在最常见的工艺中，烘干和煅烧操作被合并在一个装置——回转煅烧炉内进行。

玻璃的熔化既可在金属熔炉又可在陶瓷熔炉内进行。金属熔炉的外壳依靠感应进行加热，然后将热量传给玻璃制品。金属熔炉的主要优点是成本低、操作

简便，缺点是处理能力被限制在 30—40 升/小时。陶瓷熔炉利用浸没式电极直接加热，HLLW 的处理能力可大于 100 升/小时。然而，陶瓷熔炉工艺的缺点一直是成本高、比较难以操作。

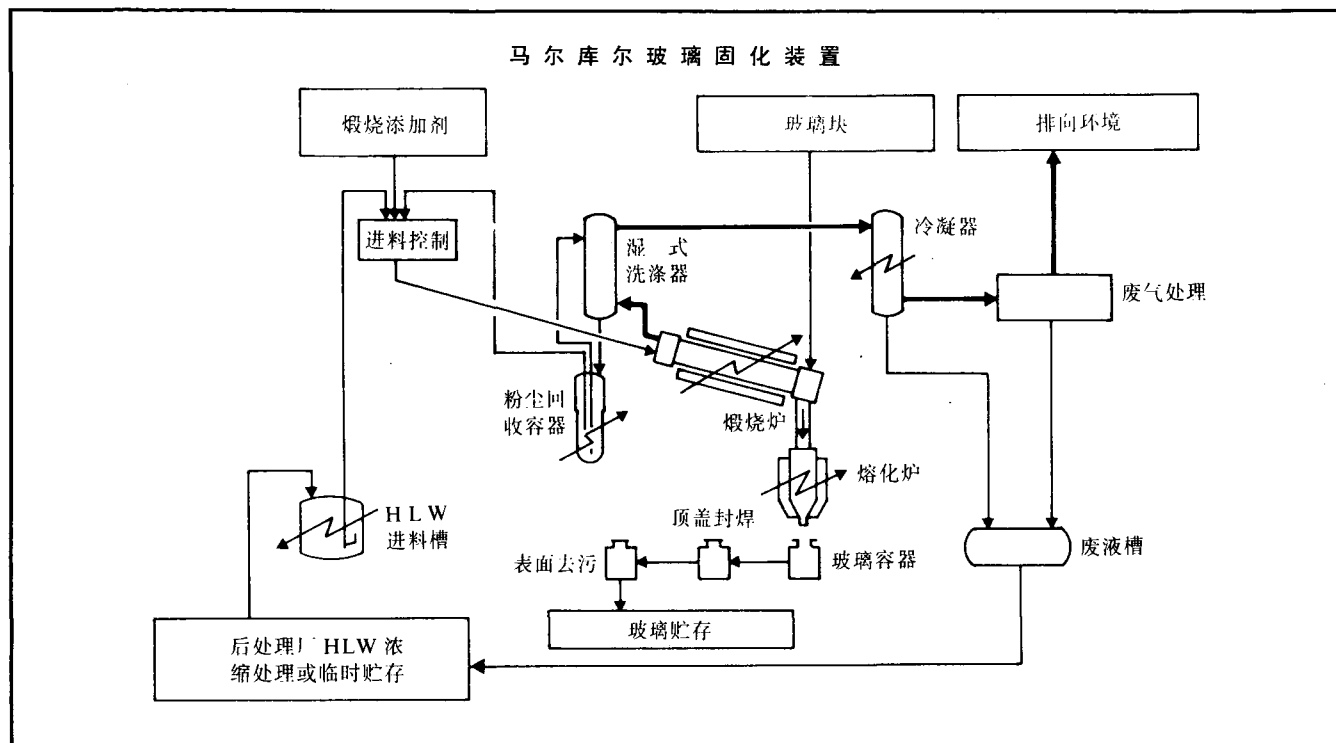
已经开发出了两种将 HLLW 转化成硼硅酸盐玻璃的玻璃固化工艺。其一是众所周知的法国 AVM 工艺，这是一种连续进行的两步玻璃固化技术，于 1978 年开始进行高放废物的工业化处理。另一是连续进行的一步陶瓷熔炉工艺，自 1985 年以来，位于比利时莫尔的德意志联邦共和国 Pamela 工厂一直在放射性条件下进行示范。

AVM 工艺

AVM 工艺由一座回转炉和一座感应加热金属熔炉组成。（见附图。）高放裂变产物溶液和煅烧添加剂一起由煅烧炉上端送入。煅烧炉是一个有点倾斜的管状炉，每分钟转 30 圈。此炉两端靠滚柱轴承支撑。两端装有专用气密垫圈，使煅烧炉可以沿轴向伸缩并维持气密性。炉内的搅拌棒旨在避免可能出现的烧结。回转筒靠外部的电阻炉加热。电阻炉分为 4 段，头两段用于蒸发，每段的加热能力为 20 kW，后两段的加热能力各为 10 kW。温度从物料入口处的 225℃ 到最大值 600℃。废液流量通常为 40 升/小时左右。回转煅烧炉出口与熔炉相接，熔炉靠中频感应加热到约 1150℃。煅烧产物靠自身重力流入熔炉，同时向熔炉内加入玻璃块，熔好的玻璃每 8 小时浇铸一次。熔炉底部是铸口，将铸口处平时呈固体状的玻璃塞熔化掉即可进行浇铸。这种熔炉的处理能力大约为 15 公斤/小时。

熔炉和煅烧炉中产生的废气，经煅烧炉排出，在

Baehr 先生是国际原子能机构核燃料循环和废物管理处的高级职员。



热洗涤塔内进行初步处理。洗涤塔能捕集夹带的微粒并将其溶入连续流动的沸腾硝酸液中。生成的溶液连续地返回煅烧炉。废气依次经过能除去亚硝酸蒸气馏分的复合容器、两个吸收塔和一些过滤器，从而得到处理。接着气体被导向通风系统。废气处理过程中复合生成的酸液被返回利用。

玻璃被注入耐酸不锈钢罐中，当注满一罐时，用自动等离子体弧焊焊上密封顶盖。接着用压力为 250 巴的水对其进行喷淋清洗，然后把罐移到临时贮存库内带通风的井筒中。

截至 1988 年 10 月底，AVM 已将大约 1225 立方米的裂变产物溶液转化为玻璃，放射性总量为 250 兆居里。* 共制成 1547 个贮存罐，装有大约 540 吨硼硅酸盐玻璃。

由法国通用新技术公司 (SGN) 设计，建在阿格燃料后处理厂的两套玻璃固化装置，也准备使用同样的工艺。这两套装置实际上是相同的：两者都包括 3 条玻璃固化线，每条固化线的蒸发能力为 60 升/小时、玻璃的生产能力为 25 公斤/小时。

联合王国塞拉菲尔德的温茨克尔玻璃固化厂

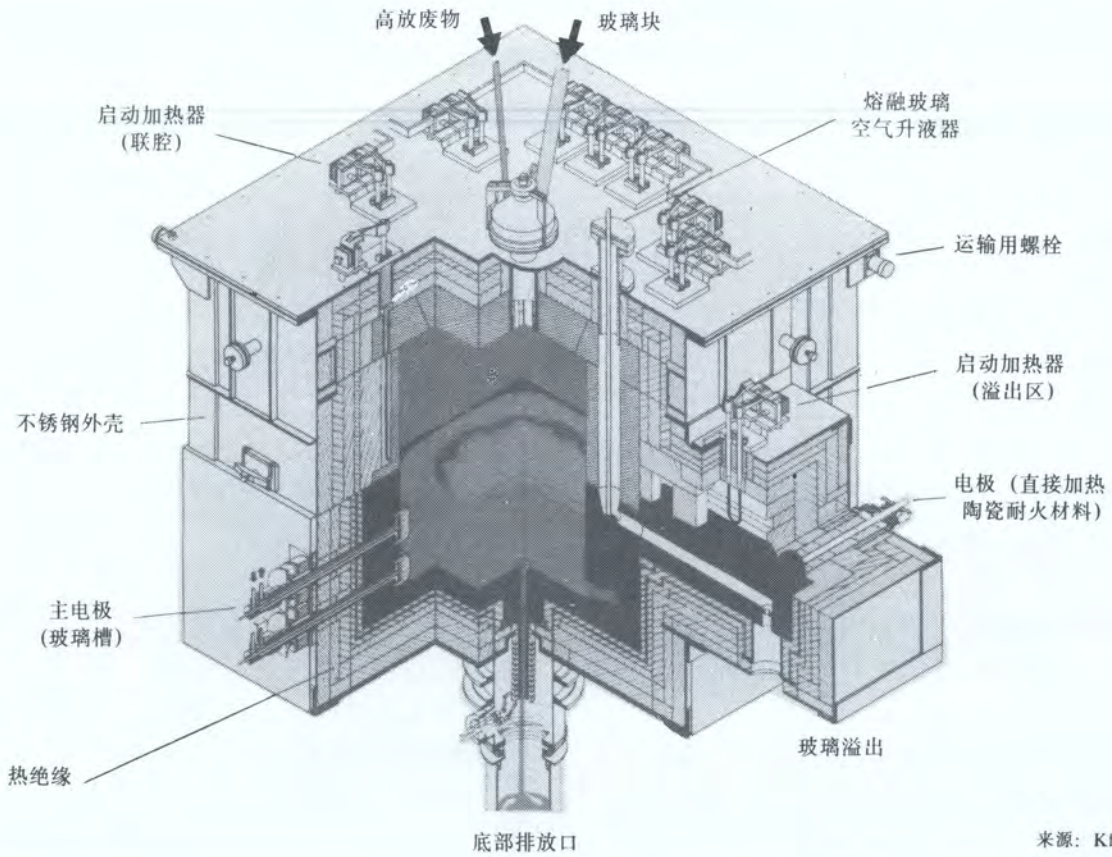
(WVP) 也采用 AVM 工艺，使用类似的设备，有两条生产线。

Pamela 工艺

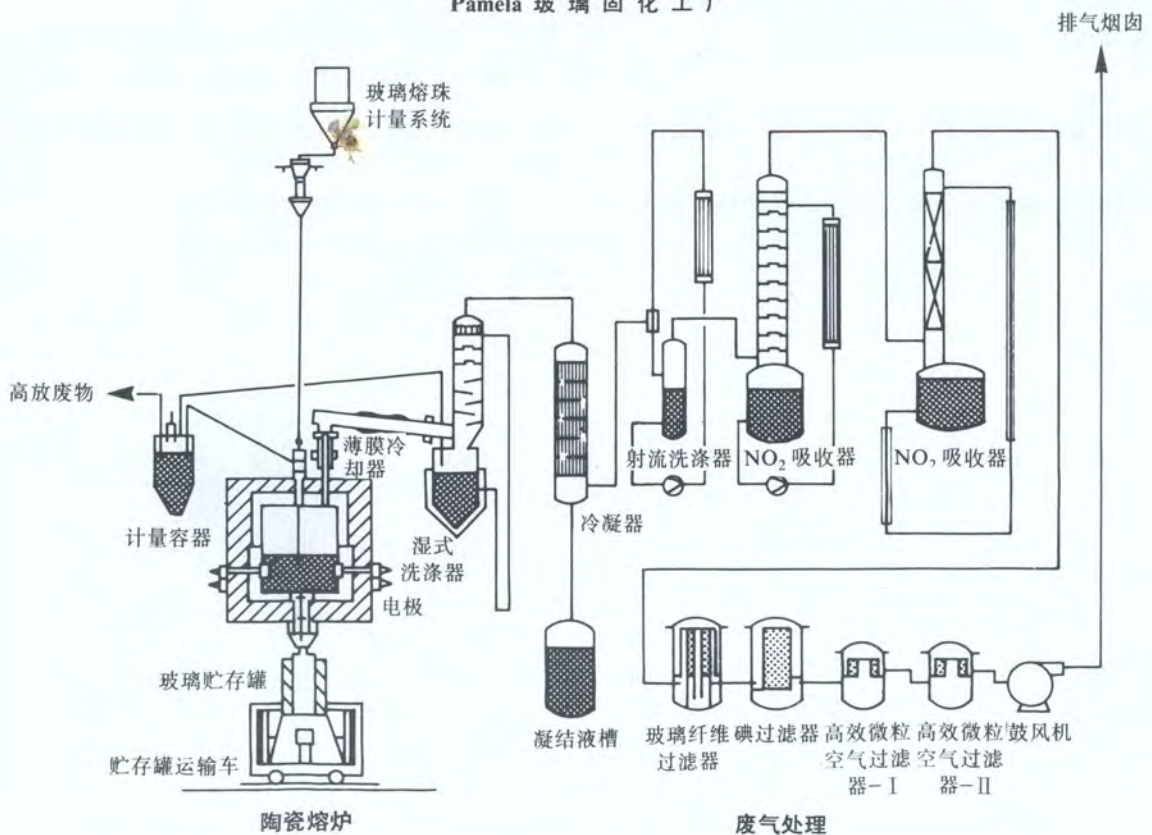
Pamela 玻璃固化厂采用一步处理工艺。它的主要部分是一座进料为液体的陶瓷熔炉，高放裂变产物溶液单独或与玻璃块一起被直接送入熔炉中，蒸发、煅烧和熔融在这个熔炉中同时进行。陶瓷熔炉的工作原理是焦耳加热效应，由于玻璃在高温下是电的良好导体，因而可以利用这一效应。在浸没在玻璃中的两个电极之间通以交流电，就能因焦耳效应而发热。耗散的电阻热使玻璃保持熔融状态并熔化新的进料。这种熔炉是用高度耐腐蚀耐高温的材料建造的。功率输入是通过 4 对因科镍-690 板状电极实现的，这些电极被安置在熔炉腔内的两个高度上，炉腔内的温度为 1150—1200℃。(见第 45 页附图。) 玻璃可以通过底部排放口或由空气升液器辅助的溢出口排出。若要使熔融的玻璃流出，可利用两个加热电路提高底部排放区出口通道内的玻璃温度。若要停止卸料，只需断开一个加热电路。为了通过溢出排放系统将熔融的玻璃注入贮存罐，在溢出口处安装了同样的加热系统。陶瓷熔炉的废气必须经过多级废气净化系统的净化处

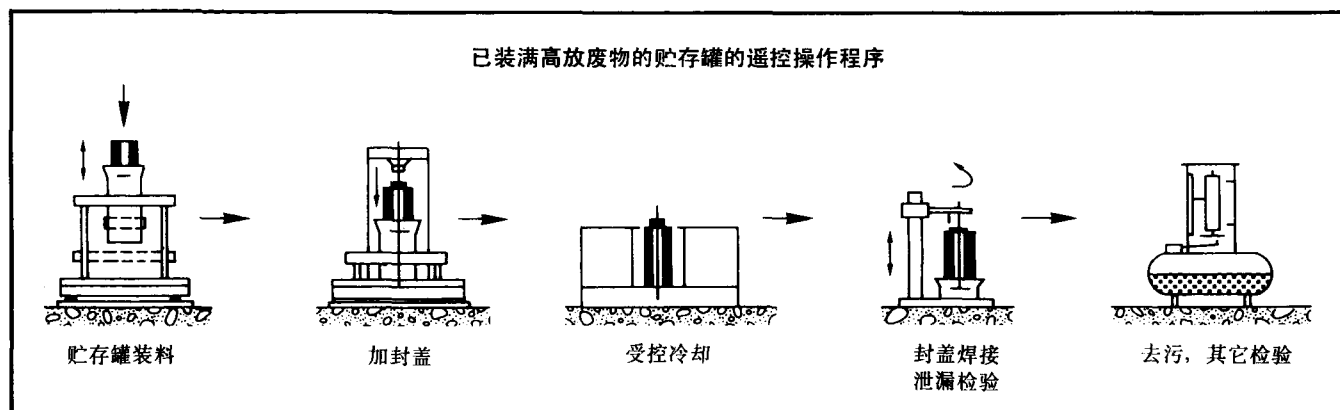
* 1 居里等于 37 吉贝克勒尔。

陶瓷衬里电加热废物玻璃熔炉 (Pamela 工艺)



Pamela 玻璃固化工厂





本图示出了使用 AVM 和 Pamela 工艺的玻璃固化厂中普遍实施的玻璃贮存罐操作程序。在灌满玻璃以后，为了给内部贮存或最终处置作准备，已装料的贮存罐须经若干道处理。主要的处理步骤是已装料贮存罐的受控冷却、封盖焊接、泄漏检测和去污。

理，才容许排向环境。不同玻璃固化工艺的废气净化系统基本上是相似的。（见第 45 页所附 Pamela 工厂流程简图。）

为防止玻璃产生裂纹和产品质量恶化，有必要对贮存罐的冷却进行控制。泄漏试验和去污操作保证了玻璃固化设施内的污染不会向外扩散。

Pamela 工厂从 1985 年 10 月开始运行到 1988 年 5 月，已对将近 265 立方米的高放废液进行了玻璃固化处理，制成 1381 个贮存罐，共计含有大约 265 吨硼硅酸盐玻璃和 9 兆居里的放射性。

小结

过去十年，高放废液的玻璃固化技术取得了很大进展。

法国 AVM 工艺已经在马尔库尔厂安全、成功地运行了多年。在阿格后处理厂又建成了两套装置，使

用相同的回转煅烧炉/金属熔炉工艺。其中的第一套装置已于 1989 年开始正式运行，第二套装置计划于 1990 年实现热运行。正在联合王国塞拉菲尔德建造的类似的固化装置，也将于 1990 年开始运行。

70 年代发展起来的陶瓷熔炉工艺，已经被几个国家选中，并处于不同的使用阶段。德意志联邦共和国已经成功地运行了一套 Pamela 装置，该装置建在比利时欧洲化学后处理厂。苏联在 1986—1988 年启用了采用陶瓷熔炉技术的玻璃固化装置。目前，美国的萨凡纳河、西瓦利以及日本的东海基地，正在建造使用陶瓷熔炉的玻璃固化装置。此外，美国汉福德基地和日本的固化装置正在设计。这些固化装置拥有大规模的工业生产能力，满足工业的与核的各种标准。

在未来的岁月中，陶瓷熔炉工艺在安全高效运行方面一定能做到与 AVM 工艺并驾齐驱。由这两种工艺生产的高放玻璃一定能满足主管部门为高放废物处置库制定的处置要求。

