陕西省科学技术进步奖提名书

(2023年度)

**一、项目基本情况**

|  |  |
| --- | --- |
| 项目名称 | 六氟化铀气态分样方法研究与应用 |
| 主要完成人 | 马腾、彭阳、胡海宏、李明、程栋、陈琛 |
| 主要完成单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |

**二、提名意见**（适用于部门、机构提名）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 提 名 者 | 陕西省物理学会 | 提名等级 | □一等奖□二等奖及以上☑三等奖及以上 |
| 提名意见：该项研究成果于2018年开始在中核陕西铀浓缩有限公司应用至今，装置及方法经长期考核稳定可靠，在国内属于领先水平。该技术有效解决了铀浓缩生产中使用液化分样法存在的高温高压风险及六氟化铀泄漏风险，大幅提高分样本质安全度。研制的分样装置及分样方法，有效提高了分样量波动控制精度，减少了六氟化铀样品的无效消耗；通过对分样操作过程的优化，有效提高了分样作业工作效率，减少对作业人员的职业危害，降低对环境的不利影响，对铀浓缩工厂安全运行具有重要的经济社会价值和示范引领作用。新方法可量化、标准化，应用以来为铀浓缩工厂提供了近六千多个各类型样品，有效保障了工厂的安全运行与产品质量。气态分样法可用于研究制定新的行业标准，成果可在核燃料行业推广应用。提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。**说明：省科学技术奖一、二、三等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖，“提名二等奖及以上”的评审落选项目不再降格参评三等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。** |

**三、项目简介**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **1.项目概况**核燃料循环产业是高科技战略产业，是支撑核工业发展的重要物质和技术基础，铀浓缩在核燃料循环体系中处于非常重要的环节。铀浓缩工厂主要生产不同丰度规格的六氟化铀，六氟化铀的丰度及成分组成是铀浓缩生产中关键的质量控制指标，体现了铀浓缩工厂的工艺控制、液化均质等工艺环节的综合运行水平。六氟化铀分样是铀浓缩产品质量检测的首道工序，分样的安全性、稳定性及可靠性在铀浓缩工厂中发挥着关键的作用。安全是核工业的生命线，随着我国核工业的快速发展，铀浓缩工厂的规模与产能持续增加，分样量与分样频次显著增多。传统六氟化铀的分样需要在高温高压环境下运行，安全风险较大，为保障核与生态环境安全，中核陕西铀浓缩有限公司组织专业技术队伍，自筹资金开展了专料理化分析系统气态分样技术研究，旨在建立一种降低分样安全风险，保障分样可靠性的分样方法，助力铀浓缩产业安全可持续发展。 **2.主要技术内容**传统上铀浓缩工厂一般依据ASTM C761《六氟化铀的化学、质谱、光谱、核和化学分析的标准试验方法》，采用液化分样方法进行六氟化铀专料样品的分取，该方法需将六氟化铀加热至93℃，使容器内的六氟化铀样品充分液化，借助重力作用使液态六氟化铀流入子样品收集容器。整个分样过程中六氟化铀的饱和蒸气压约为0.4MPa，系统始终在高压力条件下运行，安全风险大，一旦出现泄漏，会对操作人员及工作环境造成较大影响。为了有效降低六氟化铀分样的安全风险，该项目研究了在六氟化铀饱和蒸气压小于标准大气压情况下分样的技术，使操作与运行过程处于负压环境，有效降低过程风险，提高了六氟化铀分样作业的本质安全度。本方法简称气态分样，其工作原理是：给封闭系统中的六氟化铀样品进行加热，固体六氟化铀吸收热量后，部分升华为气体，饱和蒸气压增加。持续加热操作，达到三相点后六氟化铀以气、液、固三种状态存在，样品在低于标准大气压的压力条件下以气体状态实现测试样品分装。用于气态分样的装置配套有温度调节功能，控制六氟化铀的温度，始终低于三相点温度工作，饱和蒸气压控制不超过0.1MPa。分样过程中六氟化铀始终处于气态，利用气体自由扩散原理，装料容器内六氟化铀在饱和蒸汽压作用下，进入抽真空的分样装置，通过操作分样装置，按照正确的程序，将进入分样装置中的气态六氟化铀依次收集至满足实验室检测需求的样品容器中。该项目研究开发的六氟化铀样品分样方法是采用气态六氟化铀进行样品分取的方法，按照本方法的应用环境，设计了专用的气态分样装置，并使用该装置进行了充分的方法实验，建立了准确的气态分样操作程序，通过新方法与原方法的比对测试，验证了本方法分样安全可靠性及良好代表性。主要技术指标：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 名称 | 指标 | 备注 |
| 1 | 装置漏率 | ＜5.0×10-7Pa·L/s |  |
| 2 | 温度控制精度 | ＜±3.0℃ |  |
| 3 | 系统极限真空 | ＜10.0Pa |  |
| 4 | 样品压强控制 | ＜0.1MPa |  |
| 5 | 取样量波动控制 | ＜±2.0g |  |
| 6 | 丰度比对偏差 | ＜0.3% |  |
| 7 | 纯度比对偏差 | ＜0.15% |  |

**3.授权专利情况**授权实用新型专利3项：《一种六氟化铀二次抽样装置》（授权号：CN 211504865 U）；《一种六氟化铀二次抽样定量装置》（授权号：CN 211347586 U）；《一种用于盛装六氟化铀的取样容器》（授权号：CN 214473997 U）。**4.主要创新点**①项目建立了铀浓缩生产中六氟化铀的气态分样方法，实现了低压环境可靠分样技术，有效降低了铀浓缩分样环节的安全风险。；②研制了适用于六氟化铀气态分样的专用装置，该装置能有效控制六氟化铀在分样过程的压强，应用监测装置使分样运行过程始终处于安全可控状态；③建立了准确分取六氟化铀的定量控制方法与定量装置；④建立了使用聚三氟氯乙烯管收集气态六氟化铀的工艺技术。**5.应用效果及社会价值**该项研究成果于2018年开始在中核陕西铀浓缩有限公司应用至今，装置及方法经长期考核稳定可靠，在国内属于领先水平。该技术有效解决了铀浓缩生产中使用液化分样法存在的高温高压风险及六氟化铀泄漏风险，大幅提高分样本质安全度。研制的分样装置及分样方法，有效提高了分样量波动控制精度，减少了六氟化铀样品的无效消耗；通过对分样操作过程的优化，有效提高了分样作业工作效率，减少对作业人员的职业危害，降低对环境的不利影响，对铀浓缩工厂安全运行具有重要的经济社会价值和示范引领作用。新方法可量化、标准化，运行6年以来为铀浓缩工厂提供了近六千多个各类型样品，有效保障了工厂的安全运行与产品质量。气态分样法可用于研究制定新的行业标准，成果可在核燃料行业推广应用。 |

**四、客观评价**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 为验证气态分样可靠性，研究人员选用了专料样品进行方法比对。使用4个批次的样品，分别使用气态分样与液化分样方法进行分样，对样品的检测数据进行统计分析。为了有效评估样品的代表性，先后在铀浓缩生产过程中抽取4个产品装料的取样瓶（2S容器），分别使用气态分样方法与液化分样方法进行二次抽样，第一次计划抽样8.0g，第二次计划抽样8.5g，第三次计划抽样9.0g，第四次计划抽样9.5g。抽样过程中的压力状态参数、样品量控制情况、分样操作所用时间等参数见表1与表2。经过统计，相较液化分样方法，使用气态分样进行六氟化铀样品的二次抽样，在系统进样后的压强小（低于1个标准大气压），取样量控制更加准确，完成相同的抽样任务气态分样耗时更少。表1 液化分样过程关键参数统计

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 分样时间 | 进样前系统真空（Pa） | 进样后系统真空（Pa） | 取得样品质量 | 工作耗时（min） |
| 2018.10.12 | 11.0 | 4.7×105 | 8.12g | 150 |
| 2018.10.15 | 12.0 | 4.8×105 | 10.34g | 140 |
| 2018.10.27 | 16.0 | 4.7×105 | 12.18g | 160 |
| 2018.12.18 | 14.0 | 4.8×105 | 9.82g | 155 |

表2 气态分样试验过程关键参数统计

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验时间 | 进样前系统真空（Pa） | 进样后系统真空（Pa） | 取得样品质量 | 试验耗时（min） |
| 2018.10.12 | 5.0 | 4.5×104 | 8.32g | 33 |
| 2018.10.15 | 5.0 | 5.0×104 | 8.84g | 28 |
| 2018.10.27 | 5.0 | 5.5×104 | 9.28g | 30 |
| 2018.12.18 | 5.0 | 6.0×104 | 9.62g | 35 |

之后为了评估气态分样所取得样品的丰度、纯度、杂质含量等是否具有代表性，将抽取的子样品送至实验室进行理化检测，对检测结果进行统计比对。经统计，气态分样法分取样品的丰度、纯度检测结果一致；说明样品代表性良好，使用气态分样方法不会引入被测量杂质元素干扰测量，即不影响样品的本质代表性。其中丰度、卤代烃检测使用质谱法，测量仪器为MAT-281气体同位素质谱仪。纯度检测使用电位滴定法，杂质元素检测使用ICP-OES法，测量仪器为PE 7300DV。（1） 235U丰度比对此次采用气体同位素测量质谱法对样品中235U丰度值进行检测，使用设备为测量六氟化铀专用的MAT-281气体同位素质谱仪。测量原理是将六氟化铀样品导入质谱计离子源，经离化、聚焦、加速成具有一定能量和几何形状的离子束后进入磁分析器的扇形磁场，在磁场的作用下，使其按质荷比的大小分开，通过离子检测系统测定各同位素离子流的强度，从而计算出铀同位素的丰度。抽样检测数据见表3。表3子样品中235U丰度测量统计

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 取样检测时间 | 液化分取UF6中235U丰度测量值（%） | 气态分取UF6中235U丰度测量值（%） | 测量235U丰度方法的不确定度 |
| 2018年10月12日 | 4.449±0.014 | 4.448±0.014 | 0.3% |
| 2018年10月15日 | 4.001±0.013 | 4.002±0.013 |
| 2018年10月27日 | 4.454±0.014 | 4.453±0.014 |
| 2018年12月18日 | 2.401±0.008 | 2.402±0.008 |

测量235U丰度使用的测量方法不确定度为0.3%，通过上表可知由四个批次液化取样与气态取样方法所抽取样品的纯度检测结果偏差均小于测量不确定度，比对检测结果一致。（2）纯度值比对将二次抽样取得的六氟化铀样品，用液氮冷冻后，水解，蒸干水解液（氟化铀酰溶液），然后高温水解转化为八氧化三铀。由获得的八氧化三铀质量和库仑滴定法测得的质量因子。研究人员在同一个样品容器中，分别使用液化分样和气态分样方法进行二次抽样，由同一人员使用同一方法对样品进行纯度比对检测，检测数据见表4。表4 子样品纯度检测数据对比表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 取样检测时间 | 液化分取UF6纯度测量值（%） | 气态分取UF6纯度测量值（%） | 评定方法不确定度 |
| 2018年10月12日 | 99.90±0.16 | 99.90±0.16 | 0.16% |
| 2018年10月15日 | 99.91±0.16 | 99.90±0.16 |
| 2018年10月27日 | 99.92±0.16 | 99.91±0.16 |
| 2018年12月18日 | 99.90±0.16 | 99.91±0.16 |

测量样品纯度的方法采用国家标准，方法不确定度经评定为0.16%，通过上表可知由四个批次液化取样与气态取样方法所抽取样品的纯度检测结果偏差均小于测量不确定度，比对检测结果一致。综上，六氟化铀气态分样法与原液态分样法相比，气态分取样品的检测结果与液化分取样品的检测结果偏差范围均小于限值，样品代表性良好；取样过程控制系统压力小于标准大气压，安全性显著提高；取样偏差小于0.5g，对样品量的控制更加精准；分取一个样品最大耗时小于40分钟，工作效率更高。2019年11月26日，中国核工业集团有限公司科技质量与信息化部在天津组织召开了“六氟化铀样品分样新方法”项目成果鉴定会。鉴定委员会听取了技术总结报告，审阅了有关材料。认为该项目研发了一种用于六氟化铀样品的气态抽样装置与分样方法，提高了铀浓缩供取料过程中分样环节的安全性，项目总体技术达到国内领先水平，关键技术和设备自主可控，同意该项目通过国防科技成果鉴定。 |

**五、应用情况**

|  |
| --- |
| **1．应用情况（限2页）**新方法2018年开始在中核陕西铀浓缩有限公司进行了运行与应用考核，效果良好，是国内铀浓缩行业中首次研究在专料理化分析系统中采用气态分样技术的方法进行二次抽样。经考核应用验证，此次研制的气态分样装置安全可靠，试验总结出的气态分导方法具备使抽样可量化的基础，相较于液化分样方法，其本质安全度显著提高，工作效率得到提升，有效降低了分样过程的样品耗量，可很好的服务于铀浓缩工厂理化检测工作，为研究制定新的行业标准奠定基础。成果可在国内其他核燃料生产工厂，以及其他涉及气体物理性质与六氟化铀相似的行业中推广应用。目前项目组已开展建立“气态分取六氟化铀样品操作方法”行业标准的工作。 |

**六、主要知识产权和标准规范等目录（限10条）**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 知识产权类 别 | 知识产权具体名称 | 国家（地区） | 授权号 | 授权日期 | 证书编号 | 权利人 | 发明人 |
| 1 | 专利 | 一种六氟化铀二次抽样装置 | 中国 | CN 211504865 U | 2019.08.20 | 第11485068号 | 中核陕西铀浓缩有限公司 | 马腾、彭元明、胡海宏、彭阳、程栋 |
| 2 | 专利 | 一种六氟化铀二次抽样定量装置 | 中国 | CN 211347586 U | 2019.08.30 | 第11335660号 | 中核陕西铀浓缩有限公司 | 马腾、胡海宏、彭阳、李明、陈琛、程栋 |
| 3 | 专利 | 一种用于盛装六氟化铀的取样容器 | 中国 | CN 214473997 U | 2021.10.22 | 202023272899.2 | 中核陕西铀浓缩有限公司 | 彭阳、陈琛、隆建荣、金青 |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |  |  |  |  |

**七、主要完成人情况表**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 马腾 | 排 名 | 1 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 完成单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 对本项目主要学术贡献：该项目负责人，主持该项目六氟化铀气态分样（二次抽样）装置的设计、加工、调试、测试、试验；主持六氟化铀样品二次抽样（分样）新方法设计、比对试验与测试；负责该项成果装置的安装、调试以及试验实施过程中设计方案和试验方案的设计； 解决了项目实施过程中的技术难题，确保了此次科研的最终成功。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 彭阳 | 排 名 | 2 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 完成单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 对本项目主要学术贡献：1、负责六氟化铀样品气态分样（二次抽样）新方法理论设计与计算；2、负责该项成果装置的安装、调试方案以及试验实施过程中设计方案和试验方案的设计审定； 3、参与该项成果试验比对的审核。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 胡海宏 | 排 名 | 3 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 完成单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 对本项目主要学术贡献：1、负责六氟化铀气态分样（二次抽样）装置的设计、加工、调试、测试、试验方案审核；2、负责六氟化铀气态分样装置（二次抽样）的设计与加工；3、参与气态分样方法理论设计、计算以及方法试验验证审核；4、参与六氟化铀样品二次抽样（分样）新方法设计、比对试验与测试方案的设计审核。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 李明 | 排 名 | 4 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 工程师 |
| 工作单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 完成单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 对本项目主要学术贡献：1、该项目总体思路的提出者，负责六氟化铀气态分样（二次抽样）装置及分样方法技术考核指标制定；2、参与六氟化铀气态分样（二次抽样）装置的设计、加工、调试、测试、试验方案设计、审核；3、参与六氟化铀样品二次抽样（分样）新方法设计、比对试验与测试方案的设计、审核。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 程栋 | 排 名 | 5 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 完成单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 对本项目主要学术贡献：负责六氟化铀气态分样方法比对测试、试验、数据处理；参与六氟化铀气态分样方法比对测试设计方案和试验方案的设计；解决比对试验、数据处理过程中的技术问题，提出定量偏差的改进措施。 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓 名 | 陈琛 | 排 名 | 6 |
| 行政职务 | 无 |
| 技术职称 | 工程师 |
| 工作单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 完成单位 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 对本项目主要学术贡献：负责六氟化铀气态分样装置及分样方法设计、试验过程资料的整理与数据统计分析；参与该项科研及成果应用的试验工作，参与解决试验中的技术问题、样品称量衡算问题。 |

**八、主要完成单位情况表**

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 | 中核陕西铀浓缩有限公司 |
| 对本项目主要学术贡献： 中核陕西铀浓缩有限公司在该项目立项前进行了大量的技术准备工作。在项目立项后投入大量人力、物力、财力，组织完成了气态分样装置设计研制，气态分样方法的建立，组织开展了新方法与传统方法的比对实验，开展了方法经济性、安全性评价，并在公司生产系统进行了应用考核测试。在项目完成后组织开展了项目的成果鉴定，专利技术保护等。综上所述，中核陕西铀浓缩有限公司在该项目开展过程中做出了较大贡献，是该项成果的第一完成单位。 |

|  |  |
| --- | --- |
| 单位名称 |  |
| 对本项目主要学术贡献：  |

**完成人合作关系说明**

《六氟化铀气态分样方法研究与应用》项目按照项目分工，各自承担不同的任务，具体分工如下：

马腾，高级工程师，作为项目负责人，主持该项目六氟化铀气态分样（二次抽样）装置的设计、加工、调试、测试、试验；主持六氟化铀样品二次抽样（分样）新方法设计、比对试验与测试；负责该项成果装置的安装、调试以及试验实施过程中设计方案和试验方案的设计； 解决了项目实施过程中的技术难题，确保了此次科研的最终成功。

彭阳，高级工程师，负责六氟化铀样品气态分样（二次抽样）新方法理论设计与计算；负责该项成果装置的安装、调试方案以及试验实施过程中设计方案和试验方案的设计审定； 参与该项成果试验比对的审核。

胡海宏，高级工程师，负责六氟化铀气态分样（二次抽样）装置的设计、加工、调试、测试、试验方案审核；负责六氟化铀气态分样装置（二次抽样）的设计与加工；参与气态分样方法理论设计、计算以及方法试验验证审核；参与六氟化铀样品二次抽样（分样）新方法设计、比对试验与测试方案的设计审核。

李明，工程师，该项目总体思路的提出者，负责六氟化铀气态分样（二次抽样）装置及分样方法技术考核指标制定；参与六氟化铀气态分样（二次抽样）装置的设计、加工、调试、测试、试验方案设计、审核；参与六氟化铀样品二次抽样（分样）新方法设计、比对试验与测试方案的设计、审核。

程栋，高级工程师，负责六氟化铀气态分样方法比对测试、试验、数据处理；参与六氟化铀气态分样方法比对测试设计方案和试验方案的设计；解决比对试验、数据处理过程中的技术问题，提出定量偏差的改进措施。

陈琛，工程师，负责六氟化铀气态分样装置及分样方法设计、试验过程资料的整理与数据统计分析；参与该项科研及成果应用的试验工作，参与解决试验中的技术问题、样品称量衡算问题。

**完成人合作关系情况汇总表**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作者/项目排名 | 合作起始时间 | 合作完成时间 | 合作成果 | 证明材料 |
| 1 | 1 | 共同知识产权 | 彭阳/2 | 2006.01 | 至今 | 六氟化铀气态分样装置 |
| 2 | 2 | 共同知识产权 | 胡海宏/3 | 2006.01 | 2020.11 | 六氟化铀抽样定量装置 |
| 3 | 3 | 共同知识产权 | 李明/4 | 2006.01 | 2019.11 | 六氟化铀气态分样装置 |
| 4 | 4 | 共同知识产权 | 程栋/5 | 2006.01 | 至今 | 六氟化铀气态分样装置 |
| 5 | 5 | 共同知识产权 | 陈琛/6 | 2006.01 | 至今 | 六氟化铀气态分样装置 |
| 不限条目 |  |  |  |  |  |  |