

液体闪烁体——江门中微子实验的核心靶体

胡 涛

(中国科学院高能物理研究所 100049)

江门中微子实验(JUNO)的目标是精确测量中微子的质量顺序,帮助我们揭开恒星演化,宇宙起源这些科学的终极谜题。在标准模型里中微子就像一个“三无”粒子:无电荷、质量极小、几乎不和物质反应,比如,每秒穿过人身体的有几万亿个中微子,但人体却毫无感觉。针对它的这些特点,江门中微子实验设计了一个包括内装2万吨液体闪烁体(简称液闪)的直径35.4米的有机玻璃球和球外4.5万只光电倍增管的超级探测器,中微子被液体闪烁体“捕捉”后会发出微弱的光即闪烁光,光随后被光电倍增管探测到。这样利用巨大体积的液体闪烁体的“显影捉妖”性能就可以捕捉中微子“幽灵”。

液体闪烁体以线性烷基苯(LAB)为溶剂,添加发光溶质 PPO 和波长移位剂 bis-MSB,并辅以抗氧化剂 BHT。为了让飘忽不定的中微子留下清晰的身影,除了和生产厂家合作得到远高于市售质量的原料外,中国、意大利、德国、俄罗斯、比利时和芬兰等多国科学家及工程技术人员还在江门实验现场

采用了氧化铝过滤、真空蒸馏、液闪混制、水萃取、氮气剥离等多种多重纯化方法,研制了目前世界上最大体积(~2.4万立方米),最透明(衰减长度~20米),并且有极低放射性本底(铀-238和钍-232的含量低于0.1微克/千吨)的液体闪烁体。其生产纯化流程如图1所示。

一、高质量液闪原料

江门中微子实验对液闪提出两个相互关联的核心要求:极高的透明度和极低的放射性杂质含量。市售的所有原材料均无法同时满足这两项要求。为此,研究团队采取“源头控制”的策略:与生产企业深度合作,为每一种原材料建立定制化的提纯工艺和质量标准,确保原料达到高质量,为后续纯化环节减轻压力。

用量最大的原料是液闪溶剂——直链烷基苯,这是一种无色透明的液体,约需2万吨。工业烷基

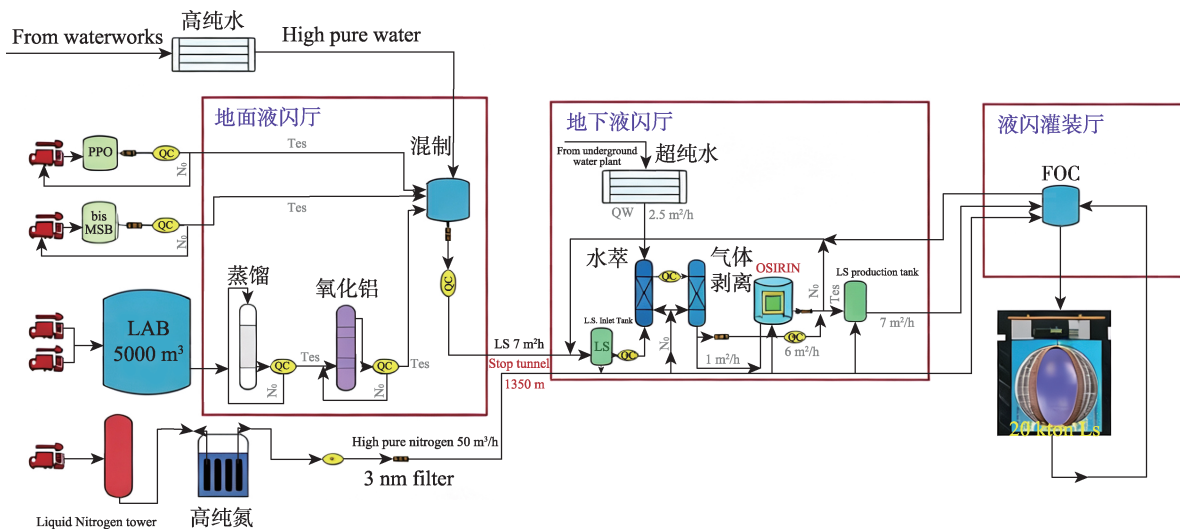


图1 液闪纯化生产流程及设备配置图

苯是洗涤剂的主要原料,执行 GB/T 5177-2017 标准,其透明度远低于实验要求,衰减长度通常不足 10 米。研究团队与中国石化金陵石化合作,将 JUNO 的透明度指标转化为可指导生产的质检参数,通过调整生产工艺,最终使烷基苯的衰减长度达到 20 米以上,且放射性杂质未检出。这批特种烷基苯被命名为“新领域烷基苯”,实现了工业原料向高能物理应用的跨越。

烷基苯运输使用的是 T11 无防浪板型 ISO 罐,其标准容积 25-26 m³。相比于传统液袋集装箱,ISO 罐的优点非常明显:烷基苯对不锈钢的兼容性好;ISO 罐密封性好,不容易漏,更安全。根据 JUNO 实验的需求,JUNO 使用的是全新 ISO 罐,且按照 JUNO 的标准直接在生产 ISO 罐厂家的生产线上进行精密清洗,通过生产线上的制罐-酸洗钝化-初步清洗-人工冲洗-阀门安装-高纯水 3D 冲洗-质检-干燥的流程化操作,确认清洗等各方面质量均合格后,下线进行氮气置换后密封备用。

JUNO 定制了 200 个全新 ISO 罐,每批次可运 3000~4000 吨,2 万吨烷基苯分 6 个批次运到 JUNO 现场。货运采用海陆联运的模式进行,循环单次货运周期约 1 个月。

烷基苯运到江门现场后,暂存于固定顶立式储罐,直径 23.7 m,高 15.4 m,有效容积 5000 m³,材质为 304L 不锈钢,内表面粗糙度 $\leq 0.4 \mu\text{m}$ 。大罐如图 2 所示。

大罐建成后,同样经过了脱脂-酸洗-钝化-水冲洗-高纯水冲洗的过程,满足 JUNO-50 标准。大罐使用流气式氮气密封,通过自控系统,即使在剧烈温度变化下,罐内工作压力也控制在-250~1960 Pa,



图 2 5000 m³烷基苯存储大罐

保证大罐安全运行。

液闪中的第一发光物质 PPO 是白色固体,需求量约 60 吨,是定制难度最高的原料。商品级 PPO 无论国产还是进口,均需进一步纯化。研究团队建立了双层质检体系:先用紫外-可见吸收光谱法快速筛选,再以衰减长度(要求 ≥ 20 米)作为决定性指标。针对放射性检测,开发了酸萃结合电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)的方法,使钷、铀的检出限达到 10^{-14} g/g,完全满足实验要求。历经近十年磨合,与华烁科技股份有限公司从工艺流程、纯化步骤、生产车间洁净度、设备清洁,到包装、仓储温湿度乃至开箱方式,逐一优化,最终实现 60 吨 PPO 的保质保量交付。

这 60 吨高纯 PPO 的成功定制,标志着我国在精细化工领域取得了重要突破:其光学纯度达到国际领先水平,衰减长度等关键指标实现了对同类产品的跨越式提升;放射性杂质钷、铀含量更是比国际同类样品低数个数量级,达到了当前国际最优水平。这不仅为 JUNO 实验奠定了最关键的原料基础,也表明我国在高端化学品定制与纯化领域已具备引领国际先进水准的能力。

第二发光物质 bis-MSB(72 千克)和抗氧化剂 BHT(1 吨)也由华烁生产。二者化学性质与 PPO 差异显著,研究团队分别建立了相应的质检方法与技术指标,厂家则针对性地设计了独立的生产和纯化流程。得益于高纯 PPO 的生产经验积累,这两种原料同样顺利完成定制与交付。

最终成效显著:所有定制原料直接混制而成的液闪,不经任何额外纯化,其质量满足探测中微子质量顺序这一基础科学目标的要求。这一品质为后续液闪经现场纯化系统进一步降低本底、拓展太阳中微子等高级物理目标提供了坚实保障。

二、氧化铝吸附:烷基苯光学纯化系统

中微子与液体闪烁体中的原子核反应后,会产生极其微弱的闪光。这些闪光被周围数万个超高灵敏度的光电倍增管捕捉并转换成电信号。要想实现预期的 3% 超高能量分辨率,一个基本前提是:

作为“光线传导介质”的液体闪烁体本身必须极度纯净和透明。任何微小的光学杂质都会像灰尘遮挡光线一样,“吞噬”掉宝贵的闪烁光子,导致信号减弱甚至丢失。

氧化铝:清除光学杂质的“魔法滤芯”

JUNO 液体闪烁体的主要溶剂是直链烷基苯(LAB)。尽管定制的 LAB 纯度已经很高,但其生产过程中仍会引入微量的重烷基苯等杂质。这些杂质就像水体中的有色污染物,会在特定波段(如370纳米和390纳米附近)吸收光线,严重影响液体的透明度。JUNO 团队创造性地借鉴了水净化的思路,但使用的“滤芯”是活性氧化铝。氧化铝是一种多孔材料,拥有巨大的比表面积,其表面特性对 LAB 中的微量光学杂质具有极强的吸附能力。整个纯化系统的核心是8根高达3米的纯化柱,里面填满了氧化铝颗粒。当 LAB 液体流过这些柱子时,杂质就像被磁铁吸附一样,留在了氧化铝的孔隙中。

超乎想象的光学提升

这一系统的纯化效果如何?实验数据给出了令人信服的答案。

首先,氧化铝过滤能显著削减 LAB 在关键波长区域的吸收峰,特别是在370纳米和390纳米附近。更直观的指标是衰减长度——它衡量光在介质中传播多远后强度会衰减2.7倍。对于纯净的液体,这个值越大越好。经过氧化铝纯化后,LAB 在430纳米波长的衰减长度超过了24米。即便后续加入发光物质(PPO 和 bis-MSB)配制成最终的液体闪烁体,其平均衰减长度也能稳定保持在21.9米以上,完全满足了 JUNO 探测器苛刻的光学性能要求。这意味着,探测器内部产生的光子有更高的概率穿越漫长的液体路径,被周边的“眼睛”成功捕捉。

严控“背景噪音”:看不见的清洁战场

对于追求极致灵敏度的粒子物理实验,任何微小的放射性“噪音”都是敌人。如果纯化过程本身

引入了放射性物质(如铀-238、钍-232及其衰变产物氡-222),那无疑是“火上浇油”。JUNO 的氧化铝纯化系统在设计之初就考虑了这一点。系统通过以下多重保险,确保“净水”过程不带来新的污染:

源头控制:严格筛选低放射性本底的氧化铝原料。所使用的310吨商用氧化铝,其铀、钍和镭-226的放射性活度均处于极低水平。**过程防护:**所有管线与容器的内表面经过精细抛光(粗糙度 <0.4 微米)和彻底清洁,最大限度减少杂质吸附和放射性污染。**氦气管理:**采用真空密封包装和特制低透氦复合袋运输储存氧化铝,并在纯化过程中使用真空抽取和氮气鼓泡技术,有效去除溶解在液体中的氦气。最终,配制好的液体闪烁体中氦浓度被控制在 $<1\text{ mBq/m}^3$ 的超低水平。

江门中微子实验的氧化铝光学纯化系统,如同一个超级精密的“净水厂”,从分子层面去除杂质、从原子层面屏蔽干扰,为2万吨液体闪烁体赋予超级透明度。这套系统成功将基础材料的性能推向了新高度,保障了 JUNO 这只探索宇宙奥秘的“巨眼”能够看得更清、测得更准。它的稳定运行,不仅为中微子物理研究奠定了坚实的基础,也为未来大型液体探测器在材料纯化方面提供了宝贵的技术积累和工程经验。

三、液闪混制:JUNO 2万吨超纯液体闪烁体的诞生

JUNO 探测器的核心,是2万吨具有极高透明度和极低放射性本底的液体闪烁体(液闪),由多种化工原料组成。如何将数以万吨计的化工原料,转化为这种世界顶级的实验介质?这便是 JUNO 液闪混制装置的非凡任务。

调配“科学鸡尾酒”:目标与挑战

JUNO 液闪是一份精确配比的“科学鸡尾酒”:以线性烷基苯(LAB)为溶剂,添加2.5 g/L 的发光剂 PPO 和3 mg/L 的波长移位剂 bis-MSB,并辅以43 mg/L 的抗氧化剂 BHT 以确保数十年的化学稳定性。

混制装置便是技艺高超的调酒师,负责将液闪原料按照配方精确调制成2万吨“科学鸡尾酒”。更有挑战的任务是对PPO进行放射性纯化,将纯度提高2个数量级。

核心工艺:从“母液”到“成品”的蜕变

由于PPO、bis-MSB和BHT是固体,溶解需要较长的时间,不可能直接配制液闪,同时也为了提高PPO的纯化效率。研究团队采取了“分而治之”的精妙策略:先分批次配制高浓度的母液(Master Solution)进行提纯,再将母液稀释为液闪。

- 精密配制:在4200升的LAB中溶解420千克PPO等溶质,形成浓度比成品高出37倍的母液。
- 深度净化:这是混制装置的核心。母液经过水洗(去除金属杂质)和高精度的二级过滤(200 nm和50 nm),将放射性杂质降低两个数量级。
- 智能混合:通过PLC自动控制系统,纯化后的母液与蒸馏净化的LAB溶剂按比例精确混合,最终以7 m³/h的流速泵向1300米外的地下实验室。

管理精髓:标准化操作

在大规模连续生产中,人为因素的管理至关重要。液闪混制的复杂程度超乎想象,值班团队每天需管理6个不同的工艺流程,涵盖32个主要步骤,涉及188项独立的人工操作,并需同时管控15套可编程逻辑控制器(PLC)参数。这种高强度的工业化生产,还对操作的精准度要求达到了近乎“强迫症”的水平:液位排放需达到毫米级精度,氧含量需控制在百万分之一(ppm)量级,而溶剂称重精度则需达到0.01 g。

为了应对这种极端挑战,项目组制定并严格执行了一套全面的标准操作程序(SOP)。这套标准的建立基于三个核心理由:

- 一致性:确保每一批次液闪的化学组分和纯度保持一致,这是探测器获得均匀响应的基石。
- 安全性:规范大规模化学品处理和高压氮气操作,杜绝安全隐患。
- 污染防控:这是最关键的一点。任何微小的操作偏差都可能污染整批母液,甚至威胁到整个2万吨探测器的核心使命。

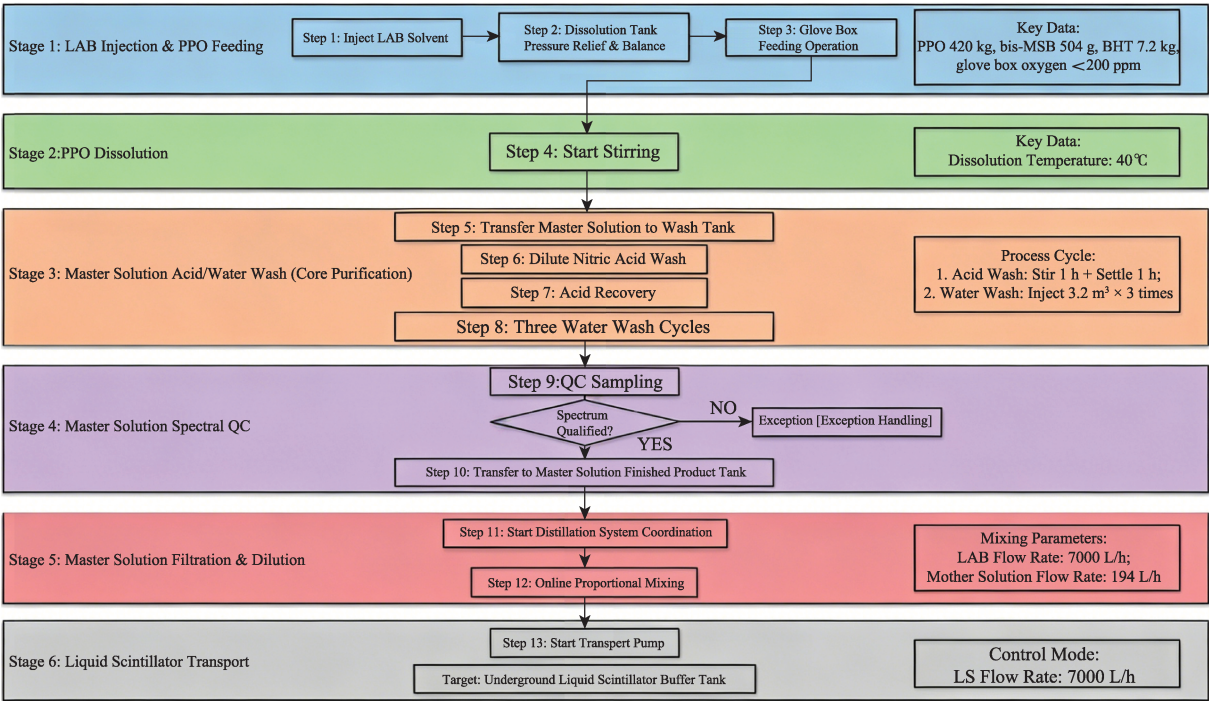


图3 JUNO 液闪混制与净化六阶段工艺流程图

危机管理：褪去“象牙色”的科学突围

2025年3月,生产团队曾面临突发危机:长期储存的PPO发生轻微氧化导致母液出现“变黄”现象,这会导致液闪透明度大幅下降。

传统的衰减长度测量需要3天才能出结果,属于“滞后指标”。液闪团队果断研发出基于吸收光谱的实时质量控制法,通过监测430 nm处的吸光度,实现了对不合格批次的即时拦截。基于这一发现,团队优化工艺,取消了诱发PPO黄化的酸洗步骤,仅依靠水洗和过滤就达到了更优的光学性能,这种数据驱动的决策让液闪透明度实现了质的飞跃。液闪生产结束后数据分析发现,这是非常关键的一个决策,如果没有及时取消酸洗步骤,液闪的衰减长度将不会达到20米的设计要求。

四、水萃：液体闪烁体水萃取提纯技术

在江门中微子实验的液闪必须达到极致的纯净——放射性杂质含量极低。如何从数以万吨计的液体中剔除那微乎其微的金属离子?科学家们

想出了一个精妙的办法:给液闪“洗个澡”。这就是关键的水萃取(Water Extraction)提纯技术。

科学原理：利用“同性相吸”的纯化艺术

为什么用水能洗掉液闪里的放射性金属?这源于化学中“极性”的奥秘。当液闪与高纯水充分接触时,那些藏在液闪里的金属离子就像见到了磁铁一样,会主动从液闪中“跳”进水里。由于油水不相容,洗完后的水可以轻松地从液闪中分离出来,从而带走放射性杂质。这种方法最神奇的地方在于:它只带走杂质,不改变液闪本身的成分。

核心神器(一): 13米高的“涡轮萃取塔”

水萃取系统的核心是一个巨大的涡轮萃取塔。它像是一个巨大的搅拌器,但内部结构极其精密:

- **逆流而行**:高纯水(重相)从塔顶向下流,液闪(轻相)从塔底向上浮。两者在塔内“擦肩而过”,增加了接触时间。
- **碎化成珠**:塔内旋转的涡轮将液闪粉碎成直径仅1~2.5毫米的小液滴。这些数以亿计的小

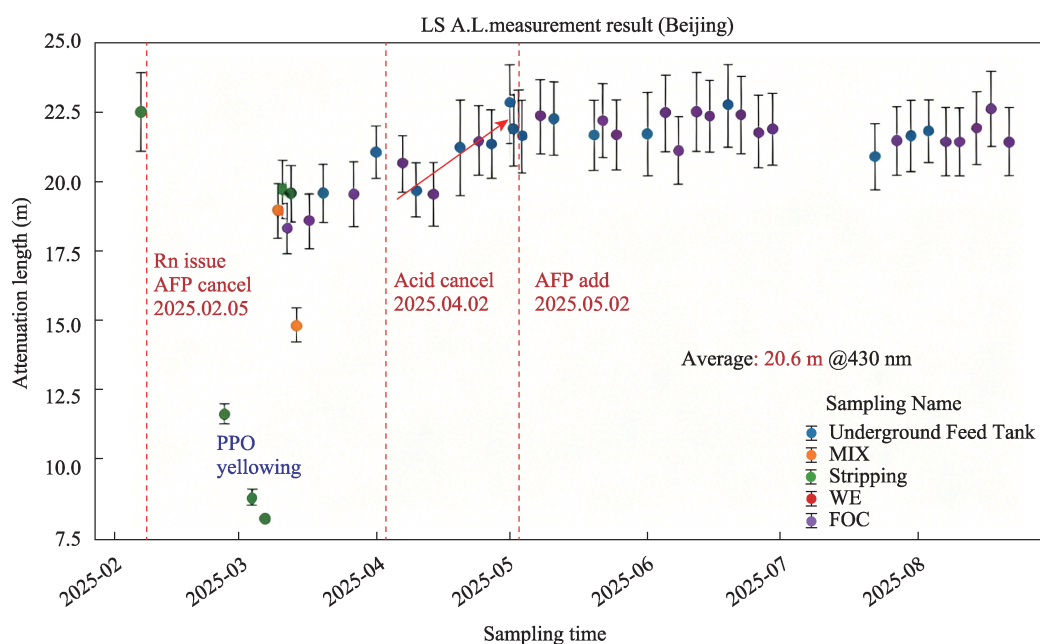


图4 液闪衰减长度结果,移除酸洗后液闪衰减长度逐步提高

液滴极大地增加了与水的接触面积,让萃取效率成倍提升。

● **五级洗涤**:在有限的 13 米高度内,设计保证了大于 5 级的理论萃取级数,确保铀、钍和钾的含量能被有效去除。

核心神器(二):黑科技“磁流体密封”

在萃取塔的顶端,有一个决定成败的部件——磁流体密封装置。这是确保液闪不受外界污染的“定海神针”。萃取塔的转轴需要高速旋转,传统的密封在转动时会产生微小的缝隙或磨损颗粒,导致大气中的氦、氩等放射性气体的渗入,是极其危险的放射性本底,一旦进入系统,液闪将前功尽弃。而磁流体密封是在转轴与壳体之间注入一种特制的纳米级磁性液体,这层磁性液体形成了一个既能自由旋转、又绝对气密的“液态密封圈”。

五、至纯之法,洗尽铅华:液闪纯化超纯水(UPW)

江门中微子实验需要极度纯净的液闪,超纯水系统(UPW)就成为达到这一要求的关键“必杀技”,扮演着“洁净守护者”的角色,为 2 万吨液闪的顶级纯度保驾护航。其用途包括:

1. 设备及管路的“终极清洗”:不给杂质留死角
2. 混制系统母液水洗:剥离母液放射性“隐形杂质”

3. 液闪水萃取提纯:最后的“放射性清零”防线

JUNO 液闪纯化的超纯水不是普通纯净水,也不是普通的工业上的超纯水,而是纯度达到物理极限的“极致纯水”——25℃时电阻率时刻稳定在 18.2 MΩ·cm,颗粒物和放射性纯度是瓶装纯净水的 10 万倍、自来水的 1 千万倍。放射性氦的纯度是瓶装纯净水的 1000 倍、自来水的 1 百万倍。这滴“纯水”的诞生,要历经 20 道精密工序,比半导体级超纯水更严苛,仅专属中微子实验的“放射性核素去除”工艺环节,就足以刷新行业标准,整套体系由 10 多种纯化步骤进行多级串联的优

化组合而成,可称之为“极低放射性超纯水”纯化工艺。

六、高纯氮:“无尘”氮气系统

江门中微子实验(JUNO)的目标是捕捉宇宙中最神秘、最难以捉摸的粒子——中微子。然而,要实现这一目标,研究人员面临的最大挑战并非来自宇宙,而是来自我们身边无处不在的“噪音”——一种名为“氦”的放射性气体。为了屏蔽“氦”对中微子测量的干扰,一个名为“高纯氮气系统”(HPN)的精密净化装置应运而生,它如同一个“超级空气净化器”,为实验创造了一个近乎完美的“无尘”环境。

氦气(Rn)是自然界中一种无色无味的放射性气体,它无处不在,甚至会从岩石和土壤中渗透出来。因此,JUNO 实验对氮气的纯度要求达到了惊人的程度:氦浓度必须低于 10 μBq/m³,为空气的百万分之一以下。

HPN 系统的核心是串联的活性炭吸附柱,采用四级吸附,工作温度-196℃。在这个极低的温度下,气体分子的运动速度大大减慢,而活性炭这种拥有巨大表面积的材料,其表面的微小孔隙会像“磁铁”一样,将氦气分子牢牢吸附住。

经过净化后的高纯氮气,其氦浓度平均值仅为 1.0±0.2 μBq/m³,远低于设计要求的 10 μBq/m³。本系统实现了每天 24 小时长时间的不间断连续稳定运行,还将一直运行,为江门中微子实验预期 20-30 年的运行取数保驾护航。

七、为纯净之光注入热能:高温导热油供热系统

江门中微子实验有两套特殊的设备不直接接触液闪,却为两大核心纯化装置——地面蒸馏与地下氮气剥离——提供着不可或缺的热能,它们就是地面燃气导热油炉与地下电加热导热油炉系统,如同纯化工艺的“能源心脏”,将精确到±1℃的热能源

源不断地输送到用热装置之中。

地面燃气导热油炉系统是以天然气为燃料、导热油为载体的闭式循环系统,为蒸馏装置稳定提供 $260\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温热油,具有大流量、小温差的特殊工艺要求。如果说地面的燃气导热油炉系统是动力澎湃的“心脏”,那么地下的电加热导热油炉系统则是精雕细琢的“工匠”。

来自宇宙深处的中微子微光,炉膛中天然气舞动的蓝色火焰之光,与科研人员日夜凝视仪表的专注目光——三束光最终汇聚在那一池超纯液闪之中,共同照亮了人类探索微观世界的前行之路。当工业之光稳稳点亮中微子之路,我们看到:那些流淌在管道中的热能,承载的不仅是物理的温度,更是科研精神的热度。

八、结语

JUNO 按计划顺利地用 6 个多月的时间完成了 2 万吨液闪的生产和灌装。数据显示,这批液闪的平均衰减长度为 20.6 米,铀(^{238}U)与钍(^{232}Th)的放射性含量均低于 $1\times 10^{-16}\text{ g/g}$ 。这一系列卓越的技术指标,为江门中微子实验捕捉幽灵粒子中微子的微弱信号提供了全球最灵敏、最纯净的实验介质。

更重要的是,JUNO 建立的这一套集成化超纯生产流程、严格的标准化操作规程以及动态的质量监控体系,为下一代寻找“无中微子双贝塔衰变”等极稀有物理事件的深地实验确立了全新的技术标杆。这 2 万吨凝聚着智慧与汗水的液闪,正静候着中微子的到来,开启探索微观宇宙真相的新纪元。

科苑快讯

人工智能揭示了隐藏洋流的惊人细节

人工智能正在把气象卫星变成海洋隐秘洋流的实时追踪器。

科学家们发明了一种新方法,来测量大区域的海洋表面洋流,其细节比以前要详细得多。这种方法被称为 GOFLOW(地球静止洋流),它使用深度学习来分析已经在轨的气象卫星捕获的热图像。因为它依赖于现有的卫星数据,这种方法在海洋观测方面取得了重大进展,而不需要新的硬件。

这些研究由加州大学圣地亚哥分校(University of California, San Diego)的勒南(Luc Lenain)和加州大学洛杉矶分校(University of California at Los Angeles)的斯里尼瓦森(Kaushik Srinivasan)领导,研究成果发表在《自然地球科学》(Nature Geoscience)期刊上。

洋流是地球气候系统运行的核心。它们在地球上传递热量,在大气和深海之间运输碳,并循环支持海洋生物的营养物质。它们还在实际应用中发挥重要作用,例如搜索和救援任务以及跟踪石油泄漏。研究人员训练了一个神经网络,来识别海洋

表面的温度模式在洋流的影响下如何变化和变形。

由于 GOFLOW 使用来自现有地球同步卫星的数据,所以不需要向卫星发射新的仪器。随着时间的推移,这种方法可以被整合到天气预报和气候模型中。它还可以通过捕捉影响海气相互作用、海洋垃圾运动和海洋生态系统快速变化的洋流,来改进预测。

云层覆盖仍然是一个挑战,因为云层阻挡了 GOFLOW 所依赖的热成像。该研究组计划结合其他类型的卫星数据来填补这些空白,并提供更连续的覆盖。

目前团队以开展全球范围的推广工作,还公开了其数据产品和代码,这将支持进一步的研究并帮助探索该技术的新应用。

(高凌云编译自 2026 年 3 月 7 日 SciTechDaily 网站)

