

固体气泡损伤探测器

——一种新型的原子核粒子探测器

郭士伦

(中国原子能科学研究院)

摘 要

固体气泡损伤探测器是最近出现的一种新型的粒子探测器。它兼具固体核径迹探测器和气泡室的性质,能探测 γ 射线、中子和各种质量的带电粒子,目前已成功地应用于中子剂量、中子能谱和 γ 剂量测量,有望成为聚变诊断、高能核物理、宇宙线和粒子物理的研究工具。本文对这种探测器的原理、制作过程、结构、特性、待解决的问题和应用进行介绍,并通过分析,指出这种新型探测器的研究方向。

最近出现的固体气泡损伤探测器^[1-3],是一种新型粒子径迹探测器,是固体核径迹探测器的改进形式,是无数微观气泡室的集合体,是软胶过热液滴探测器的进一步发展^[4]。这种探测器刚刚出现,还未得到广泛研究。有限的研究说明,它有许多独特优点,有望解决其他粒子探测器长期未能很好解决的遗留问题;进一步广泛的研究有可能证实人们的各种预想,使之成为可以与威尔逊室、气泡室、火花室、核乳胶和固体核径迹探测器并列的新型的粒子探测器。

一、固体气泡损伤探测器的原理

固体气泡损伤探测器由含无数均匀分布的过热液体微滴的硬弹性聚合物制成。当带电粒子或中子穿过过热液体微滴或其附近时,带电粒子或中子在聚合物或微滴中产生的反冲核或核反应产物在微滴中损失能量,使过热液体气化,产生爆炸,在液滴位置生成肉眼可见的气泡。一个或多个连成系列的气泡便构成入射粒子径迹。

二、固体气泡损伤探测器的制作过程和结构

固体气泡损伤探测器是在加拿大乔克河(Chalk River)核研究所工作的华裔中子剂量专家吴汉健(H. Ing)博士和H. C. Birnboim在1983年开始研制成功的^[1-3]。他们把聚合探测固体用的液态单体或单体溶液与少量探测液体一起倒入玻璃或塑料试管中,剧烈搅拌,探测液体被粉碎成直径约 $25\mu\text{m}$ 的液滴,均匀悬浮在单体中,然后在混合液体表面倒入某种液体(覆盖剂或称施压剂),把试管密封后,立即使单体聚合,探测液体微滴便被均匀固定在聚合物中,成为固体气泡损伤探测器。

原则上,各种透明硬弹性固体都可用作探测固体。其中,聚合物最易成形,因此他们采用了聚合物,如聚丙烯酰胺,它的单体为丙烯酰胺。探测固体要有弹性,在弹性限度内,微滴可膨胀成气泡;探测固体要质地坚实,以便封闭液滴和气泡,使它们经久不变。

原则上,各种透明液体都可用作探测液体。但实际上,总是根据工作温度和工作压力的要求选用某种合适的液体或几种液体的混合物作

探测液体。比如,为了在常温或室温下工作,已选用氟利昂 F-12, F-114 或它们的混合物作探测液体。

覆盖剂的作用是对探测固体施加压力,控制液滴过热度 and 探测器灵敏度。覆盖剂的成分可与探测液体相同或相异。

封有覆盖剂的固体气泡损伤探测器对入射粒子不灵敏。要使探测器灵敏,必须敏化。敏化的方法是打开试管的密封,全部或部分消除覆盖剂的压力,使微滴达到需要的过热度。敏化后的探测器,可以立即记录入射粒子径迹。

探测液体和探测固体是固体气泡损伤探测器最基本的结构成分,其他成分可有可无。容器的探测元件(即含有过热液体微滴的硬弹性固体)。可以作成各种形状,如球形、圆柱形、钮扣形、薄片形或丝形。用作中子剂量计的探测元件的体积一般约为 2cm^3 。入射粒子产生的气泡大小由微滴的体积和探测元件的结构决定,一般为 0.3mm 左右,易于观察和测量。

三、固体气泡损伤探测器的特性

根据现有知识推测,固体气泡损伤探测器能探测许多种粒子,如 γ 射线、电子、各种基本粒子(如介子和重子)和各种原子核($Z \geq 1$);利用中子产生的次级粒子的径迹,也可以探测中子。到目前为止,除了对中子的探测已作了一些研究之外,还未对其他粒子的探测进行研究。本文将着重介绍固体气泡损伤探测器用作中子探测器的性质。对中子的探测实际是通过探测重带电粒子实现的,因此由探测中子的性质可以推测探测重带电粒子的性质。对较轻粒子的探测可以由重粒子外推和引伸,本文也将适当讨论。现将固体气泡损伤探测器的性质列举如下:

1. 气泡径迹数目与人射中子数目和中子剂量成正比

用纯净原料和现有技术制成的固体气泡损伤探测器的气泡密度在 10^{-2} 至 10^2 气泡/ cm^3 范围内,与人射的中子注量和中子剂量成正比。

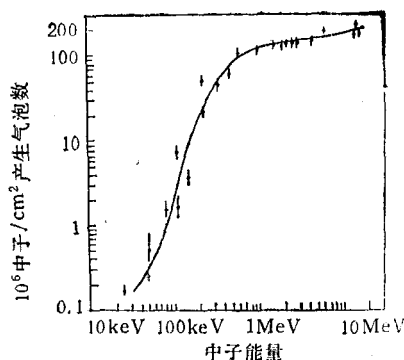


图1 固体气泡损伤探测器 ($\Delta P = 5\text{atm}$) 的中子注量响应^[3]

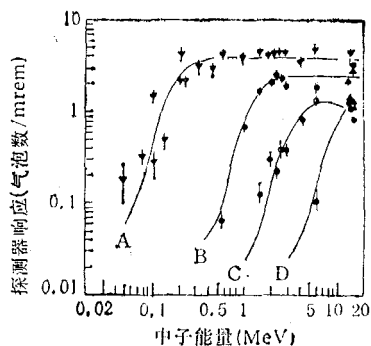


图2 不同类型(过热度 ΔP 不同)固体气泡损伤探测器的剂量当量响应^[3] A为 $\Delta P = 5\text{atm}$; B为 $\Delta P = 3\text{atm}$; C为 $\Delta P = 2\text{atm}$; D为 $\Delta P = 1\text{atm}$

2. 探测中子数目和中子剂量灵敏度高

体积约为 2cm^3 的探测元件,可以探测 $\sim 10^3$ 中子/ cm^2 的中子注量,因而可以用于极弱中子源或聚变装置的探测或诊断,或用作个人中子剂量计。钮扣式的探测元件,可以测量的剂量下限为 1mrem ,甚至可达到 0.1mrem 。此下限只相当于一天的最大允许剂量 18mrem 的 $1/18$ 或 $1/180$,也远低于人们希望达到的下限 10mrem 。

3. 探测中子具有阈能

只有大于阈能的中子才会产生气泡,阈能附近响应曲线陡峭上升,阈能以上响应曲线平坦(见图1)。这两方面的品质比以前采用的裂变阈探测器和包 ^{10}B 的 ^{239}Pu 人工阈探测器^[5] 好得多。更为可贵的是,改变液体的过热度 ΔP (探测液体饱和蒸汽压与探测固体对微滴压力

之差), 可以使阈能在 10keV 至十几 MeV 之间改变, 组成一组理想的人工阈探测器 (见图 2)。这种具有理想响应曲线的人工阈探测器组是多年来中子物理工作者盼望得到的。

4. 借助人体的反照效应, 中子剂量响应曲线在从热能到 20MeV 中子能区内基本平坦

利用快中子直接照射, 可以测量阈能以上的中子剂量; 把探测元件带在人体上, 人体反射热中子和慢中子, 通过与探测液体和探测固体中 N 和 Cl 的 (n, p) 反应, 低能中子也引起气泡产生。两种效应叠加, 使响应曲线在广大能区基本平坦 (见图 3)。用这种中子剂量计, 不必区别中子能量, 而能正确测量人体遭受的中子剂量。多年来, 中子剂量专家们期望找到从热能到十几 MeV 中子剂量响应平坦, 测量下限能达到 10mrem 的个人中子剂量计, 固体气泡损伤探测器在这两方面基本上达到了剂量学的要求。

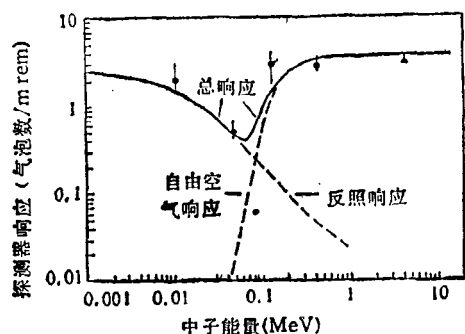


图 3 配带在人体上作为个人中子剂量计的固体气泡损伤探测器的剂量当量响应 $[(\Delta P = 5 \text{ atm})]$, 总效应为中子从空气中直接入射 (自由空气响应) 和经人体反射 (反照响应) 之和^[3]

5. 探测灵敏度可改变

改变探测液体与探测固体的体积比, 可以改变探测灵敏度, 灵敏度高的元件可作个人中子剂量计, 灵敏度低的元件可作事故剂量计。

6. 能即时读数和长期累积计数

探测器的气泡生成时有冲击波发生, 可用声学探测器如微音器探测。气泡可用肉眼读数, 随时记录中子强度和剂量。探测元件中的气泡能保留几个月, 便于记录累积剂量。

7. 可长期存放待用

在敏化前, 固体气泡损伤探测器不灵敏, 长时间存放, 如经过十个月后再敏化, 探测效率没有变化。

8. 可反复使用

实验说明, 施加外界压力, 可使气泡变成液体微滴。再次敏化, 粒子入射还会使微滴变成气泡。因此, 探测元件可多次使用。

9. 对 γ 射线不灵敏

一般固体气泡损伤探测器对 γ 射线不灵敏, 适于在 γ 和中子混合场中测定中子剂量。

10. 可作 γ 探测器和基本粒子探测器

固体气泡损伤探测器是 10^6 至 10^8 个气泡室 (在 1 cm^3 体积内) 的集合体。既然气泡室能够探测 γ 射线和各种基本粒子, 固体气泡损伤探测器也应能探测这些粒子。探测 γ 射线的关键要求是: γ 射线的次级电子在过热微滴中的能量损失足够大, 产生的“胚胎”气泡的半径大于气泡进一步膨胀的临界半径, 因而“胚胎”气泡可以进一步增大为肉眼可见的气泡, 这样的探测器对 γ 射线灵敏; 反之, 如果 γ 射线入射产生的“胚胎”气泡的半径小于临界半径, “胚胎”气泡不能膨胀, 则对 γ 射线不灵敏。由于气泡膨胀的临界半径与液体的过热度有关 (成反比), 探测元件对 γ 射线是否灵敏, 决定于探测液体的过热度, 过热度很高的探测元件才有可能用作 γ 探测器, 对基本粒子的探测具有类似的要求。

11. 可作重带电粒子探测器

固体气泡损伤探测器探测中子是通过中子在探测器中产生的反冲核和核反应产物实现的, 它能探测重带电粒子是毫无疑问的。探测中子的阈能反映了如下事实: 改变探测液体的过热度, 可以改变探测重带电粒子的灵敏度。换言之, 探测重带电粒子的灵敏度可能与重带电粒子在探测液体中的能量损失率有关, 与入射粒子的种类无关, 改变探测液体的过热度, 能改变阈的高低, 即探测重带电粒子, 可能具有与固体核径迹探测器相似的阈特性。

高能重带电粒子在探测材料中的射程很长, 可达几百微米至数厘米, 重带电粒子在探测器中沿飞行轨道产生大量离子和次级电子, 它

们都会引起气泡的产生,测量气泡的分布参数,或许能反推重带电粒子参数(电荷、质量和能量)。固体气泡损伤探测器的这些性质急待研究。

四、固体气泡损伤探测器仍待解决的问题

1. 响应随温度变化

固体气泡损伤探测器仍存在的问题之一是它的响应随温度升高而增大。原因是,气泡的产生与过热度有关,而过热度与温度有关。目前,它可用于空调恒温场所,或同时记录工作温度。解决这一问题的途径之一是,敏化后仍使用覆盖剂,使它产生的压力抵消过热度变化增加的压力。目前,这一研究已取得进展。

2. 响应随时间变化

至今研制的固体气泡损伤探测器的响应几乎都随敏化后的时间呈阶跃式突降。敏化后约8小时内响应不变,然后突然下降约二分之一,维持不变数天后,又突然下降到大约四分之一。下降的原因不明,各批探测元件的持续时间也不同,有的并无突降现象。目前商品出售的有两种,响应不变的期限分别为8小时和21天。

五、固体气泡损伤探测器的应用

固体气泡损伤探测器的研究刚刚开始,除用作中子剂量计外,在其他领域的应用几乎还未进行。现列举几个已有的和潜在的应用领域。

1. 个人中子剂量计和事故剂量计

如前所述,这种探测器已用作个人中子剂量计。把探测液体所占体积减小到1%以下,可用作事故中子剂量计,在各种核装置现场采用。

2. 中子能谱测量

中子物理学家最感棘手的问题之一是测量keV至MeV中子能区的能谱。固体气泡损

伤探测器理想而可控的阈能响应,已经引起他们的兴趣,新的中子阈探测器必将补充或取代原有的裂变阈探测器和包¹⁰B的²³⁹Pu人工阈探测器。

3. 聚变诊断

当代世界已把未来能源部分地寄托在核聚变、快堆和混合堆的利用。固体气泡损伤探测器对诊断灵敏度高,体积小,不致干扰临界装置的反应性,能即时用肉眼读出气泡读数,或用声学 and 光学元件即时记录气泡的产生,有可能成为高技术(新能源)研究的理想工具。

4. 高能核物理、宇宙射线和粒子物理研究

固体气泡损伤探测器可以制成各种形状和尺寸,如球壳形或大片叠层,用于记录高能核反应产生的重带电粒子,宇宙线核或基本粒子。这种探测装置的空间分辨好,有效面积大,收集效率高,肉眼可见,记录持久,便于测量和分析,重量轻,不需电源,造价便宜。

5. 其他应用

固体气泡损伤探测器可用作即时可见的射线照相的底片,显示样品的内部结构和元素的分布,也可立即显示粒子束流的位置和轮廓。增加气泡所占空间比例和对气泡外的固体作进一步的硬化处理,有可能把制作固体气泡损伤探测器的方法发展成一种生产轻型塑料的新方法。研究不同大小微滴对辐射的效应,可能成为研究辐射化学和微量学的新方法。固体气泡损伤探测器用作中子剂量计,可广泛应用于许多部门,如石油勘探、放射医疗、核武器试验、公路建设、核电站、试验反应堆和加速器剂量监测。固体气泡损伤探测器不但将成为现代科学技术研究的新工具,而且将直接应用于经济建设。

- [1] H. Ing and H. C. Birnboim, *Nucl. Tracks*, 8(1984), 285.
- [2] H. Ing and H. C. Birnboim, *Proc. Fifth Sym. Neutron Monitoring*, EUR 9762, (1985), 883.
- [3] H. Ing, *Nucl. Tracks*, 12(1986), 49.
- [4] R. E. Apfel, *Nucl. Instr. Meth.*, 162(1979), 603.
- [5] G. S. Hurst et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 27(1956), 153.