

## 放射性核素气体测定肺功能的进展

常用的肺活量、血液气体分析等肺功能测定方法多为双肺全部机能的检查。这些检查对肺局部病灶之机能改变反映的不够准确,在正常肺组织代偿较好时可能掩盖了病患部位机能减退而呈假阴性结果。放射性同位素测定肺功能较简单、安全、不痛苦,采用多探头功能仪或 $\gamma$ 照相机常可达到对肺分区功能的连续观察,提供定量数据,配合灌注与吸入闪烁图,对呼吸系统某些疾病的研究和临床应用上有一定的价值。为了探索肺部血流灌注、换气与

扩散等各方面功能的情况,近二十年来应用放射性核素气体测定肺功能的报告较多,现作一概括介绍。

### 一、放射性核素气体的一般性能

核子医学应用的放射性核素气体多为惰性气体 $^{133}\text{Xe}$ 、 $^{125}\text{Xe}$ 、 $^{127}\text{Xe}$ 、 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 等,另外还有 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 等,现将它们的基本情况和数据列表如下。

放射性核素气体基本数据

放射性气体	制备	物理半衰期	$\gamma$ 线能量 (仟电子伏)	肺受照剂量 (毫拉德/毫居里/分)
$^{133}\text{Xe}$	反应堆	5.27天	81(35%)	5.1
$^{125}\text{Xe}$	加速器	17.2小时	188	1.8
$^{127}\text{Xe}$	加速器	36.4天	203(65%) 172(22%) 375(20%)	1.5
$^{81\text{m}}\text{Kr}$	发生器	13秒	190(65%)	0.032
$^{13}\text{N}$	加速器	10分	510	/
$^{15}\text{O}$	加速器	122秒	$\beta^+1.74$	/

$^{133}\text{Xe}$ 的应用自1955年即有报道<sup>[1]</sup>。目前我国已能自产供应。 $^{133}\text{Xe}$ 是惰性气体,几不溶于血,可渗入橡皮及塑料中,故一般贮存于玻璃容器,避光低温保存<sup>[2]</sup>。 $^{133}\text{Xe}$ 由反应堆制备,物理半衰期为5.27天, $\gamma$ 线能量为81仟电子伏,肺受照剂量为5.1毫拉德/毫居里/分,全身受照剂量为0.2毫拉德/毫居里/分<sup>[3]</sup>。 $^{133}\text{Xe}$ 可作成两种剂型:(1)以 $\text{CO}_2$ 稀释至大气压力,放于皮囊等密闭装置供吸入照相测定,反映肺的换气功能,(2) $^{133}\text{Xe}$ 压溶于消毒的生理盐水中,供静脉注射,当其行至毛细血管则离开血液,聚于空气腔内,其分布取决于肺血流之分布<sup>[4]</sup>。两种剂型的 $^{133}\text{Xe}$ 配合使用可作肺血流换气动态之分析研究。 $^{133}\text{Xe}$ 不与血中蛋白等物质结合,不参与化学代谢,它是脂溶性的,因此细胞膜的脂类物质对氙不

起屏障作用,氙可自由穿透扩散,均匀分布在待测器官组织中。由于这些特点, $^{133}\text{Xe}$ 还可应用于测定脑、肾等器官血流量<sup>[5]</sup>。

$^{125}\text{Xe}$ ,物理半衰期为17.2小时, $\gamma$ 线能量为188与243仟电子伏,适于 $\gamma$ 照相,但由加速器生产,使用的不如 $^{133}\text{Xe}$ 广泛<sup>[6]</sup>。

$^{127}\text{Xe}$ ,物理半衰期为36.4天,便于临床使用, $\gamma$ 线能量203与172仟电子伏,适于 $\gamma$ 照相,且病人受照剂量较低,这些都较 $^{133}\text{Xe}$ 优越。Atkins对19例患者同体先后用 $^{127}\text{Xe}$ 与 $^{133}\text{Xe}$ 作肺换气照相,认为 $^{127}\text{Xe}$ 的影像在空间分辨率上比 $^{133}\text{Xe}$ 为佳<sup>[7]</sup>。近年来 $^{127}\text{Xe}$ 在国外颇受欢迎。

$^{81\text{m}}\text{Kr}$ 是由 $^{81}\text{Rb}$ - $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 发生器生产制备的,母体 $^{81}\text{Rb}$ 系由加速器生产,物理半衰期为4.58小时,发生器通常可使用15小时<sup>[8]</sup>。 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 亦是难

溶于血的情性气体,物理半衰期为13秒,亦有气体及压溶于5%葡萄糖液两种剂型,可吸入或静脉注入,亦可经导管直接注入有关器官。肺受照剂量为0.032毫拉德/毫居里/分,心、肾、肝、睾丸或卵巢以及全身受照剂量均低于0.05毫拉德/毫居里/分, $^{81m}\text{Kr}$ 对人体影响甚微<sup>[9]</sup>。 $^{81m}\text{Kr}$ 不仅用于肺的灌注与换气照相,还可口服作吞咽功能研究,也可经导管体内局部器官显影。 $^{81m}\text{Kr}$ 的 $\gamma$ 线能量为190千电子伏,较 $^{133}\text{Xe}$ 更适于 $\gamma$ 照相,加以衰变很快,呼出之 $^{81m}\text{Kr}$ 废气放射性消失也快,无需密闭装置,且可在间隔2分钟条件下重复使用,故国外多推崇此示踪剂。

$^{13}\text{N}$ 与 $^{15}\text{O}$ 均是加速器生产制备,半衰期很短,不易随时取得,使用的报道较少<sup>[2]</sup>。

## 二、 $^{133}\text{Xe}$ 清除曲线的测定及其应用

$^{133}\text{Xe}$ 清除曲线的常用测定方法是以多个探头对准两肺诸肺野,将 $^{133}\text{Xe}$ 生理盐水0.5毫居里/0.2毫升快速呈“弹丸”式注入肘静脉中,于记录鼓上自动绘成相应于诸肺野的多个清除曲线。清除曲线之峰时可反映肺野的灌注功能,清除曲线下降斜率,可用半对数坐标纸求计半清除时间( $W_{1/2}$ )或清除90%的时间表示,反映肺泡气体换气功能<sup>[10]</sup>。

$W_{1/2}$ 之正常值: Farmelant报告为4~7秒, Heidendal报告平均为6.1秒,前田知穗报告为3~13秒<sup>[10]</sup>。朝阳医院报告30例120个肺野为 $12.1 \pm 0.90$ 秒<sup>[11]</sup>。

峰时之正常值: 前田知穗以连续 $\gamma$ 照相显示,正常人肘静脉注入 $^{133}\text{Xe}$ -盐水后8~12秒分布于肺野<sup>[12]</sup>,朝阳医院报告30例120肺野为 $8.80 \pm 0.32$ 秒,北京721医院报告注后15秒血管灌注达高峰,肺影均匀<sup>[11]</sup>。

慢性支气管炎的长期炎症改变,可使细小支气管通气不良,造成局部肺泡缺氧, $\text{CO}_2$ 蓄积而致换气功能低下,表现为 $W_{1/2}$ 延长;气管炎、肺气肿、肺心病等慢性气道梗阻疾患,其病变可波及伴行动脉分支,使动脉管腔变小,血流受阻,肺泡壁的毛细血管数目减少, $^{133}\text{Xe}$ -盐水到达肺野的峰时亦相应延缓。Farmelant报告慢性气管炎9例 $W_{1/2}$ 为7.0~19.0秒,其中8例 $W_{1/2}$ 延缓。Medina报告40例慢性呼吸道梗阻病患者,80% $W_{1/2}$ 延缓,其中14例灌注肺扫描未见异常而 $W_{1/2}$ 延缓。在研究慢性阻塞性疾患的致病因素(如吸烟、粉尘等)、病理改变及疗效观察等方面, $^{133}\text{Xe}$ 清除曲线测定也有

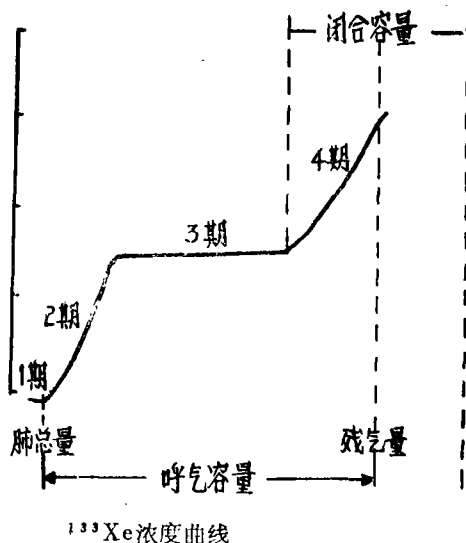
一定参考价值<sup>[10]</sup>。

肺梗塞等肺血管病,主要是某一动脉或一个肺叶的分枝受堵塞,其所辖区域的局部血运消失,灌注扫描形成缺损,峰时延缓,由于换气功能尚正常, $W_{1/2}$ 可正常。因此,有些资料说明,用 $^{133}\text{Xe}$ 清除曲线之峰时与 $W_{1/2}$ 两指标再配合肺灌注扫描综合分析,可以对肺血管病与肺实质病鉴别诊断。Wagner报告正常组6例9次之 $W_{1/2}$ 为 $13 \pm 4$ 秒,肺梗塞10例18次之 $W_{1/2}$ 为 $17 \pm 8$ 秒,接近正常,而慢性阻塞性呼吸疾患组7例11次左肺 $W_{1/2}$ 为 $40 \pm 9$ 秒、右肺为 $62 \pm 27$ 秒,均明显延缓<sup>[13]</sup>。Isawa等认为肺灌注扫描与 $^{133}\text{Xe}$ 换气扫描一致异常者为呼吸道梗阻病,而灌注扫描异常、换气扫描正常者为肺梗塞,有鉴别意义<sup>[14]</sup>。但肺梗塞患者缺血区较大或病程较长者,其肺泡换气功能亦可受波及,而致 $W_{1/2}$ 延缓<sup>[15]</sup>。

对局限性呼吸疾病如肺癌、肺脓疡、肺结核等, $W_{1/2}$ 可提供对病患局部换气功能障碍程度的了解,作为放射治疗前确定照射剂量与手术前确定手术范围之参考,亦可作为疗效观察之指标<sup>[10]</sup>。

## 三、 $^{133}\text{Xe}$ 测定闭合肺容量

Dollfuss于1967年首先报告用 $^{133}\text{Xe}$ 测定闭合肺容量。常用的测量方法是:患者先呼气至不能再呼(达残气量),吸入 $^{133}\text{Xe}$ 气0.1~0.3毫居里/2毫升,再用口含器联到肺量计上作缓慢而均匀的深吸至不能再吸(达肺总量),吸入的速度为0.3~0.5升/秒,再以同样速度均匀呼气,并用连接在接口处的快速分析仪连续记录 $^{133}\text{Xe}$ 的浓度,绘制呼气容量—— $^{133}\text{Xe}$ 浓度曲线(见图),分为4



期, 第一期器械及上呼吸道死腔的气体, 第2期示肺泡中含有 $^{133}\text{Xe}$ 的气体开始排出, 第3期为坪期, 第4期 $^{133}\text{Xe}$ 浓度增高, 含 $^{133}\text{Xe}$ 少的肺下部小气道开始闭合, 呼出气体中来自肺上部的 $^{133}\text{Xe}$ 气增加, 呈上升曲线<sup>[18]</sup>。

闭合容量多以“第4期容量/肺总量”为指标。Dore 报告正常人此值多小于 $\frac{1}{3}$ <sup>[17]</sup>。影响正常值的因素有: (1) 呼吸流速。如果呼吸速度加快, 第4期容量增加。呼吸流速自0.3升/秒增至54升/秒时, 闭合容量从15%增至50%。Collins 认为呼吸流速在0.5升/秒以下时对试验影响较小<sup>[18]</sup>。(2) 年龄。正常人的闭合容量和肺弹性回缩力成反比。儿童的肺弹性回缩力随年龄而增加, 至16岁以后则逐渐减少。故儿童的闭合容量逐年减少, 至16岁又逐渐增加。(3) 肥胖者闭合容量增加。(4) Collins 报告31例正常人第4期容量/肺活量(%)坐位时为 $0.46 \pm 0.35 \times \text{年龄}$ , 而仰卧位时为 $1.3 \pm 0.34 \times \text{年龄}$ , 明显较坐位高, 一般主张取坐位<sup>[18]</sup>。

较轻的慢性气管炎, 直径在2毫米以下的小气道阻塞, 其小气道阻力在呼吸道阻力中不到30%, 因此小气道有无狭窄不易在一般通气功能测定中反映出来。用 $^{133}\text{Xe}$ 测定闭合容量是测定小气道狭窄简单实用的方法, 重复性强, 病人不痛苦。McCarthy 报告正常人抽烟者第4期容量增加的占总人数的72%, 而常规肺功能检查则仅30%异常<sup>[19]</sup>。 $^{133}\text{Xe}$ 测定闭合容量可以灵敏地提示肺弹性回缩力状况, 对研究慢性气管炎及其诱因有一定价值。

二尖瓣及主动脉瓣心脏病病人闭合容量可增加, 如吸入 $\beta$ -肾上腺素等支气管舒张剂, 第4期容量减少而残气量不变。肝硬变患者因低蛋白血症产生间质性肺水肿, 使下肺野气道呈压迫性闭合, 而闭合容量增高。肺水肿患者如快速静注生理盐水可使第4期容量增加<sup>[16]</sup>。故闭合容量测定对心、肺疾患病人进行补液等治疗时也是有参考价值的。

#### 四、 $^{133}\text{Xe}$ 等测定“换气/灌注”比值

Marks 等于1968年报告用 $^{133}\text{Xe}$ 与 $^{131}\text{I}$ -MAA 分别作吸入与灌注扫描, 再经电子计算机处理绘出双肺各部位的“换气/灌注”比值(简称 $v/p$ )。具体作法是: 用密闭装置系统(内含 $^{133}\text{Xe}$ 气1~3毫居里)给仰卧的患者吸入, 在15分钟内用 Pickev Dynapix 10晶体线型扫描装置测得两次洗进、一次平衡及两次洗出的数据, 将换气分布的信息储于磁带, 患者体位不变, 再静注 $^{131}\text{I}$ -MAA 200 微居里,

由磁带储存其灌注分布的信息数据。上述数据经电子计算机处理, 按全肺每 $1.20 \times 1.35$ 厘米<sup>2</sup>区将“ $v/p$ ”按1.00( $\times 1000$ )以数字显示出来。此外还可获得“洗进/洗出”的全肺分布图<sup>[20]</sup>。

正常人每分钟肺泡通气约4升, 通过肺脏的血流为5升, 一般 $v/p$ 约为0.8; 但各个肺野亦不尽相同; 肺尖之 $v/p$ 多大于1(1~1.5), 肺底则小于1(0.7~1.0)<sup>[21]</sup>。

肺气肿等慢性气道阻塞性疾患, 当小气道狭窄时可以引起换气血流比例失常, Marks 报告肺气肿患者 $v/p$ 可达0.2~7<sup>[20]</sup>。肺梗塞等患者通气良好但无血流, 其 $v/p$ 可明显增加。Jacobsteri 报告17例肺梗塞患者用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -微球3毫居里灌注扫描后再作 $^{133}\text{Xe}$ 换气扫描, 所获 $v/p$ 达4.6~12.9, 平均为8.4<sup>[22]</sup>。肺动脉高压时肺尖区血流量加大,  $v/p$ 可以减少, 甚至小于1<sup>[23]</sup>。Scott 报告20例支气管癌患者其血流灌注量均减少,  $v/p$ 则增大<sup>[24]</sup>。

近年来许多作者用 $\gamma$ 照相机或多探头计数率仪系统测计 $v/p$ , 一般认为 $v/p$ 增加提示肺野供血减少, 而 $v/p$ 减少提示肺泡换气功能低下<sup>[25]</sup>。 $v/p$ 异常即血流和通气比例失调的最后结果往往都是缺氧, 没有或仅有轻微的 $\text{CO}_2$ 潴留。血液通过通气不足的肺泡时( $v/p$ 减少), 不能释放充分的 $\text{CO}_2$ , 也不能取得足够的氧, 表现为缺氧; 而血液通过过度通气的肺泡时( $v/p$ 增高), 虽能释放大量的 $\text{CO}_2$ , 但不能取得相应比例的氧, 也表现为缺氧。因此 $^{133}\text{Xe}$ 测定“换气/灌注”比值不仅适用于研究区域性气道梗阻, 以及肺梗塞等患者的肺功能状况, 而且也对给氧等治疗提供参考指标, 是个较灵敏、较先进的方法, 但需电子计算机等设备, 应用受到限制<sup>[25]</sup>。

#### 五、 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 对肺功能的研究

$^{81\text{m}}\text{Kr}$ 能以几分钟的时间间隔, 接连作肺灌注及换气照相, 反映肺灌注与换气功能。

(1) 肺灌注照相方法: 患者取仰卧位或俯卧位, 将10毫升等张的 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ -葡萄糖液在3~5秒钟内快速注入右肘静脉, 每4秒钟照相一次。 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 不溶于血, 静脉注入后很快到达肺毛细血管, 其后离开血液聚于空气腔内, 故 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 在肺内前期显影的分布取决于肺内血流分布, 反映肺灌注功能。(2) 肺换气照相方法: 夹住鼻子, 用一塑料管使患者经口吸含 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 空气50毫升, 只作单次呼吸, 10秒钟照相一次, 呼出之废气经排气系统处理。(3) 常用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 碟状放射源置患者背部下方作穿透摄影显示

心肺位置作为肺灌注、换气照相之标定位置以资比较<sup>[28]</sup>。

Yano曾报告过5例正常人用 $^{81m}\text{Kr}$ 作肺灌注和换气照相的情况。灌注照相显示静脉注入 $^{81m}\text{Kr}$ 葡萄糖液后0~4秒时上腔静脉显影,4~8秒时上腔静脉与心脏显影,8~12秒时右心室与左肺间呈一稀疏显影区,12~16秒时显示部分肺影,16~30秒时则双肺显影完整,换气照相吸入 $^{81m}\text{Kr}$ 气体后0~2.5秒气管与支气管显影,4秒后双肺部分显影,至10秒左右双肺全部显影。

Yano还报告11例呼吸系统疾病患者,其中1例肺炎发病后2周吸入 $^{81m}\text{Kr}$ 气照相,于吸入 $^{81m}\text{Kr}$ 气后11~26秒时示双肺影像,右肺尖缺损,示换气功能受损;该患者静脉注入 $^{81m}\text{Kr}$ 液后31~60秒时亦显示右肺尖缺损,反映灌注功能亦受损。另一例重症哮喘患者灌注照相示双肺全野均匀显影,反映血流灌注功能尚可,吸入 $^{81m}\text{Kr}$ 气后示双肺尖较肺底影像充盈,且肺尖多处呈缺损及稀疏,反映换气功能受损。再有1例中等肺气肿患者,X光未见异常,而 $^{81m}\text{Kr}$ 灌注与换气照相右肺下野皆显一片状缺损<sup>[27]</sup>。

Schor报告41例患者,既作 $^{133}\text{Xe}$ 照相、又作 $^{81m}\text{Kr}$ 照相进行比较,其中14例肺梗塞患者7例两种核素照相结果一致,7例的 $^{81m}\text{Kr}$ 照相显示缺损区比 $^{133}\text{Xe}$ 照相清晰,另27例阻塞性或实质性肺疾患患者有9例二者一致,其余各例,某些放射性气体滞蓄区 $^{81m}\text{Kr}$ 照相不能显现,而 $^{133}\text{Xe}$ 照相则显示的较好<sup>[28]</sup>。

$^{81m}\text{Kr}$ 照相有以下几点较 $^{133}\text{Xe}$ 照相优越:

(1) $^{133}\text{Xe}$ 的 $\gamma$ 射线能量(81千电子伏)较低,部分 $\gamma$ 射线易为骨骼等组织吸收,使其影像变淡且不均匀,而 $^{81m}\text{Kr}$ 的 $\gamma$ 线能量(190.4千电子伏)适于 $\gamma$ 照相,影像清晰;(2) $^{81m}\text{Kr}$ 的半衰期很短(13秒),可于短时期内重复检查;(3) $^{81m}\text{Kr}$ 照相时,肺受照剂量为0.032毫拉德/毫居里/分,而 $^{133}\text{Xe}$ 照相则为5毫拉德/毫居里/分;(4) $^{133}\text{Xe}$ 半衰期为5.3天, $^{133}\text{Xe}$ 照相时呼出的废气污染环境较显著,而 $^{81m}\text{Kr}$ 于2分钟后放射性基本消失,污染环境甚微,不需密闭装置防护。

$^{81m}\text{Kr}$ 换气照相较气溶胶照相为佳:溶胶颗粒大小、空气流速、呼吸率和潮气量均影响它在气道的沉着,妨碍成影, $^{81m}\text{Kr}$ 不受这些因素影响,更接近于生理状况<sup>[29]</sup>。

目前国外多推崇 $^{81m}\text{Kr}$ ,认为有可能代替

$^{133}\text{Xe}$ ,但由于 $^{81}\text{Rb}$ - $^{81m}\text{Kr}$ 发生器母体 $^{81}\text{Rb}$ 半衰期4.7小时,一般只能使用15小时,殊为不便,当前应用不广,报告并不太多<sup>[28]</sup>。

综上所述,用惰性气体 $^{133}\text{Xe}$ 与 $^{81m}\text{Kr}$ 作肺功能检查较为简便、灵敏,此种示踪剂对患者只有很少照射剂量,无什损害,也不痛苦。今后随着 $\gamma$ 照相机、电子计算机的应用日益广泛,放射源供应充足及时,采用放射性核素气体把脏器形态检查和动态功能检查结合起来,较全面地综合分析肺换气功能和血流分布,对于呼吸系统疾患的研究和诊治,将会有更大的进展。

## 参 考 文 献

1. Knipping H W, Dtsch Med Wschr 80: 1146, 1955.
2. Bland W H, et al: "Nuclear Medicine" P.313, 1971.
3. Rawbone R G: J Nucl Med 17: 337, 1976.
4. Loberg MD, et al: J Nucl Med 14: 172, 1973.
5. Bassingwaigkte J B, et al: Sem Nucl Med 6: 141, 1976.
6. Hines H H et al: J Nucl Med 16: 143, 1975.
7. Atkins H L, et al: J Nucl Med 18: 653, 1977.
8. 加藤真,他: Radioisotopes 26: 27, 1977.
9. Swanon A L, et al, Int J Nucl Med Biol 3: 140, 1976.
10. 朱国泓综述: 国外医学参考资料, 放射医学分册(2): 8, 1977.
11. 1979年全国放射性新药鉴定会交流资料
12. 前田知穗,他: Radioisotopes 22: 124, 1973.
13. Wagner H N, et al: Radiology 91: 1168, 1968.
14. Isawa T, et al: J Nucl Med 12: 186, 1972.
15. Ali M K, et al: Clin Res 21: 11, 1973.
16. 朱松山综述: 国外医学参考资料, 内科分册3: 109, 1975.
17. Dore E K, et al: Amer J Roentg 104: 770, 1968.
18. Collins JV: Brit J Dis Chest 67: 1, 1973.
19. McCarthy D S: Amer J Med 52: 747, 1972.
20. Marks A, et al: J Nucl Med 9: 450, 1968.

21. Ishu Y, et al: J Nucl Med 14: 414, 1973.
22. Jacobsteri JG, et al: J Nucl Med 14: 142, 1973.
23. Loken MK, et al: Semin Nucl Med 1: 229, 1971.
24. Scott P, et al: J Nucl Med 14: 410, 1973.
25. Andrews J T, et al "Nuclear Medicine, Clinical and Technological Bases" P.75, 1977.
26. Mayron L W, et al: Int J Nucl Med Biol 2: 40, 1975.
27. Yano U, et al: J Nucl Med 11: 674, 1970.
28. Schor RA, et al: J Nucl Med 19: 648, 1978.
29. Jones T, et al: J Nucl Med 11: 118, 1970.

(朱国泓综述 马寄晓审)

## 质子激发X射线分析

质子激发X射线(简称PIXE)分析技术,是在半导体探测器和电子学迅速发展的基础上,由于环境科学和生物医学中微量元素研究的需要,从1970年开始迅速发展起来的一种新的元素分析方法<sup>[1]</sup>。由于它具有多元素同时分析,灵敏度高和样品量小等优点,很适合于探索性研究工作。近年来发展很快,技术上日益完善,应用范围迅速扩大。目前不仅应用于环境科学和生物医学,而且在法医学、考古和固体物理等科学领域中也有许多应用。1976年在瑞典召开了国际专题会议<sup>[2]</sup>。在小型加速器应用和离子束分析领域中<sup>[3]</sup>,也成了重要内容之一。近年来,我国不少单位已经建立和应用这种方法,在1978年第一次全国活化分析会议中,有不少这方面的内容。

本文概述PIXE方法的基本原理、实验方法、及其在医学生物学中的应用。

### 基本原理

电子、质子、 $\alpha$ 粒子和重离子等带电粒子都可由加速器加速作为入射粒子,轰击待测元素,激发出特征X射线,用Si(Li)探测器探测它们,信号经放大、分析和记录,从而测量这些元素的量。把这种分析技术统称为带电粒子激发X射线分析。但是,因为质子作为入射粒子具有本底低和灵敏度高等优点,所以在医学生物学中主要使用质子,称为质子激发X射线分析。而 $\alpha$ 粒子和重离子多应用于表面物理研究。

#### 1. X射线的产生

当加速的质子与靶原子的电子碰撞时,靶原子就受激或电离。在这个过程中若质子把靶原子的一个内层电子打出来时,就形成一个空穴。原子处于受激状态,外层电子就去填补这一空穴(约在 $10^{-15}$

秒内),其多余的能量(即两个壳层的电子结合能的差值)就放射出特征X射线,这就是我们分析的对象;或者传给一个外层电子,使它们得到足够的能量脱离原子。把前一种现象称为发射X射线荧光,后一种现象称为发射俄歇电子。当 $Z \leq 10$ 时,发射俄歇电子占多数,这样的元素不适于PIXE分析。

特征X射线的能量等于外层电子结合能与空穴所在壳层结合能的差值。它与入射粒子能量无关,只与元素有关,所以也把特征X射线称为标识X射线。如果空穴发生在K层则发射的荧光称为K系特征X射线,其中如果由L层电子填补空穴,则发射的荧光称为 $K\beta$ X射线,如果由M层电子填补空穴,发射的荧光称为 $K\alpha$ X射线。在一定实验条件下,一种元素的 $K\beta$ X射线计数与 $K\alpha$ X射线计数的比值为一个常数称为 $\frac{K\beta}{K\alpha}$ 比值。如果空穴发生在L壳层,则发射的荧光称为L系特征X射线。类推,还有M系特征X射线。X射线发射截面 $\sigma_X$ 与电离截面 $\sigma_i$ 的比值称为特征X射线的荧光产额 $\omega$ <sup>[1]</sup>

$$\omega = \frac{\sigma_X}{\sigma_i} \quad (1)$$

不同元素的特征X射线的能量不同(有表可查)。因此,测得特征X射线的能量,就能判断是那种元素,测得其强度就可知道该元素的数量。这就是元素定性定量分析的基础。

#### 2. 本底的产生

本底是限制灵敏度的主要因素。PIXE分析中本底主要来自三部分。

加速的质子与靶原子碰撞时,除了上述的使靶原子受激外,也可使靶原子电离。电离产生的电子称为次级电子,这些次级电子若在原子核附近与库