

# 重离子活化分析概况

张维成

重离子与待测样品发生核反应，测量生成核或核反应过程中放出的射线或粒子的放射性，进行元素含量的分析，这种分析方法称为重离子活化分析法。它是灵敏度很高的分析方法，具有选择性强、灵敏度高、精确度好、无损、快速、取样小等特点。在一定条件下，还能给出核素沿样品厚度的分布状况。它特别适用于重基体中的轻杂质（一般  $Z < 10$ ）的分析。这与粒子激发X射线分析、背散射分析相配合，即扩大了元素分析的范围，又发挥了各自的特色。

从带电粒子活化分析发展的趋势看，出现在化学分析工作者面前最有希望的研究线索是：应用新的带电粒子，发展瞬发分析和采用高准直或高聚焦的束流来进行微区分析，获得核素平面或深度分布的信息。

带电粒子活化分析的发展与引入重离子束分不开的<sup>(2)</sup>。采用最轻入射粒子（氢、氦）的活化分析法已为大家所熟悉，并在许多科学领域和工业技术等方面发挥着引人注目的作用<sup>(1)</sup>。重离子活化分析的研究工作的报道，近年来日益增多<sup>(2-12)</sup>。国内中国科学院近代物理所的同志采用重离子活化— $\alpha$ 活性测量的方法，测定空气中铅的浓度，对铅的极限灵敏度可达 $10^{-9}$ 克<sup>(3)</sup>。国外一些从事活化分析研究的著名单位如美国得克萨斯 A&M

大学化学系，以化学教授斯韦克特(E. Schweikert)为首，着重研究了重离子活化分析，计算了重离子反应的Q值、库仑势垒及阈能，形成了一个独立学派，并利用该大学88吋的扇形聚焦可变能量回旋加速器加速的 $N^+$ 、 $Li^+$ 、 $B^+$ 、 $Be^+$ 、 $C^+$ 等重离子开展了实验工作<sup>(4-12)</sup>。

应用重离子束的显著特点是对某一靶核可能产生更多的核反应，也可获得较高的产率，能够探测到更低的数量级，从而提高了方法的灵敏度。如测定硼，采用6.8MeV质子，通过核反应 $^{11}B(p, n)^{11}C$ ，探测极限为0.001ppm；而采用13.5MeV $^9Be$ ，通过核反应 $^{11}B(^9Be, 2n)^{18}F$ ，探测极限提高到0.00025ppm。另外也扩大了元素分析的范围。重离子束即能分析轻离子束常分析的B、C、N、等，又能分析轻离子束不能分析的H、He、Li等元素。

目前在重离子活化分析中大多数采用1MeV/amu的束流。在这样的条件下，库仑势垒限制了被活化的核素 $Z \leq 8$ 。这时粒子束总射程约为几个 $mg/cm^2$ 。从分析的观点看，这可在无干扰下测定薄层和小试样中低原子序数的核素。表1列出重离子作入射粒子进行活化分析的一些概况。

表1 重离子活化分析

入射粒子		欲测元素	所测核素		主要干扰元素	核反应	探测极限(ppm)	备注
种类	能量		名称	半衰期				
$^3H$	4—5MeV	$^1H$				$^1H(t, n)^3He$	1000	测量瞬发n
$^6Li$	3MeV	$^1H$				$^1H(^6Li, ^3He)\alpha$	—	
	7MeV	C	$^{13}N$	9.96分	Be	$^{12}C(^6Li, an)^{13}N$	0.01	

续表

## 重 离 子 活 化 分 析

${}^7\text{Li}$	5MeV		${}^1\text{H}$				${}^1\text{H} ({}^7\text{Li}, \gamma) {}^8\text{Be}$	10	测瞬发 $\gamma$
	8MeV/amu		${}^1\text{H}$	${}^7\text{Be}$	53天		${}^1\text{H} ({}^7\text{Li}, n) {}^7\text{Be}$	0.1	
	74MeV	3	${}^1\text{H}$	${}^7\text{Be}$	53天		${}^1\text{H} ({}^7\text{Li}, n) {}^7\text{Be}$	0.1	
	74MeV	3	${}^2\text{H}$	${}^8\text{Li}$	0.85秒		${}^2\text{H} ({}^7\text{Li}, d) {}^8\text{Li}$	0.1	
${}^9\text{Be}$	7.8 MeV	1	B	${}^{18}\text{F}$	110分	C, N	${}^{10}\text{B} ({}^9\text{Be}, n) {}^{18}\text{F}$ ${}^{11}\text{B} ({}^9\text{Be}, 2n) {}^{18}\text{F}$	0.003	
	13.5MeV	1	B	${}^{18}\text{F}$	109.7分	C, C	${}^{10}\text{B} ({}^9\text{Be}, n) {}^{18}\text{F}$ ${}^{11}\text{B} ({}^9\text{Be}, 2n) {}^{18}\text{F}$	0.00025	
	7.8MeV	1	N	${}^{18}\text{F}$	109.7分	B, N	${}^{14}\text{N} ({}^9\text{Be}, \alpha n) {}^{18}\text{F}$	0.009	
	13.5MeV	1	N	${}^{18}\text{F}$	109.7分	B, C	${}^{14}\text{N} ({}^9\text{Be}, \alpha n) {}^{18}\text{F}$	0.0005	
	13.5MeV	1	C	${}^{18}\text{F}$	109.7分	B, N	${}^{12}\text{C} ({}^9\text{Be}, dn) {}^{18}\text{F}$	0.08	
${}^{10}\text{B}$	5 MeV/amu	1—3	${}^1\text{H}$	${}^7\text{Be}$	53天		${}^1\text{H} ({}^{10}\text{B}, \alpha) {}^7\text{Be}$	0.1	
	64MeV	3	${}^1\text{H}$	${}^1\text{Be}$	53天		${}^1\text{H} ({}^{10}\text{B}, \alpha) {}^7\text{Be}$	0.1	
	64MeV	3	${}^1\text{H}$	${}^{10}\text{C}$	19秒		${}^1\text{H} ({}^{10}\text{B}, n) {}^{10}\text{C}$	—	
	5MeV/amu		${}^4\text{He}$	${}^{13}\text{N}$	9.96分		${}^4\text{He} ({}^{10}\text{B}, n) {}^{13}\text{N}$	~1	
${}^{11}\text{B}$	2.3MeV		${}^1\text{H}$				${}^1\text{H} ({}^{11}\text{B}, \alpha) 2\alpha$	100	测瞬发 $\alpha$
	6MeV/amu		${}^1\text{H}$	${}^{11}\text{C}$	20.3分		${}^1\text{H} ({}^{11}\text{B}, n) {}^{11}\text{C}$	6	
	60WeV	1	${}^1\text{H}$	${}^{11}\text{C}$	20.3分		${}^1\text{H} ({}^{11}\text{B}, n) {}^{11}\text{C}$	/	
	6MeV/amu		${}^2\text{H}$	${}^{12}\text{B}$	0.02秒		${}^2\text{H} ({}^{11}\text{B}, d) {}^{12}\text{B}$	0.1	
	60MeV	1	${}^2\text{H}$	${}^{12}\text{B}$	0.02秒		${}^2\text{H} ({}^{11}\text{B}, d) {}^{12}\text{B}$	0.1	
${}^{12}\text{C}$	12MeV	1	Li	${}^{18}\text{F}$	109.7分	B, C	${}^7\text{Li} ({}^{12}\text{C}, n) {}^{18}\text{F}$	0.001	
	1MeV/amu		Li	${}^{18}\text{F}$	109.7分	B, C	${}^7\text{Li} ({}^{12}\text{C}, n) {}^{18}\text{F}$	0.001	
${}^{14}\text{N}$	12.5MeV	1	Be	${}^{18}\text{F}$	109.7分	Li	${}^9\text{Be} ({}^{14}\text{N}, \alpha n) {}^{18}\text{F}$	0.002	
	1MeV/amu		Be	${}^{18}\text{F}$	109.7分	Li	${}^9\text{Be} ({}^{14}\text{N}, \alpha n) {}^{18}\text{F}$	0.002	
	12.5MeV	1	Li	${}^{18}\text{F}$	109.7分	Be	${}^6\text{Li} ({}^{14}\text{N}, d) {}^{18}\text{F}$ ${}^7\text{Li} ({}^{14}\text{N}, t) {}^{18}\text{F}$		
	1MeV/amu		Li	${}^{18}\text{F}$	109.7分	Be	${}^6\text{Li} ({}^{14}\text{N}, d) {}^{18}\text{F}$ ${}^7\text{Li} ({}^{14}\text{N}, t) {}^{18}\text{F}$		
${}^{15}\text{N}$	7MeV		${}^1\text{H}$	${}^{13}\text{H}$	9.96分		${}^1\text{H} ({}^{15}\text{N}, \alpha \gamma) {}^{12}\text{C}$	100	测瞬发 $\gamma$
${}^{16}\text{O}$			${}^1\text{H}$	${}^{13}\text{N}$	9.96分		${}^1\text{H} ({}^{16}\text{O}, \alpha) {}^{13}\text{N}$	—	
${}^{18}\text{O}$	34MeV	0.3	B	${}^{27}\text{Mg}$	9.48分	C, N	$\text{B} ({}^{18}\text{O}, x) {}^{27}\text{Mg}$	0.03	无损分析 放化分离
	39MeV	0.4	Si	${}^{43}\text{Sc}$	3.89小时	Al, P, K	$\text{Si} ({}^{18}\text{O}, x) {}^{43}\text{Sc}$	0.08	
	39MeV	0.5	S	${}^{47}\text{V}$	32.6分	无干扰	$\text{S} ({}^{18}\text{O}, x) {}^{47}\text{V}$	0.008 0.005	
	18MeV		${}^1\text{H}$				${}^1\text{H} ({}^{19}\text{F}, \alpha \gamma) {}^{16}\text{O}$	1000	
	109MeV	1	${}^1\text{H}$	${}^{19}\text{Ne}$	18秒		${}^1\text{H} ({}^{19}\text{F}, n) {}^{19}\text{N}$	—	
	109MeV	1	${}^2\text{H}$	${}^{20}\text{F}$	10.31秒		${}^2\text{H} ({}^{19}\text{F}, p) {}^{20}\text{F}$	1.2	
${}^{22}\text{Ne}$			${}^2\text{H}$	${}^{23}\text{Ne}$	38秒		${}^2\text{H} ({}^{22}\text{Ne}, p) {}^{23}\text{Ne}$	—	

(下转22页)

(上接49页)

### 参 考 文 献

1. 张维成 核物理动态 (内部刊物) 3, 31 (1983)
2. 张维成 分析化学 (排印中)
3. 龙敖等 环境科学2,39(1978)
4. J. R. Meginley et al., J. Radioanal. Chem. 37, 275(1977)
5. C. V. Barros et al., Ibid 53,173 (1979)
6. C. Friedli et al., Ibid 54,281 (1979)
7. B. D. Lass et al., Ibid 57,481 (1980)
8. Ibid 60,255 (1980)
9. J. F. OJO et al., Ibid 60,261 (1980)
10. E. A. Schweibert, Ibid 64,195 (1981)
11. C. Friedli et al., Ibid 64,239 (1981)
12. B. D. Iass et al., Ibid 70,251 (1982)