

# 离心机分离功率的影响因素

陈 利<sup>1</sup>, 应纯同<sup>2</sup>

(1. 中核陕西铀浓缩分离公司, 陕西 汉中 723312;  
2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

**摘要:** 根据分离功率的定义, 导出了分离功率与全分离系数、分流比及供料丰度 3 个参数的一般关系式, 并分析了这 3 个参数的变化对分离功率的影响。结果显示, 分离功率随全分离系数的增大而增大; 分离功率在分流比约为 0.5 时取得最大值; 分离功率在高供料丰度和低供料丰度的情况下都比较低, 在供料丰度约为 0.5 时最大。

**关键词:** 分离功率; 分流比; 丰度; 全分离系数

**中图分类号:** TL 25    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-7512(2008)03-0129-06

## Influence Factors of Gas Centrifuge's Separative Power

CHEN Li<sup>1</sup>, YING Chun-tong<sup>2</sup>

(1. China Nuclear Industry Company, Hanzhong 723312, China;  
2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The unified expression of the separation power and the overall separation factor, the cut and the concentration of the feed were derived. The influence of the three factors to the separation was described also. The results showed that the separation power increase along with the overall separation factor increase, the separation power can acquire the maximum value when the cut is about 0.5, the separation power is lower in the high feed concentration and the low feed concentration, and the maximum when the feed concentration is about 0.5.

**Key words:** separation power, cut, concentration, overall separation factor

传统获得稳定同位素的途径主要有电磁法、扩散法和化学交换法等, 但是这些方法所需成本高, 产量低, 不能满足对稳定同位素日益增加的实际需要。离心法是人类很早就发现的一种分离具有不同相对分子质量物质的方法, 它是利用

离心机旋转产生的强离心力场将不同质量的同位素或混合气体分开, 是一种利用压强扩散达到分离目的的方法。随着科学技术的发展, 自 20 世纪 70 年代开始, 离心法已逐渐达到工业化生产规模, 现在已经成为分离稳定同位素的一种普

遍方法。离心机的分离系数大,且其制造技术成熟,可大量生产,因而在某些同位素的生产中已经完全取代了传统的电磁法和扩散法。从学术的意义上讲,在世界上的84种非放射性元素中,有62种元素具有两种或两种以上的稳定同位素,它们中的一半都可以使用离心法进行分离。而衡量离心机性能的最主要的一个参数是分离功率<sup>[1]</sup>。它是一个分离装置或系统在单位时间内所能提供的分离能力的量度。

在已往的文献<sup>[2-13]</sup>中,给出了单位供料量的分离功率与浓化分离系数、贫化分离系数和供料丰度的统一的表达式,并讨论了供料丰度 $C_F$ , $C_F \ll 1$ , $C_F \approx 1$ , $C_F = 0.5$ 和对称分离几个特定情况下的分离功率的影响因素,以及分离功率与供料量、全分离系数、分流比和供料丰度在以上4种特定情况下的近似表达式。本工作拟在没有任何限制条件下,得到单位供料量分离功率与全分离系数、分流比和供料丰度的普遍表达式,并分析各个参数对分离功率的影响。在实际应用中,这个表达式具有更广泛的用途。在由离心机组成的分离稳定同位素的装置中,由于同位素用途不同,装置的结构也不同,了解了对分离功率影响的差异,可以根据装置特点采用更易提高其分离功率的调整方法,或者选择全分离系数更大的离心机,从而提高装置的实际效率。

## 1 用全分离系数表示的分离功率

分离级流量间关系示于图1。对于一个分离单元,目标同位素供料丰度为 $C_F$ ,其供料量为 $F$ ,分流比为 $\theta$ ,目标同位素精料丰度为 $C_P$ ,流量为 $\theta F$ ,目标同位素贫料丰度为 $C_W$ ,贫料流量为 $(1-\theta)F$ 。

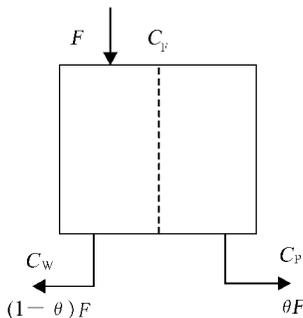


图1 分离级示意图

产品与供料的相对丰度之比称为浓化分离系数,用 $\alpha$ 表示:

$$\alpha = \frac{C_P/1-C_P}{C_F/1-C_F} \quad (1)$$

供料与贫料的相对丰度之比称为贫化分离系数,用 $\beta$ 表示:

$$\beta = \frac{C_F/1-C_F}{C_W/1-C_W} \quad (2)$$

精料与贫料的相对丰度之比称为全分离系数,用 $\gamma$ 表示:

$$\gamma = \frac{C_P/1-C_P}{C_W/1-C_W} = \frac{C_P/1-C_P}{C_F/1-C_F} = \frac{C_F/1-C_F}{C_W/1-C_W} \quad (3)$$

分流比 $\theta$ 为轻馏分流量 $A$ 与流量 $G$ 之比,即:

$$\theta = \frac{A}{G} \quad (4)$$

由图1轻组分物料守恒可得:

$$\theta C_P + (1-\theta)C_W = C_F \quad (5)$$

由(1)、(2)和(5)式得到:

$$\theta = \frac{(\beta-1)[1+(\alpha-1)C_F]}{\alpha\beta-1} \quad (6)$$

气体离心机的分离功率 $\delta U$ 是单位时间内输出的价值总和与输入的价值总和之差,即:

$$\delta U = PV(C_P) + WV(C_W) - FV(C_F) \\ = F[\theta V(C_P) + (1-\theta)V(C_W) - V(C_F)] \quad (7)$$

(7)式中, $V$ 为价值函数。对双组分分离的情况,价值函数定义如下:

$$V(C) = (2C-1)\ln[C/(1-C)] \quad (8)$$

由(3)、(6)和(8)式可以得到单位供料量分离功率的表达式:

$$\frac{\delta U}{F} = (1-2C_F)\ln\left\{\left[(\gamma-1) \cdot (\theta-C_F) + 1\right]^2 + 4C_F(\gamma-1)(1-\theta)\right\}^{1/2} - [(\gamma+1)C_F - \theta(\gamma-1) - 1] \\ - (1-2C_F)\ln[2(1-C_F)] + \frac{\left\{\left[(\gamma-1)(\theta-C_F) + 1\right]^2 + 4C_F(\gamma-1)(1-\theta)\right\}^{1/2}}{\gamma-1} \quad (9)$$

分离功率的表达式(9)既可用于分离系数较大的情况,也可用于分离系数较小的情况,以及非对称分离过程,没有特定的限制条件。

## 2 几种特定情况下分离功率的表达式

在下面几种特定情况下,可得到(9)式的近似表达式。

(1) 低丰度非对称分离。特定条件是  $C_F \ll 1$ , 即  $1 - C_F \approx 1$ , 可以认为  $C_F$  小于 0.05 为低丰度。此时, 分离功率的近似表达式为:

$$\frac{\delta U}{F} = \ln \left\{ [(\gamma - 1)\theta + 1]^2 \right\}^{1/2} + [(\theta(\gamma - 1) + 1)] > + \ln 2 + \frac{1 - \{[(\gamma - 1)\theta + 1]^2\}^{1/2}}{\gamma - 1} \ln \gamma$$

$$= \ln[1 + \theta(\gamma - 1)] - \theta \ln \gamma \quad (10)$$

由(10)式可以看出, 在低丰度非对称分离中, 分离功率只是  $\theta$  和  $\gamma$  的函数, 与供料丰度无关。

(2) 高丰度非对称分离情况。特定条件是  $C_F \approx 1$ , 即  $1 - C_F \approx 0$ , 通常认为  $C_F > 0.95$  属于这种情况。此时, 分离功率的近似表达式为:

$$\frac{\delta U}{F} = \ln[1 + (1 - \theta)(\gamma - 1)] - (1 - \theta) \ln \gamma \quad (11)$$

由(11)式可以看出, 在高丰度对称分离中, 分离功率只是  $\theta$  和  $\gamma$  的函数, 与供料丰度无关。

(3) 对称分离。特定条件是  $\alpha = \beta = \gamma^{1/2}$ 。此时, 分离功率的近似表达式为:

$$\frac{\delta U}{F} = \frac{\sqrt{\gamma - 1}}{\sqrt{\gamma + 1}} \ln \sqrt{\gamma} \quad (12)$$

(12)式适用于一切对称分离过程。此时, 分离功率与供料丰度无关, 由全分离系数  $\gamma$  决定。

(4)  $C_F = 0.50$  时的分离。此时, 分离功率的近似表达式为:

$$\frac{\delta U}{F} = (1 - \theta) \ln \gamma - \ln \gamma \left( \sqrt{(\gamma - 1)^2 (\theta - \frac{1}{2})^2 + \gamma} - (\gamma - 1)^2 (\theta - \frac{1}{2}) - 1 \right) / (\gamma - 1) \quad (13)$$

由(13)式可知,  $C_F = 0.50$  时, 分离功率只是  $\theta$  和  $\gamma$  的函数, 与供料丰度无关。

### 3 各种情况下分离功率的影响因素

前面已经得到了单位供料量分离功率  $\delta U = f(\theta, \gamma, C_F)$  的表达式, 在这里, 通过这个一般的表达式分析分流比  $\theta$ 、全分离系数  $\gamma$  及供料丰度  $C_F$  对单位供料量的分离功率的影响。在分析中, 分流比  $\theta$  取值为 0.3 ~ 0.6, 全分离系数  $\gamma$  取值为 1.2 ~ 1.5, 供料丰度  $C_F$  取值为 0.03 ~ 0.98。为了简单, 用  $C$  表示供料丰度。

### 3.1 当 $\gamma$ 一定 $\theta$ 变化时供料丰度 $C$ 与分离功率 $\delta U$ 的关系

分析全分离系数  $\gamma$  一定时, 分流比  $\theta$  取值为 0.3 ~ 0.6 时, 根据公式(9)得到供料丰度  $C$  与分离功率  $\delta U$  的曲线关系, 结果示于图 2 和图 3。

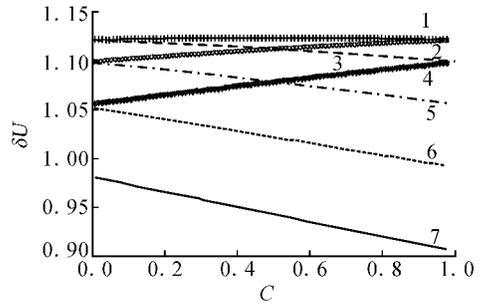


图 2 供料丰度  $C$  与分离功率  $\delta U$  的曲线图  
1— $\theta = 0.50$ ; 2— $\theta = 0.55$ ; 3— $\theta = 0.45$ ;  
4— $\theta = 0.60$ ; 5— $\theta = 0.40$ ; 6— $\theta = 0.35$ ;  
7— $\theta = 0.30$

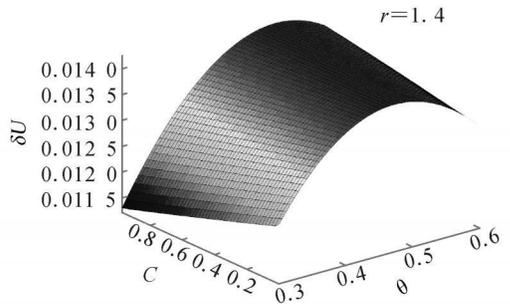


图 3  $\gamma = 1.4$  时供料丰度  $C$  和分流比  $\theta$  与分离功率  $\delta U$  的曲线图

图 2 为当  $\gamma = 1.35$ ,  $\theta$  分别取 0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.55、0.60 时, 供料丰度  $C$  与分离功率  $\delta U$  的图形曲线。从图 2、3 中可以看出,  $\theta$  取值为 0.30 ~ 0.45 时, 随着  $\theta$  的增大,  $\delta U$  也在增大;  $\delta U$  随  $C$  的增大而减小, 近似为一条单调递减的直线。  $\theta$  取值为 0.55 ~ 0.60 时, 随着  $\theta$  的增大,  $\delta U$  在逐渐减小; 而此时,  $\delta U$  则随着供料丰度  $C$  的增大而增大; 当  $\theta$  取值为 0.50 时, 曲线的变化趋势比较平稳, 变化的幅度比较小,  $\delta U$  达到最大值。上述结果表明, 在离心机组成的装置中, 在  $\gamma$  一定时, 要调节  $\theta$  不能小于 0.45, 可使  $\delta U$  较高。另外, 当  $C$  较大时, 可将  $\theta$  调至 0.55 附近, 它比  $\theta$  为 0.60 时有更大的  $\delta U$ 。

在全分离系数取其余的值,且  $\theta$  在 0.30 ~ 0.60 的范围内取值时, 供料丰度  $C$  与分离功率  $\delta U$  的变化趋势与图 2 相似。

### 3.2 固定 $\theta$ 后, $\gamma$ 变化时 $C$ 与 $\delta U$ 的关系

分流比  $\theta$  一定, 全分离系数  $\gamma$  在 1.2 ~ 1.5 的范围内取值, 供料丰度  $C_F$  与分离功率  $\delta U$  的曲线关系示于图 4 ~ 6。分流比取 0.3 时, 供料丰度  $C$  和全分离系数  $\gamma$  与分离功率  $\delta U$  关系示于图 7。

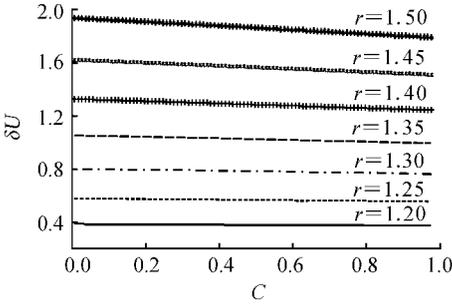


图 4  $\theta$  为 0.55 时供料丰度  $C$  与分离功率  $\delta U$  的曲线图

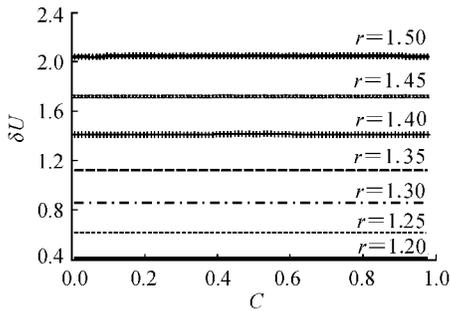


图 5  $\theta$  为 0.5 时供料丰度  $C$  与分离功率  $\delta U$  的曲线图

由图 4 ~ 6 可知,  $\theta$  固定后, 随  $\gamma$  的增加,  $\delta U$  是增加的, 且  $\gamma = 1.5$  时比  $\gamma = 1.2$  时增加好几倍。实际离心机中,  $\gamma$  主要决定于机器本身的结构与性能, 所以应选用  $\gamma$  大的离心机用于实际稳定同位素的分离。

另从图 4 到图 6 中还可以看出, 当分流比  $\theta < 0.5$  时, 分离功率  $\delta U$  随着供料丰度  $C$  的增大而增大; 当分流比  $\theta = 0.5$  时, 分离功率  $\delta U$  的变化趋势很小, 几乎不变; 当分流比  $\theta < 0.5$  时, 分离功率  $\delta U$  随着供料丰度  $C$  的增大而减小。

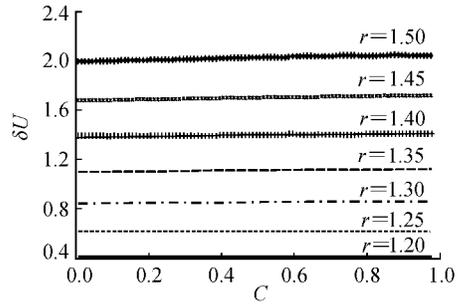


图 6  $\theta$  为 0.35 时供料丰度  $C$  与分离功率  $\delta U$  的曲线图

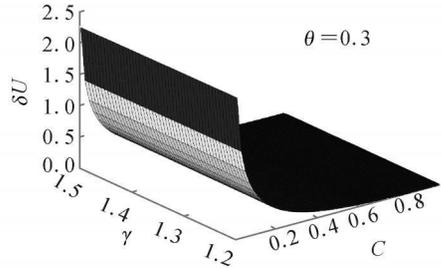


图 7 供料丰度  $C$  和全分离系数  $\gamma$  与分离功率  $\delta U$  的曲线图

### 3.3 对分流比 $\theta = 0.5$ 时, 供料丰度 $C_F$ 与分离功率 $\delta U$ 的曲线图

在图 5 中, 当  $\theta = 0.5$  时, 曲线的变化趋势不容易看出, 为了看清楚图形的变化趋势, 将分离功率的坐标放大, 单独做  $\theta = 0.5$  时  $C_F$  与  $\delta U$  的关系曲线, 结果示于图 8。

从图 8 中可以看出, 在分流比  $\theta = 0.5$  的情况下, 分离功率  $\delta U$  在供料丰度  $C$  在 0.4 ~ 0.6 之间取得最大值, 曲线为一个开口向下的抛物线, 在最大值左边分离功率  $\delta U$  随供料丰度  $C$  的增大而增大, 在最大值右边分离功率  $\delta U$  随供料丰度  $C$  的减小而减小。

### 3.4 当 $C$ 一定时 $\gamma$ 和 $\theta$ 与分离功率 $\delta U$ 的关系

供料丰度  $C$  分别取 0.03、0.5、0.98 时, 分流比  $\theta$ 、全分离系数  $\gamma$  与分离功率  $\delta U$  的关系分别示于图 9、10、11。

从图 9 ~ 11 可以看出, 在供料丰度一定的情况下, 分离功率随全分离系数的增大而增大。在高丰度的情况下, 全分离系数越大对分离功率的影响幅度越大, 且分离功率取最大值时, 分流比为 0.5 ~ 0.6 之间。从图可知, 丰度增加时,  $\theta$  可

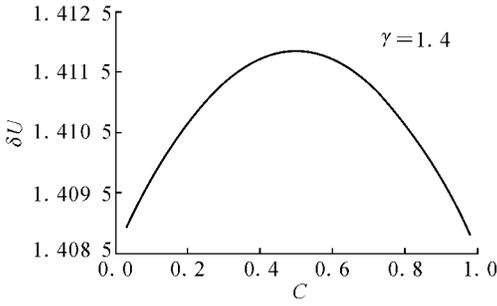


图 8  $\theta=0.5$  时,  $C$  与  $\Delta U$  的关系

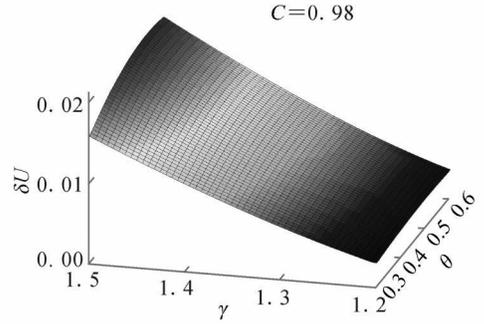


图 11 分流比  $\theta$  和全分离系数  $\gamma$  与分离功率  $\Delta U$  的曲线图( $C=0.98$ )

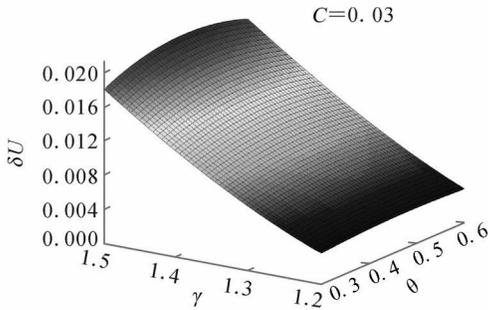


图 9 分流比  $\theta$  和全分离系数  $\gamma$  与分离功率  $\Delta U$  的曲线图

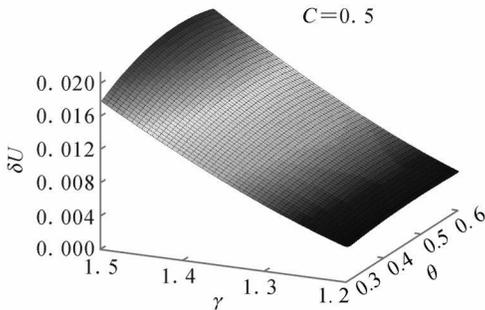


图 10 分流比  $\theta$  和全分离系数  $\gamma$  与分离功率  $\Delta U$  的曲线图( $C=0.5$ )

调高一点,但  $\theta$  变化影响比  $\gamma$  影响小,所以要选高  $\gamma$  的离心机组成分离装置。

#### 4 结论

通过单位供料量分离功率的一般表达式,分析了各个参数对分离功率的影响。从分析中可以看分离功率随全分离系数的增大而增大;分离功率在分流比约为 0.5 时取得最大值;分离功率在高供料丰度和低供料丰度的情况下都比较低,在供料丰度约为 0.5 时最大。

由于  $\gamma$  对  $\Delta U$  增加贡献较明显,所以应在改进离心机上下工夫,使用户可选择使用  $\gamma$  较大的离心机组成分离装置。在实际装置中,  $\theta$  是可以调节的,可在装置设计时加以考虑,使得  $\theta$  值根据需求加以调整,从而得到较大的  $\Delta U$ 。

总之,了解  $\gamma$ 、 $c$ 、 $\theta$  对  $\Delta U$  影响情况,在根据装置实际情况加以综合考虑,设计好并调节到装置的最佳运行状态,就会得到较高的  $\Delta U$ 。

最后,建议在实际计算中使用(9)式而不必使用近似式,可使结果更精确,且使用计算机编程运算,不会增加个人工作量。

致谢: 衷心感谢曾实教授的悉心指导和关怀。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张存镇主编. 离心分离理论[ M]. 北京: 原子能出版社, 1986: 1-25.
- [ 2 ] 黄兆欣, 席学武. 外国离心技术研究发展概况[ R]. 天津: 核工业理化工程研究院科技信息中心, 2003.
- [ 3 ] WOOD HG, YING Chuntong, ZENG Shi, et al. Estimation of Overall Separation Factor of a Gas Centrifuge for Different Multicomponent Mixtures by Separation Theory for Binary Case[ J]. Sep Sci Technol, 2002, 37(2): 417-430.
- [ 4 ] ZENG Shi, YING Chuntong. A Second-order Time-Accurate Method for Determination of Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures in Separation Cascades[ J]. Sep Sci Technol, 2000, 35(5): 729-714.
- [ 5 ] ZENG Shi, YING Chuntong. A Robust and Efficient Calculation Procedure for Determining Concentration of Multicomponent Mixtures[ J]. Sep Sci Technol, 2000, 35(4): 613-622.

- [ 6 ] WOOD HG, YING Chuntong, ZENG Shi, et al. Overall Separation Factors for Stable Isotopes by Gas Centrifuge[ J]. Sep Sci Technol, 2001, 36 (2): 159-175.
- [ 7 ] ZENG Shi, YING Chuntong. Transient Process in Gas Centrifuge Cascades for Separation of Multi-component Isotope Mixtures[ J]. Sep Sci Technol, 2001, 36( 15): 3 439-3 457.
- [ 8 ] 沈祖培, 梁尤能, 应纯同. 价值函数与分离功率的表达式[ C] // 同位素分离. 北京: 铀同位素分离学会, 1986: 8-13.
- [ 9 ] 威廉尼 S. 铀浓缩 [ M]. 段存华, 过松如译. 北京: 原子能出版社, 1986: 14-42, 215-282.
- [ 10 ] 沈朝纯. 铀及其化合物的化学与工艺学[ M]. 北京: 原子能出版社, 1986: 240-247.
- [ 11 ] 侯岩松. 气体离心级联基本全分离系数的研究 [ D]. 北京: 清华大学工程物理系, 2004.
- [ 12 ] 姚东. 多组分同位素单机及级联基本全分离系数的研究及应用[ D]. 北京: 清华大学工程物理系, 2003.
- [ 13 ] 侯岩松. 离心级联价值函数和分离功率的研究 [ D]. 北京: 清华大学工程物理系, 2001.

## 北京大学第一医院核医学科 首次获美国核医学杂志优秀论文奖

第 55 届美国核医学年会于 2008 年 6 月 14~18 日在美国新奥尔良市国际会议中心举行, 北京大学第一医院核医学科主任王荣福教授应邀参加了本次会议。他指导的刘萌博士研究生课题“人端粒酶催化亚单位(hTERT)反义显像实验研究”, 于 2007 年 12 月在以论著在美国核医学杂志(J Nucl Med, 2007, 49(12): 2 164-2 187. IF:5.915)发表。该论文在此次会议期间获得最佳基础科学研究论文奖, 所做的工作得到了国际同行的认可和高度评价, 并于 16 日上午授奖, 来自全世界的同行给予了热烈的掌声表示祝贺, 前任和现任美国核医学主席 Thakur 和 McEvan 教授及世界著名核医学专家 Wagner 教授表示祝贺! 同时也给予了鞭策和鼓励。与会期间, 来自世界各地的海内外中国学者也纷纷表示祝贺, 北京大学医学部也为此感到自豪和骄傲。这是北京大学医学部核医学首次在本专业最高学术水平的杂志发表论文, 也是我国核医学专业领域首次获得这个奖项, 这标志着近年来北京大学核医学部在分子功能影像核医学应用研究领域或方向走在国际前沿, 核素示踪技术在人端粒酶催化亚单位的研究处于国际领先地位。

本次会议期间, 王荣福教授分别作了“Detection of Human Telomerase Reverse Transcriptase (hTERT) mRNA with  $^{99}\text{Tc}^m$ -Radiolabeled Antisense Probes in Malignant Tumors in vivo.”口头报告和“Study on Pharmacokinetics and Acute Toxicity of  $^{99m}\text{Tc}$ -radiolabeled Antisense Probes Targeting Human Telomerase Reverse Transcriptase(hTERT) mRNA”壁报交流, 其研究内容引起国外学者的极大兴趣, 受到国际同行高度评价。世界核素示踪反义显像有很深造诣的美国专家 Hnatowich 教授在王荣福教授口头报告后, 特地点评了这一研究具有原创性, 研究课题具有非常好的设计与思路, 并分别在交流期间进行了广泛认真的学术讨论和将来双方进行合作等事宜。

北京大学第一医院核医学科