

氦素定年技术、氦热年代学及其在地质中的应用

杨美伶, 陈宣华

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 本文介绍了氦同位素定年技术和氦热年代学, 说明了该方法的理论基础和技术要求, 以及其在较小幅度剥露作用研究、古地貌研究和年轻地质体定年等方面的应用情况和前景。

关键词: 氦素定年; 热年代学; 地质应用

中图分类号: P597, P575.6

文献标识码: A

氦同位素定年(以下简称氦素定年)思想的产生已有近百年历史^[1], 但其真正引起重视并得到应用只是近年来的事^[2]。研究表明, 磷灰石的氦素年龄是非常低温条件下矿物冷却的年龄, 其封闭温度为 70°C 左右^[3-4]。因此, 氦素定年技术越来越受到人们的重视, 氦热年代学也成为地学研究的前沿课题之一。

1 氦素定年理论和氦热年代学

1.1 氦素定年理论

²³⁸U、²³⁵U 和 ²³²Th 的系列衰变和 ¹⁴⁷Sm 衰变都可以产生 ⁴He 核(即 α 粒子), 而矿物中放射成因 ⁴He 的主要来源是铀系元素的衰变, 假定没有初始 ⁴He 的存在, 其基本表达式为:

$${}^4\text{He} = 8^{238}\text{U}(\exp(\lambda_{238}t) - 1) + 7(\lambda^{238}\text{U}/137.88)(\exp(\lambda_{235}t) - 1) + 6^{232}\text{Th}(\exp(\lambda_{232}t) - 1) \quad (1)$$

其中, ⁴He、U 和 Th 表示矿物中同位素的含量(现代值), t 为累积时间(也就是矿物的氦素年龄), λ 为衰变常数。该方程适用于氦素年龄约 350 千年的矿物晶体。

由于 U-Th 系列衰变产生的 α 粒子具有较高动能, 能在固体中穿透几个微米的距离。因此, α 衰变在母体和子体核之间会产生空间分异。每个 α 衰变都具有特征能量, 特定材料具有特定的制动距离^[5]。一般来说, 晶体最外层约 20 μm 厚的范围内母体和子体同位素的比例将受到影响。解决这一问题的方法是进行 α 粒子发射校正。

Farley 等^[6]发展了基于颗粒形态和粒度测量对 α 粒子长距离制动效应进行氦素年龄校正的定量模型, 主要的假定是:

(1) 定年矿物和围岩之间一般具有很大的浓度差, 因此, 从周围介质移植而来的 α 粒子

收稿日期: 2005-03-30

基金项目: 地调项目“国外地质科学发展动向及我国对策”(编号 20018000001)

作者简介: 杨美伶(1951-), 女, 副译审, 1977年毕业于四川大学外语系, 长期从事图书情报研究工作。

E-mail: ymling@cags. net. cn

不很显著，可以只考虑内部衰变产生的 α 粒子。

(2) 定年矿物具有特定的 U-Th 浓度分布。

该模型说明控制晶体中残余 α 粒子总分量 (F_T 因子，即测试年龄被它相除以得到“ α 粒子发射校正”年龄的因子)的两个最重要因素是：晶体表面积/体积比率 (β) 和 α 粒子制动距离。Farley 等给出的实验分析和 Monte Carlo 计算结果，可以用来计算几种简单的颗粒几何形态 (包括球体、柱体和立方体) 的 F_T 值。

实际应用中可以通过以下步骤实现该理论模型的假定：

(1) 尽量选择具有好晶形和均一粒度的颗粒用于分析。

(2) 双目镜下用分度线测量颗粒。对于磷灰石，分别测量其棱柱直径和长度。

(3) 在矿物粒度和形态测量的基础上，根据 α 粒子发射模式计算其 F_T 值。对于磷灰石，可以通过将测量的长度值乘以某一参数 (如 1.5) 的做法来抵消矿物分离中产生的垂直柱面破裂的影响。

(4) 假定单个颗粒对总浓度的贡献与其质量成正比，并以质量作为其权重计算整个群组的平均 F_T 值。

地表条件下氦同位素可以被保存在橄榄石^[7]、辉石、角闪石^[8]、石榴子石^[9]、非蛻变锆石、非蛻变榍石^[10]、磷灰石^[2]、褐帘石^[11]、磁铁矿^[12]和赤铁矿^[13]中，也可以被保存在玄武玻璃^[14]，因此这些矿物和岩石是氦素定年的可能对象。

1.2 氦热年代学

氦热年代学是基于氦素定年矿物中氦同位素的扩散行为研究而发展形成的热年代学方法之一。同时，扩散行为也会在一定程度上影响矿物绝对氦素年龄的测定。

实验研究可以确定 Arrhenius (阿雷尼乌斯) 方程中的各个参数，由此得到矿物中氦扩散率随温度变化的精确值：

$$D/a^2 = D_0/a^2 e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

其中 D 为扩散率， D_0 为极限温度下的扩散率， E_a 为活化能， R 为气体常数， T 为 Kelvin 温度， a 为扩散域半径^[15]。如果矿物中氦扩散作用满足方程 (2)，那么， $\ln D/a^2$ 作为温度倒数 ($1/T$) 的函数将给出一条直线，其截距为 $\ln D_0/a^2$ ，斜率为 $-E_a/R$ ；如果得到的不是直线，则可能存在更复杂的扩散过程 (如多重扩散机制或多重扩散域)。

精确测定氦素定年矿物中氦的扩散率，以及扩散率随矿物特性 (如颗粒度、形态、化学成分和缺陷及辐射损坏程度) 的变化关系，是氦热年代学研究的基本任务。

目前，研究程度较高的氦素定年对象是磷灰石矿物。Zeitler 等提出，在冷却速率为 $10^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 条件下，磷灰石具有大约 100°C 的矿物封闭温度。近期工作^[3, 16-17]进一步完善了这一结论，并且提出：

(1) 温度低于 300°C 时，磷灰石中氦扩散作用过程一般都遵守 Arrhenius 关系 (方程 2)，说明此时的氦扩散作用是一种单一机制下的热活化体扩散过程。 300°C 以上的 Arrhenius 图解转变为曲线，它可能与自然条件下的氦扩散关系不大。

(2) 高精度实验给出磷灰石活化能为 $32 \sim 38 \text{ kcal/mol}$ 。活化能与其矿物特性之间可能没有关系。

(3) 根据墨西哥中部杜兰哥地区磷灰石中 D/a^2 值随粒度变化的形式，得到其扩散域为颗粒本身，也即，“ a ”值为矿物粒度。这说明该磷灰石中氦的扩散作用是结晶学均质的，

扩散作用的相关维度为磷灰石棱柱半径。

(4) 综合有关精确观测的实验结果, 得到半径在 $80 \sim 90 \mu\text{m}$ 之间磷灰石的氦封闭温度为 70°C 。矿物封闭温度随粒度和冷却速率的变化而变化。

地表以下 He 年龄将快速变小, 并出现一个氦部分保存带 (Helium Partial Retention Zone, 简称 HePRZ; 其位置与地壳热历史有关, 一般处在大约 $40 \sim 80^\circ\text{C}$ 之间^[18]。Wolf^[19]、Warnock^[20]和 House 等^[21]成功地验证了 HePRZ (氦部分保存带) 的存在。

Stockli 等^[22]在加州的 White Mountains (一个快速剥露的地壳块体) 发现, 在一个非常好的磷灰石裂变径迹部分退火带 (简称 FTPAZ) 的上面存在一个同样好的氦部分保存带 (HePRZ)。他们用 FTPAZ 与不整合面 (由此可确定剥露前的地表) 一起计算了剥露前的地温梯度。氦部分保存带 (HePRZ) 的存在说明, 该地温梯度条件下氦扩散实验外推数据与实际观测数据非常吻合。

2 技术方法

2.1 一般分析流程

过去 5 年中, 加州理工学院磷灰石氦素定年的分析流程有了很快的改进, 目前采用的是“单一试样”技术, 样品氦年龄可以直接由测量的子/母同位素比值经方程 (1) 计算而得。“单一试样”技术的分析流程为:

(1) 手拣挑选一份合适大小 (通常为几到几十粒磷灰石晶体) 的试样, 使之完全不含矿物包裹体, 测量其 α 发射校正因子, 并把它们放入到不锈钢试管中。在试管的顶部点焊与之相配的盖子, 使磷灰石样品封闭其中, 同时又可以有气体的自由交换。

(2) 不锈钢试管被放置在耐热的真空炉之上, 呈“圣诞树”型排列。在抽气和真空炉去气之后, 就形成了一个热的本底。如果本底过高, 继续抽气和去气, 直到形成一个好的本底。把不锈钢试管投入到真空炉中, 在 950°C 下恒温 20 分钟。许多实验显示, 这一温度—时间配置可以使粒度不小于 $200 \mu\text{m}$ 、不含包裹体的磷灰石样品完全去气。产生的气体被已知量的 $99 + \% \text{He}$ 增敏, 然后集中存储在 16°K 下恒温的低温碳黑中。当所有的气体被转移到碳黑中之后, 加热碳黑至 37°K , 纯化后的 He 气体被输送到四极质谱仪。在大约两分钟间隔的静态模式下, 测量 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 比值, 然后把整个系统抽空。

(3) 再次加热同一样品至 950°C , 恒温 20 分钟。重复 (2) 中测量程序。对于不含包裹体的磷灰石样品, “再去气”阶段将产生与本底值相当的 He 浓度。但是, 如果样品中含有一定量的矿物包裹体, 这一阶段将产生较多的气体。包含矿物包裹体的样品将被放弃, 实验不再继续。

(4) 投入另一个样品, 重复以上步骤。

(5) 所有样品测试完毕, 打开不锈钢试管, 检查并确认所有磷灰石矿物样品仍然保留在试管中 (有时由于盖子没有很好地焊接好, 或者试管变形, 会引起样品丢失)。样品丢失会使得母体同位素的测量在较少的试样中进行, 从而影响最后的年龄计算值, 使之偏高。把各个样品分别转移到特氟隆 (聚四氟乙烯) 烧杯中。

(6) 磷灰石被溶解在浓缩的 HNO_3 中, 用已知量 ^{230}Th 和 ^{235}U 增敏, 并用水稀释到一定量 (通常为 2ml)。完全溶解, 样品与增敏剂达到平衡后, 把溶液放置在 90°C 烤箱中烤 1h 以上。

(7) 用感应耦合的等离子质谱仪直接测量这些溶液的 Th/U 同位素比值。

根据纯标准气体和标准水溶液的再现性, 当气体量高出本底许多时, 以上程序测定的 He 年龄总分析误差为 2% 左右 (2σ , 不包括 α 发射校正误差)。实际上误差主要来自 He 同位素的测定, 最后的 He 年龄误差 (2σ) 大约为 6%, 颗粒群组内部也有一些内在的变化。

大多数情况下, U-Th 背景值与被测量样品的浓度无关。实际上, 并不需要超纯试剂和超净实验方案。相反, He 同位素测量的本底是该测试流程中最主要的局限性。例如, 加州理工学院真空炉的典型本底值为 0.6fmol, 相当于含 U、Th 均为 10ppm 的 $10\mu\text{g}$ 磷灰石在 1Ma 产生的 He 气体量。因此, 有必要开发低本底的激光氦素定年方法。

2.2 激光 He 气收集方法

House 等^[23]开发了间接的 Nd-YAD 激光加热技术, 可以用于单一试样的 He 气收集。他们把样品 (磷灰石或榍石) 包在 Pt 或 Pd 箔 ($1 \times 1\text{mm}$) 中, 通过激光间接地把样品加热到矿物熔点以下的温度。“激光微加热炉”由耐火、高热导材料组成。这种方法可以完全收集样品中的氦气, 而不至于使 U-Th 汽化。由此得到的氦年龄与常规大样品加热结果一致, 并具有相当好的精度。激光加热技术具有快速分析和低本底两个优点, 使单晶氦素定年成为可能, 由此可能为氦热年代学研究开辟许多新的研究和应用领域。

2.3 矿物标准

目前出版物中氦年龄数据有以下几个“标准”。加州理工学院测定的几十个杜兰哥磷灰石 He 年龄平均为 32.6Ma, 其标准偏差为 1Ma ^[24]。该年龄比较公认的该磷灰石年龄 ($31.6 \pm 1\text{Ma}$)^[25] 稍微大一点, 但处在误差范围之内。Warnock 等测定的该磷灰石 He 年龄更为年轻 (27.5Ma)。Reiners 和 Farley^[26-27]报道的 Fish Canyon 凝灰岩榍石和锆石 He 年龄分别为 $30.1 \pm 2\text{Ma}$ 和 $28.1 \pm 2.8\text{Ma}$, 比其可接受年龄^[28]要稍微大一些。

3 氦冷却年龄的解释

把样品的 He 年龄与其特定的封闭温度结合起来分析, 是解释 He 冷却年龄的最简单方法, 如 Dodson^[29]。但是, 这种方法只局限于具有单调冷却 $t-T$ 轨迹的情况。Wolf 等提出了解释氦年龄的更好方法, 他给出了一系列模型, 可以解释任意 $t-T$ 轨迹和实验扩散率参数条件下的氦年龄。

同一个氦年龄可以产生在各种不同的 $t-T$ 轨迹情况下, 因此, 如果没有附加条件, 一般很难对单个氦年龄做出唯一的解释。年龄—高程图解可以较好地控制冷却历史^[18], 同时也可与其它方法 (如裂变径迹^[22]) 进行对比。为了氦素定年技术的成功应用, 还需要进一步工作使其与其它定年方法的热标度相兼容。例如, 最近有研究认为, 磷灰石裂变径迹长度模拟得到的冷却历史与磷灰石氦年龄不相一致^[21]。这并不奇怪, 因为与裂变径迹相比, 氦年龄对温度非常敏感。

从单个样品得到较详细的冷却信息可以有以下两种方法: (1) 分析不同粒度晶体的氦年龄, (2) 分析单颗粒晶体中 He 浓度分布。分析三种完全不同的冷却历史: 7Ma 时的瞬间冷却; 速率为 $10^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 的冷却过程; 100Ma 温度为 65°C 的等温过程。在半径为 $65\mu\text{m}$ 时, 这三个热历史中形成的磷灰石 He 年龄均在 7Ma 左右。热历史分辨方法概括如下:

(1) 年龄—粒度关系 由于磷灰石中 He 扩散域是其颗粒本身^[24], 当粒度减小时, He 扩散率增大 (也即, D/a^2 中的 a 随颗粒的最小维度而变化)。不同粒度的颗粒对不同的温度敏感。因此, 这三种热历史可以产生三种截然不同的 He 年龄—粒度关系。倘若能在相当

大的粒度范围内得到精确的单颗粒氦年龄,那么,年龄—粒度关系可以用来更精确地限定其热历史。

(2) He 浓度分布 晶体内浓度梯度是样品经历的热历史的敏感函数。三种热历史产生的浓度分布各不相同,从近乎方形(经 α 发射调整)到极其圆滑。特别是颗粒最边缘 5% 部分成分的不同。阶段加热实验可以在一定程度上得到浓度分布曲线的形态^[30]。

Wolf 等^[11]首先尝试用磷灰石氦热年代学进行南加州地区 San Jacinto 山脉隆升历史的研究,发现磷灰石 He 年龄随着采样高程而有系统的变化,与磷灰石裂变径迹年龄所显示的系统变化^[31]相类似。根据这些研究和进一步的实验结果,以及 He 扩散率只是对低温敏感的特性^[3,20-22],磷灰石氦热年代学测量最近备受人们的关注。同时,其它含 U-Th 矿物也因此引起了人们的注意^[8,32,16,26]。氦热年代学正在走向其迅速发展的黄金时期。

4 氦素定年和氦热年代学的应用

与其它定年方法相比,氦素定年有两个明显的优势:首先是对原来无法达到的低温过程的敏感性,其次是其精度。把不同矿物相的氦年龄测定结果与其它测年方法如长石的多重扩散域(MDD^[33])和裂变径迹方法^[34]等相结合,可能会取得更好更精细的区域冷却历史。如,磷灰石 He 封闭温度为 70℃,比其它任何已知方法的封闭温度都要低,因此,磷灰石氦年龄给出了冷却作用最后阶段的唯一信息。此外,某些情况下,氦年龄提供了比已有方法更好的年龄精度和更好的温度控制。当样品只是在最近才经历冷却作用时,情况更是如此。

4.1 较小幅度剥露作用的研究

与普遍应用于山脉剥露定年和速率计算的磷灰石裂变径迹方法相比,磷灰石氦素定年方法的温度灵敏范围要低约 25℃ 以上,即在地壳深度上要浅大约 1km 以上。换言之,氦年龄对剥露作用更加敏感。快速冷却情况下,剥露作用可能会把 HePRZ(氦部分保存带)暴露出来或剥蚀掉,这时,氦年龄—地温曲线的斜率变化的最下端就说明了 HePRZ 底面的存在,该年龄也就是剥露作用启动的年龄^[35]。例如,当地温梯度为 20℃/km 时,磷灰石 HePRZ 的深度为约 3.5km,即,在剥蚀掉上层约 3.5km 物质后,磷灰石 HePRZ 底面就会暴露出来。而要把 FTPAZ(裂变径迹部分退火带)底面暴露出来则需要剥蚀掉上层约 5km 左右的物质才有可能。

Stockli 等^[22]应用氦素定年方法研究了美国西部盆-岭省。如在加州东部的 White Mountains,氦年龄随着构造古深度而减小,从 55Ma 减小到小于几个百万年,正好是预期的 HePRZ 出露方式。氦年龄随深度变化曲线的斜率变化说明,快速剥蚀作用启动的年龄为 11Ma。自 HePRZ 向下延伸约 1km 左右,氦年龄仍保持在 11Ma。剖面底部氦年龄又开始下降,可能记录了更年轻的冷却事件。磷灰石裂变径迹年龄包含了 11Ma 的冷却事件,但出现在更深的构造部位;如果总体剥蚀程度稍微小一点的话,靠磷灰石裂变径迹年龄本身是很难估算该冷却事件启动的年龄。

4.2 古地貌研究

磷灰石氦年龄对地表以下 1 到 3km 深度之间的温度非常敏感。在该深度范围,地壳的温度场深受自由冷却面位置影响,因此,等温面追踪着上覆地形。上覆地形的波长决定了等温面形貌的振幅,当地形波长减小时,等温面振幅跟着减小。当温度和地壳深度增加时,等温面振幅也会下降。这说明了用剥露作用解释低温冷却年龄的复杂性^[36-37],但由此也说明了研

究地貌演化历史的可能性（如：加州东部内华达山脉^[38]）。在经历稳态地貌变化的剥露作用制约下，当山脉被剥露时，深切峡谷之下岩石将会比大山脊之下同一高程岩石先冷却。结果是，同一高程情况下，峡谷底部岩石具有比峡谷之间岩石更老的氦年龄。

House 等^[38]在内华达山脉南部和中部做了一条 2000 米高程的水平剖面，发现 San Joaquin 河和 Kings 河附近样品的磷灰石 He 年龄比峡谷之间的山岭区样品高出几乎 20Ma。最简单的解释是，现代河道的位置与 60~80Ma 之前河道的位置基本上一致。模拟结果说明，氦年龄变化的幅度与 80Ma 时平均大约 3km 的地势起伏相一致。

因此，可以通过磷灰石氦冷却年龄反推得到古地貌特征。虽然其它热年代学方法也可能记录这种剥露效应，但是由于等温面随着温度的上升而急剧下降，因此只有在磷灰石（U-Th）/He 体系中再现得最好，说明其在研究长期地貌演化方面具有很大的潜在价值。

4.3 年轻地质样品的高精度定年

理论上，即使是非常年轻的样品，也可以得到相当高精度（几个百分比）的氦年龄。因此，氦素定年可应用于（1）非常年轻火山岩系的绝对年龄测定和（2）最近才剥露岩石精确冷却历史的确定。对于年轻火山岩系（~50kyr 至 ~1.5Myr 之间）中火山灰等，现有定年方法如¹⁴C、U 系不平衡定年和⁴⁰Ar/³⁹Ar 法等都有其局限性，而这一年龄段正是古人类演化和气候变化等研究领域最为感兴趣的。锆石等 U-Th 含量高的矿物中 He 同位素的生成非常之快，因此，年轻样品（如 50kyr）的高精度定年很有可能。例如，1mg 含 U-Th 均为 200ppm、年龄为 50kyr 的锆石，将具有比典型氦本底高出 300 倍以上的氦浓度，而年龄仅为 175kyr、质量约 10 μ g 的单颗粒锆石，其氦浓度将高出本底 10 倍。

不过，火山灰氦素定年还需要解决的一个重要问题，年轻晶体（特别是锆石）可能会在建立²³⁸U 体系的长期平衡之前已经获得一部分 He，导致相当量的²³⁰Th/²³⁸U 亏损。其结果，在达到长期平衡之前，每一个²³⁸U 衰变反应产生少于 8 个 α 粒子。长期不平衡引起的氦年龄偏差随喷发年龄、晶体 Th/U 比值和岩浆喷发前在岩浆房中滞留时间的不同而系统变化^[33]。例如，²³⁰Th 亏损对非常年轻的典型锆石样品（10kyr）喷发 He 年龄计算的影响为 50%，而对 1Myr 样品的影响减小到 <10%，主要是低估样品的年龄。Farley 等^[3]给出了校正长期不平衡影响的计算方程，并发现，处在同一个 Th/U 比值变化范围内的一次喷发样品的分析结果，可以用来鉴别和排除长期不平衡对（U-Th）/He 体系喷发年龄计算的影响。他们对新西兰火山灰中磷灰石和锆石测量的结果说明火山喷发时间为 370 ± 10 kyr。尽管这方面的应用才刚刚开始，并且还受长期不平衡效应的影响，但是其前景还是比较乐观的。

同样，与磷灰石裂变径迹测年等相比，（U-Th）/He 体系得到的冷却年龄具有比较好的精度，特别是年轻样品。例如，Spotila 等^[39]研究表明，圣安德烈斯断裂在通过南加州圣 Gorgonio 山口时，其两条分支断裂所夹的快速剥露地壳裂块中磷灰石 He 年龄约 1.5Ma，精度为 100kyr（ 2σ ）。在 1km 的垂直剖面上，8 个样品给出的 He 年龄范围为 1.39 ± 0.10 （ 2σ ）至 1.64 ± 0.11 Ma。这些高精度年龄不仅控制了该裂块快速剥露启动的年龄，也相当好地限定了剥露速率的可能范围。冷却年龄和剥露速率的精度是确定该巨大走滑断裂沿线裂块剥露机制的关键。

5 氦素定年的未来展望

磷灰石氦热年代学研究已经有了一定的应用范围，并取得了具有地质意义和科学性的结

果。目前的任务是,把氦素定年技术和其它各种定年方法相互连接,以研究某些关键地区的区域热演化历史,如磷灰石裂变径迹和氦素定年技术的结合可以揭示 $\sim 110^{\circ}\text{C}$ 到 45°C 温度范围的精细冷却历史,楣石氦年龄可以用来精细化由钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 多重扩散域(MDD)模拟方法^[32]得到的冷却历史。因此,氦素定年具有可观的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Strutt R. On the radio-active minerals [C]. In : Proceedings of the Royal Society of London , 1905 , 76 : 88 ~ 101 .
- [2] Zeitler PK , Herczig AL , McDougall I , Honda M. U-Th-He dating of apatite : a potential thermochronometer [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1987 , 51 (12) : 2865 ~ 2868 .
- [3] Farley K , Kohn B , Pillans B. (U-Th) /He dating of Pleistocene zircon and apatite : A test case from the Rangitawa tephra , North Island , New Zealand [J]. *Geology* , 2000 . submitted .
- [4] Farley KA. (U-Th) /He dating techniques , calibrations and applications [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* , 2002 , 47 (4) : 819 ~ 843 .
- [5] Ziegler JF. Helium : Stopping powers and ranges in all elemental matter [M]. New York , Pergamon , 1977 . 367 .
- [6] Farley K , Wolf R , Silver L. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th) /He ages [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1996 , 60 (21) : 4223 ~ 4229 .
- [7] Trull TW , Kurz MD , Jenkins WJ. Diffusion of cosmogenic ^3He in olivine and quartz : implications for surface exposure dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 1991 , 103 (1 - 4) : 241 ~ 256 .
- [8] Lippolt HJ , Weigel E. ^4He diffusion in ^{40}Ar retentive minerals [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1988 , 52 (6) : 1449 ~ 1458 .
- [9] Dunai T , Roseleib K. Sorption and diffusion of helium in garnet ; implications for volatile tracing and dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 1996 , 139 (3 - 4) : 411 ~ 421 .
- [10] Hurley P. Alpha ionization damage as a cause of low He ratios [J]. *Transactions of the American Geophysical Union* , 1952 , 33 . 174 ~ 183 .
- [11] Wolf , R , Farley K , Silver L. Assessment of (U-Th) /He thermochronometry : the low-temperature history of the San Jacinto Mountains , California [J]. *Geology* , 1997 , 25 (1) : 65 ~ 68 .
- [12] Fanale FP , Kulp JL. The helium method and the age of the Cornwall , Pennsylvania magnetite ore [J]. *Economic Geology* , 1962 , 57 (5) : 735 ~ 746 .
- [13] Wernicke RS , Lippolt HJ. ^4He age discordance and release behavior of a double shell botryoidal hematite from the Schwarzwald , Germany [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1994a , 58 (1) : 421 ~ 429 .
- [14] Graham DW , Jenkins WJ , Kurz MD , Batiza R. Helium isotope disequilibrium and geochronology of glassy submarine basalts [J]. *Nature* , 1987 , 326 (6111) : 384 ~ 386 .
- [15] Fechtig H , Kalbitzer S. The diffusion of argon in potassium bearing solids. In : Schaeffer OA , Zähringer J (eds) , *Potassium-Argon Dating* [M]. Heidelberg , Springer , 1966 , 68 ~ 106 .
- [16] Lippolt HJ , Leitz M , Wernicke RS , Hagedorn B. (U + Th) /He dating of apatite : experience with samples from different geochemical environments [J]. *Chemical Geology* , 1994 , 112 (1 - 2) : 179 ~ 191 .
- [17] Wolf R , Farley K , Silver L. Helium diffusion and low temperature thermochronometry of apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1996b , 60 (21) : 4231 ~ 4240 .
- [18] Wolf R , Farley K , Kass , D. A sensitivity analysis of the apatite (U-Th) /He thermochronometer [J]. *Chemical Geology* , 1998 , 148 (1 - 2) : 105 ~ 114 .
- [19] Wolf R. Development of the (U-Th) /He Thermochronometer [PhD thesis] : Pasadena , CA , California 1996 , Institute of Technology .
- [20] Wamock AC , Zeitler PK , Wolf RA , Bergman SC. An evaluation of low-temperature apatite U-Th/He thermochronometry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 1997 , 61 (24) : 5371 ~ 5377 .
- [21] House M , Wernicke B , Farley K , Dumitru T. Cenozoic thermal evolution of the central Sierra Nevada from (U-Th) /He thermochronometry [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 1997 , 151 (3 - 4) : 67 ~ 179 .
- [22] Stockli D , Farley K , Dumitru T. Calibration of the (U-Th) /He thermochronometer on an exhumed fault block , White Mountains , California [J]. *Geology* , 2000 , submitted .
- [23] House M , Farley K , Stockli D. Helium chronometry of apatite and titanite using Nd-YAG laser heating [J]. *Earth and Planetary*

Science Letters, 2000, 183 (3-4): 365 ~ 368.

- [24] Farley KA. Helium diffusion from apatite: general behavior as illustrated by Durango fluorapatite [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (10): 2903 ~ 2914.
- [25] Jonckheere R, Mars M, Van den haute P, Rebetez M, Chambaudet A. L'apatite de Durango (Mexique): Analyse d'un minéral standard pour la datation par traces de fission [J]. Chemical Geology, 1993, 103 (1 - 4): 141 ~ 154.
- [26] Reiners P, Farley K. Helium diffusion and (U-Th) /He thermochronometry of titanite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63 (22): 3845 ~ 3859.
- [27] Reiners P, Farley K. (U-Th) /He thermochronometry of zircon: Initial results from the Gold Butte Block, Nevada and Fish Canyon Tuff [J]. Tectonophysics, 2000, submitted.
- [28] Hurford AJ, Hammerschmidt K. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating of the Bishop and Fish Canyon Tuffs: Calibration ages for fission-track dating standards [J]. Chemical Geology, 1985, 58 (1 - 2): 23 ~ 32.
- [29] Dodson MH. Closure temperatures in cooling geological and petrological systems [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1973, 40: 259 ~ 274.
- [30] Albarede F. The recovery of spatial isotope distributions from step-wise degassing data [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 39 (3): 387 ~ 397.
- [31] Wagner G, Reimer G. Fission track tectonics: the tectonic interpretation of fission track apatite ages [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1972, 14 (2): 263 ~ 268.
- [32] Wernicke RS, Lippolt HJ. Botryoidal hematite from the Schwarzwald (Germany): heterogeneous uranium distributions and their bearing on the helium dating method [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1992, 114 (2 - 3): 287 ~ 300.
- [33] Lovera O, Richter F, Harrison T. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronometry for slowly cooled samples having a distribution of diffusion domain sizes [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94 (8): 17917 ~ 17935.
- [34] Gallagher K. Evolving temperature histories from apatite fission-track data [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 136 (3 - 4): 421 ~ 435.
- [35] Fitzgerald P, Gleadow A. New approaches in fission track geochronology as a tectonic tool: examples from the Trans-Antarctic mountains [J]. Nuclear Tracks and Radiation Measurement, 1990, 17: 351 ~ 357.
- [36] Stuwe K, White L, Brown R. The influence of eroding topography on steady-state isotherms-application to fission track analysis [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 124 (1 - 4): 63 ~ 74.
- [37] Mancktelow NS, Grasemann B. Time-dependent effects of heat advection and topography on cooling histories during erosion [J]. Tectonophysics, 1997, 270 (3 - 4): 167 ~ 195.
- [38] House M, Wernicke B, Farley K. Dating topography of the Sierra Nevada, California, using apatite (U-Th) /He ages [J]. Nature, 1998, 396 (6706): 66 ~ 69.
- [39] Spotila JA, Farley KA, Yule JD, Reiners PW. Near-field convergence along the San Andreas fault zone in southern California, based on exhumation constrained by (U-Th) /He dating [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, submitted.

(U-Th) /He DATING TECHNIQUE AND THERMOCHRONOLOGY AND THEIR APPLICATIONS IN GEOLOGY

YANG Mei-ling, CHEN Xuan-hua

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In the paper the (U-Th) /He dating technique and thermochronology are introduced and the theoretical basis and technical requirements are dealt with. In addition, the applications of the (U-Th) /He dating technique in studies of small-magnitude exhumation, paleogeomorphology and high-precision dating of young geologic bodies are presented and the application prospects are discussed.

Key words: (U-Th) /He dating; thermochronology; application in geology