

中国热释光与电子自旋共振 测定年代研究

上海博物馆 编

王雄达^{*} 主编

金明超 高构成 副主编

中国计量出版社

中国热释光与电子自旋共振 测定年代研究

上海博物馆 编

王维达 主 编

金嗣炤 高钧成 副主编

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国热释光与电子自旋共振测定年代研究/王维达主编. 北京:
中国计量出版社, 1997. 3

ISBN 7-5026-0869-9/TB · 490

I. 中… II. 王… III. ①热释光测年法-研究-中国②电子自
旋共振测年法-研究-中国 IV. K854. 2

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第03501号

内 容 提 要

本书内容共分三篇。第一篇为热释光测定年代的原理、技术和方法;第二篇为 TL 和 ESR 测定年代在考古和地学上的应用;第三篇为基础知识和常用资料。

全书概括介绍了当代我国热释光与电子自旋共振测定年代方面的研究成果。
本书可供从事热释光研究的科研人员和大专院校有关专业师生阅读参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

850×1168 毫米 32 开本 印张 15.75 字数 416 千字

1997 年 3 月第 1 版 1997 年 3 月第 1 次印刷

*

印数 1—500 定价:40.00 元

前 言

我国热释光 (TL) 和电子自旋共振 (ESR) 测定年代工作从 1975 年开始, 至今已 20 多年。虽然热释光剂量学在当时还是一个比较新的题目, 但一些从事辐射剂量研究的实验室已从国外引进了若干热释光剂量仪, 并利用它们开展年代测定研究。其实, 当时国际上已有专门为测定年代而设计的热释光测量系统及其他辅助设备, 但产量很少。我国从 80 年代初由考古和地质部门陆续引进这类专用装置。至 1987 年, 我国已有 10 个实验室从事热释光测定年代工作。同时有两个实验室开始研究电子自旋共振测定年代。开展 ESR 工作比较有利的地方是不少化学或物理实验室都有现成的 ESR 谱仪, 而且不需要任何改动就可以用来测定年代。所以发展很快, 至今已有 15 个实验室在进行工作。

1987 年, 在中国矿物岩石地球化学学会支持下, 我国从事这个领域研究的科技工作者组织起来, 成立了热释光与电子自旋共振测定年代专业组, 并在合肥召开了全国第一次热释光与电子自旋共振测定年代学术讨论会。以后每隔两三年举办一次讨论会。1990 年在昆明、1992 年在成都、1994 年在无锡、1996 年在青岛分别召开了第二、三、四和五次讨论会。每次讨论会均在中国核学会会刊《核技术》上出版一本专集。除了专集上发表比较集中的研究文章外, 十几年来, 许多学者在国内外刊物上发表的论文远远超过了这几本专集。为了反映我国在这个领域中的研究成果, 我们邀请了热释光与电子自旋共振测定年代的十几位专家, 合作编著了《中国热释光与电子自旋共振测定年代研究》一书。本书的宗旨不是面面俱到地论述 TL 和 ESR 测定年代的所有问题, 而是结合我国实际情况, 根据每位作者自己的研究成果和专长进行编写。因

此，本书既有一般学术著作的共性，又有中国地域特色的个性。

本书内容分三篇。第一篇是原理、技术和方法。主要叙述 TL 和 ESR 测定年代中的基本内容，了解和掌握这些内容就可以开展年代测定工作。第二篇是 TL 和 ESR 测定年代在考古和地学上的应用。其中有我国出土陶器碎片和古建筑上砖块、瓦片的 TL 年代测定，北京猿人、动物化石和珊瑚礁的 ESR 年龄测定等。这些内容具有中国地域特色和某些中国独有的技术方法，体现了我国 TL 和 ESR 的研究水平。第三篇是基础知识和常用资料，这些资料都是与测定年代有关的。

TL 和 ESR 测定年代是一门综合和交叉的学科，它涉及到的面很广，如固体物理、核物理、辐射剂量、放射化学、矿物、地质和考古等。因此需要诸多领域的专业人员联合起来，相互配合，共同研究。本书的编写工作就是由来自高等院校、中国科学院及部委所属研究所和文物博物馆系统的各类专家相互协作、共同努力下完成的。虽然如此，但每位作者写的内容仍有相对独立性，编者在统稿时，已尽量把它们连贯起来，避免交叉重复。但是 TL 和 ESR 既有共同处，也有不同的地方，为了尊重每位作者根据自己的研究成果撰写的论文，编者尽量不予改动，因此，在书中可能会出现某些交叉重复的地方，特别是参考文献。参加本书编著的作者具体分工如下：王维达：第一、三、五、八、十一章；金嗣炤：第二、四章；高钧成：第三、五、十八、二十、二十一、二十二、二十三章；周智新：第三、五、七章；夏君定：第三、五章；彭子成：第六、第九章；李虎侯：第十章；卢演涛和张景昭：第十二章；计凤桔：第十三章；黄培华：第十四章；陈铁梅：第十五章；业渝光：第十六章；梁兴中：第十七章；陈以健：第十八章；刘京发：第十九章。

最后需要说明的是因编者水平有限，书中错误或不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

王维达

目 录

第一篇 原理、技术和方法

第一章 热释光测定年代原理	(1)
第一节 引言	(1)
第二节 热释光机理	(5)
第三节 俘获电子的热寿命	(9)
第四节 年代测定	(11)
第五节 测定年代装置	(17)
第二章 电子自旋共振测定年代	(28)
第一节 电子自旋共振的基本原理	(28)
第二节 ESR 测定年代原理	(35)
第三节 ESR 年代学的发展历史	(42)
第四节 电子自旋共振波谱仪	(48)
第三章 考古物质的热释光测定年代	(58)
第一节 样品采集	(59)
第二节 细粒混合矿物技术	(61)
第三节 粗粒石英技术	(69)
第四节 α 剂量测定年代	(70)
第五节 前剂量测定年代	(72)
第六节 γ -TL 方法	(84)
第四章 地质样品的电子自旋共振测定年代	(93)
第一节 样品采集与制备	(93)
第二节 古剂量的测定	(94)
第三节 年剂量的测定	(101)
第四节 ESR 年龄计算	(107)
第五节 陷阱电子的平均寿命	(110)

第五章 年剂量	(114)
第一节 天然放射性	(114)
第二节 钍系、铀系、钾和铷的年剂量资料	(120)
第三节 厚源 α 计数	(124)
第四节 热释光剂量测量方法	(143)
第五节 放射性含量分析	(152)
第六节 影响年剂量的因素	(156)
第六章 年剂量计算模式	(165)
第一节 不同地质样品的年剂量计算模式	(166)
第二节 放射性元素的不同积累和衰变体系的年 剂量计算模式	(172)
第三节 实例计算	(177)
第七章 人工辐照源的刻度	(180)
第一节 γ 源的刻度	(180)
第二节 β 源的刻度	(181)
第三节 α 源的刻度	(184)
第八章 热释光测定年代误差	(189)
第一节 误差来源	(189)
第二节 各参数的误差分析和计算	(190)
第三节 年代误差计算	(200)
第九章 电子自旋共振测定年代误差	(205)
第一节 误差传递法研究 ESR 年龄的误差	(205)
第二节 数值插入法研究 ESR 年龄的误差	(211)
第十章 光释光测定年代	(219)
第一节 引言	(219)
第二节 实验设施	(221)
第三节 光释光断代的依据	(230)
第四节 光释光现象的解释	(242)
第五节 光释光应用的成败与前景	(249)

第二篇 考古学和地学上的应用

第十一章 古陶器热释光年代测定	(257)
-----------------------	-------

第十二章	中国黄土热释光年代测定	(274)
第十三章	断层泥和滑带土热释光年代测定研究	(291)
第一节	引言	(291)
第二节	热释光退火的模拟实验研究	(292)
第三节	断层泥(或滑带土)中石英热释光实际退火 效应的研究	(301)
第四节	断层泥和滑带土热释光测年的应用	(305)
第五节	认识和讨论	(313)
第十四章	北京猿人的 ESR 年龄	(316)
第十五章	动物化石的 ESR 年龄测定与人类进化研究的 时间标尺	(333)
第一节	ESR 法测年与古人类研究	(333)
第二节	牙珐琅 ESR 测年的基本方法	(336)
第三节	牙珐琅 ESR 测年的某些成果介绍	(352)
第十六章	珊瑚礁 ESR 年代测定	(358)
第十七章	α 石英 ESR 测定年代	(385)
第一节	α 石英 E' 心的测年零点	(385)
第二节	α 石英 ESR 测年实验方法	(391)
第三节	测年结果及工程地质学意义	(404)
第十八章	次生碳酸盐沉积物的 ESR 年龄测定	(413)
第十九章	陨石的热释光年龄测定	(439)
第一节	陨石冲击变质年龄的测定	(439)
第二节	陨石落地年龄的测定	(449)

第三篇 基础知识和常用资料

第二十章	放射性	(459)
第一节	概述	(459)
第二节	放射性衰变	(460)
第三节	衰变规律	(462)
第四节	三个天然放射性系列	(465)
第二十一章	射线与物质的相互作用	(467)
第一节	带电粒子与物质的相互作用	(467)

第二节	不带电粒子与物质的相互作用	(469)
第二十二章	量、单位和常用物理常数	(472)
第一节	概述	(472)
第二节	中华人民共和国法定计量单位	(472)
第三节	电离辐射量和单位	(475)
第四节	常用物理常数	(478)
第二十三章	测量误差和数据处理	(481)
第一节	概述	(481)
第二节	系统误差	(482)
第三节	随机误差	(482)
第四节	粗大误差	(485)
第五节	直接测量结果的处理	(487)
第六节	间接测量结果的处理——误差传递	(488)
第七节	测量不确定度	(489)
第八节	数据处理	(490)

第一篇

原理、技术和方法

第一章 热释光测定年代原理

王维达

第一节 引言

热释光 (thermoluminescence, 简称 TL) 是一种物理现象, 是晶体受到辐射作用后积蓄起来的能量在加热过程中重新以光的形式释放出来的结果。利用这一现象, 可以测定陶瓷器和砖瓦等物体的烧制年代, 也能测定地质材料最后一次受热以来所经过的时间, 是本世纪 60 年代发展起来的一项考古、测年新技术。

一、基本概念

如果我们从古代陶器或古建筑砖瓦上取一些粉末样品, 以很快的速度加热, 就有一个微弱的光发射出来, 它能被高灵敏度的光电倍增管探测到, 这就是图 1-1 中的曲线 a 。图 1-1 的横坐标是加热温度, 纵坐标是光的强度。加热速率是 $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。如果这个样品再第二次加热, 测到的光信号就是曲线 b 。第一次加热时发射的光称为热释光, a 称为热释光曲线。第二次加热时的曲线 b 称为本底, 即热辐射信号。

热释光是陶器中放射性杂质和周围环境发出的微弱的核辐射通量长期作用在陶器矿物中产生的一种效应。这些放射性杂质主要是 U、Th 系列核素和 ^{40}K , 其浓度只有百万分之几, 但它们的半衰期很长, 大于 10^9 年, 因此, 我们可以把这些天然放射性核素作为每年提供固定剂量的放射源。当陶器中的矿物晶体如石英、长

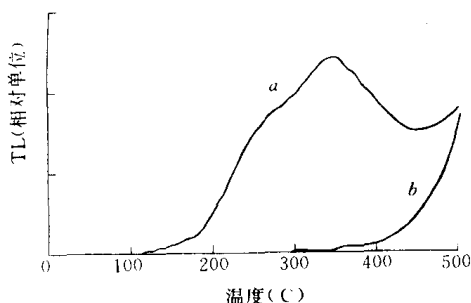


图 1-1 热释光曲线

石和方解石等受到上述放射性核素发出的 α 、 β 和 γ 射线辐照时，一部分辐射能以晶体发热的形式消耗掉，另一部分辐射能则贮藏 在晶体中，一旦晶体加热，约有万分之四的能量以可见光的形式 释放出来，这种现象就是矿物晶体的热释光现象，具有这种热释 光特性的晶体称为“磷光体”。一件陶器样品加热时发射的热释光 越强，表示年代越长，反之则短，所以热释光强弱就成为陶器计 时标准，有人称其为“热释光时钟”。陶器在古代烧制时，经历几 百摄氏度到一千度高温，因此，陶器粘土中的矿物晶体在地质时 期内贮藏的大量热释光都释放完，好似古人把热释光时钟拨回到 “零点”。但陶器中的放射性物质是烧不掉的。这样，陶器中的晶 体又以均匀的速率继续接受和贮藏辐射能，这些辐射能很“纯 净”，是器物“诞生”后开始逐年增加的，于是就可以作为陶器年 龄的标志。我们称这个辐射能为陶器总的吸收剂量或累积剂量，统 称为“古剂量”。因为这个剂量是用热释光技术测量的，所以这个 方法就称为“热释光测定年代”。但是这个古剂量的大小只能作为 器物相对年龄的标志，因为每件陶器的内部放射性物质含量和外 部提供的辐射剂量是不一样的，为了得到每件陶器的“绝对年 龄”，还需要测定器物各自的年剂量，即每年提供给陶器中磷光体 的辐射吸收剂量。这个剂量由四部份组成：陶器内部放射性物质 提供的 α 和 β 剂量；陶器埋葬土壤提供的 γ 年剂量和宇宙空间 提供的宇宙射线年剂量。把一件陶器的古剂量除以自己的总年剂量，

就得到了这件陶器的烧制年代，即

$$\text{年龄} = \frac{\text{古剂量}}{\text{年剂量}} \quad (1-1)$$

这就是热释光测定年代的基本概念。

二、发 展 简 况

热释光现象早在三百多年前就被发现。1663年10月28日，英国化学家 Robert Boyle 第一次描述了热释光现象^[1]。他在黑暗处把钻石加热到一定温度时，看到钻石发出微弱的光。当他把钻石放在身体温暖部分时，也会发出微弱的光。他立即把这奇异现象报告英国皇家学会。翌年，皇家学会会志发表了他的文章，题目就是 Boyle 观察到有关钻石在黑暗中闪光的实验报告。嗣后，1676年 Elsholtz 也叙述了矿物萤石的这一效应^[2]。以后三百年中，陆续有人报道了各种矿物加热时发光现象。当时大家只知道热释光是光照或天然辐照产生的，对其过程尚不明白。为了和荧光区别，称它为“磷光”，并把具有这种特性的物体称为“磷光体”。1898年，Trowbridge 和 Burbank 把天然萤石加热，排空它们在地质时期积累的热释光，然后用 X 射线辐照，在没有光的情况下观察辐照剂量与发出的热释光关系，基本上了解热释光由辐射产生，通过加热可将辐射能转变成光能这一基本概念^[3]。直到二次大战后，由于固体物理和核技术的发展，特别是光电倍增管作为高灵敏度的光探测器的应用，使物理学家和化学家有条件对热释光现象作广泛深入的研究。也有一些地质学家利用热释光特性辨别矿物，为地学研究提供依据。用某些矿物和陶器样品贮藏的热释光来估计它们最后一次加热以来所经过的时间是本世纪 50 年代开始的。首先提出地质和考古年代测定设想的是 1953 年威斯康星大学的 Daniels 等人^[4]。1960 年伯尔尼大学的 Grögler, Houtermans 和 Stauffer 第一次探测了古陶器发射的热释光^[5]，同年，加利福尼亚大学的 Kennedy 和 Knopff 在美国科学进步会议上发表了用热释光测定年代报告^[6]。这些研究虽很初步，却引起了

世界上许多实验室的兴趣。60年代早期发表的热释光测定年代的文章，主要强调这项技术的潜力，同时也报道了一些原来想象不到的复杂情况。世界上大多数热释光实验室到1966年才与测定地质年代及地层学发生关系。这些工作在1966年意大利Spoleto召开的国际地质会议上作了介绍，并于1968年出版了一本《地质材料的热释光》论文集^[7]。这本书包括了热释光在考古学、地质学、矿物学和陨石学上的应用。在以后的10年中，突出贡献表现在考古学测定年代的应用和测量方法的研究。60年代，牛津大学考古研究室的Aitken, Fleming和Zimmerman, 京都大学的Ichikawa, 威斯康星大学的Mazess, 费城大学的Ralph和丹麦国立大学的Mejdahl等人对热释光测定年代进行了系统和深入的研究，为热释光测定陶瓷年代奠定了基础^[8-15]。当时，国际上有一半的论文是他们发表的。之后，丹麦Risø北欧热释光实验室的Mejdahl等人又在剂量测量技术上作了较大的发展。我国在60年代由中国科学院地质研究所率先研究了地质年龄测定。70年代由上海博物馆建立了测定考古年代的热释光实验室^[16-18]。

目前世界上约有50个实验室从事热释光测定年代研究。从1978年开始，每隔2或3年召开一次热释光测定年代国际讨论会，至今已召开七次。第1—3次论文集分别刊于PACT (Physical and Chemical Techniques Applied to Archaeology) 第2、3、6和9卷，第4和第5次会议文集则刊于《Nuclear Tracks》第10和14卷。从1977年开始，出版了一份国际热释光测定年代专业通讯刊物《Ancient TL》，编辑部原设在华盛顿大学，1984年迁至英国Durham大学，1995年又移至法国Blaise-Pascal大学。同时牛津大学出版的《Archaeometry》杂志也对热释光测定年代作了大量的报道。

70年代开始，伯明翰大学的Göksu等人用热释光方法测定被古人用火烧过的燧石的年代^[19]，包括被火烧过的石块和石笋方解石年代，这就把年龄测定的范围延伸到¹⁴C方法不能胜任的旧石器时代的早期。另外，与地质有关的火山熔岩也可以用于年代测

定。当然,它的异常衰退是一个很难解决的问题^[20,21]。将热释光技术扩展到各种沉积物测定年代最早由苏联的 Morozov 等人提出^[22-24]。风和水形成的沉积物能够用于测定年代,关键是热释光时钟的置零问题。对风沉积物来说,主要是阳光的“晒退作用”,最早提出这个问题的是 Wintle 和 Huntley^[25-27]。在所有这些应用中,年代测定的上限均为一百万年以内。这个年代上限对有些物质来说是非常小的,这主要由这些样品本身的特性所决定^[28-31]。热释光方法也可以用来解释陨石和月岩的历史情况^[32-37]。

1985 年,加拿大西蒙·弗雷泽大学的 Huntley 等人发展了一个新的技术,即用激光取代加热^[38],她称其为“光测定年代”(Optical dating),也有人称光子激发释光 (photon-stimulated luminescence, 简称 PSL)、光致释光 (photoluminescence, 简称 PL) 或光释光 (optically-stimulated luminescence, 简称 OSL),总之,是用单色光来排空光敏陷阱中的电子。这对测定阳光晒退的沉积物(例如风形成的黄土)的年代可能是一个新的突破,目前有许多实验室都在进行研究^[39-46]。

第二节 热释光机理^[47]

热释光机理十分复杂,至今还没有完全被人们所了解,通常只在实验室中严格控制晶体形成过程中的杂质含量进行研究。因为热释光与微量杂质和热历史有非常大的关系,而这两者在测定年代中基本上是不知道的。TL 测定年代与¹⁴C 测定年代有很大的不同。后者基本上是测量¹⁴C 核素的放射性衰变,不论样品是木头、贝壳还是骨骼,其衰变速率都相同,而前者对不同的矿物有不同的 TL 机理,即使相同矿物中每个样品的灵敏度也不一样,需要各自独立标定,这是因为每个样品的实际杂质含量都有区别。但是 TL 测定年代的基本原理还是可以用一些模型加以解释的。图 1-2 是一个最简单的离子晶体晶格缺陷的模型。这个晶体可以是 SiO₂, CaSO₄ 或 NaCl 等。一个离子晶体由正负离子晶格组成。产生缺陷的原因是多样的,如杂质原子的渗入,固体从熔融状态下

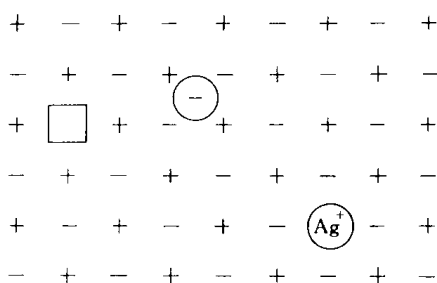


图 1-2 最简单的离子晶体晶格缺陷模型^[47]

快速冷却以及核辐射引起的损伤等，所以缺陷也有各种模型。图 1-2 是产生缺陷中三种最简单的情况。图中左边表示负离子空位，中间是填隙离子，右边是取代的杂质中心。当晶格在上述左边某种缺陷的因素作用下，一个负离子由正常的位置跑掉，形成一个负离子空穴，其作用就象一个电子“陷阱”。当一个由核辐射电离产生的电子扩散到这个陷阱附近时，该电子就被陷阱吸引进去，成为“俘获电子”。电离电子是在辐射作用下从母核分离出来的。这个核辐射电离作用与引起少量的晶格损伤的核辐射不同，它主要是产生热释光的。一旦晶体遇热，晶格受到热振动，电子就从陷阱中被“抖”了出来。加热温度越高，振动越强烈，抖出来的电子也越多。当加热到一个非常狭窄的温度范围时，电子被驱赶的几率急剧增加，使电子从非常牢固的被束缚状态下突然变成在晶体周围自由扩散。有两种命运等待着每一个扩散的电子：有可能被再次俘获；也有可能被再次驱赶。再俘获如果发生在其他的缺陷，而这个缺陷具有抵御晶格振动的能力，即比原来更深的陷阱，那么这个电子就在深陷阱中滞留下去。如果扩散的电子与一个电子早已被分离掉的离子再复合，则有两种类型，一种为发射型，另一种为非发射型。属发射型的就发出光。发生复合的地方称为“释光中心”。发出的光就称为“热释光”。释光中心是一种特殊的缺陷类型，通常由杂质引起，如 Ag^{2+} 或 Mn^{2+} 。杂质决定热释光颜色。如释光中心的杂质是银，热释光为蓝-紫色；如杂质为锰，则

热释光为黄-绿色。

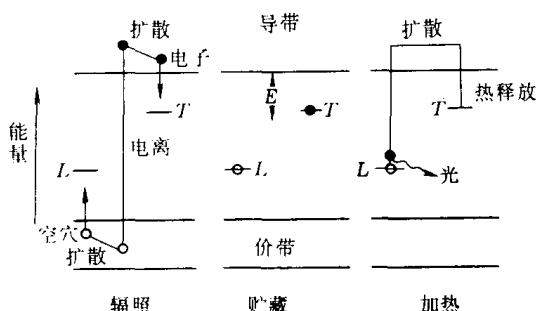


图 1-3 热释光过程^[47]

Aitken 用能级图形象地阐明了热释光现象 (图 1-3)，他将其分解成三个过程。

(1) 辐照 晶体受核辐射产生电离，使价带中的电子获得足够的能量进入导带，在导带中自由扩散。当它扩散到陷阱 T 附近时，其中某些电子就被陷阱俘获。同时，电子离开后留下的空穴也在价带中扩散，其中一部分有可能被杂质形成的释光中心 L 俘获。

陷阱是由晶格缺陷导致局部出现的新能级，其能量水平低于导带，但比价带高得多。释光中心也是一种局部新能级，但能量水平略高于价带。

(2) 贮藏 这是指晶体在古陶器中自古至今所经过的时间。只有在陷阱中贮藏时间非常长的电子才能用于测定年代，这个时间一般称电子寿命。电子寿命用导带下陷阱深度 E 来确定。当能级差距 E 大于 1.5eV 时，电子寿命可大于 1 百万年。测定年代所用陷阱越深越好，使被俘获电子能牢固地束缚在陷阱中，常温下少量的电子泄漏可以被忽略。这样，俘获的电子数目就可以与陶器的年龄成正比。

(3) 加热 当样品加热到某一陷阱的特征温度时，晶格受到热振动，当振动能量达到 E 时，立即把电子从陷阱中驱赶出来，在晶体周围扩散。这些被驱赶出来的电子到达释光中心并与之复合

时就发射光，这就是我们观察到的热释光。但电子也可能在非释光中心即“抑制中心”复合，或被更深的陷阱俘获，这样就没有热释光发射。热释光总量即光子数总量正比于俘获电子的数量，也正比于晶体遭受的核辐射剂量。

电子在陷阱中贮藏时间有一定的寿命。即使在常温下，也有一些逃逸的几率。对寿命为几百万年的陷阱，逃逸可能是很轻微的，例如发生快速驱赶电子的特征温度高于 400°C 以上的那些较深的陷阱，逃逸几乎可以忽略，但对发光峰低于 100°C 的浅陷阱，其寿命只有 1 小时甚至更短。显然，测定年代只能用寿命为几万年以上的陷阱，通常用 250°C 以上的热释光曲线。在古代陶器中，含有各种矿物，每种矿物有不同类型陷阱，每个陷阱又有不同的特征温度，因此在测量热释光时，各个独立发光峰会互相重叠、合并，使测量结果呈现出一条连续的热释光曲线，如图 1-1 所示。从图 1-1 也可以看到，低于 200°C 处，没有热释光，因为这些陷阱中电子寿命太短。

图 1-3 中的“空穴”，即通常说的电荷载流子。对一个电子已被分离的原子是一个带电空穴，它可以从邻近的原子得到一个电子。邻近原子失去电子后又成为一个带电空穴，以此类推，空穴就这样被传递过去，形成正电荷载流子。由此可见，电离产生了电子和空穴，而发光又使电子和空穴在释光中心重新复合。如果重新复合发生在“抑制中心”，则不产生光，能量以发热形式消耗掉。与电子类似，空穴也可能被俘获，空穴陷阱的特征能量用价带上面的距离表示（图 1-3）。这是因为空穴在价带中能自由扩散，它易于被能量较低的释光中心俘获。在有些晶体中，潜在的热释光以俘获空穴的方式贮藏着。一般地说，热释光的颜色不取决于导带下释光中心的深度。一个电子从导带到达处于激发态的释光中心，其剩余能量也以晶体发热的形式消耗掉。然后随着热释光发射，中心立即消除激发，恢复原来状态。

有些晶体受到压力后，加热时也会发光，称“压力热释光”，样品在粉碎时经过磨擦，会产生“磨擦热释光”。同样道理，如果