

测井工程师
进修丛书

碳氧比能谱测井

朱达智 李士文 程宗华 殷国才 编

石油工业出版社

出版者的话

测井工程师进修丛书，将从1984年起，陆续出版。《碳氧比能谱测井》作为该丛书的第一本，已与广大测井工作者见面了。测井工程师进修丛书，将陆续介绍各种主要测井方法、数控测井系统与测井仪器、测井资料解释方法和数字处理技术。既有技术基础理论，也有测井新方法和新技术。通过学习本丛书，能使读者系统掌握基础知识和了解国内外先进技术。丛书可作为测井工程师的进修用书，也可作为大专院校有关专业师生以及地质、开发等工程技术人员的参考用书。

编辑测井工程师进修丛书，对于我们来说，还缺乏经验，恳请读者指正。

前 言

碳氧比能谱测井是一种新型的脉冲中子测井方法，其最突出的优点是能够穿透套管、水泥环而直接获得地层的含油饱和度。

近年来，由于该测井方法在淡水油田套管井中的应用具有特殊的优点，因此逐渐引起了测井界的关注。目前，在国际范围内，碳/氧比测井技术从方法研究、仪器改进、信号传输、解释方法、数据处理直到现场应用都发展很快。我国大庆油田对该项技术的研究也进行了多年。为了赶超该项技术的国际先进水平，并使其在我国的应用尽快产生良好的经济效益，我们编写了这本书。

本书以1981年美国德莱塞阿特拉斯（Dresser Atlas）测井公司出版的“C/O测井”论文集为基础，并参阅了1950年以来进行该测井方法研究的有关资料和国内外若干其它有关资料，同时，还适当地结合了我们自己的一些经验和体会。

在编写过程中，曾与大庆研究院从事碳/氧比测井研究工作的有关同志进行了有益的讨论；杨荫祖、林荣祥同志给了不少支持和帮助；牛超群、耿秀文两同志为本书作了审阅，提出了不少有益的意见。王曰才教授对全书进行了审校。在此我们表示衷心的感谢。

由于我们的理论水平很低，实践经验又少，书中疏漏谬误之处肯定很多，恳请读者及时批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 碳/氧测井的物理基础和地质基础	6
第一节 中子与物质的相互作用	6
第二节 伽马射线与物质的相互作用	23
第三节 伽马射线的探测	30
第四节 碳/氧测井的基本原理和地质基础	40
第二章 碳/氧测井的方法研究	48
第一节 概述	48
第二节 不同介质对C/O测量的响应	49
第三节 孔隙度、岩性、矿化度和油的密度对C/O测量的影响	55
第四节 井眼条件对C/O比测量的影响	58
第五节 仪器参数和测量条件的选择	62
第六节 C/O测井的探测深度	65
第三章 碳/氧比测井仪器	69
第一节 概述	69
第二节 多道脉冲幅度分析器简介	70
第三节 中子发生器	77
第四节 辐射探测系统	82
第五节 信号传输	89
第六节 地面仪器	109
第四章 连续碳/氧测井的现场应用和解释技术	116
第一节 连续C/O测井的刻度和现场操作	116
第二节 C/O测井的解释技术	119
第三节 现场应用实例	145
第四节 误差的一般概念和C/O测井的误差分析	164
结束语	178
参考文献	181
符号说明	184

绪 论

长期以来,在下套管井的地层中直接寻找油层、监测石油产量、观察油层动态和确定储集层中的含油饱和度,一直是测井工作者最重要的研究课题之一。特别是在油田开发过程中,逐步采用注水、注化学胶束溶液、注蒸汽或注二氧化碳等种种提高油田采收率的措施以后,这项研究任务显得更为重要。

碳氧比(C/O)测井方法是五十年代初期开始研究、近十年来逐步投入现场应用的一种新型的脉冲中子测井方法。该测井方法利用一种在20千赫兹(KHz)脉冲速率控制下的14兆电子伏特(Mev)中子源,能够在套管井中直接区分油层与低矿度水层(矿化度低于50000PPM)、未知矿化度水层或矿化度变化很大的水层;在孔隙度较高($\Phi \geq 15\%$)的储集层中,能定量地给出含油饱和度参数;如果结合其它测井资料进行综合解释,还能给出地层中的油水含量、孔隙度、渗透率及必要的岩性参数等。总之,综合碳/氧测井方法的特点,其最突出的优点是:能穿透仪器外壳、井内流体、钢套管和水泥环等介质而直接探测地层,其测量结果基本上与地层水矿化度无关,在一定程度上,也与地层中的泥质含量无关。

为了让读者全面了解碳/氧比测井,这里首先简要地回顾一下该测井方法的发展过程。据有关资料报导,将放射性方法用于石油测井的研究工作大约是从1939年开始的。但是,要研制出一种能在生产上直接用来评价有开采价值的储集层含油饱和度的仪器(当时不叫碳/氧比测井仪),恐怕要追述到五十年代初期^[1]。

1950年,美国的几个企业团体,为了解决上述问题,首先开始了一些有关的物理研究工作。后来,苏联、加拿大、日本等国也先后开展了这项技术的研究。

从原理上说,穿过钢管探测地层中的石油,只有少数几种物理参数能够完成,重力梯度和声学特性有一定的作用,但核测量技术与其它方法相比,具有独特的优越性,因为中子和伽马射线能很容易地穿透钢管。

因此,摆在早期研究人员面前的任务是:在技术上寻找一种切实可行的方法,利用中子轰击来激发石油,并通过测定激发能量来作为含油量多少的指示。

虽然石油本身不能发出贯穿辐射,但碳元素和氧元素却可以。所以设想被向前推进了一步:如果以高能中子轰击地层,并且有选择地测量由碳发出的辐射,就能测量到碳元素。然而遗憾的是,当时没有能够激发碳辐射的天然中子源;早期的研究人员手中又没有能用于测井的人造中子源;甚至当时还不知道能否生产出这种中子源来。因此,在当时,能否发明一种小型的原子破碎机,来产生轰击地层所必需的中子通量,已成为设想继续向前推进的先决条件。

1956年,马丁(Martin)第一个报导了测量成功的消息。他在探测装置周围的油罐里测到了碳辐射。但是,由于当时技术条件的限制,他没有、也不可能提出现场应用的主张。

1959年,尤曼斯(Youmans)等人报导了一种内含加速器型中子源仪器的进展。但

是该仪器不是直接测量碳辐射，而是测量氧元素的相对含量，并通过考察水的有无来间接寻找油层，这种方法被称为氧活化测井。虽然该方法较后来的碳/氧比测井仅有简单得多的测量仪器，但是，由于它对油层的指示缺乏直接性和准确性，因此，对地质学家没有足够的吸引力。

1960年，蒂特曼 (Tittman) 和奈力根 (Nelligan) 报导了测井用脉冲中子源技术的进展^[2]。同年，豪耶尔 (Hoyer) 等人发展了碳测井系统，并第一次大胆地把它成功地用于现场井中^[3]。虽然，因为该仪器存在这样那样的问题，在现场没有获得应有的地质效果。但是，后来他的技术被卡乌尔 (Culver) 等人继承和发展起来，从而产生了第一代碳/氧比测井仪器。

与此同时，核物理和电子技术一直在不断地前进着。在不同的实验室里，碳测井理论和其所需的测试仪器也在研制中。

1964年，尤曼斯等人报导了中子寿命测井仪 (Neutron Lifetime Log, 简称NLL) 的产生及其商品性介绍^[4]。中子寿命测井仪器在高矿化度 (≥ 50000 PPM)、高孔隙度 ($\Phi \geq 20\%$) 地层中找油具有很高的成功率。该方法是通过测量热中子的宏观俘获截面 Σ ，来区分套管外的油层和高矿化度水层的。例如，某地层中含有高矿化度（一般来说就是含NaCl多）水，水的宏观俘获截面 Σ 值就比油层中的 Σ 值大得多（因为氯化钠中的氯元素具有大的宏观俘获截面），于是利用两种地层中的 Σ 值之差，就能够准确地分开油层和水层。中子寿命测井仪的研制成功，把测井工作者多年来的研究课题大大地向前推进了一步。

然而，虽然中子寿命测井方法在盐水储集层中的应用是成功的，但在地层水的宏观俘获截面未知、变化或其差别不能足够地区分开含油和含水储集层时，中子寿命测井和其它测井方法一样，很难对地层作出可靠的解释。因此，生产上的需要将迫使测井工作者作进一步的研究，即一定要研究出一种新的测井方法，使其与地层水的宏观俘获截面（或矿化度）的高低无关。即使在极低矿化度的情况下，也能可靠地区分油层和水层，这种方法就是本文所介绍的碳/氧比测井方法。

1970年6月，由卡乌尔等人研制成功的第一代碳/氧比测井仪器正式投入现场试验^[5]。在他们的仪器中，成功地引用并发展了中子寿命测井仪器中的脉冲中子发射系统，他们利用快中子非弹性散射理论，通过对地层中由中子辐照所诱发的非弹性散射伽马射线的能量和强度的测量，并把测得的这些信息与地层中所含的特定元素联系起来，最后利用C/O比值的大小来区分油层、水层，进而确定储集层中的含油饱和度，试验取得了满意的效果。试验的方式主要是点测，每张谱线需测量3—5分钟。同时，他们也用每分钟5英尺的测速，20秒的时间常数对地层作了连续测量。但由于当时中子发生器只采用4KHz的速率工作，计数率较低，故连续测井的精度很低，甚至可以说基本上无实用价值。被测地层全部是低矿化度地层。从1970年6月起至1973年6月止，利用这种类型的C/O比测井仪共计测量了77口现场井，获取了1800多条可供分析的谱线。测量后不久，先后在39个被测量层中进行了射孔验证。结果，除了5层因地质情况复杂无法对比外，其中有25个层与测量结果的判断完全相符。这个统计数字表明，点测碳/氧比测井仪器已经趋于成熟，因此，就在1973年下半年，点测碳/氧比测井仪正式投入现场应用。

虽然，这种点测型式的C/O测井仪在很多情况下的应用是成功的，但是，为了获得足

够的测量精度和C/O比值测量的重复性,在一口井中判断多个层位常常需要花费很多的时间,这在客观上就限制了它的应用范围。

1974年,舒尔茨(Schultz)和史密斯(Smith)针对当时点测碳/氧比测井仪器的弱点,在保持原仪器对油、水层的划分具有足够的灵敏度的同时,把改进的重点放在增加计数率上。因此,使得碳/氧比测井仪由定点测量向连续测量的过渡出现了明显的突破^[6]。他们采用的办法是:让中子发生器以20KHz的重复速率工作,而由于频率提高在测量门中所造成的俘获伽马射线本底的增加,则可用“双门减本底”的方法来扣除,这在后面还要详细介绍。这样做的结果,使碳/氧比测井的有用计数率大大提高,从而有效地提高了测量时效,改善了连续测量曲线的统计特性,使碳/氧比测井的发展又大大地向前迈进了一步。同年晚些时候,卡乌尔等人也相继报导了脉冲中子源的新进展和碳/氧比测井系统的商品性介绍。

在以后的三年中,上述新型的碳/氧比测井系统以点测和连续测量相结合的方法又在现场的几百口井中进行了试验。测量结果证实,这种测井系统在淡水油田的套管井中,对油层和低矿化度水层的划分具有很高的成功率,同时,它对可能产油层位的判断能力也提高了,因为连续测量有助于防止那些可能的产油层被遗漏掉。测量还表明,该方法在高孔隙度($\Phi \geq 20\%$)的砂岩地层中应用时,很少出现错误。因此,该测井系统于1977年正式投入现场应用。

在以后的几年中,由于生产上的需要,碳/氧比测井技术取得了飞快的进展。特别是电子计算机技术的普及,为碳/氧比测井解释技术的发展开辟了一条新的途径。

1979年,劳伦斯(Lawrence)基于大量的试验井资料、岩芯资料和现场结果,详细地报导了“快看”现场解释技术和计算机化解释方法,有效地把孔隙度、烃密度、泥质含量和不同岩性的井眼环境对碳/氧比测量的影响进行了校正,从而使碳/氧比测井能在不同的条件下,对一口井中的可能产油层作出正确的判断^[7]。

1980年,费特(Fertl)和伏罗斯特(Frost)系统地报导了利用计算机进行数据处理的先进解释技术^[8]。利用这一技术,把连续碳/氧比测井资料与其它套管井和裸眼井资料结合起来进行综合分析,人们可以获得有关储集层的孔隙度和泥质含量、含油饱和度、渗透率、水/油比、含水量以及每英亩一英尺油层中的现存油量等地质资料。因此,可以说,计算机化解释技术在测井中的应用,使碳/氧比测井的现场应用又进入了一个新的时期。

总结碳/氧比测井方法的整个发展过程,不难发现,为了在油田中引用这项新的测井技术,三十多年来,很多科研人员做了大量的基础工作。因此,该项研究成果中也包含了他们的许多贡献。当然,在现场评价中,最先进的碳/氧比测井系列要算是豪耶尔和舒尔茨等人技术的结合。

为了让读者更全面地了解碳/氧比测井发展的全过程,下面有必要简要介绍另外两种与上述碳/氧比测井系统有着截然不同设想和结构的碳/氧比测井系列。虽然这两种测井系列由于种种原因没有投入现场应用或者正处于试验阶段,但是,他们的设想却有其独到之处,这些独到之处很可能使其具有潜在的发展前景。这两种碳/氧比测井系列分别是“双晶电子偶谱仪”和“数字式”碳/氧比测井系统。

“双晶电子偶谱仪”式碳测井系统是劳森等人(Lawson)在七十年代初期提出来的。他们在详细地分析了豪耶尔等人的单晶碳/氧比测井系统的弱点后指出:由于单晶碳/氧比

测井系统所测得的谱线中严重地存在着两种干扰,一是地层中各种元素(除碳和氧元素外)所产生的高能伽马射线及其康普顿退降在碳能区和氧能区中的干扰;二是晶体内部的康普顿退降所产生的干扰,这两种干扰将极大的影响非弹性散射伽马能谱的测量,因此,单晶碳/氧比测井系统对地层的分析精度不可能很高。劳森等人还指出:来自地层中的干扰是无法克服的,但是来自晶体内部的干扰却能够采取一定的措施来消除。因此,他们以三晶电子偶谱仪为基础,经过大量的理论探讨和实验室研究,终于提出了“双晶电子偶谱仪”碳测井系统的大胆设想,向豪耶尔等人的技术提出了挑战。

事实证明,劳森等人的装置在改善非弹性散射伽马能谱谱形方面确实取得了人所共睹的成就,他们第一次使油、水砂谱中清晰地显示出了碳、氧和硅峰,为进行能谱分析提供了极为方便的条件。然而,该装置中致命的弱点却使其无法与豪耶尔等人的系统相匹敌,那就是计数率低,且结构复杂。因此,他们的设想最后为实践所否定。

虽然劳森等人的“双晶电子偶谱仪”被否定了,但是他们想通过改善谱形来提高碳/氧比测井解释精度的思想却为人们所接受。劳森等人曾指出,如果大体积、高分辨的锗(锂)探测器能用在测井上,将有可能使他们的设想东山再起。当然,他们的这一看法未必全对,然而,事实将证明,他们的预言也不是全无道理的。

“数字式”碳/氧测井系统是由美国斯伦贝尔测井公司道尔研究中心(Schlumberger-Doll Research Center)提出并研制的,其最初的实验装置被称为“诱发伽马射线测井仪”(Induced Gamma Ray Tool),简称IGT系统。这种测井系统只能作点测,点测时间为8分钟。

目前,该测井系统已经取得了许多新的进展,测井系统的全称为“诱发伽马能谱测井仪”(Induced Gamma Ray Spectroscopy Tool),简称GST系统^[50]。该系统可以进行非弹性散射、俘获辐射、氧活化等多种伽马能谱的测量;还可从直接输出C/O、Cl/H、H/(Si+Ca)、Fe/(Si+Ca)、Si/(Si+Ca)、S/(Si+Ca)等多种测量参数;利用这些测量参数,人们可以对被测地层的含油、水饱和度、矿化度、孔隙度、泥质含量、岩性特征等作出正确评价。在利用这一系统作C/O测量时,既可作点测(每点测5分钟),又可作连续测量(测速为140英尺/小时),在140英尺/小时的测速下,5次测量的叠加所给出的统计误差大约与5分钟定点测量读数的统计误差相当。当利用GST系统作俘获和氧活化测井时,其连续测井的测速为600英尺/小时。

由于在GST系统的井下仪器中采用了多道分析器线路,在其地面仪器中又引入了计算机控制系统CSU(Cyber Service Unit),因此它与以前的C/O测井系统相比,具有很多独特的优点,特别是在其数据处理功能(如剥谱和谱拟合分析技术)方面已经显示出很大的优越性。确切地说GST系统是一种综合测井系统,该系统从井下仪器到地面仪器,从信号传输方式到最终的信号处理都与豪耶尔等人的C/O测井系统有着截然不同的型式。因此,从某种意义上说,它代表着碳/氧比测井系统发展的另一个方面。虽然,目前该系统的许多技术性能还不够完善,但它的潜在前景是不容忽视的。由于有关该系统的具体情况在本书的第三、四章还要详细介绍,故这里就不再赘述了。

到此为止,已经先后介绍了碳/氧比测井方法的特点和其简要发展过程,下面我们将以提纲的方式向读者简要介绍该测井方法的主要用途,以供阅读时参考^[11]。

1. 在报废井或大修井中对遗漏掉的油层、气层进行勘探;

- 2.在淡水、低矿化度水或未知矿化度水的地层中,探测油、气层;
- 3.在裸眼井测井和一般套管井所提供的资料与储集层性能不一致的那些地方,用该方
法去评价那些含油储集层(这些含油层可以是含泥质的,也可以是不含泥质的);
- 4.在不能进行裸眼井测井的新井中,探测油、气层;
- 5.在淡水油田中,寻找和监测油/水界面;
- 6.监测石油产量和含油地层的开采情况;
- 7.在水驱油工程中,评价地层的含油饱和度和淡水穿透情况;
- 8.在化学和胶束溶液驱油工程中,评价地层的含油饱和度;
- 9.在注二氧化碳(CO_2)驱油工程中,评价地层的含油饱和度;
- 10.在注蒸汽驱油工程中,判断重油储集层、沥青砂岩层的含油饱和度及注入蒸汽的
贯穿前缘;
- 11.在火驱油工程中,判断含油饱和度和燃烧效率;
- 12.根据测—注—测技术,确定地层中的残余油饱和度;
- 13.在未知矿化度或变矿化度的混合岩性和复杂岩性地层中,寻找含烃层;
- 14.区分套管外的含气层和褐煤层;
- 15.寻找煤层并评价其等级。

除了上述15种用途外,C/O比测井还有若干其它附加用途,读者可在今后的实践中逐步了解。然而必须指出,C/O比测井方法的许多用途均是在与其它测井方法共同使用时才具有的,如果单独使用一种C/O测井方法,将不会得到预期的地质效果。此外,由于C/O比测井方法至今尚处于发展和完善阶段,许多实际应用问题还需在今后的实践中逐步解决,因此,望读者在深入理解C/O比测井理论的同时,大胆实践,勇于创新,以使该测井方法在我国国民经济和石油工业发展中尽快发挥其应有的作用。

第一章 碳/氧测井的物理基础和地质基础

碳/氧 (C/O) 测井是一种新型的脉冲中子测井方法, 该方法所依据的基本理论是快中子非弹性散射理论, 它所要分析和测量的主要目的伽马射线是非弹性散射伽马射线。因此, 要深入了解碳/氧比测井, 必须首先了解中子和伽马射线的一般概念、中子和伽马射线与物质的相互作用、伽马射线的探测原理、普通化学中子源和加速器中子源的一般机理等。这些概念既是一般核测井或脉冲中子测井的物理基础, 也是碳/氧比测井的一般物理基础。

然而, 要想深入了解碳/氧测井的物理基础和地质基础, 仅仅掌握上述一般概念是远远不够的, 还需重点了解与碳/氧比测井有关的特殊概念。这些概念包括: 14Mev 快中子在地层中的减速过程; 14Mev 快中子在减速过程中所诱发的伽马射线随时间的分布关系; 脉冲中子源的特殊功用和同步测量技术; 地层中特定元素原子核与快中子 (或慢中子) 发生反应时所产生的特征伽马射线; 在区别油水层时指示元素的选取原则; 实际地层中非弹性散射伽马能谱的复杂性; 碳/氧比测井名称的来源等。这些概念和上述核测井的一般概念结合起来, 就是碳/氧比测井的物理基础和地质基础, 也是本章向读者介绍的全部内容。

第一节 中子与物质的相互作用

一、中子的一般概念

中子是组成原子核的基本粒子之一。它的静止质量是1.00866原子质量单位 (一个原子质量单位等于 C^{12} 原子质量的1/12, 即等于 1.66053×10^{-27} 千克)。中子所带的电荷量小于电子电荷的 10^{-18} 。因此, 可以说, 中子是不带电的中性粒子。

因为中子不带电, 所以当它射入物质时, 它和原子核外的电子几乎不发生作用, 故中子不需要克服库仑力的障碍, 能量很低的中子也能很容易地进入原子核内部, 引起各种核反应。能量较高的中子穿透能力更强, 它们常常可以穿透套管和水泥环的阻挡而进入几十厘米深的地层中, 与地层内各种元素的原子核发生核反应。中子的这种宝贵特性, 常常为人们所利用, 碳/氧比测井和油田中所有的其它中子测井方法都是利用中子的这一特性。

中子的核物理实验表明, 中子的能量不同, 与地层中各种元素的原子核发生反应的主要型式也不同。所以, 在讨论中子与地层中各种元素的核所发生的反应之前, 有必要按中子能量的高低, 将其大致分类如下^[12]

1. 慢中子 ($0 < E < 1\text{Kev}$)

慢中子可以分为四种: 冷中子 ($0 \leq E \leq 0.002\text{ev}$); 热中子 ($E \approx 0.025\text{ev}$); 超热中子 (比热中子能量高的慢中子); 共振中子 ($1\text{ev} < E < 1\text{Kev}$)。慢中子除了上面的分类外, 有的书中还分出所谓的镉中子和超镉中子, 镉中子是指被镉强烈吸收的中子, 其能量约低于0.4ev; 超镉中子是指不被镉强烈吸收的中子, 其能量约大于0.6ev。这种分法通常与作者所面向的读者有关。

2. 中能中子 ($1\text{Kev} < E < 500\text{Kev}$)

这类中子同原子核的主要作用是弹性散射。

3. 快中子 ($500\text{Kev} < E < 10\text{Mev}$)

这类中子同原子核的主要作用是非弹性散射。

4. 特快中子 ($E > 10\text{Mev}$)

特快中子能产生 $(n, 2n)$, (n, p) 等核反应。由于加速器技术的发展, 目前已能产生能量高于 50Mev 的中子。可把它们称作超高能中子。

二、中子源

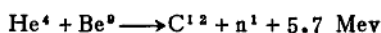
要研究中子与原子核作用必须要有中子源, 然而, 在常规情况下中子均束缚在原子核内, 由于某种原因, 跑到原子核外的中子被称为自由中子, 这种自由中子很不稳定, 要自发地产生 β^- 衰变, 其半衰期为 11.7 分。在衰变前又易被原子核俘获, 因此自然界中没有自由中子的贮存。为了得到中子, 必须用人工的方法来产生, 能够产生中子的装置叫中子源。在碳/氧比测井方法的研究过程中, 为了得到一种符合测量要求的中子源, 用了整整十多年的时间。

中子源按其产生的方法不同, 可以分为如下几类: 同位素中子源, 反应堆中子源和加速器中子源。衡量中子源的主要技术指标是中子强度、中子能量和半衰期。

1. 同位素中子源

利用放射性同位素核衰变时所放出的能量较高的射线去轰击某些靶核, 而实现发射中子的核反应, 这样的中子源, 称之为同位素中子源。同位素中子源中有 (α, n) 反应中子源和 (r, n) 反应中子源两类, 其特点是体积小, 制造简单, 使用方便, 故在实验室和油田测井中均获得了广泛的应用, 而 (α, n) 反应中子源, 是同位素中子源中用的最多的一种。

铀、钍、镭放射系元素中, 有许多天然的 α 粒子发射体, 放出 α 粒子的能量约为 4Mev 到 6Mev , 许多人造重元素衰变时发出的 α 粒子的能量也处于这个范围。我们把这些 α 粒子的发射体, 如镭 (Ra^{226}), 镅 (Am^{241}), 钋 (Po^{210}), 钚 (Pu^{238}), 钚 (Pu^{239}) 等与铍 (Be^9) 以粉末状态混合在一起, 经过简单的工艺加工, 就可做成 (α, n) 反应中子源。 (α, n) 反应中子源利用的反应式是:



目前常用的 (α, n) 反应中子源有镭-铍 ($\text{Ra}^{226}-\text{Be}^9$), 钋-铍 ($\text{Po}^{210}-\text{Be}^9$), 镅-铍 ($\text{Am}^{241}-\text{Be}^9$) 钚-铍 ($\text{Pu}^{238}-\text{Be}^9$)、钚-铍 ($\text{Pu}^{239}-\text{Be}^9$) 等, 其中镭-铍和钋-铍中子源又是测井中应用得最多的两种。镭-铍中子源的特点是发射中子流的强度大, 半衰期长 (1620 年), 中子强度几乎不随时间变化, 所以常用其作为标准中子源。其主要缺点是, 镭和它的衰变产物还发射出很强的伽马射线, 从而使这种中子源具有很强的伽马射线本底, 这对实验往往是不利的, 而钋-铍中子源就没有这个缺点, 因为钋在衰变时只是发射一组能量为 5.298Mev 的 α 粒子, 而且仅伴随着非常弱的伽马辐射。所以, 当希望获得没有强烈的伽马辐射中子源时, $\text{Po}-\text{Be}$ 中子源是最合适的当选者。然而, 钋-铍中子源也有其致命的弱点, 即其半衰期很短 (仅为 138 天)。此外, 镅-铍和钚-铍中子源也有半衰期长和伴随伽马辐射弱的特点, 因此, 近年来在测井中也越来越多地使用它们。表 1-1-1 列出了常用的 (α, n) 反应中子源及其主要特性。图 1-1-1 画出了钋-铍源的中子能谱。

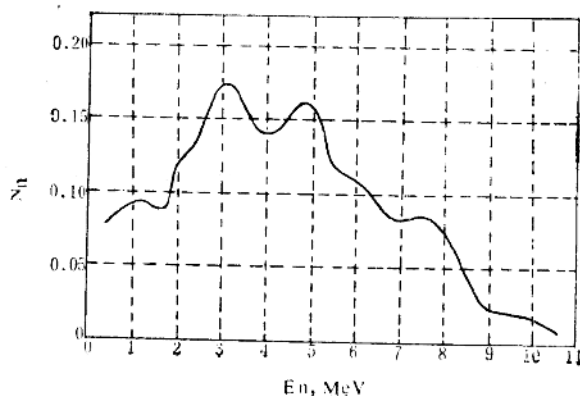


图 1-1-1 外-铍源的中子能谱

表 1-1-1 常用的 (α, n) 中子源

中子源	半衰期	中子平均能是 (MeV)	中子产额 (10^6 中子/秒· 居里)	伽马强度 毫伦/小时/米· 10^6 中子	备 注
Pb ²¹⁰ -Be ⁹	22年	4.5—5.0	2.3—2.5	9	
Po ²¹⁰ -Be ⁹	138.4天	4.2	2.3—3.0	>0.1	
Ra ²²⁶ -Be ⁹	1620年	3.9—4.7	10.0—17.1	60	
Ac ²²⁷ -Be ⁹	21.8年		15—26	8	
Tb ²²⁸ -Be ⁹	1.913年		17—20	30	
Pu ²³⁹ -Be ⁹	24400年	4.5—5.0	1.5—2.7	<1	
Am ²⁴¹ -Be ⁹	433年	5.0	2.2—2.7	1	
Cm ²⁴² -Be ⁹	163天		3.0—7.0	<1	
Cm ²⁴⁴ -Be ⁹	18.0年		6.0	<1	
Pu ²³⁸ -Be ⁹	86年	5.0	4400		
Cf ²⁵²	2.65年	2.3	2.2—4.0	<1	非 (α, n) 中子源

最后需说明一点，除Be⁹外，也可用硼(B)和氟(F)来作为 (α, n) 反应的靶子，不过产额低些。此外， (γ, n) 反应中子源中被广泛应用的有铯-铍源。这种中子源与 (α, n) 反应中子源比较起来，中子产额低，体积大，且有很强的伽马射线本底。

2. 反应堆中子源

在原子反应堆里，由于链式反应的实现，重原子核不断裂变而释放出大量的中子来。因此，反应堆是一种强大的中子源。以反应堆里引出的中子通量常常可以高达 10^{12} — 10^{14} 中子/秒·厘米²。由于测井中不用这类中子源，故在这里不作详细介绍。

3. 加速器中子源

利用加速器加速带电粒子去轰击靶核，而引起发射中子的核反应的装置，称为加速器中子源。与同位素中子源相比较，这类中子源有如下特点：

- (1) 强度高
- (2) 可以在广阔的能区中获得单能中子
- (3) 便于控制，在加速器不运行时没有很强的放射性。

加速器中子源常用的反应有四种,



质子引起的两个反应 (1.1.1) 和 (1.1.2) 都是吸能反应。如果质子的能量稍高于反应的阈能, 则可以获得单能中子流。反应式 (1.1.3) 和 (1.1.4) 是强烈的放能反应, 核物理中称其为 (d, n) 反应。随着常电粒子加速技术的发展, (d, n) 反应极为广泛地被用作中子源, 其主要原因是该反应比其它反应能给出更高的中子产额。其中, (1.1.4) 式又非常广泛地被用作产生 14Mev 能量中子的中子源。碳/氧比测井和中子寿命测井仪器中的脉冲中子发生器就是利用该反应研制而成的, 为此, 我们有必要对这种类型的加速器中子源作较为详细的介绍。

由 (1.1.4) 式显而易见, 当具有一定能量 E_d 的氘核 (${}_1\text{d}^2$) 去轰击氚 (${}_1\text{H}^3$) 靶时, 将发生放射 α 粒子和中子的核反应。对于具有不同能量的氘核, 发生这种核反应的几率也不同, 在核物理中, 通常均用有效截面 σ 来表示这种几率, σ 的意义是: 单位面积的靶上射入一个入射粒子, 并和其中一个原子核作用发生反应的几率。有效截面的单位是靶恩 (barn), $1 \text{ 靶恩} = 10^{-28} \text{ 厘米}^2$ 。在本反应中, 有效截面 σ 与氘核能量 E_d 的关系可用下式表示^[13],

$$\sigma(E_d) = \frac{58}{E_d} \frac{e^{-\frac{1.72}{\sqrt{E_d}}}}{1 + \frac{(E_d - 0.096)^2}{0.174^2}} \quad (1.1.5)$$

其中, E_d 的单位为 Mev; σ 的单位为靶恩。公式中的几个常数都是从最符合实验数据的条件下选出的。常数 0.096Mev 相当于氘核的共振吸收能量, 0.174Mev 为共振吸收宽度。图

(1-1-2) 是有效截面 σ 与氘核能量 E_d 间的关系曲线, 图中的圆点是实验数据, 而连续曲线便是上面所列举的公式。该反应中释放出的能量 Q 将分配给中子和氦核 (即 α 粒子), 中子的能量 E_n 随着轰击氘核的能量 E_d 和中子的发射角度 θ_n 而变化, 其数值大小可以用以下公式计算出来:

$$\theta = 17.6 \text{ Mev} = \frac{5}{4}E_n - \frac{1}{2}E_d - \frac{1}{2}\sqrt{2E_d \cdot E_n} \cos\theta_n \quad (1.1.6)$$

显然, 当 E_d 很小时,

$$Q \cong \frac{5}{4}E_n = 17.6\text{Mev} \quad (1.1.7)$$

所以,

$$E_n \cong \frac{4}{5}Q = 14\text{Mev}$$

由上述计算公式还可以知道, 在中子获得 14Mev 的能量的同时, 生成的氦核将获得 4Mev 左右的能量, 而且其数量与生成的中子数相等。这样, 通过测量 α 粒子的绝对数目, 完全可以得到精确的中子数。然而, 如果直接记录中子流本身是很难达到该精度的。

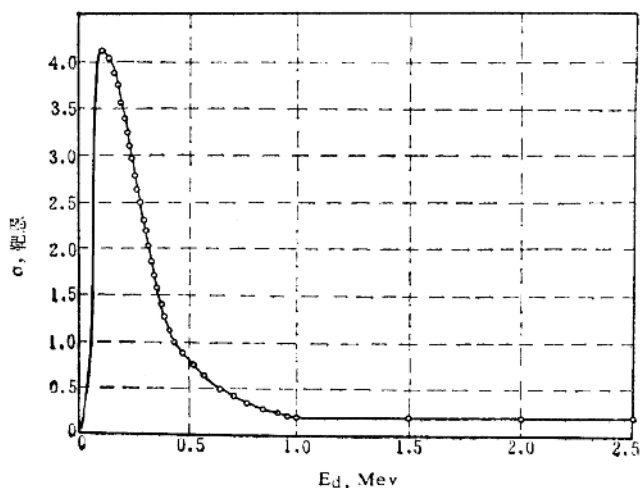


图 1-1-2 有效截面 σ 与氘核能量 E_d 间的关系曲线

我们在利用 $T(d, n)He^4$ 反应（即氘—氦反应）制造井下脉冲中子发生器时，通常均将氘核加速到略高于其共振吸收的能量（即略大于100keV），当这些氘核进入靶物质发生反应之前再损失掉一部分能量，因此，当发生核反应时，正好有最大的反应截面，且发射的中子基本上是单能的，即能量为14Mev。

在碳/氧化测井仪器中，其井下脉冲中子发射系统由中子管、12万伏高压和相应的电子控制线路组成。它是井下仪器中最重要的组成部分之一，所以，对于它的详细结构，工作过程等在本书的第三章中还要作具体介绍。

三、中子与地层的相互作用

如前所述，因为中子是不带电的中性粒子，所以，中子与地层的相互作用，都是中子与地层元素的原子核之间的作用。在作用过程中，由于中子能量和靶核质量各不相同，所以可以产生各种不同型式的核反应，概括起来主要有以下几种型式：

1. 非弹性散射 (n, n')

能量为 E 的入射中子与靶核作用时，中子被靶核吸收形成复合核，然后中子再以较低的能量发射出来，靶核则仍留在激发态上，这种作用过程称为非弹性散射。用符号记作 (n, n') 。符号中的第一个 n 表示入射中子， n' 则表示散射后的中子。激发核一般又通过发射伽马射线返回基态，我们把由此产生的伽马射线称为非弹性散射伽马射线。

显然，产生非弹性散射需要有一定的阈能。所谓阈能 (E_{th})，就是入射粒子能产生某种核反应所需的最低能量。具体到这里，粗略说来，就是入射中子的动能应大于靶核的第一激发能级的能量 E_1 ，如果考虑到质心运动，则非弹性散射的阈能为：

$$E_{th} = \frac{A+1}{A} E_1 \quad (1.1.8)$$

其中： A 是靶核的质量数。一般说来， A 越大，则 E_1 越小。由轻核到重核的 E_1 大约可由几兆电子伏特变到100Kev或更小。表（1-1-2）列出了一些原子核的第一激发能 E_1 和第二激发能 E_2 〔13〕。

表 1-1-2 一些原子核的第一、二激发能 E_1, E_2

原 子 核	第一激发能 E_1 (MeV)	第二激发能 E_2 (MeV)
C ¹²	4.43	7.68
C ¹³	3.09	3.68
N ¹⁴	2.31	3.96
O ¹⁶	6.06	6.14
Na ^{23*}	0.46	2.0
Mg ²⁴	1.37	4.14
Ti ⁴⁸	0.99	2.32
Co ⁵⁹	1.1	1.5
Ni ⁶⁰	1.33	2.18
Cu ^{63*}	0.67	0.97
Ta ¹⁸¹	0.137	0.165
Pb ²⁰⁸	2.61	3.20
Th ²³²	0.05	0.163
U ²³⁸	0.045	0.145

● 编者注：原书中Na²³和Cu⁶³分别误写成N²³和Cu¹³

非弹性散射不能完全用一个有效截面来描述，因为凡是激发能比 $\frac{A}{A+1}E$ (E 是入射中子能量， A 是靶核质量数) 低的能级，在发生非弹性散射时都可能被激发。激发到每个这样的能级都有一定的截面 $\sigma_i(n, n')$ ，称为微分截面。测量各种能量的伽马射线就可以决定所有这些微分截面，而由测量散射中子总数得出的则是这些微分截面的总和，称为非弹性散射总截面 $\sigma(n, n')$ ，显然：

$$\sigma(n, n') = \sum \sigma_i(n, n')$$

由上面的叙述可以推知，在中子能量相同时，轻元素的总截面较小，而重元素的总截面则较大。这是因为轻元素的能级间隔大，能被激发的能级较少的缘故。对于同一种元素，中子能量增加时，非弹性散射的总截面也增大。这是因为当中子能量增高时，可以被激发的能级也增多了，因此 $\sigma(n, n')$ 也随之增大。表(1-1-3)列出了由14MeV中子与不同元素作用所产生的伽马射线的截面^[14]。

需指出，非弹性散射只有对快中子才是比较重要的作用方式。快中子的非弹性散射理论是碳/氧比测井方法最重要的理论基础。

四、弹性散射(n, n)

中子与靶核象两个小球一样作弹性碰撞，碰撞后中子损失部分能量，改变了原来的运动方向。中子损失的这部分能量都给了核，变成了核的功能，于是核向另一方向运动，称为反冲核，作用前后总动能不变，这种作用称为弹性散射。发生这种散射时，中子的能量一般都低于靶核的第一激发能级的能量，因此，反应后，反冲核不会处于激发态。弹性散射以符号(n, n)表示。第一个n表示入射中子，第二个n表示被散射后的中子。利用弹性散射可使中子的速度减低，将快中子变为慢中子。

在碳/氧比测井中，由中子源发射出的14MeV的高能中子，在最初的极短时间内(约 $10^{-8} - 10^{-7}$ 秒)，经过一、二次非弹性散射而损失掉大量的能量。此后，中子已没有足够的能量再发生非弹性散射或(n, α)，(n, p)等反应了，只能经过弹性散射来继续减速。弹

表 1-1-3 14Mev中子与不同元素作用产生伽马射线的截面

Er(Mev)	可能发生的反应	终核跃迁	产生的截面 (毫巴/球面度在90° 处)	其它处的总截面 (毫巴/球面度)
4.43	$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*$	4.43→0	13.1±1.3	(12.8a 13.0b)
7.03	$^{14}\text{N}(n, n')^{14}\text{N}^*$	7.03→0	4.8±1.6	—
6.7	$^{14}\text{N}(n, n')^{14}\text{N}^*$	6.7→0	弱	—
5.1	$\left\{ \begin{array}{l} ^{14}\text{N}(n, n')^{14}\text{N}^* \\ ^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}^* \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5.1→0 \\ 5.03→0 \end{array} \right.$	4.3±1.4	—
4.46	$^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}^*$	4.46→0	5.10±1.0	—
3.95	$^{14}\text{N}(n, n')^{14}\text{N}^*$	3.95→0	存在	—
3.68	$^{14}\text{N}(n, d)^{13}\text{C}^*$	3.68→0	2.7±0.9	—
3.09	$^{14}\text{N}(n, d)^{13}\text{C}^*$	3.09→0	存在	—
2.31	$^{14}\text{N}(n, n')^{14}\text{N}^*$	2.31→0	4.7±0.9	—
2.14	$^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}^*$	2.14→0	1.4±0.5	—
1.63	$^{14}\text{N}(n, n')^{14}\text{N}^*$	3.95→2.31	2.2±0.7	—
0.51	湮没辐射	—	存在	—
≈10	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	?	0.3±0.1	—
≈8.5	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	?	0.7±0.2	—
7.12	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	7.12→0	5.0±1.0	—
6.92	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	6.92→0	3.8±0.9	—
6.13	$\left\{ \begin{array}{l} ^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^* \\ ^{16}\text{O}(n, p)^{15}\text{N}^{\beta-}, ^{16}\text{O}^* \end{array} \right.$	6.13→0	$\left\{ \begin{array}{l} 12.2±1.2 \\ (10.4±1.2)^* \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 16.2c, d \\ 11.0±2.0f \end{array} \right.$
5.8	?	?	2.0±0.7	—
4.43	$^{16}\text{O}(n, n')^{12}\text{C}^*$	4.43→0	1.5±0.5	—
3.85	$^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}^*$	3.85→0	2.6±0.5	—
3.68	$^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}^*$	3.68→0	5.5±1.1	—
3.09	$^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}^*$	3.09→0	1.6±0.3	—
2.75	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	8.88→6.13	3.8±0.04	—
1.96	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	8.88→6.92	弱	—
1.76	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	8.88→7.12	0.7±0.2	—
1.48	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	10.36→8.88	0.4±0.1	—
0.98	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	9.85→8.88	0.5±0.1	—
0.74	$^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}^*$	7.12→6.13	弱	—
0.51	湮没辐射	—	存在	—
4.4	$^{40}\text{Ca}(n, n')^{40}\text{Ca}^*$	4.48→0	弱	—
3.9	$^{40}\text{Ca}(n, n')^{40}\text{Ca}^*$	3.90→0	3.8±1.3	—
3.73	$^{40}\text{Ca}(n, n')^{40}\text{Ca}^*$	3.73→0	9.0±1.8	—
2.78	$^{40}\text{Ca}(n, d)^{38}\text{K}^*(?)$	2.82→0	2.7±0.6	—
2.1	$^{40}\text{Ca}(n, p)^{40}\text{K}^*$	2.10→0	弱	—
1.61	$\left\{ \begin{array}{l} ^{40}\text{Ca}(n, p)^{40}\text{K}^* \\ ^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}^* \\ ^{40}\text{Ca}(n, n')^{40}\text{K}^* \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1.64→0 \\ 1.61→0 \\ 5.11→3.73 \end{array} \right.$	5.4±0.6	—
1.15	$\left\{ \begin{array}{l} ^{40}\text{Ca}(n, n')^{40}\text{Ca}^* \\ ^{44}\text{Ca}(n, n')^{44}\text{Ca}^* \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4.48→3.35 \\ 1.16→0 \end{array} \right.$	2.2±0.3	—
0.89	$^{40}\text{Ca}(n, p)^{40}\text{K}^*$	0.89→0	4.8±1.0	—
0.77	$^{40}\text{Ca}(n, p)^{40}\text{K}^*$	0.80→0.03	5.6±1.2	—
0.51	(湮没辐射)	—	存在	—
7.93	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$	7.93→0	0.9±0.3	—

续表

Er(MeV)	可能发生的反应	终核跃迁	产生的截面 (毫巴/球面度在90°处)	其它处的总截面 (毫巴/球面度)
7.40	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$	7.42, 7.38→0	2.7 ± 1.0	—
6.89	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$	6.89, 6.88→0	3.7 ± 1.3	—
6.5	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$	8.33→1.78	2.2 ± 0.8	—
6.0	?	?	弱	—
5.57	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$	7.42, 7.38→1.78	弱	—
5.10	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$	6.89, 6.88→1.78	3.9 ± 0.8	—
4.50	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$	6.27→1.78	1.2 ± 0.4	—
4.0	?	?	2.3 ± 0.8	—
3.5	?	?	2.0 ± 0.7	—
2.84	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}^*$	4.62→1.78	5.3 ± 0.6	—
3.25	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$	4.10→0.85	弱	—
3.08	?	?	弱	—
2.61	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$	3.45→0.85	3.7 ± 0.8	—
2.52	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$	3.39→0.85	2.7 ± 0.7	—
2.32	?	?	1.7 ± 0.6	—
2.13	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$	2.96→0.85	3.5 ± 0.7	—
2.02	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$	4.10→2.09	1.5 ± 0.5	—
1.82	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$	2.66→0.85	5.4 ± 0.6	—
1.66	?	?	2.0 ± 0.4	—
1.33	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$ $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}^*$	$3.45 \rightarrow 2.09$ $1.32 \rightarrow 0$	7.4 ± 1.5	—
1.24	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$	2.09→0.85	23.0 ± 2.3	(23.7 ± 7.0^C) $28.0 \pm 7.0_f$
1.02	$^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$	3.12→2.09	6.3 ± 1.3	—
0.92	$^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}^*$	$1.32 \rightarrow 0.41$ $0.93 \rightarrow 0$	11.7 ± 3.9	—
0.85	$\{^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}^*$ $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}^{\beta-56}\text{Fe}^*\}$	0.85	$\{57.6 \pm 5.8$ $(56.9 \pm 5.8)^*$	$\{48.0 \pm 15.0^C$ 49.0 ± 13.0^f
0.51	湮没辐射		存在	$79.2 \pm 9.4^{*}, \lambda$
0.41	$^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}^*$	0.41→0	存在	107.0 ± 12.0^a
2.62	$^{208}\text{Pb}(n, n')^{208}\text{Pb}^*$	2.62→0	20.3 ± 2.1	1.65^P 25.5 ± 4.6^q
2.53	$^{208}\text{Pb}(n, n')^{208}\text{Pb}^*$	5.1→2.62	5.6 ± 1.9	—
2.24	$^{208}\text{Pb}(n, n')^{208}\text{Pb}^*$	5.4→3.20	4.6 ± 1.6	—
2.02	$^{207}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$	4.37→2.34	3.4 ± 1.1	—
1.77	$^{207}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$	2.34→0.57	12.9 ± 2.6	—
1.70	$\{^{207}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$ $^{208}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$	$3.61 \rightarrow 1.9$ $1.72 \rightarrow 0$	8.2 ± 1.8	—
1.58	$^{207}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$	5.20→3.61	4.6 ± 1.5	—
1.06	$^{207}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$	1.63→0.57	55.7 ± 5.6	—
0.99	$^{207}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$	1.90→0.89	17.3 ± 5.8	—
0.89	$\{^{207}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$ $^{208}\text{Pb}(n, n')^{206}\text{Pb}^*$	$0.89 \rightarrow 0$ $1.68 \rightarrow 0.80$	26.3 ± 9.0	—
0.81	$^{208}\text{Pb}(n, n')^{206}\text{Pb}^*$	0.80→0	45.5 ± 9.0	—
0.57	$\{^{207}\text{Pb}(n, n')^{207}\text{Pb}^*$ $^{208}\text{Pb}(n, n')^{208}\text{Pb}^*$	$0.57 \rightarrow 0$ $3.20 \rightarrow 2.62$	存在	—