

核临界安全指南

[美]J. T. 托马斯 等 编著

原子能出版社

2.1

Nuclear Safety Guide

TID-7016

Revision 2

J.T.Thomas

核临界安全指南

〔美〕 J.T. 托马斯等 编著

李嘉梁 吴德强 译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张5.25·字数113千字

1987年5月北京第一版·1987年5月北京第一次印刷

印数1—850 ·统一书号: 15175·845

定价: 1.10 元

内 容 简 介

本书为美国《核临界安全指南》第二次修订本的中译本。该指南是国际上核临界安全领域中影响较大且具有较高实用价值的一份参考资料。

本书的编写体例明显地不同于以前的版本。它进一步充实了定性指导方面的内容，提供的数据也大大增加。这些数据绝大多数是未附加安全系数的次临界数据。对某项操作进行具体分析并规定适当安全系数的工作，则留给核临界安全专业人员去完成，这样做能更有利于因地制宜地做好临界安全工作。

全书共分五章：第一章为基本知识；第二章为孤立单体现额；第三章为影响单体次临界限额的因素；第四章为易裂变材料的贮存和运输；第五章为易裂变材料加工厂中的核临界安全。附录中介绍了特殊钢系元素的临界性。

本书译自1978年6月出版的美国核管理委员会报告NUREG/CR-0095。书末还附上了1980年J.T.托马斯在一次专题讨论会上对该书的介绍。

本书主要供从事易裂变材料临界安全工作的专业人员参考，也可供从事易裂变材料生产、操作、贮存和运输的有关人员参考。

第二次修订本序

《核临界安全指南》一书，是美国原子能委员会于1956年以保密报告的形式首次印发的，编号为LA-2063。1957年解密重印，编号改为TID-7016。1961年发表了第一次修订本，内容有所扩充，其中的指导性内容更加完善。当时曾故意将核安全推荐值定得比较保守，这次修订时没有采用这种做法。本指南的初版及第一次修订本，都严格地以临界参数的实验值为依据，因而普遍认为它们对于操作和处理的可裂变材料数量不大的那些单位是非常有用的。另外，当时已经建立了一些核临界安全小组，小组的成员们在临界安全方面相当有经验，这两份资料也是他们推进核临界安全工作的一个起点。

读者将会发现，本修订本的编写体例已迥然不同。在过去的十二年中，核临界安全这门学科已日臻成熟。计算能力的提高允许人们用验证过的计算值去扩充和替代实验数据；而基本数据的扩展又使人们有可能更好地对现有资料进行内插、外推和分析判断（对于原先采用虽然可靠但安全程度不明的安全系数处理问题的那些场合更是如此）。因此，本修订本进一步充实了定性指导方面的内容。书中还有许多数据资料，加上适当的安全系数以后，本指南同样具有前两个版本所具有的那种定量指导功能，也就是说，读者照样能够从中获得定量指导。实际上，分析某项操作中可能出现的各种常规的意外事件以及虽说异常却又可信的意外事件，然后选定合适的安全系数，现已成为临界安全专家们义不容辞的任

务。

有关单位在编制供内部使用的核临界安全大纲或手册时，可以很方便地把目前这种形式的指南成段成段地吸收进去，成为大纲或手册的一个组成部分。我们希望，本指南能重新满足现今的需要，并对今后更全面、更系统地编写核临界安全方面的资料有所裨益。

H.K.克拉克	萨凡那河研究所
E.D.克劳顿	巴特尔太平洋西北研究所
E.B.约翰逊	橡树岭国家研究所
H.C.帕克斯顿	洛斯阿拉莫斯科学研究所
D.R.史密斯	洛斯阿拉莫斯科学研究所
J.T.托马斯	橡树岭国家研究所，本文编写组 组长

目 录

第二次修订本序

第一章 基本知识.....	1
第一节 关于核临界安全的概念.....	1
引言	1
基本的安全原则.....	2
影响临界性的若干因素.....	4
临界数据的来源.....	8
实验数据.....	8
理论数据.....	9
表征临界度的指标.....	10
第二节 核临界安全控制的实施.....	11
通用的临界安全标准.....	11
行政管理办法.....	12
责任制.....	12
其他的行政管理办法.....	13
技术措施.....	14
双意外原则.....	14
几何控制.....	15
用中子吸收剂进行控制.....	15
次临界限额.....	16
用仪器监督问题.....	16
第三节 事故经验教训.....	18
概述.....	18
工厂事故.....	20
1958年6月16日美国橡树岭Y-12厂发生的事故.....	20

1958年12月30日美国洛斯阿拉莫斯科学研究所 发生的 事故.....	22
1959年10月16日美国国家反应堆试验站爱达 荷化学处理厂 发生的事故.....	23
1961年1月25日美国国家反应堆试验站爱达荷 化学 处理厂 发生的事故.....	24
1962年4月7日美国汉福特瑞喀普勒克斯车间 发生的事故.....	25
1964年7月24日美国罗德岛伍德河枢 纽站发生的事故.....	26
1970年8月24日英国原子 能管 理局 温斯 克尔工厂发生 的 事故.....	27
对处理厂事故的其他一些 看法.....	28
正确地看待临界危 害.....	31
第二章 孤立单体的 限 额.....	33
第一节 几种易裂变核素的单参数 限 额.....	33
引言.....	33
氢慢化系 统.....	34
均匀水溶 液.....	34
均匀混合物 和均匀浆液.....	35
非均匀浆 液.....	35
金属单 体.....	36
第二节 与易裂变材料浓度有关的 限 额.....	37
水溶液和金属-水混 合物.....	37
铀-235的重量百分数不超过5%的 稍加 浓铀.....	48
第三节 几种核素的混合物.....	52
钚-天然铀混 合物.....	52
溶液和含水的均匀混 合物.....	54
干燥的及潮湿的混合二氧化物 粉末.....	55
钚和天然铀混合物的数量不限时 钚的次临界相对含量.....	56
钚-天然铀-水均匀混合物中的 钚的次临界浓度.....	57
含 ^{232}Th 的 $^{233}\text{U}-\text{C}-\text{H}_2\text{O}$ 混 合物.....	62

^{235}U 金属-水-石墨混合物	64
第四节 特殊形状的几何体	68
环状圆柱	68
管道交接点	68
第三章 影响单体次临界限额的因素	72
典型的意外情况	72
次临界限额的放宽	73
密度降低	73
易裂变金属被稀释	75
中等程度的 ^{235}U 浓缩度	75
含有 ^{240}Pu 的钚	76
中子吸收剂	77
固体中子吸收剂	78
可溶中子吸收剂	78
单体的几何形状	81
混凝土反射层	84
第四章 易裂变材料的贮存和运输	86
第一节 阵列的限额	86
另一种贮存判据	88
运输	96
第二节 中子相互作用	100
面密度模式、密度类比模式及立体角模式	100
面密度模式	100
密度类比模式	102
立体角模式	103
其他的估算方法	111
第五章 易裂变材料加工厂中的核临界安全	112
人员培训	112
临界报警	113

应急计划.....	114
加工厂中有关核临界安全问题的若干示例.....	114
水堆燃料元件溶解器	114
低加浓铀溶液的贮存.....	115
在硼硅酸盐玻璃管中贮存溶液.....	116
在装填着含硼拉西环的贮槽中贮存溶液	117
可溶性中子吸收剂.....	119
管道交接点的设计	120
溶液滞留量的设计	121
U(30)O ₂ 的运输	121
U(93)金属贮存阵列.....	123
制作燃料组件.....	124
附录 特殊锕系元素的临界性.....	133
中子数为奇数的核素	133
中子数为偶数的核素.....	136
注意防止 ${}_{98}^{244}\text{Cm}$ - ${}_{98}^{245}\text{Cm}$ 混合物临界	136
关于特殊锕系元素的安全限额.....	137
参考文献.....	139

《核临界安全指南》TID-7016 第二次修订本介绍J.T.

托马斯

149

第一章 基本知识

第一节 关于核临界安全的概念

引言

1.1 在实际工作中，一般把核临界安全定义为避免发生意外核闪变(nuclear excursion)*的一种专门技术。当良好的屏蔽和密封条件能保护操作人员免受临界事故所产生的强辐射伤害因而安全标准可以放宽时，这个定义仍然是易裂变材料**工艺流程的设计者处理核临界安全问题时的准绳。

1.2 设计工艺流程时，必须仔细分析含有可裂变材料**

* excursion一词，在反应堆专业文献中往往译成“功率骤增”、“剧增”和“偏移”等。看来此处不能使用这些译名，建议译作“闪变”。在本书第一章中，除了涉及到“核闪变”外，还有“意外闪变”(accidental excursion)、“超临界闪变”(supercritical excursion)、“工厂闪变”(plant excursion)、“溶液闪变”(solution excursion)、“闪变实验”(excursion experiment)、“闪变地点”(excursion site)和“离闪变点的距离”(distance from a excursion)等词组，这些场合都是不可能用“骤增”、“偏移”等译名顶替的。——译者注

** 在国际标准 ISO921—1972 及其补篇中，将“易裂变材料”(fissile material)定义为包含一种或数种易裂变核素，并在适当条件下能达到临界的那种材料。“易裂变核素”是指能由热中子诱发裂变的那些核素。“可裂变材料”(fissionable material)则定义为包含一种或数种可裂变核素的那种材料。“可裂变核素”是指能由任何一种反应诱发裂变的那些核素。

原文中出现这两个词时，我们都只是简单地把它直译成中文。实际上，本书第一章中使用“可裂变材料”一词的许多地方，改用“易裂变材料”也许更好。——译者注

的每一道工序，寻找可能会达到临界的组配 (critical configuration) *，然后配置适当的设备，制定出专门的操作规程。既要防止这些潜在临界组配的出现，又不要过多地牺牲生产效率。这种分析工作一般要随着设计工作的深入而反复地进行，有时甚至会反过来要求变更设计方案。这就意味着有关的临界安全专业人员、设计人员和生产操作人员之间要反复进行磋商，直到整个工艺流程定案为止。如果想得更远些，设备可能会以意想不到的方式损坏，职工会有变动，某些要求也许会被更改，到时候又得进行磋商。

基本的安全原则

1.3 尽管核临界安全工作有自身的特殊性，但一般仍将其归入普通工业安全之列。具体地说，若能牢记以下几条在普通工业中经过长期考验的基本安全原则，定将得益不浅：

1.3.1 所谓安全，就是在危害和利益之间谋求适当的平衡；把安全当作与其它目标完全无关的一种概念，那是毫无意义的。因此，应该把安全当成设计和运行时必须实现的目标之一，而不是孤立的一件事。尽管经验已经证明，临界事故的危险性并不比其它工业事故更为严重^①，但为了在临界

* 在本书中，我们将configuration译作“组配”，其含义是指易裂变材料系统的几何结构和尺寸、材料组成和分布以及反射条件等各方面状况的总称。——译者注

① 无论是从事故可能会造成人员伤亡，还是从可能造成设备损坏角度看，这个结论都是对的。当然，临界事故会在经济上造成相当大的损失，如需要在事故的调查研究和清除放射性污染方面付出额外的费用。

危害和利益之间谋求适当的平衡而采取的控制措施，却多多少少比非核工业严格一些。由于人们对临界事故的危险程度不怎么熟悉，容易产生某种不安心理，对这种心理多照顾一些也是可以理解的。但是，那种“零危害”的极端观念（要求做到“绝对保证安全”和“完全确保安全”的提法就有这个意思）却误人不浅。要杜绝一切危害是根本做不到的，这种要求反而会有碍于把危害维持在较低的容许水平上的日常性工作的进行。

1.3.2 能否防止事故，与在安全工作上给生产第一线的基层领导规定的责任和权限关系很大，因为他们离操作现场最近，而且是根据管理部门的原则指示和方针进行工作的。由远离现场的行政当局掌管细节是不可取的。

由远离现场的管理机关掌管细节，会使操作人员滋生这样一种想法——“这事反正有人在管”，因而丧失掉搞好临界控制所必不可少的警惕性。当然，这种状况是美国政府现有的安全法规造成的。要使法规行之有效，就需要对法规中的要求和现场的控制措施作出通盘的考虑，美国核管理委员会按许可证申请者的能力调整许可证发放条件的做法，就是一个很好的例证^[1]。

1.3.3 安全法规既应以通用的专业标准为基础，但也应允许其他的能保证安全的办法存在。专横武断地选用一种办法（如一切按条例办），就会扼杀掉经济上最合算的折衷办法或最适宜的方案。

死板的条例会束缚设计者的手脚，使他们无法象平时那样去寻求能满足多方面要求的、最满意的解决办法，结果会使安全要求与其他目标相互脱节，并会使临时凑合的不称手的操作方法的出现几率增加。灵活性可使设计人员获得自

由，使他们能够把核工业中已经积累起来的大量经验用于整个工艺流程。

1.3.4 简单而方便的安全规定往往比复杂的规定或不方便的安排更有利于安全。同样，还应当提倡采用花钱少的措施。最重要的是要使临界控制措施切实可行，使没有经过深思熟虑的、难以实施的控制办法处处碰壁。换句话说，应该将物料和设备安排得便于正确操作而不容易引起误操作，以提高核临界安全性。当然，特殊情况可以采取特殊的控制措施。

尽管上述原则不可能在决定每一项安全问题时都起作用，但在多数情况下它们是能够提供宝贵的启示的。

影响临界性的若干因素

1.4 一个含有易裂变材料的系统，当其中的链式裂变反应能稳定而自持地进行时，我们就称这个系统是临界的^①。在这种情况下，一次裂变所产生的若干个中子中，平均有一个用于引起新的裂变，因而系统内的中子总数平均地说不随时间而变化。其余的中子或因不能引起裂变的俘获而损失掉，或因从系统中泄漏出去而损失掉。要达到临界，系统内的中子数目就要保持严格的平衡；而是否能够保持这种平衡又与系统内的材料的组成和数量、系统的形状和周围情况有关（这些问题以后都会谈到）。在技术说明书中，对这些参数都必须有具体规定。当然，有许多情况下，技术说明书并不一定要很复杂。例如，对于一个带有水反射层的球体，只要列出材料组成和临界质量（或临界体积）就够了。

^① 严格地说，这是指“缓发临界”。

1.5 中子的泄漏使本来有可能引起裂变的一些中子从系统中跑掉了，这是影响系统临界性的一个重要因素。泄漏量与易裂变系统的形状、大小和组成有关，也与该系统周围材料的中子反射能力有关。例如，可以限制溶液包容体的某些尺寸（如限制管径，使该管道的面积-体积比足够大），使系统的中子泄漏量相当大，以致不管装了多少可裂变材料都不会产生自持链式反应。若包容体外面带有冷却套，或者附近有其他工艺设备和结构材料，则包容体的尺寸必须比周围没有这些中子反射体时的允许值小。在本指南中，我们把天然水、混凝土、石墨和不锈钢看作典型的反射材料。虽然大家知道，重水和铍等是更为有效的反射材料，但它们在加工厂中并不常见。

1.6 临界质量对于与可裂变同位素相混的中子慢化元素（如水中的氢）相当敏感。本指南中给出的适用于孤立单体的次临界参数，主要用于以氢作慢化剂的情况。氢的浓度常用氢原子数与可裂变核素原子数之比表示，其值可以是零（金属的情况）到几千（稀溶液的情况）。在水溶液的情况下，另一种说法是“单位体积中的可裂变材料质量”。在上述氢浓度范围内，临界质量开始时可以是几十公斤，后来逐渐变小，中间经过一个几百克的极小值，然后再逐渐变大。当溶液很稀时，由于氢的数量很大，会吸收掉了许多中子，因而系统不可能达到临界，或者说，临界质量趋向无穷大。对于这种稀溶液，只要控制好化学浓度就能保证系统是次临界的。

1.7 一般说来，在具有慢化剂的情况下，当可裂变材料与慢化剂完全均匀混合时（例如水溶液的情况），临界质量最小。但铀中铀-235的含量只有百分之几时是个例外：稍

加浓铀在水中非均匀分布时，其临界质量比同样浓缩度的铀按同样比例与水均匀混合时的临界质量小。这是由于铀-238具有能强烈吸收能量为几电子伏的中子这一特性（称作共振吸收）所引起的。当把铀排列成适当形状的栅格时，裂变产生的高能中子慢化成能量低于铀-238共振吸收能区的中子的几率增大，因而逃脱掉了铀-238的共振吸收。这种栅格的逃脱共振几率是可以测量和计算的。据估计，可以采用栅格结构使临界质量减小的铀-235浓缩度值最高为5—7%（重量）。

1.8 铀-235浓缩度较低的铀，按栅格布置时的临界质量与均匀混合时不同，这种特殊性质可以用来解释一条常用的核安全规则（指在加工厂中可以不考虑天然铀的临界安全问题。——译者注）。因为我们知道，尽管把直径合适的天然铀金属棒仔细地按某种栅距排列在天然水中，也能达到临界，但所需铀量肯定很大；另一方面，由于前面刚刚说过的理由，天然铀与水形成的均匀混合物，不管比例如何，都不可能达到临界（事实上，已有数据证明，为了使铀-水均匀混合物达到临界，铀中铀-235含量至少必须接近1%）。

1.9 可裂变同位素与其他材料（包括空气）相混合时，其临界质量也与可裂变同位素的分布方式有关，但只有在特殊情况下，才能定量地描述出这种依赖关系。一般说来，当其他参数不变时，临界质量随密度的减小而增加。例如，钚-239金属球的临界质量就小于外形为球体的钚-239干细屑或切屑的临界质量。又如，各种水溶液中的铀-235的临界质量，大于 $H/^{235}U$ 原子数比相同的、含密度较高的二氧化铀的均匀水浆液的临界质量，其原因就在于在水溶液情况下铀-235的密度较小。

1.10 在可裂变材料内部加入 镉 和 硼 之类的中子吸收剂，能使本来会临界的系统变成次临界安全的。但必须注意不要因腐蚀或机械位移等原因造成吸收剂意外地消失，或使预定的分布方式遭到破坏。固体吸收剂可以在制造和安装设备时加进去，溶液状中子吸收剂则可以直接加到工艺液流中去。但是，为了保证中子吸收剂总是存在并按预定方式分布，必须采取若干行政管理措施。还要注意，并非一用中子吸收剂次临界度就肯定会增加，在装有可裂变材料的容器外表面包上中子吸收材料的情况就是一例。假如容器外表面包上一薄片镉后，外面再包上相当厚的一层水，则镉对于增大临界质量是很有效的；若没有厚水反射层，则所包镉片反而会使临界质量减小。在后一种情况下，镉起了中子反射层的作用，因为镉既是良好的中子吸收体（对热中子而言），又是良好的中子散射体（对能量大于热中子的中子而言）。

1.11 化学处理过程中常遇到铀的硝酸盐溶液，其中的氮和铀中的铀-240也是常见的中子吸收剂。不过，当铀中所含的氢或其他慢化核素极少甚至没有时，参加链式反应的中子基本上是快中子（即能量较高的中子），铀-240吸收此类中子的能力就不如吸收低能中子那样强，这时不能指望它提高安全性。铀-241的含量即使较少（如小于或等于2%），也不能忽视，但可以把它当作铀-239，因为它是一种很容易被热中子诱发裂变的同位素。对于铀-241含量较高、但铀-240含量高于铀-241的场合，把铀-241当作铀-239是偏保守的。

1.12 前面的论述都是针对孤立单体说的。但是，为了估价整个加工区和整个库房的临界安全性，还必须考虑各个次临界单元之间的中子交换作用。必须给这些单元规定适当

的间距标准。在设计工厂设施和贮运易裂变单元时，都必须细心地采取防范措施，以保持间距不会变动。贮运货物时，将货物紧堆紧码的做法在普通工业中是司空见惯的，但在贮运易裂变材料时，因为有临界问题，这种习惯必须改一改。

1.13 中子相互作用的强弱，与各个单元的尺寸、形状以及单元间的距离等几何因素有关，也与阵列本身的尺寸和形状有关。当然，夹杂在单元之间的材料和围在阵列周围的材料都会严重影响阵列的临界性。一个挤得相当紧的次临界阵列，水淹时也许会达到临界。相反，一个水淹时是次临界的阵列，在水退走后也有可能达到临界，因为水有吸收中子的一面，在这里也许主要起阻碍单元之间交换中子的作用。被水反射时是次临界的阵列，改用混凝土反射时也许会达到临界。在制定供贮运可裂变材料用的安全间距标准时，这种种因素都是必须考虑的。

临界数据的来源

1.14 实验数据是临界安全的基础，它既可供直接应用，又可供验证计算技术用。然而，只有在极少数情况下，才需要使实验条件与预期的使用条件相符。完全一模一样地做往往是不必要的，只要使测得的临界参数在安全性方面肯定比实际需要的参数更加苛刻就行了。例如，球体的临界体积就比材料组成和反射情况都相同的圆柱体的临界体积小些。在许多情况下，需要使用可靠的理论方法将已有实验数据内插和外推。总的说来，实验值与计算值是相辅相成的。

实验数据

1.15 1964 年以前通过实验获得的临界数据，可以很方便地从《包含铀-235、钚-239和铀-233等易裂变核素的各