

水力压裂法 地下处置放射性废物

原子能出版社

[美] R.J.森 著

SHUI LI YA LIE FA
DI XIA CHU ZHI FANG
SHE XING FEI WU

水力压裂法 地下处置放射性废物

〔美〕R. J. 森 著

全惟俊	译
简永年	
吴民华	校

原子能出版社

内 容 简 介

石油开发广泛采用的水力压裂技术已成功地应用于永久处置放射性废物。美国橡树岭国立实验所应用该法将放射性废物灰浆注入不渗透的页岩层，灰浆凝固后成为岩层的一部分，以达到把放射性废物与生物圈长期隔绝的目的。经近20年的实践和验证，已证明该法是一种安全、简单和经济的处置方法。

美国地质调查所受美国能源部的委托编写了本书，作为向国际原子能机构提供的专题报告。书中较全面地介绍了水力压裂技术的基础理论，包括破裂力学理论，地应力的影响及其它有关的地质水文知识；对处置场址选择和评价的方法步骤作了较详尽的论述；对人们最为关切的安全问题设有专章分析讨论。附录详细介绍了处置方法的工艺、厂房布置和监控手段，并且引用了许多典型的试验资料和参考文献，具有较大实用参考价值。

本书可供从事环境保护、废物处置的专业人员使用，也可供石油、地质等部门中从事油层压裂，地应力测定及岩体断裂力学研究的工程技术人员和大专院校有关专业师生参考。

Site Selection and Investigation for Subsurface
Disposal of Radioactive Wastes in Hydraulically
Induced Fractures

Ren Jen Sun

U. S. Geological Survey

Open-file Report 80-450

1980

水力压裂法地下处置放射性废物

〔美〕R. J. 森 著

全惟俊 译

简永年

吴民华 校

责任编辑 韩国光

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

北京怀柔孙史山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张7.625·字数180千字

1987年1月第一版·1987年1月第一次印刷

印数1—960·统一书号，15175·803

定价，1.60元

译者的话

核燃料生产、放射性同位素应用及核能发电等不可避免地会产生一些放射性废物。解决好这些废物的处理和处置对保护生态环境，促进核能发展具有十分重要的意义。在各种处置方法中地质岩层处置是最为现实和可靠的方法。美国橡树岭国立实验所与石油、地质部门合作发展了一种既安全又经济的地质岩层处置方法，即水力压裂注浆处置法，该法特别适用于大量液体废物的永久处置。1964年至1979年该所将产生的 7000m^3 废液配成 11200m^3 废物灰浆，含放射性核素 $2.4 \times 10^{18}\text{Bq}$ （65万Ci），分25次注入地下页岩层（实验注射7次，运行注射18次）。经过长期的安全监测，未发现对周围环境有任何不利影响。1979年后原压裂厂停止运行，在其附近又建一新压裂厂，该厂已于1982年6月投入运行。新厂不仅能处置放射性浓度较高的废液，而且能处置废液贮罐底部沉积的放射性淤泥。

我们认为水力压裂注浆处置法是一项很有发展前途的废物处置方法。该法不仅适用于放射性废物的永久处置，而且也有可能适用于其它毒性废物的永久处置。我们想通过翻译出版此书向读者介绍本方法的概貌，并且期望它能结合我国国情而获得应用，为保护环境，发展我国废物处置技术起一些作用。

限于我们的水平和经验，译文中不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

1984年10月

提 要

中放废液(主要由半衰期小于50a的放射性核素如铯和锶组成,放射性浓度小于 $2.22 \times 10^{11} \text{Bq/l}$,即 6Ci/l)与水泥混合后注入厚页岩层是一种有前途的、可行的处置方法。水力压裂过程提供了在页岩中容纳废物的空间。在水泥灰浆中添加离子交换剂和吸附核素的材料可进一步提高灰浆滞留核素的能力。注入的废物灰浆凝固后,成为页岩层的组成部分,只要注射区域不遭受侵蚀或溶蚀,废物就一直固定在地下深处。

这种处置方法的安全问题包括以下五个方面:(1)形成垂直裂缝的可能性;(2)注射期间和注射后的相分离;(3)压裂裂缝方位测定方法的可靠性;(4)诱发地震的可能性;(5)地下水导致核素的浸出和迁移。

在层状页岩中,垂直于层面和与层面平行的抗张强度的差异使裂缝容易沿接近水平的层面形成。甚至在垂直应力比水平应力稍高的地区,也能在深度约1000m以下的页岩中,由水力压裂形成接近水平的层面裂缝。在场址评价时应进行注射试验,以确定是否能形成水平的层面裂缝。

压裂裂缝的方位能够根据注射时的注射压力、注水后的压力衰减和注射后地表的抬升等现象间接加以判断;然而,若注射的流体或废液含有足够的 γ 放射性核素,则可以通过注射前后在观测井内进行的 γ 射线测井直接确定。

若废物灰浆混合恰当,相分离的量可小于注入总体积的百分之一。因页岩渗透率低(小于 10^{-6} 达西(darcy)),并具有高的离子交换和吸附容量,进一步减少了分离液中废物的活动能力,从而减少了污染环境的危险性。

注射灰浆不致引起页岩岩体中的孔隙压力普遍上升,同时处置场地必须位于地质稳定和构造上弛张的区域,即当地不存在活动断层的区域;因而,这种处置方法避免了因注射流体而引起诱发地震的两个必要和基本的条件(孔隙压力上升和岩体所受应力已接近其破裂强度极限)。

在一口注射井可分段进行多层废物注射。首先在井的最深部进行第一组的数次注射,然后在其注射处用水泥填塞;在第一组注射深度上面的适当位置再进行第二组的数次注射。注射井的重复利用把注射井和监测井的建造费用分摊到许多次注射上,使水力压裂注射灰浆的方法用来处置放射性废液在经济上具有吸引力。

本书讨论了页岩层中形成接近水平的层面裂缝的理论依据,场址选择的现场工作步骤,放射性废液处置的安全、监控和运行,并用典型实例作例子,说明理论应用和现场实际运行过程。

目 录

提 要	Ⅰ
第一章 绪论	(1)
1.1 目的和范围	(4)
1.2 致谢	(4)
第二章 破裂力学理论	(5)
第三章 放射性废物注入水力压裂裂缝的控制因素	(8)
3.1 地应力	(8)
3.1.1 垂直地应力	(8)
3.1.2 水平地应力	(10)
3.1.3 构造应力	(10)
3.2 水力压裂力学	(11)
3.2.1 无套管裸孔周围的应力状态	(11)
3.2.2 有套管固井孔内的压裂	(13)
3.2.3 层状岩体的压裂	(13)
3.2.4 存在裂隙和节理的层状岩体的压裂	(14)
3.3 各类岩石用于水力压裂和废物注射的适用性	(15)
3.3.1 页岩	(15)
3.3.2 矿岩和石灰岩	(15)
3.3.3 结晶火成变质岩	(16)
第四章 场址评价	(17)
4.1 地质	(17)
4.2 水文	(17)
4.3 地质稳定性	(18)
4.4 资源开发的影响	(18)
第五章 场址调查	(19)
5.1 试验钻探	(19)
5.1.1 地球物理测井	(19)
5.1.2 岩芯分析	(20)
5.1.3 基岩岩层的走向和倾向	(20)
5.2 水力压裂试验	(20)
5.3 水力压裂试验数据的分析	(21)
5.3.1 压力数据的分析	(21)
5.3.2 地表抬升数据的分析	(22)
5.3.3 γ 射线测井记录的分析	(23)
第六章 安全分析	(25)
6.1 灰浆相分离引起的废物迁移问题	(25)

6.2	地下水浸泡灰浆层问题	(26)
6.3	垂直裂缝的形成问题	(27)
6.4	水力压裂引起诱发地震的可能性	(27)
6.4.1	历史上的人为地震	(28)
6.4.2	诱发地震的机理	(28)
6.4.3	水力压裂灰浆注射引起诱发地震的可能性	(29)
6.5	注入废物所需隔离时间	(30)
第七章 结论		(31)

附 录

A. 典型实例		(32)
A1	纽约州西谷的水力压裂试验	(32)
A1.1	场址地质	(32)
A1.2	井网建造	(34)
A1.3	注射试验	(34)
A1.4	概要	(45)
A2	田纳西州橡树岭国立实验所的放射性废物处置	(45)
A2.1	地质和水文	(47)
A2.2	地震	(49)
A2.3	橡树岭国立实验所产生的放射性废液的性质	(49)
A2.4	处置放射性废液的概况	(50)
A2.5	注射工艺及处置厂房	(51)
A2.6	注射	(56)
A2.7	监控系统	(61)
A2.8	场址调查	(61)
A2.9	废物出露的可能性	(71)
A2.10	概要	(72)
B. 符号说明		(73)
C. 参考文献		(75)
D. 附表		(82)

第一章 绪 论

放射性废物是核电生产和其它核能应用时不可避免的副产物。有效地解决长寿命、高毒性的放射性废物的处置问题是发展核能应用的基本课题。在过去20年中已提出或研究了多种处置放射性废物的方法，如适当地质岩层中的浅层和深层处置，海底处置，宇宙空间处置，极地冰层处置和核嬗变处置等^[92, 44]。根据现有工艺技术水平，所有提出的方法中，地质岩层处置废物是最可行和最实际的方法。

地质处置方法之一是中放废液（放射性浓度小于 $2.22 \times 10^{11} \text{Bq/l}$ ，主要由半衰期小于50a的放射性核素如铯和钡组成）与水泥及添加剂混合，通过一口深井注入经水力压裂而形成的裂缝，该裂缝处于基本不渗透的岩层内（渗透率低于 10^{-8} 达西）。注入的灰浆在压力下固化，形成薄灰浆层，成为岩层的组成部分（图1），从而废物固定在低渗透性岩层的预定区域内。注射时由水压力形成的裂缝提供了在岩体内接收贮存废物的空间

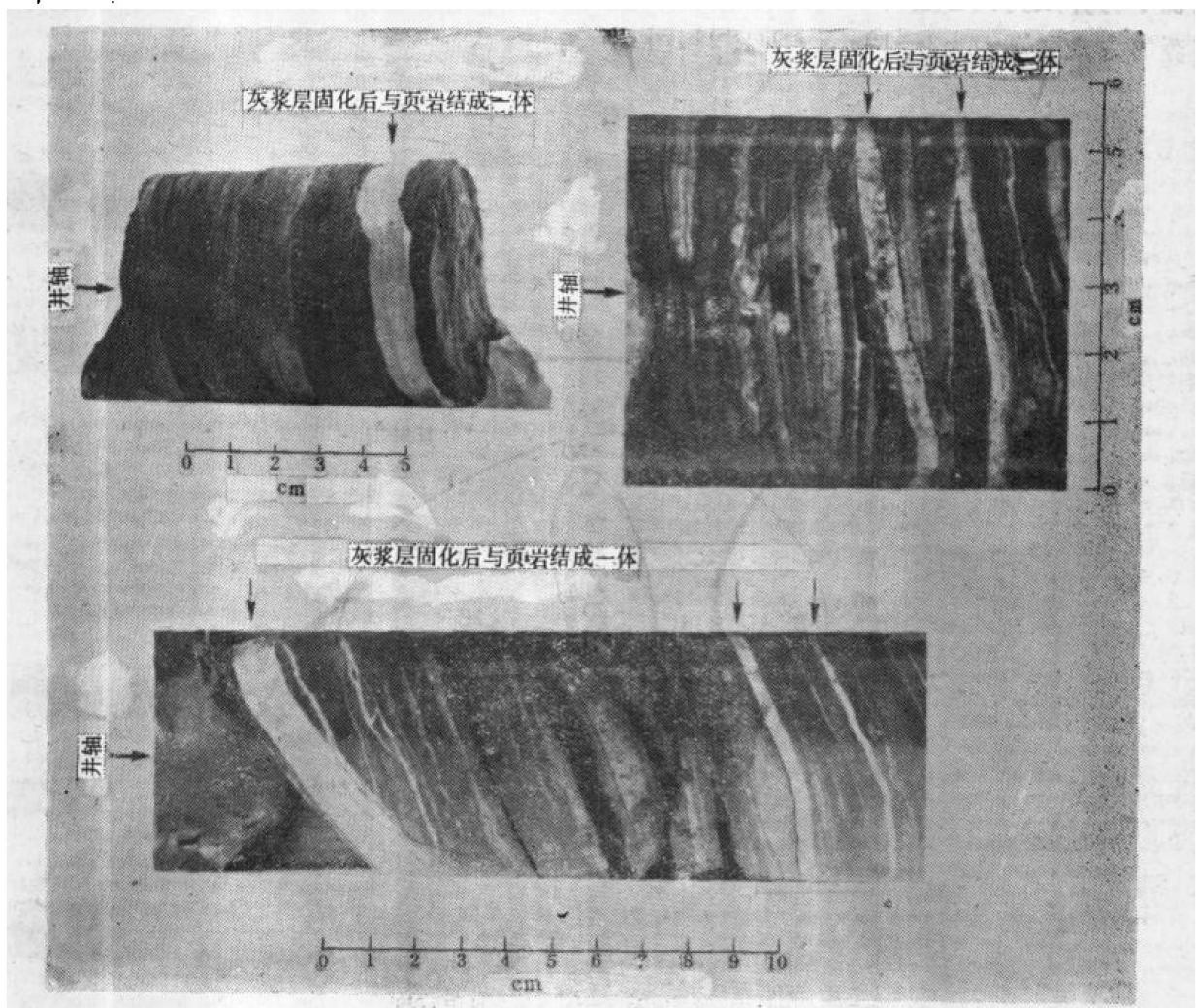


图 1 灰浆层固化后与页岩结成一体的岩芯样
[图示几个岩芯取自几次注射（资料来源：橡树岭国立实验所）]

1947年以来水力压裂技术在石油工业中广泛应用于石油开发^[18,19]。但是,直到1959年才开始进行用水力压裂注射灰浆的方法处置废物的试验。1958年美国大陆石油公司的D.A.Shock向美国原子能委员会(现美国能源部)建议,用水力压裂法将灰浆注入不渗透的岩层有可能用来处置高毒性的放射性废物^[20]。美国原子能委员会采纳了这个建议,并选择橡树岭国立实验所作为实验场地。

用该技术处置放射性废物有如下几项要求:(1)压裂的裂缝应是水平的或接近水平的;(2)废物应在一个确定的区域中被包容足够长的时间,直到放射性核素衰变为无害水平。

从1959年到1960年,在橡树岭国立实验所所在的科纳索加(Conasauga)页岩层两个不同地点进行了三次非实际废物的水力压裂注射试验。灰浆用放射性核素 ^{137}Cs 标记。第一次注射在地表下88m的浅层进行。注射后在注射区内钻了22个岩芯孔。从岩芯看到,固化的灰浆层与层面基本平行(图1)。第二和第三次实验在一口新井中完成,该井位于第一口注射井以东1830m处。注射的灰浆与第一次实验所用的类似。这两次注射分别在井深285m和212m处进行。注射后在第二个实验场地钻了24个岩芯孔。岩芯情况再次证实灰浆层与层面平行并成为页岩层的组成部分(图1)。灰浆层被限制在最大半径为100m的区域内,实测的灰浆层厚度为3—12mm(见图2和图3)

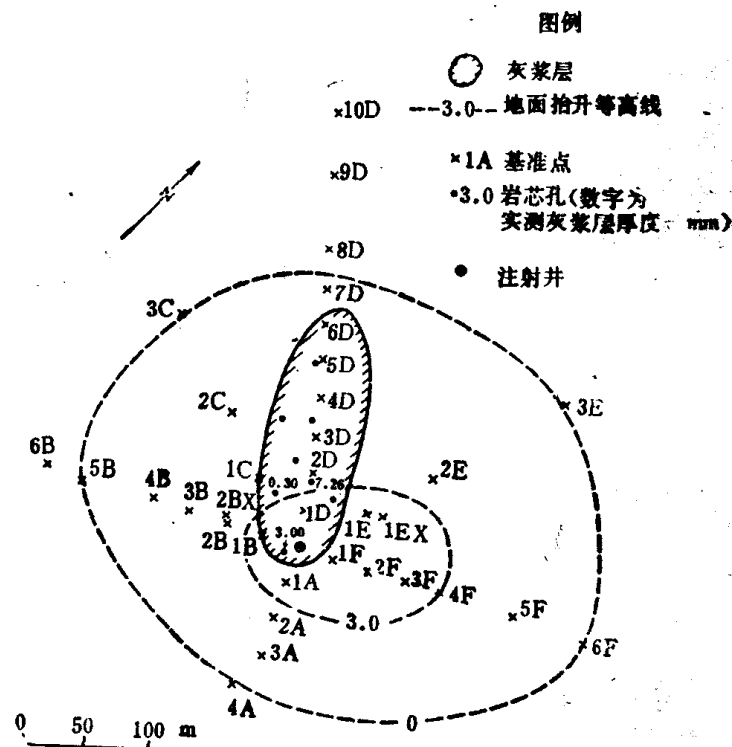


图 2 实测地表抬升、灰浆层范围和厚度

[橡树岭国立实验所(田纳西州)第二实验场地1960年9月3日注射试验结果]

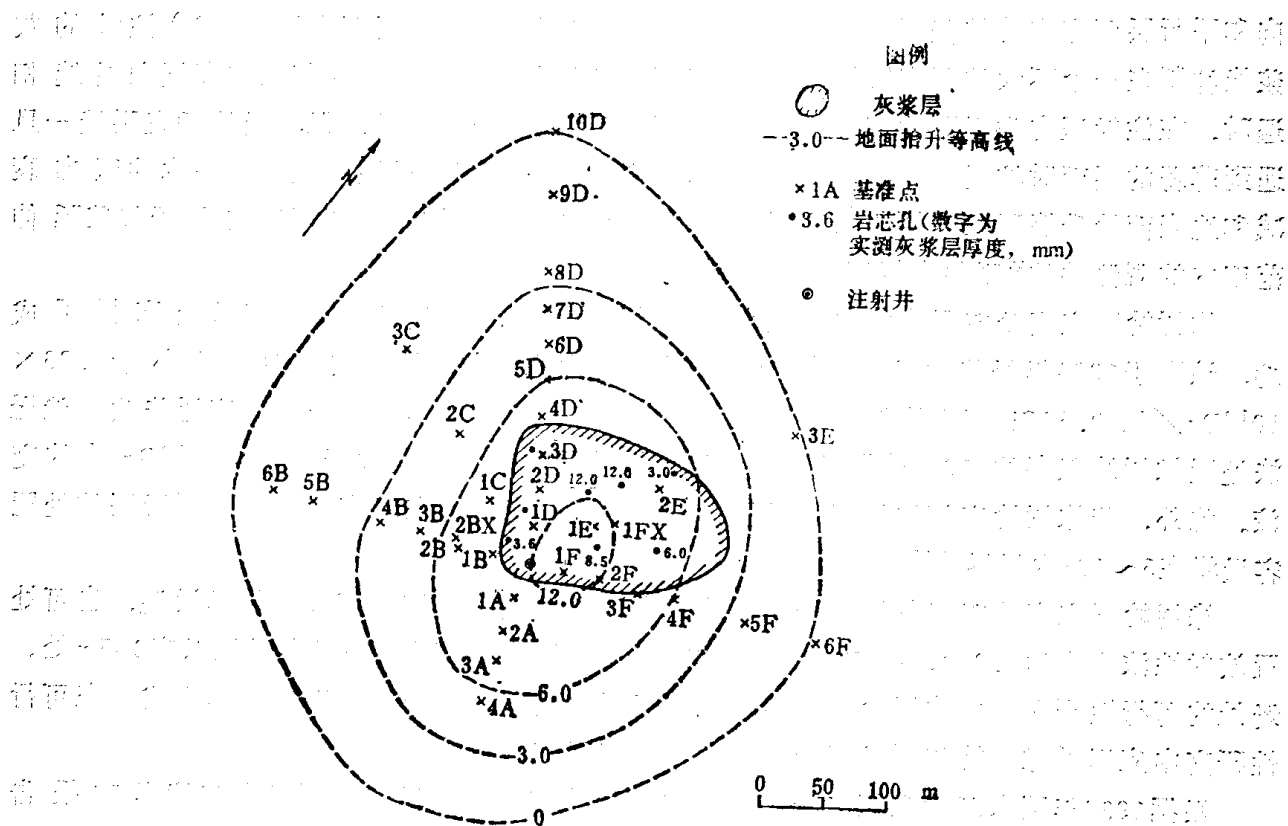


图 3 实测地表抬升、灰浆层范围和厚度

[橡树岭国立实验所(田纳西州)第二实验场地1960年9月10日注射试验结果]

在第二实验场地以西800m的科纳索加页岩中钻了第三口注射井,该井深329m,并下了14cm的套管。从1964年到1965年,用橡树岭国立实验所产生的放射性废液在该井中进行了7次注射实验。注射由深至浅在288m至265m段进行。从1966年到1978年,在该井265m至245m段进行了正规的废液处置运行操作。共注射了由7000m³橡树岭国立实验所放射性废液形成的11000m³灰浆,内含放射性核素 2.37×10^{16} Bq(64万Ci)。取芯和在注射井周围的观测井进行的γ测井也都表明,形成的灰浆层平行于页岩层面[20,21,22,23]。

橡树岭国立实验所的例证表明,用水力压裂法在层状页岩中处置中放废液是可行的。然而,石油油井水力压裂的大多数经验说明水力压裂裂缝一般是垂直的[40]。根据这个经验,地球学家通过美国科学院向美国原子能委员会提出劝告,不要将橡树岭国立实验所场地获得的成果推广应用到其它地区[6]。

鉴于上述劝告,美国原子能委员会在纽约州政府的许可下,主持了一项由橡树岭国立实验所和美国地质调查所联合进行的实验计划,在纽约州凯得洛加斯县近西谷的西纽约核燃料服务中心场地内进一步开展用水力压裂法把放射性废物处置入页岩层的课题试验。该计划的目标如下:(1)论证在另一个地区用水力压裂法将放射性废物处置入接近水平的层状页岩的适用性;(2)发展一种预测和监控水力压裂裂缝方位的经济而实用的方法;(3)研究场址评价的步骤[5]。

从1969年到1971年,在西谷场地进行了6次水力压裂注射试验,除最后一次用灰浆外其余都用水。大多数注射使用放射性示踪剂标记。注射深度从442m到152m。通过试验得到如下结论:(1)在深度小于1000m的层面大致为水平的层状页岩中,因页岩垂直层面方

向和平行层面方向的抗张强度有很大的差异,水力压裂可形成层面裂缝;(2)注射的灰浆能控制在一个不大的预定区域内;(3)当压裂裂缝与岩层中存在的节理和高倾角裂缝相遇时,在注射压力作用下此节理或高倾角裂隙有可能进一步扩展,但扩展的垂直裂缝一旦遇到薄弱的层面时扩展就会终止;(4)压裂裂缝的方位可通过注射压力、注水的压力衰减和地表面抬升等现象间接加以监测,若灰浆含有 γ 放射性核素,则可通过位于灰浆延伸范围内的观测井的 γ 测井直接测定^[78, 81]。

橡树岭国立实验所现有的水力压裂处置厂是为注射试验设计的。由于试验取得了成功,该厂于1966年经修改成为常规处置放射性废物的厂房,处置放射性浓度小于 $1.96 \times 10^{10} \text{Bq/l}$ (0.53Ci/l)的放射性废液。这个处置厂的设备不作进一步的广泛修改,就无法处置橡树岭积存的 1500m^3 化学淤泥,也无法处置放射性浓度大于 $1.96 \times 10^{10} \text{Bq/l}$ 的废液。此外,若橡树岭废液的年产生量保持现有水平不变,则在现有厂房下,页岩层的处置容量将在5~10a内耗尽^[85]。

橡树岭国立实验所准备建造一个新的水力压裂处置厂,该厂可处置化学淤泥,也可处置放射性浓度高达 $2.22 \times 10^{11} \text{Bq/l}$ (6Ci/l)的废液。新厂位于现有厂址以南245m处。场址的可行性研究已由橡树岭国立实验所和美国地质调查所合作,于1974年完成。在可行性研究中应用了橡树岭和西谷在一系列实验中所建立的方法。

根据1969年国家环境政策法令,所有主要的政府工程项目都需要提出环境影响报告书。报告书应就每一项拟定的行动对环境造成的所有可能的影响作出评价,同时也要对拟定的行动有哪些可行的替代办法作出评价。橡树岭国立实验所准备建造的新废物处置厂的环境影响报告书得出如下结论,用水力压裂法处置橡树岭的放射性废液是所有可采用的方法(例如大罐贮存和玻璃固化法)中最安全和最经济的方法^[86]。

1. 1 目的和范围

在页岩层内用水力压裂灰浆注射法地下处置一定类型放射性废液的可行性已在美国经过研究并得到了充分验证。本报告的目的是向负责安排、批准和实施放射性废物处理计划的有关当局提供指南,以便对采用水力压裂法处置中放废液(放射性浓度小于 $2.22 \times 10^{11} \text{Bq/l}$,含有的核素主要是半衰期小于50a的锶和铯等)的合理性作出评价。本文所含的资料也希望对选择和评价合适的处置场地有所帮助。报告内容也包括处置方法的安全评价。废物处理当局利用有关资料在各种处置方法中评价水力压裂处置技术时,安全评价(即处置废物至少能在规定时间内安全地被隔绝在岩层内)是十分重要和必要的。本方法与其它处置方法的风险分析比较不属于本报告的范围。

本报告提供相当多的理论讨论和典型实例,以方便读者评价本报告的结论是否恰当。

1. 2 致谢

本报告是为国际原子能机构提供的报告,由美国能源部废物管理局委托编写的。

作者向橡树岭国立实验所的R. A. Robinson和H. O. Weeren致谢,感谢他们提供了橡树岭水力压裂处置的资料。作者也曾得到美国地质调查所的R. A. Farrow的帮助。在橡树岭场址评价调查中R. A. Farrow协助测定了页岩岩芯的扩张强度。

第二章 破裂力学理论

岩体形变可分为三种主要类型：(1)褶皱；(2)剪切断裂；(3)张性断裂。从理论上说，褶皱是岩体在应力作用下发生形变，但宏观上没有失去连续完整性。剪切断裂是岩块沿破裂面位移的结果。断裂是剪切断裂的专门例子。张性断裂是岩体垂直于最小主应力方向的分离破坏，没有平行破裂面的位移。张性断裂过程包括粘结力消失、分离成两部分以及释放贮存的弹性应变能〔2〕。节理和水力压裂破裂属于张性断裂。

有三种较成熟的理论可应用于岩体破裂过程，它们是：(1)库伦-纳维叶 (Coulumb-Navier) 理论；(2)莫尔 (Mohr) 理论；(3)格里费斯 (Griffith) 理论〔47〕。前两种理论适用于岩体在最大剪应力作用下的破坏过程。最后一种理论讨论了岩体在张力作用下的破坏过程，可用于解释张性断裂。因此，只利用格里费斯理论来讨论水力压裂力学。

裂缝的形成包括两个阶段，即裂缝引发阶段和裂缝延伸阶段。岩体本身原有的一条或数条裂隙开始扩张破坏的过程称为裂缝引发阶段。紧接着裂缝引发阶段之后的裂缝扩展的过程是裂缝延伸阶段。有两种裂缝延伸，稳定延伸和不稳定延伸〔6〕。

稳定裂缝延伸时作用的应力和裂缝长度之间存在着确定的关系，因此裂缝扩展能得到控制，这种裂缝延伸可在静力学条件下加以检验。如果裂缝扩展不是由应力而是由诸如延伸速度等其它因素支配的，这种裂缝扩展就成为不可控制的；在固定载荷下裂缝迅速扩展至材料完全破坏，如玻璃的破裂。这种延伸称为不稳定延伸，具有动力学的特点。

水力压裂裂缝的扩展取决于所施加的水的压力，一旦施加的压力下降到低于临界值，裂缝的扩展即行终止。因

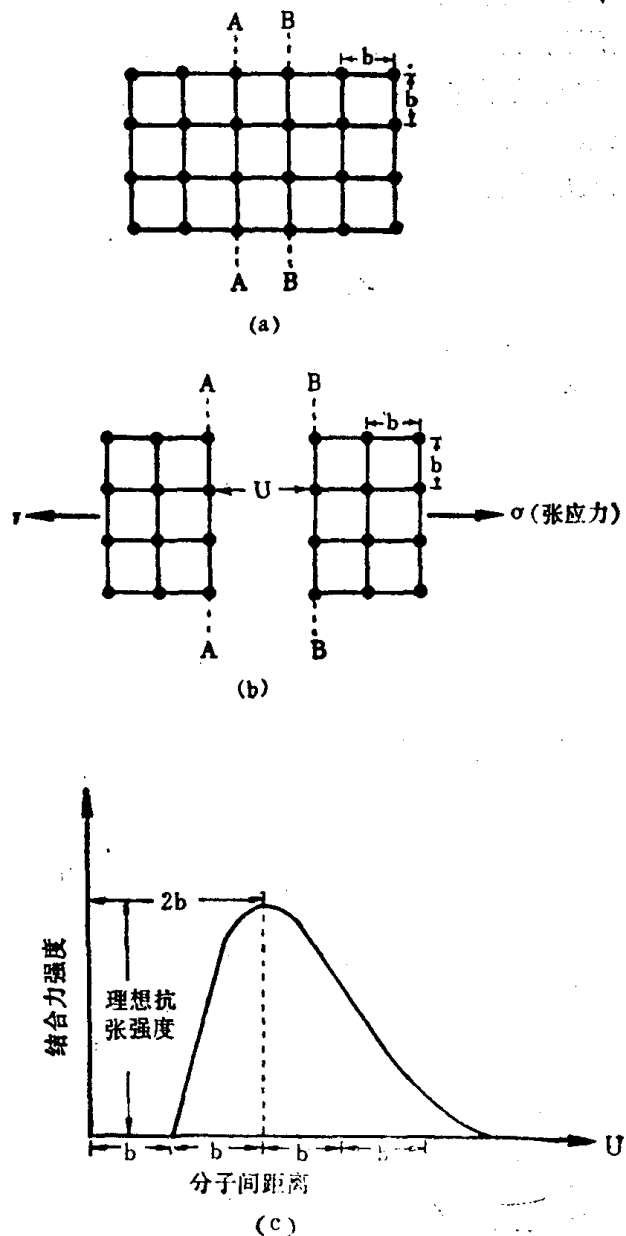


图 4 张应力作用下完美晶体的破裂〔14〕
(a) 处于平衡条件下的晶粒；(b) 两个分子面被拉开；(c) 张应力作用下的理论结合力。

此，水力压裂裂缝的扩展属稳定延伸。

沉积物沉淀时单个颗粒互不关联，沉积物不具有粘结力。当沉积物长期被埋在后来的沉淀物下，就被压实并胶结。压实和胶结导致颗粒间相互粘结，于是岩块就具有粘结强度或抗张强度。胶结和压实作用越强，结合力也就越大。

张性破裂裂缝延伸时，必须做功克服垂直于破裂面的应力及裂缝末端颗粒间的结合力。当水压增大但还不够大时，岩体中原有的裂隙并不扩展。当水压力达到某一临界值，超过垂直应力与裂缝末端的最大结合力之和时，裂隙才开始扩展。

在完美晶体中，处于张应力作用下的结合力是分子间距离 b 的函数〔14，49〕，如图4所示。

让我们考虑在张应力作用下两个微粒面的情况。未加张应力前分子结合力为零。在张应力作用下结合力随分子间的距离增加成比例地增加；当分子间距离增大到平衡距离的两倍时，结合力达到最大值。分子间距离进一步增大，结合力反而减小；当分子间距离大于平衡距离的四倍时，结合力趋近零。最大分子结合力定义为所考虑材料的理想抗张强度，即此材料处于完美晶体条件下的抗张强度。材料的实际抗张强度通常比理想抗张强度小几个数量级，这是因为：（1）晶体结构的缺陷；（2）组成材料的碎屑颗粒其矿物成分的差别以及胶结程度的差别；（3）胶结物类型的差别。

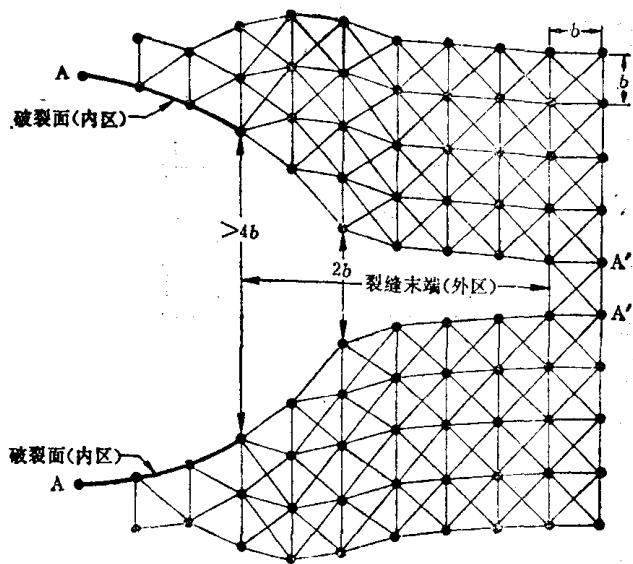


图5 裂缝末端分子结构示意图

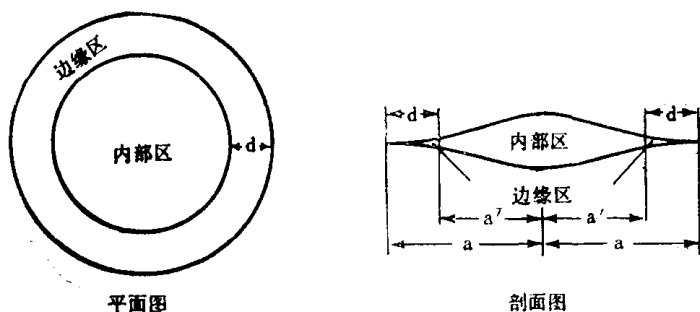


图6 脆性破裂的两个区域〔8〕

图5是表示裂缝末端周围理想化的分子结构示意图。考虑裂缝从左至右扩展。当张应力增加时，裂缝末端的第一对分子开始分开，应力越大，分得越开。分子间距离从平衡条件 b 增加到 $2b$ ，再到 $4b$ ，以上即为破裂的全过程，裂缝扩展了一个分子间距离 b ，与此同时，作用的应力减小。这样，第二对分子又成为新的裂缝末端。作用的应力又一次增大和减小。破裂过程从一对分子到另一对分子持续进行。

为避免解破裂问题的复杂的非线性积分方程式，Barenblatt〔3〕将破裂区分为两个部分（见图6），即内部区和边缘区。

在内部区，两个相对的破裂面距离较远，不存在分子结合力，因而可认为破裂面不受此种应力的作用。弹性线性理论完全适用于该区域。在边缘区，相对的破裂面靠得很近，它们之间存在着很强的分子结合力，出现塑性屈服。为避免复杂的非线性弹性理论，使破裂问题

在线性理论范围内得到解决, Barenblatt做出了两点假设: (1) 边缘区的尺寸与整个裂缝尺寸相比是小的; (2) 当裂缝扩展时, 边缘区垂直于破裂面的剖面形状不受裂缝中压力的影响, 在给定的温度和组成条件下保持不变。进一步讲, 也就是说破裂面上的分子结合力的分布情况也不受裂缝中压力的影响, 在给定条件下保持不变。作者认为这些假设是切合实际的。

基于上述假设, 裂缝末端的平均结合力定义为 fT , T 是岩块平均抗张强度, f 是由岩石物理性质确定的常数。 f 值范围为 $0 \leq f \leq 1$ [3, 28, 48, 68, 72]。

第三章 放射性废物注入水力压裂裂缝的控制因素

用水力压裂技术将放射性废物处置入地质岩层的工艺是将废液与水泥和添加剂混合,然后加压将废液水泥浆通过注射井挤注到地下岩层。注射井充分贯穿基岩,全井下套管并注水泥固井。注射前用水砂喷射技术在套管和水泥壁上割出360°的水平缝,并一直穿透到基岩。施加的水压将岩体分开,形成容纳注入灰浆的空间。通常先注水使预先切割出的水平缝的末端引发裂缝。裂缝引发后,紧接着就注射废液灰浆。注入的灰浆在压力下凝固。固化后注入的灰浆就成为基岩岩层的组成部分,废物被固定在一个限定的区域内。通过同一切割缝可接连进行2~3次注射,然后用水泥堵塞旧切割缝到下一个注射深度,再次用水砂喷射形成新的水平缝。废液注射从井底开始向上多次进行,直到注射岩层的处置容量耗尽为止。

水力压裂技术处置废物最令人关心的问题在于基岩中能否形成水平裂缝,从而使注入的废物被固定在一个预定的区域内。绝大多数油井水力压裂的经验表明,水力压裂形成的裂缝一般是垂直的〔40〕,垂直裂缝不适合用来处置放射性废物。水力压裂法形成水平裂缝的可能性将在下面讨论。

讨论基于下述假设,岩层是各向同性的和均质的。显然,实际情况并非如此。地质岩层一般是非均质和各向异性的,尤其是页岩层更是如此。然而,根据橡树岭国立实验所和西谷的实验结果,上述的简化假设看来是能成立的〔77~79, 81〕。这些实验情况收编在附录中。

3.1 地应力

地层一定深度的裂缝扩展时,裂缝中施加的压力必须克服垂直于裂缝面的应力和裂缝末端的结合力。因此,在水力压裂过程中必须考虑垂直于裂缝面的地应力的大小。

在深处某一给定点的应力大小,一般说是三种应力分量的总和。它们是:(1)重力应力;(2)构造应力;(3)岩体中流体的压力。

重力应力主要由上覆岩层的重量引起,但要区分两种情况:(1)现有地形条件产生的应力作用;(2)过去地形条件产生的应力作用。构造应力是由地壳变动引起的,这类变动是各种因素影响的结果,如温度、地球化学作用等。流体压力产生于孔隙内的流体如石油、天然气和水。

3.1.1 垂直地应力

考虑岩层内笛卡尔坐标系(其Z轴处于垂直方向)中深度Z处的一个岩石小单元(图7)。

以垂直应力表示的平衡方程式如下〔47〕:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \rho g = 0 \quad (1)$$

式中, σ_z ——垂直应力;

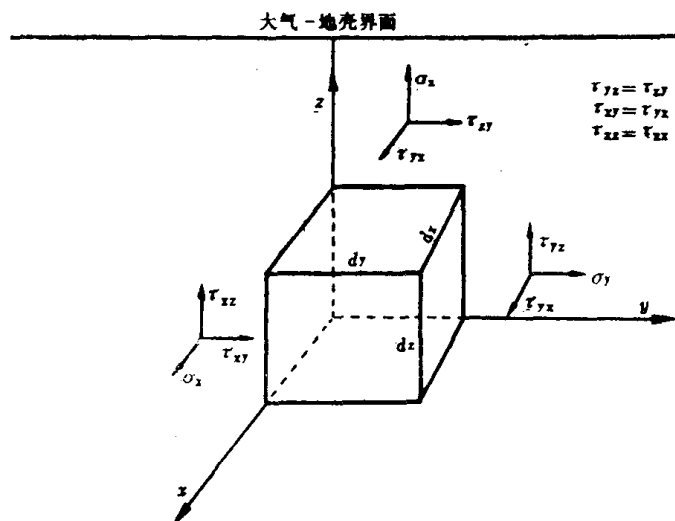


图7 作用于深度 z 的小长方体单元上的应力

τ_{yz}, τ_{xz} ——剪切应力；

ρ, g ——分别为岩石密度和重力加速度。

式(1)对 z 积分得

$$\sigma_z = \gamma z - \int_0^z \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dz - \int_0^z \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dz \quad (2)$$

式中, γ 为上覆岩层的相对密度(ρg)。Howard^[37]认为式(2)只有三种特殊情况使垂直应力等于单位面积上覆岩层的重量,但在地质学的观点上,只有其中的两种情况是可以采纳的。

第一种情况,在地形平坦和构造简单的区域,沿大气-地壳界面不存在剪切应力分量,于是,

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (3)$$

垂直应力就等于单位面积上覆岩层的重量。

第二种情况,岩体通过长期蠕变造成弛张,剪应力减小,于是,

$$\int_0^z \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dz = \int_0^z \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dz = 0 \quad (4)$$

此时,垂直应力又等于覆盖层的压力。

第三种情况, x 轴和 y 轴的剪切应力相等但方向相反,于是,

$$\int_0^z \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dz = - \int_0^z \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dz \quad (5)$$

这种情况在地质上是不大可能发生的,条件的局限性很大,特别在与选择 x 轴和 y 轴的地理方向问题结合时,情况更是如此。

结论:在地形比较平坦和地质构造简单的区域,垂直应力能由单位面积上覆岩层的重量进行计算。然而,在地形不规则或地质构造复杂的区域,垂直应力可能等于覆盖层的压力,也可能不仅仅等于覆盖层的压力。

3.1.2 水平地应力

尚没有合适的解析模型可用于估算水平应力。然而土壤力学的经验有助于说明水平应力和垂直应力的关系。

例如, 考虑碎屑沉积物沉淀积累的简单情况, 沉积物受到的主应力仅来自覆盖层压力。应力与应变关系是单个碎屑质点间的动摩擦系数、质点结构排列和质点弹性常数的函数。当横向应变为零时, 颗粒间水平应力和垂直应力的比值叫做“静止地层压力系数”, 用 K_0 表示^{〔67〕}。由文献〔8, 87〕给出的经验式为

$$K_0 = 0.95 - \sin\phi \quad (6)$$

式中, ϕ 是碎屑沉积物的内摩擦角。

应当强调指出, 微小的应变就对水平应力有显著影响。曾发现, 应变在 10^{-3} 数量级就足以引起抗剪强度, 也就是将水平应力对垂直应力的比值减小到“活动地层压力系数” K_a ^{〔87〕}, 此处,

$$K_a = (1 - \sin\phi) / (1 + \sin\phi) \quad (7)$$

地质上对有关横向制约的详细情况知道得很少, 尚待进一步探索。Voight^{〔87〕}相信某些类型沉积盆地的水平应变事实上可能消失。水平应力系数 K (定义为 σ_h/σ_v) 必定在活动地层压力系数和静止地层压力系数的限值之间, 并给出下式:

$$(1 - \sin\phi) / (1 + \sin\phi) \leq \sigma_h/\sigma_v \leq (0.95 - \sin\phi) \quad (8)$$

一般来说, 无节理的硬沉积岩如砂岩和石灰岩, 其内摩擦角 ϕ 为 $27 \sim 30^\circ$, 软沉积岩如页岩和泥岩, 内摩擦角 ϕ 为 $0 \sim 20^\circ$ ^{〔24, 32, 67, 47〕}。于是, 对硬沉积岩, σ_h/σ_v 可以考虑在 $0.33 \sim 0.55$ 之间, 对软沉积岩, 在 $0.49 \sim 0.95$ 之间。美国含有砂岩和页岩的沉积盆地, σ_h/σ_v 的测量平均值等于 0.6 ^{〔65〕}。

实验室实验表明, 岩石样加荷和卸荷过程中存在滞后效应^{〔8, 87〕}, 卸荷过程的水平应力高于加荷过程的水平应力 (图8)。

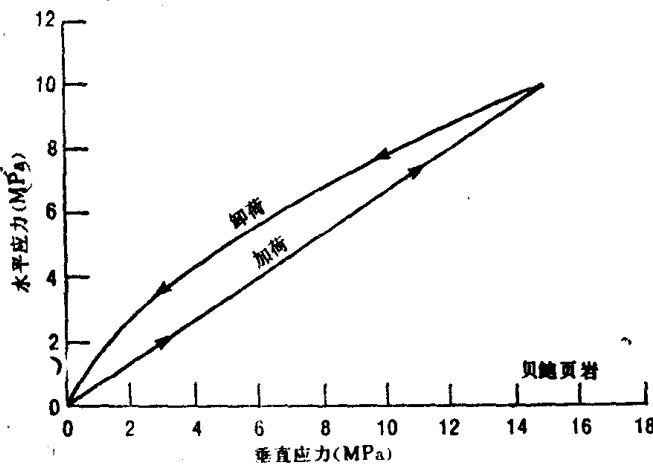


图8 贝鲍页岩(Bearpaw Shale)单轴抗压试验加荷和卸荷过程的滞后效应

如果滞后效应存在于经历过严重侵蚀或第四纪冰川卸荷的区域, 则水平应力有可能高于根据现有覆盖层压力计算的数值。

3.1.3 构造应力

以上讨论的地应力仅是重力应力的结果。除此以外, 岩体也承受构造应力。可惜还没有可用来估算构造应力的解析理论。还应当指出, 存在现时构造应力的区域不一定局限于地震活动区, 也不一定具有反映过去应力分布的构造特征。现时应力和由过去形变形成的构造

之间不一定具有几何联系。积累的大量地质迹象表明, 在多次发生形变的区域, 应力方向可随时间有显著的变化。而且, 在被认为是地质稳定的区域, 也能存在明显的现时构