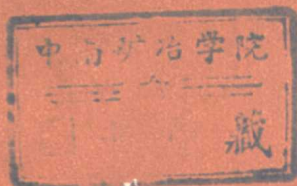


332950

# 放射性废物盐矿处置



原子能出版社

## 前 言

原子能工业生产的各个环节，都有放射性废物产生。随着核动力堆的迅速增加，核武器生产的发展和原子能应用领域不断扩大，放射性废物的产生量和积累量正在急剧增长。严格控制放射性物质对环境的污染，是需要解决的重要课题。目前，国外放射性三废的处理和处置与原子能工业发展的速度很不适应，与主工艺相比，三废处理工艺还相当落后，至于放射性废物的最终处置尚处于探索或设想阶段。

原子能工业的放射性废物，按放射性强度计，99%以上来自核燃料后处理工厂。从反应堆卸出的辐照燃料中，还有可裂变物质和其它有价值的物质。这种辐照过的核燃料，冷却几个月到一年后，使短寿命的裂变元素衰变掉，然后运到后处理厂，把辐照核燃料中的裂变产物分离掉。在普雷克斯（Purex）流程的第一循环，即共去污循环中，约99%的裂变产物留在含硝酸盐的高放废液中。除了高放废液以外，核燃料后处理厂还产生大量的中放和低放废液。

对于低放废液，由于其量大，而放射性水平低，一般都是适当去污净化以后，往江、湖、河、海或浅表地层排放。去污净化过程中产生的蒸残液、泥浆和废树脂，通常经沥青固化或水泥固化后长期贮存或处置。对于中放废液，一般先用大罐贮存，然后固化处理。如法国、西德、比利时，采用沥青固化法或水泥固化法进行固化，最后作为固体废物处置。但有的国家直接采用深地层排放（如美、苏），和海洋排放（如英国）的。对于高放废液，英、法等国主要以酸性

形式贮存在不锈钢大罐中，美国则用氢氧化钠碱化后贮存在碳钢大罐中。到1974年6月底为止，美国两个钚生产基地贮存高放废液的碳钢罐已发生26起泄漏事故：在泄漏比较严重的汉福特，152个高放废液罐中已发现有18个泄漏，泄漏的废液全部渗入地下，泄漏废液的总量在1600米<sup>3</sup>以上；萨凡那河后处理工厂30个废液罐中已发现有6个泄漏。美国碳钢罐多次泄漏，表明了碳钢罐贮存不安全。对于不锈钢大罐，国外认为安全使用寿命也只有15—40年。1969年，美国联邦法律规定：动力堆元件的高放废液应在元件处理后五年内固化，固化废物应在高放废液产生后的十年内送往国家贮存库长期贮存或最终处置。1972年，英国决定八十年代初开始高放废液高温固化，改变了1971年它在第四届日内瓦和平利用原子能会议上对高放废液高温固化的保留态度。近年来，美、法、西德、苏、英等国都开展了高放废液高温固化的研究工作。法国的玻璃固化工作取得了较快的进展。固化后的高放废物如何长期地安全贮存或最终处置，这已成为很多国家急待研究解决的问题。

大家知道，放射性废物中主要核素铯-90和铯-137要衰变到无毒的水平，须经过上千年。少量的铀、钚和其它超铀元素，则需要几十万年才能衰变到无毒水平。显然，在这样长的时期内，要不使这些废物的有危害的量进入人类的生物圈，这是一个艰巨的任务。现在，国外很多科技工作者都在探索研究，如何把这种放射性废物永远地从人类的生物圈中除去，也就是寻找最后处置的方法。这种处置，基本上通过两条途径来达到，一是将有害物质变为无害物质，二是使这类物质不进入人类环境中。近年来，据资料报道有以下几种处置方案：

1. 利用核反应把放射性同位素转变为稳定同位素。这个设想是利用加速器、反应堆、受控热核反应，将长半衰期的放射性核素转变为稳定同位素。这个方案费用很大。

2. 空间处置放射性废物。这个设想是利用现代火箭技术将废物送到宇宙太空中去。应用这种处置技术的主要限制是费用昂贵以及发射系统和推进系统的可靠性、安全性。

3. 南极冰下处置放射性废物。1972年11月在巴黎召开的后处理放射性废物管理会议上，美国地质调查队的报告提议，在南极建立一个永久性的国际高放废物贮存库。把裂变产物固结在玻璃中，运到南极，放在冰上，利用废物放出的热，溶出一个冰罩矿井，然后废物本身被封住。容器慢慢沉到冰-岩石界面。预计废物能在界面贮存十万年。

4. 利用地下盐矿，地下核爆炸形成的洞穴及其它深地层处置放射性废物。根据处置需要，所选场址应是地质构造非常稳定，废物与周围环境、土地、水源、空气有很好的屏障，在符合安全要求的长时间内放射性物质不进入人们的生活环境。

由于地下盐矿的特殊地质构造满足上述要求，目前认为盐矿是一种现实可行的安全、经济的处置放射性废物的场所。1972年和1976年分别在巴黎和维也纳召开的国际放射性废物管理会议上，以及1974年4月美国塔克森（Tucson）废物处理会议上，虽然都对高放废液固化块的长期贮存或最终处置进行了广泛的讨论，议论了种种方案，但大部分只是设想或初步试验阶段，仅盐矿贮存和处置放射性废物作过较多工作。

这本小册子介绍了西德等国对盐矿贮存或处置放射性废物的评价，西德改建阿塞（Asse）废盐矿并用它贮存低、中

放废物的情况和安全性，以及为试存高放废液固化块所作的研究发展工作。

## 一、盐矿处置放射性废物的优点

盐矿处置放射性废物的研究工作早已在西德、美国和其它一些国家进行。

美国对高放废物以固体形式处置在盐矿中的方法比对其方法作了更多的研究。1957年，美国国家科学院（NAS）曾将盐矿处置法推荐作为近期最有希望的最终处置方法。自此之后，美国国立橡树岭实验室对这种技术作过充分的研究和试验。他们曾在堪萨斯州（Kansas）的莱昂斯（Lyons）盐矿进行过放射性示范试验。美国原子能委员会计划建立一个国家放射性废物贮存库，把私营后处理工厂来的固化废物处置在莱昂斯盐矿中。后来，由于发现莱昂斯盐矿附近的钻井有大量水失踪，对贮存放射性废物有影响，所以放弃了这一场址的试验并在堪萨斯州及新墨西哥州另选矿场。

法国的苏塞利尔等人在第四届日内瓦和平利用原子能国际会议上提出，高放废物和含有一定量超铀元素的废物应贮存在盐矿中。

西德认为把放射性废物贮存在盐矿中是最可取的安全、可靠的方法之一，从1963年开始研究盐矿处置放射性废物，他们利用西德北部沃尔芬比特尔（Wolfenbüttel）附近的一个废弃的阿塞盐矿，已经成功地贮存了低、中放废物。他们认为利用盐矿处置放射性废物有如下优点：

1. 岩盐有良好的塑性，可将放射性废物紧密地包覆起

来；

2. 盐层中可以建造坚固的大型硐室；
3. 岩盐导热性好，使放射性废物的衰变热能安全地扩散出来；
4. 盐矿是一种非常稳定的地质层；
5. 盐矿开采成本较低。

盐层的地质是非常坚实的，不会发生地层断裂现象。从地质和历史观点来看，不存在地震的危险。若开采方法适当，不会产生渗水。从其它已经开完的盐矿来看，渗透的淡水被盐饱和以后，便失去了溶解能力。在阿塞盐矿中，假设每天最高的渗水量为5000米<sup>3</sup>，则开始渗到750米深的底部需要三个月的时间。渗透满整个废盐矿，要花两年多的时间。可是，一个硐室仅在六天后盐溶液的饱和度就达到90%以上。实际上，这种盐溶液已失去了溶解能力。因此，不会对间壁和顶盖有很大的影响，也不会出现盐溶液在大范围内的循环。另外，固化的放射性废物的浸出率是非常低的，而且固化物外面还有密封装置。溶解在饱和盐溶液中的放射性核素的扩散在10<sup>4</sup>年内也只移动几百米远，因此，排除了对地下的污染。因此，把放射性废物贮存在盐矿中几千年，甚至几百万年也是安全的。

## 二、阿塞盐矿的地理、地质情况

阿塞盐矿是从1906年开始开采的，1964年关闭。1965年德意志联邦共和国买下了阿塞盐矿，交给慕尼黑辐射和环境研究公司（GSF），该公司同卡尔斯鲁厄核子研究公司

(GFK) 合作, 制订了对放射性废物盐矿处置的庞大的研究和发展计划, 阿塞盐矿成了西德研究和发展盐层处置放射性废物的重要设施。

阿塞盐矿经过地面、地下设施改建以后, 1967年4月开始低放废物贮存试验。经历了三个试验贮存阶段后, 1971年起常规处置低放废物。1972年夏季开始处置中放废物。至1976年2月, 已处置了62000个容器的低放废物和746桶中放废物。这两类废物的处置工艺正在继续发展。另外, 为了试验无屏蔽条件下通过一个小口径竖井直接处置中放废物, 阿塞盐矿正在建造一个原型洞穴, 预计这个洞穴将在1979年初开始运行。同时, 为了在八十年代初试验处置高放废物, 积极进行着研究和发展工作。

阿塞盐矿位于下萨克森 (Lower Saxony) 联邦州的不伦瑞克 (Brunswick) 东南约20公里的地方。

阿塞是近8公里长的小山脉。它是哈尔茨 (Harz) 山脉的北前沿。其走向是从西北到东南。与绝大多数其它北德盐穹不同, 阿塞地质构造相当简单。它是由三迭纪的不对称背斜作用形成的。其南侧接近垂直, 而北侧的地层首先陡峭倾斜, 然后向北平坦。北侧相对于南侧已升高了400—500米, 所以在北侧露出了老地层。在早三迭纪和中三迭纪的沉积层下面有几百米厚的背斜盐层, 它是二迭纪镁灰岩系地层形成的。

阿塞盐矿的岩盐是在1906—1964年期间开采的, 在这期间, 在古老的和年轻的岩盐 ( $\text{Na}_2$  和  $\text{Na}_3$ ) 中, 挖出了145个硐室, 分布在距地表490—800米深的15层上。这些硐室的总容积为  $3.5 \times 10^6 \text{米}^3$ 。仅其中一部分能直接用来处置低放和中放废物。在年轻岩盐中, 一般硐室长60米, 宽40米, 高





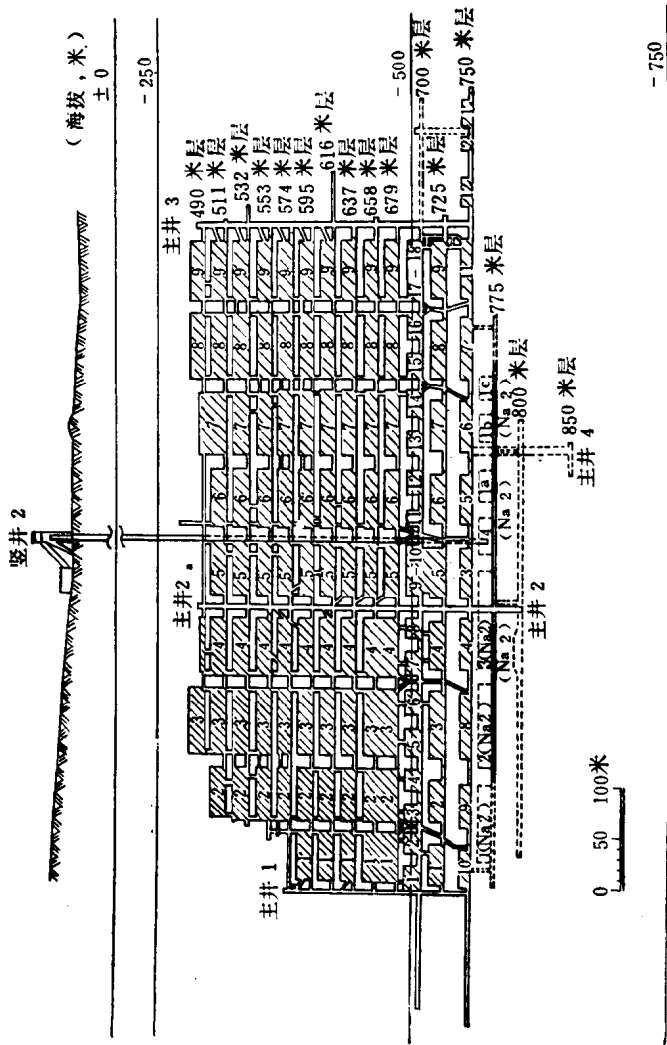


图 2 阿塞盐矿的纵截面图

15米，其容积约为36000米<sup>3</sup>。

阿塞盐矿的盐是在二迭纪地质年代（距现在约220—200百万年），由海洋蒸发而来的。大约110百万年前，原来层状盐通过地壳构造过程折皱而成为现在形状。阿塞的地质构造比西德北部或墨西哥海湾沿岸的许多其他盐穹简单得多。在侧面它没有突出的典型的蘑菇形横断面。所以，实际上它不是盐穹，而是盐背斜。尽管如此，在这背斜中的盐是很纯的。像盐穹一样，在深处都留下了页岩、硬石膏、白云石的夹心层，这在层状盐矿中是经常遇到的。这是由于这些矿石比起具有塑性的盐来要硬和脆得多，在地壳构造折叠时被留在深处。

阿塞盐矿这种地质成因，使它具有以下四个特性，有利于用来处置放射性废物。

1. 它的岩盐比较纯，这对岩盐力学性能和处置高放废物后热扩散是很重要的。

2. 盐背斜的深度较深，盐底至少在地表面以下1500米处，可能更深。从地质研究和从北德同样年龄的其它盐穹估计，矿底可能在地表面以下2000—3000米之间。在盐背斜中，可处置高放废物的平面区要比层状盐矿小，但用钻深洞来贮存固化的高放废物，上述缺点能得到弥补。因为这种背斜越往下深入盐层越宽，废物产生的热量容易被盐传导出去。

3. 阿塞盐矿盐层下面是基底岩石，它们是由古生代岩石构成。这种岩石极其坚固，从来没有记载过西德北部地下的底层岩石发生地震。

4. 背斜的侧面被不渗水的硬石膏和页岩覆盖着，所以地下水和盐不能直接接触。1969年，地质钻孔钻到了背斜的

顶上，钻孔证明：冠岩是粉砂岩、石膏、硬石膏的混合物，是完全干燥的，盐和覆盖层之间接触的表面没有任何水或盐水。

但是，有以下一些弱点，限制阿塞盐矿成为大量高放废物和 $\alpha$ 废物的最终贮存库。

1. 在阿塞背斜有一厚层光卤石钾碱盐，其组成为：大约52%光卤石、30%岩盐、14%硫酸钡和少量其它组分。光卤石是水合氯化钾和氯化镁，其化学式为  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 。这个矿物加热到温度超过 $110^\circ C$ ，脱水成无水化合物，温度超过 $165^\circ C$ ，甚至放出盐酸气体。此外，光卤石在压力下特殊蠕动，因此强度很低。它在水中和在饱和氯化钠溶液中溶解度相当高。

2. 从西德钾碱和盐矿的历史资料来看，不能完全排除阿塞盐矿在某一时候会发生洪水。在1906年，位于西面1.5公里的阿塞矿I曾发生过洪水。

3. 矿中存在少量饱和  $MgCl_2$  的盐水，会对贮存容器产生腐蚀。

4. 现有测定和计算方法尚不能试验和预言复杂地下系统几千年期间岩石力学稳定性和安全性。

由于这些原因，西德不打算把阿塞盐矿用作为高放废物和 $\alpha$ 废物的贮库。但是，用来贮存和处置低、中放废物则是完全合适的，并且将在这里试验贮存高放废物，以发展和提供处置工艺，获得安全方面的经验等。因此，阿塞盐矿在现在和将来的相当长时间内仍然是西德核燃料循环中的重要设施。

### 三、为利用阿塞盐矿处置放射性 废物所作的研究

#### 1. 矿山周围空间的观测

1967年和1968年，在阿塞竖井的光卤石区域进行了会聚性测量。在盲井2的637米层到700米层之间，废弃部分的矿层运动由12个测量点进行观测，用遥控指示记录。固定安装会聚性测量器，在490米和511米底层的40个地点，观察坑巷和回采出现的会聚。

测量这些点对巷道侧面、底或顶的相对运动。为了得到绝对值，补加30个与相对测量点成角度的参比点，并在490米层固定点网中，设置了20个水准仪点。不时在50个点的测量圈内作会聚测量。

为了查明可能有的沉降，在地表上扩大固定点网。

#### 2. 温度研究——调查矿层中的热扩散

为了查明阿塞盐矿的岩盐矿石中的热扩散，进行了温度研究。

首先，在490米层的4\*室来试验加热器和测量设备。在这项准备性质的研究结束以后，把该室改建为研究场地Ib。在这项研究中，把两台电加热器装在矿坑侧面开辟的孔道里（见图3、4）。加热器I处于8.12米深处，加热器II处于3.25米深处。用中心对准器将加热器在孔道中对准中心。加热元件以及周围盐石的温度用镍铬-镍铝合金热电偶来测定，用一

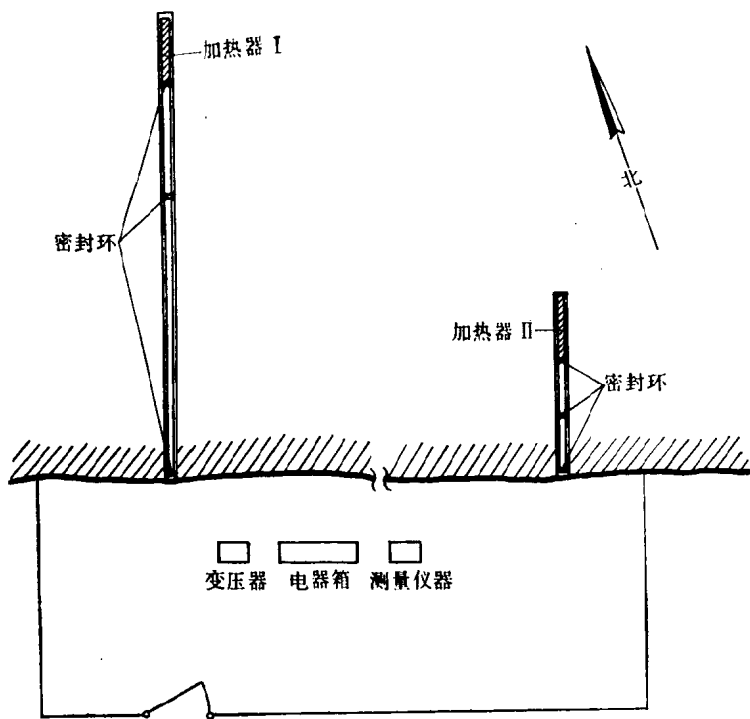


图3 490米层上的4<sup>号</sup>室(温度研究场地Ib)

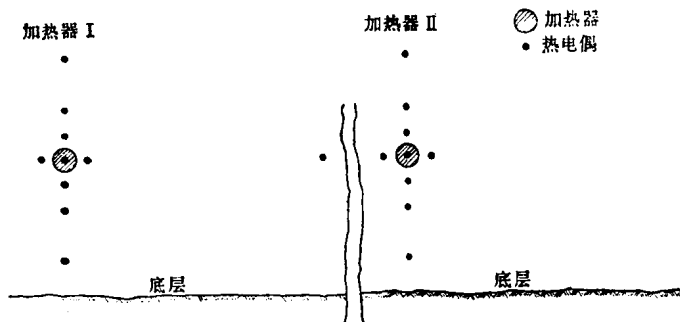


图4 阿塞矿490米层温度研究场地Ib 加热器和热电偶的分布

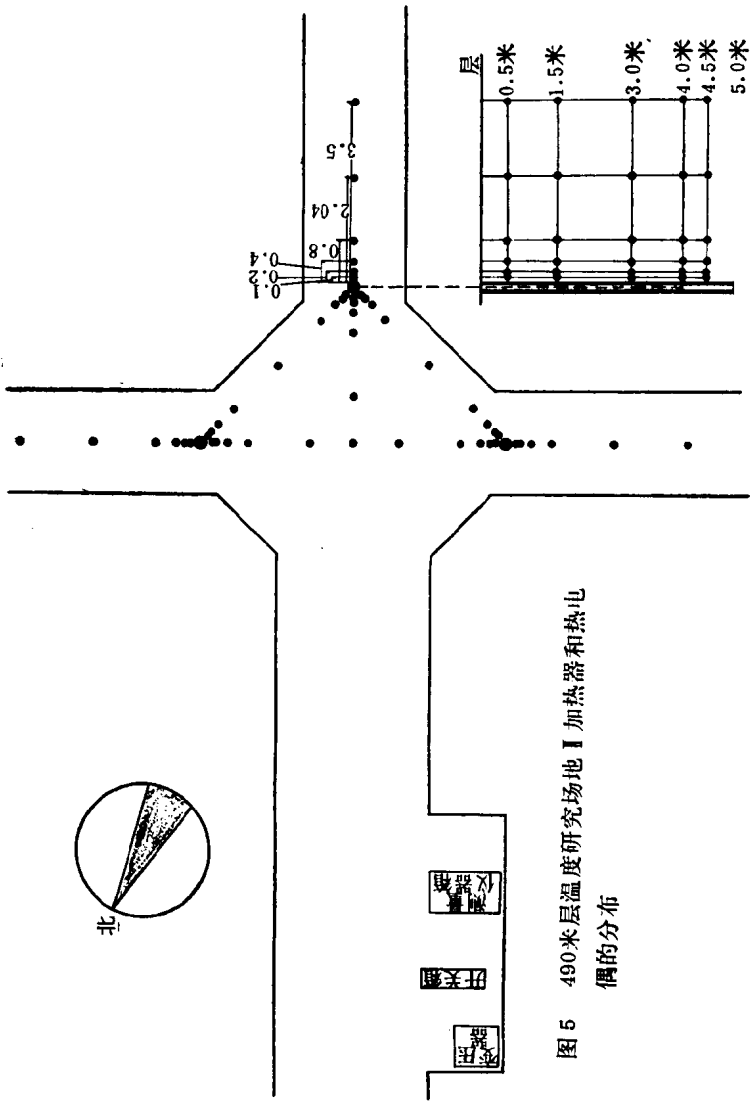


图5 490米层温度研究场地Ⅱ加热器和热电厂的分布

补偿记录器来记录。每一加热器电功率调节到1.5千瓦,这相当于将来贮存的高放废物的比功率。

连续试验超过5700小时。加热器中温度在开动后短时间达到215—240°C,最后达到225—240°C。详细的研究结果发表在“在温度研究现场Ib矿层的热扩散和变形行为”的报告中(见GSF-T16)。

该项研究结束之后,在490米底层温度研究场地II(见图5)施工。它呈十字形,每支段20—25米长。在研究现场的中心有三台圆柱形电加热元件,装在距底部5米深处。热扩散由96个测量点进行观测。这项大型研究是同汉诺威(Hannover)的国立土壤学院的地温学教研室密切合作进行的。

### 3. 水文学研究

卡尔斯鲁厄核子研究公司同辐射和环境研究公司(GSF)的放射性液体比重研究部密切合作下,1968年提出了水文地质研究提纲,接着将此提纲付诸实施。为弄清阿塞盐矿东部和西部水文地质情况,采用1:10000比例尺的特殊地质地图,在井水、泉水、污水渠安排了64个测量点,并进行地形拍照。在这些测量点,对温度、pH值、电导和水的注入量按月进行测量。

对大约一半取样点,进行了化学全分析,其中部分在汉诺威的下萨克森土壤研究局进行,部分在博丘姆(Bochum)的威斯特伐里亚(Westfalen)联合采矿组织的会计处进行。在同位素地质化学中心实验室,对两个高含盐量的泉水测定了同位素硫-34的含量。这样的测定,为确定盐分来自哪种类型的地质岩层,提供了重要线索。

#### 4. 材料耐腐蚀研究

为了研究热、盐、盐液和放射性辐射对材料的影响，制造高放废物的贮存容器以及解决在盐矿中贮存的问题，对15种不同材料进行了考验。每种材料制成六个样品，其中三个在实验室、三个在盐矿进行长期试验。试验的材料是根据生产厂家所提供的耐腐蚀性等级进行挑选的。

研究结果，是同卡尔斯鲁厄工业大学的工具机械和企业技术系合作审定的。部分样品的辐照是在核研究公司的放射化学研究所中进行的。

表1、表2是所选材料的一些试验结果。

表1 盐矿中腐蚀的研究  
(试样在300°C的盐中)

材 料 名 称	材料腐蚀损耗,毫米/年	穴状腐蚀
炭素工具钢 (NCT)	0.0106	无
超级 V2A 不锈钢 (V2A supra)	0.0019	无
策克斯 A18S (Cekas A18S)	0.0058	有
雷马尼特冷韧工具钢 (Remanit HC)	0.0019	无
雷马尼特 1880 (Remanit 1880)	0.0058	有
太尔马克思耐热镍基合金11A (Thermax 11A)	0.0019	无
高温用钢 ATS 115 (ATS 115)	腐蚀覆层	无
高温用钢 ATS 200 (ATS 200)	0.0194	无
V2A 不锈钢 (V2A)	0.0078	无
哈斯特耐腐蚀镍基合金 C (Hastelloy Alloy C)	0.0039	无
哈斯特耐腐蚀镍基合金 (Hastelloy)	不能测量	无
因科镍合金 825 (Incoloy 825)	0.0291	无



表2 在实验室中腐蚀研究  
 (试样在浓盐液中, 用 $\gamma$ 射线照射 ( $10^6$ 拉德))

材 料 名 称	材料腐蚀损耗, 毫米/年	穴状 腐蚀	2450小时 后空洞深度
炭素工具钢 (NCT)	0.0341	无	80微米
超级 V2A 不锈钢 (V2A supra)	0.0000	无	
策克斯 A 18S (Cekas A 18S)	0.0054	有	
雷马尼特冷切工具钢 HC (Remanit HC)	0.0054	无	
雷马尼特冷切工具钢 1880SW (Remanit 1880SW)	0.0054	无	
塔尔马克恩耐热镍基合金 11A (Thermax 11A)	0.0036	无	
高温用钢 ATS 115 (ATS 115)	腐蚀覆层		
高温用钢 ATS 200 (ATS 200)	0.0108	有	
蒙乃尔合金 400 (Monel 400)	0.0359	有	
普通 V2A 不锈钢 (V2A)	0.0144	有	
卡彭特 20cb3 (Carpenter 20cb3)	腐蚀覆层		
哈斯特耐腐蚀镍基合金 C (Hastelloy Alloy C)	0.0054	无	
哈斯特耐腐蚀镍基合金 (Hastelloy)	0.0036	无	
因科镍 825 (Incoloy 825)	0.0287	无	
钢 4301 (stahl 4301)	0.0018	有	

## 5. 矿山机械研究

1968年晚秋,克劳斯塔尔 (Clausthal) 技术大学的矿物-岩石系提供给深处贮存所的三轴水压机, 经过大检修和适当鉴定之后, 重新投入生产。此外, 提供了一种带有电子设备的特殊单轴试验机, 用来对干物体进行强度试验, 可把应力和形变情况自动记录下来。为能经济地得到和制备试验物体, 一种能够取得较大直径岩心的岩心钻孔机, 在阿塞盐矿进行了考验。