

反应堆重混凝土拆除解体技术概述

李 烨, 谭昭怡, 张 东, 苏容波, 王子久

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 反应堆生物屏蔽层重混凝土的拆除解体是反应堆退役过程中的难点之一。本文对重混凝土拆除解体技术进行了详细的调研。结果表明: 金刚石串珠绳锯、空心腔削法和金刚石圆盘锯可以对反应堆重混凝土进行拆除解体。

关键词: 重混凝土; 退役与去污; 水射流; 金刚石绳锯; 金刚石盘锯

中图分类号: X837

文献标识码: A

文章编号: 1001-3644(2008)03-0031-04

Investigation Report on Dismantlement Technology for Heavy Concrete of Reactor

LI Ye, TAN Zhao-yi, ZHANG Dong, SU Rong-bo, WANG Zi-jiu

(Institute of nuclear physics & chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: To dismantle the heavy concrete of biological shield lay of a reactor is one of the difficulties in the process of D&D project. In this paper, the technology for dismantlement of heavy concrete was investigated. The result showed that XHWS, hollowly boring and diamond circular saw were available to dismantle the heavy concrete of reactors.

Keywords: Heavy concrete; D & D; Water-jet cutting; XHWS; Diamond circular saw

1 引言

随着第一批反应堆服役期满, 其退役问题日益受到各方面关注。反应堆生物屏蔽层重混凝土具有密度大、抗压强度高、堆池内壁部分存在严重的活化放射性污染等特点, 而且为了辐射屏蔽需要在其中掺杂了大量金属。因此对反应堆生物屏蔽层重混凝土进行拆除解体是反应堆退役过程中难点之一。

反应堆生物屏蔽层主要由不同形状、大小以及壁厚的重混凝土构成。在反应堆退役过程中必须在拆除解体的基础上进行适当处理。目前切割混凝土的方法主要分为热切割法(如火焰切割、激光切割等)、机械切割法(如高压气体破碎、油压破碎、金刚石工具切割等)、化学切割法(爆破法、膨胀切割法等)和组合切割法等^[1]。本文对其中

的热切割和机械切割方法开展了调研。

2 热切割法

热切割法主要包括氧茅切割、火焰切割和激光切割等三种方法。其中激光切割法是利用透镜会聚激光产生高能量密度的光束来加热被切对象, 在很短的时间内超过其熔点而实现切割功能的方法。激光切割理论上能够熔融任何材料, 包括铁、钢、混凝土等。日本采用不同方法对岩石、混凝土的切割进行了大量的实验研究, 并计算了不同方法切割单位体积对象时所需能量。结果如表1所示。

结果表明^[1]: 激光切割比能最小, 且割口窄, 切割单位深度所需的能量比其他切割方法少。另外, 激光切割还有容易实现遥控操作、寿命长、产生烟尘少、切割对象选择性好以及不需要冷却水等优点。但是激光切割也存在两个明显的缺陷: 首先需要开发专业大功率切割装置和遥控操作装置, 因此所需费用十分昂贵; 另外, Obayashi 公司在普通混凝土进行切割试验结果表明, 其最大切割深度仅为 0.3m^[2]。

收稿日期: 2008-02-25

基金项目: 国防科工委“十五”核设施退役与放射性废物治理专项工程技术研究项目。

作者简介: 李 烨(1980-), 女, 辽宁铁岭人, 2003年毕业于南京理工大学化工学院化学工程与工艺专业, 本科, 研究实习员。研究方向为放化分析与核设施退役工程技术研究。

表1 各种材料的切割比能比较

Tab. 1 Comparison of cutting specific energy of different kinds of material

切割方法	被切割材料	比能 ($10^6\text{J}/\text{m}^3$)
手持凿岩机	硬岩	260 ~ 390
风钻	硬岩	210 ~ 840
金刚石钻机	硬岩	1120 ~ 4500
水喷射	花岗石	56000
水喷射	砂岩	11000
超声波钻机	石英	19000
火焰喷射	真岩	134000
电弧热	真岩	500 ~ 100000
CO ₂ 激光	花岗岩、混凝土	200 ~ 600

3 机械切割法

机械切割法主要包括高压水射流、金刚石盘锯、风动破碎法、空心鏜削法、油压破碎以及金刚石绳锯等方法。

3.1 高压水射流切割技术

3.1.1 切割原理

高压水射流切割技术的基本原理就是将少量水加压到极高的压力（最大可达 $5 \times 10^8\text{Pa}$ ），迫使高压水通过小孔（内径为 $10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}\text{m}$ ）以高速（可达 1000m/s ）冲击工件。动能转化为冲击作用，在工件极小的面积上产生极大的冲击力，当冲击能量大于工件材料的体积能时，可使得工件表面变形、产生微裂纹、脆性破坏，最终导致材料碎屑自基体剥离，如果连续的发生后即可穿透材料，则形成切割作业。

在高压水中加入颗粒磨料，能够大大增强对材料的磨蚀能力，常用磨料为金刚砂和石榴石。颗粒磨料混合方式主要有前混合和后混合两种，研究表明：采用压力为 $2.4 \times 10^8\text{Pa}$ 的高压水射流，通过后混合方式添加密度为 $4000\text{kg}/\text{m}^3$ 的石榴石作为磨料，其对材料表面的冲击压强可达 10^9Pa 以上^[3]。

3.1.2 技术特点

根据其切割原理，高压水射流切割技术具有对切割对象材质基本没有限制、切割过程中基本不产生烟尘和粉尘、容易实现遥控操作和自动化切割、耗材成本较低以及切割能力强等优点。由于需要极高的压力，另外在切割过程必需使用磨料，因此与常见切割方法相比高压水射流切割技术存在固定投资大、切割速度、喷嘴磨损大以及噪声大等缺陷。

万方数据

3.1.3 发展现状

目前磨料水射流切割技术在美国等发达国家，已经广泛的应用于飞机制造业、汽车制造业、建筑工程公司以及核能等领域^[4]。关于其对核设施拆除方面还未见相关报道。

该技术在国内还处于研究阶段，目前国内对磨料水射流切割加工技术的研究重点集中在对各种材质进行切割试验研究以确定切割参数和通过对切口的检验，对切割原理进行深入探索等^[5]。中物院核物理与化学研究所采用磨料水射流对不同组成的反应堆生物屏蔽层重混凝土进行切割，对密度为 $2300\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $4500\text{kg}/\text{m}^3$ 的重混凝土，切割门限压力分别为 $3.43 \times 10^7\text{Pa}$ 和 $5.03 \times 10^7\text{Pa}$ ，当压力为 $2.41 \times 10^8\text{Pa}$ 时，最大切割深度分别可达 0.30m 和 0.25m 。切割时磨料选择、系统压力、喷嘴移动速度以及靶距对切割深度均有一定的影响。

3.2 金刚石盘锯

3.2.1 切割原理

金刚石盘锯通过金刚石粒子与被切割材料之间的刮划获得期望的锯痕。其结构类似于普通水泥切割机，在一定尺寸上的金属圆盘外沿添加金刚石材料，然后通过金属圆盘的高速旋转和锯片的平行移动实现对材料的切割。金刚石盘锯适用于混凝土、钢筋混凝土、不锈钢以及不同金属的合金。切割最大厚度一般为锯片直径的 $30\% \sim 40\%$ 。另外，切割过程中根据被切割材料、切割规范（包括厚度和实际情况）需采取水或者氮气冷却。

3.2.2 技术特点

根据其切割原理，金刚石盘锯切割技术具有设备和操作简单、锯切工艺参数容易控制、切割速度相对磨料水射流快等特点。而在使用过程中冷却液必须回收处理，另外，由于重混凝土中钢筋种类和密度的差异，为了延长锯片寿命，在选择锯齿材料和粘合剂时需要通过实验来进行选择。

3.2.3 应用实例

金刚石圆盘锯切割混凝土最早是应用在路面切割上，主要是切割路面的防滑槽、伸缩缝，拆除旧的路面以及防护栏等。1990 年，日本的 Nagata 切割公司采用金刚石圆盘锯对东京和名古屋之间的一条高速公路上的钢筋混凝土栏和中间隔离带进行了成功拆除^[6]。切割过程中使用了 4 台圆盘锯，1999 年 Penhall 公司采用金刚石圆盘锯对美国亚特兰大国际机场一条长 3000m ，宽 50m ，厚度为 $0.40 \sim 0.55\text{m}$ 的跑道进行了拆除，工程缩短至预计的 $1/6$ ^[7]。

3.3 空心镗削法

空心镗削切割技术也称密集钻孔技术，其原理就是使用电动或者液压驱动的旋转钻上镶有金刚石或碳化物的钻头，沿预设切割线方向打空心排孔的切割方法^[1]。中国核动力研究院某堆生物屏蔽层拆除就是采用了该技术。除了需要水冷却、钻孔过程产生大量粉尘以及需要人员的近距离操作等缺点以外，从使用效果来看，钻头损耗大和拆除速度慢是该方法最大的技术缺陷。尽管如此，由于该法技术成熟，原理也十分简单。因此在反应堆堆体混凝土拆除中仍然可作为一种备选方法。

3.4 金刚石绳锯

3.4.1 串珠绳及锯切机理

金刚石绳锯是具有一定弹性的连续体，由弹性橡胶套、载体金属丝网、金刚石环以及与连接件组成。如图 1 所示，金刚石环以每米 32 ~ 40 个的密度安装在金属丝网上，两环之间垫以特殊橡胶套用以保护金属丝网，同时使绳锯有较高的柔性。金刚石环具有切削锋利与使用寿命长的特点。金属丝网使绳锯具有足够的强度。因此开始锯切时绳锯和材料只在局部的棱角处相接触，随着锯切的进行，接触点变成切割线，最后形成一条连续光滑的锯切曲线。

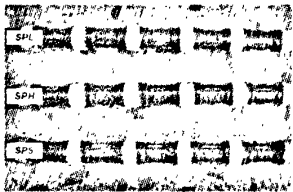


图 1 金刚石串珠绳示意图
Fig. 1 Diagram of a XHWS

金刚石绳锯工作原理如图 2 所示。在进行切割作业时，根据切割对象形状以及预设锯切线路可以进行垂直切割和水平切割，根据现场条件的不同，还可以进行“拉切”和“推切”。

金刚石绳锯机可以由液压马达或电机驱动。它主要由主运动系统、进给系统、金刚石串珠绳、张紧装置、导向机构、控制系统、冷却系统等组成。金刚石串珠绳在进行切割时为闭合环状式，依靠安装在轨道上的设备以理想的速度驱动。由其中主运动系统的驱动装置带动驱动轮旋转，使张紧的金刚石串珠绳做循环运动，实现切向进给运动，并保持所需要的线速度；同时进给系统驱动装置带动基体

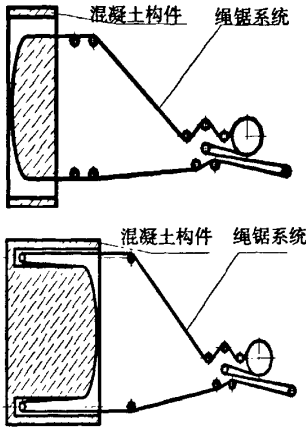


图 2 金刚石绳锯切割作业示意图
Fig. 2 Cutting operation of XHWS

沿轨道做直线运动，实现金刚石串珠绳的径向进给运动，张紧装置可以保证金刚石串珠绳在工作过程中始终处于张紧状态，保证切割所需恒定张紧力^[8]。

3.4.2 技术特点

由于金刚石具有自然界最高的硬度和弹性模量，因此金刚石绳锯几乎能切割任何材料。另外由于切割导向装置十分灵活，因此金刚石绳锯对被切割部件的厚度几乎是没限制的，且由于操作和空间不够而带来的困难实际上并不存在。而在切割过程中，金刚石绳锯的安全性、二次污染以及切割速度慢等技术缺陷应该引起关注。

3.4.3 发展现状

金刚石串珠绳锯 19 世纪 70 年代在意大利问世，最初用于石材开采^[6]。作为新一代的切削工具，经过二十多年的研究、开发和完善，现在其应用领域扩大到荒料整形、板材切割、异型石材制品加工、钢筋混凝土建筑物的拆除和修整、玻璃等脆硬材料的加工、海底构件的维修以及核电厂的拆除等领域中^[9]。在美国普林斯顿 - 宾夕法尼亚加速器退役期间采用金刚石绳锯切割了厚达 0.8m 的屏蔽地板；在 Zimmer 核电站改建为燃煤电厂过程中，也使用金刚石绳锯系统切割了有许多障碍物和预埋管道的厚钢筋混凝土^[10]。普林斯顿大学等离子物理实验室采用金刚石绳锯和等离子弧对聚变测试堆的真空压力容器进行切割试验，结果表明：与等离子弧切割相比，采用金刚石绳锯进行切割时，操作人员减少 4 倍，其受照剂量减少 70 倍，切割时间减少近 50%，切割过程氙释放量减少 3 倍^[11]。另

外采用金刚石绳锯系统成功地切割反应堆热交换器的成功经验也有报道。

与国外相比,国内金刚石绳锯处于刚刚兴起的阶段。其应用面还很窄,小部分用于大理石矿山开采,其余部分主要用于荒料整形和分割以及异型石材加工等,在建筑施工、脆硬材料和钢件加工等领域尚未涉及。国内金刚石串珠绳的研究和生产能力也远远落后于国外,目前仅有少数几个厂家开发出大理石切割用的电镀金刚石串珠绳,凭借低廉的价格可取代部分进口绳锯,而针对花岗石切割用的烧结金刚石串珠绳,还处于探索型试验阶段^[12]。中物院核物理与化学研究所采用金刚石串珠绳锯对两

种组分不同的重混凝土进行了模拟切割实验,结果表明:对密度为2300kg/m³和4500kg/m³的重混凝土,最大切割速度为3.0m²/h和0.3m²/h,实验过程中负载电流和切割线速度对切割速度均有一定的影响。

4 方法比较

根据调研和实验结果,对空心镗削法、金刚石圆盘锯、磨料水射流以及金刚石串珠绳锯等方法进行比较。结果见表2。

表2 几种拆除解体方法的综合比较

Tab.2 Comparison of several kinds of disassembly method

方法名称	空心镗削法	金刚石圆盘锯	磨料水射流	金刚石串珠绳锯
拆除能力	能对各种型号的重混凝土进行拆除,但拆除速度慢,每小时钻孔2个。	能对各种型号的重混凝土进行拆除,最大切割厚度为0.6m。切割速度快。	压力为241Mpa时,对2300kg/m ³ 和4500kg/m ³ 的重混凝土最大切割深度分别可达0.30m和0.25m。切割速度快。	对密度为2300kg/m ³ 和4500kg/m ³ 的重混凝土,切割速度可达3.0m ² /h和0.3m ² /h。
实施可能性	需特定工装,投入小。	需特定工装,投入小。	需高压水射流装置和特定工装,实施成本高。	需绳锯切割装置,实施成本较高。
人员防护要求	需要近距离操作,需重点考虑现场气溶胶污染防护和γ辐射屏蔽措施。	需要近距离安装切割装置,需考虑现场气溶胶污染防护和γ辐射屏蔽措施。	需要近距离安装切割装置,需考虑现场气溶胶污染防护和γ辐射屏蔽措施。	需要近距离安装切割装置,需考虑现场气溶胶污染防护和γ辐射屏蔽措施。
对环境的影响	产生大量气溶胶,必须对空气进行净化 and 监测。	产生大量气溶胶,必须对空气进行净化 and 监测。	产生的气溶胶为水雾状,约为3.9×10 ⁻⁵ kg/m ³ ,粒径在>9.0×10 ⁻⁶ m范围内的气溶胶达到96.6%以上;噪声大。	切割现场空气粉尘含量为3.8×10 ⁻⁶ kg/m ³ ,其中粒径大于2.1×10 ⁻⁶ m的粉尘则占总量的95%以上。
原材料消耗	钻头磨损快,每切割1m ³ 重混凝土损耗钻头约2个。	圆盘损耗较快,无详细数据。	喷嘴寿命约2/3h,消耗水量0.34m ³ /h。磨料60kg/h。	金刚石串珠绳磨损较快,可及时修复,磨损速率约为1m/h,冷却水量少约0.1m ³ /h。

5 结 论

综上所述,结论如下。

5.1 所有的切割方法均需要近距离操作,因此在切割都必须考虑现场气溶胶污染防护和γ辐射屏蔽措施。

5.2 磨料水射流切割技术切割能力较低,固定投入最大,切割过程产生的气溶胶为难于防护的“湿尘”且量大,单位时间消耗的磨料量大。因此该方法不适用于重混凝土的拆除解体。

5.3 金刚石串珠绳锯可以对重混凝土进行切割但速度较慢,其切割过程中现场空气粉尘含量较低且为易防护的大粒径粒子,其原材料磨损较小,由于其不受被切割物件形状和环境条件的限制,因此适合于形状复杂,环境条件苛刻的重混凝土如活化层的切割。

5.4 空心镗削法和金刚石圆盘锯均能对各种型号的重混凝土进行拆除,共同的缺点就是其原材料磨损较快。另外空心镗削法拆除速度慢但是对被切割物件环境条件限制较小,而金刚石圆盘锯拆除速度快但其装置安装对被切割物件环境条件限制较大。因此两种方法结合可作为除活化层以外堆体混凝土的拆除方法。

参考文献:

[1] 罗春信. 混凝土的切割方法[J]. 电焊机,1998,28(5):40.
[2] 姚建春,张长琳. 水射流切割技术[J]. 造船技术,1995,(10):40-44.
[3] 赵 民,丛 娟. 高压水射流切割石材机理研究[J]. 应用技术,1998,(3):9-13.

(下转第39页)

达到排放要求,二燃室设置了燃烧器助燃。从二燃室出来的高温烟气,直接进入急冷系统,高温烟气瞬间降温至 200℃ 以下,避开二恶英合成区域^[4],然后进入布袋除尘系统,再经湿式洗涤塔洗涤去除酸性有害物质,最后达《危险废物焚烧污染控制标准》后经烟囱排放。

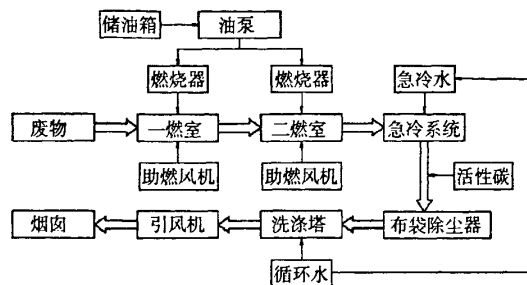


图 动物尸体焚烧工艺流程

Fig. The incineration process of animal bodies

选用容积 100m³ 冷库一个,发生洪涝灾害时,作为动物尸体应急储存场所,平时作为焚烧前动物尸体堆放场所。为便于动物尸体焚烧炉进料并有利焚烧,动物尸体从冷库中取出后视具体情况进行破碎,但不应破肚,配备一台手提往复劈猪工具,该型装置操作灵活,效率高,多为中、小型屠宰厂使用。

3.4 污水处理

漂浮物在水中浸泡多时,打捞上岸时含水率很高,因此,在转运站压缩过程中,不可避免产生污水,且其水量要超过一般生活垃圾压缩转运站。又由于打捞物漂浮多日,其中的可溶解物质及大部分可降解有机物质都在漂浮过程中溶解沉降,剩下的大部分是枯枝、塑料等轻质及不易降解的物质,因此,压缩过程中产生的污水浓度要大大低于一般生活垃圾转运站产生的渗沥液浓度,可按一般生活污水考虑,直接排入市政污水管网。

整个工程总用地 40.1 亩,其中码头用地 4.9 亩,中转站用地 13.2 亩,处置设施用地 22 亩,劳动定员共计 83 人,总投资 6748.5 万元,年经营成本 546.8 万,单位经营成本 105.2 元/t,年总成本 920.1 万,单位总成本 176.9 元/t。

4 实施建议及结论

4.1 实施建议

4.1.1 合理确定打捞规模,使水体中存在一定的水葫芦,以利用它去除水中的富营养成分和重金属等污染物。

4.1.2 做好每日打捞量数据统计工作,分析固体漂浮物的分布规律,有助于本工程运行及其他类似工程参考。

4.1.3 考虑到水面漂浮物产生的季节性,一般集中在半年左右的时间,人员配置可考虑兼职或临时雇佣,还可与现有环卫系统人员统筹考虑。

4.1.4 物料性质对烘干效果影响较大,如甘蔗表层的钠质极大的影响水分的蒸发,因此,为确保烘干机科学选型,建议做工业中试实验。

4.2 结论

本工程的实施将极大改善两江流域漂浮物泛滥的现状,进而改善两江水质,促进钱塘江下游地区经济发展,故本项目具有极大的社会和环境效益。

参考文献:

- [1] 洪春米,魏幼璋,等.水葫芦防治及综合利用的研究进展[J].科技通报,2005,21(4):491-496.
- [2] 郑为键.水口库区主河道水葫芦专项整治实践[J].中国水利,2005,(9):45-47.
- [3] 转载至中国电力报.利用漂浮物发电的电厂将在重庆巫山开建[J].广西电力科技建设信息,2006,(3):30.
- [4] 张建强,杨红薇.垃圾焚烧与二恶英的产生及控制[J].四川环境,2003,22(1):44-46.
- [5] 赵永赞.后混合磨料水射流切割石材的特性[J].河北理工学院学报,2002,24(2):26-31.
- [6] 邹正龙.磨料水射流切割煤岩的机理研究[J].煤,1996,5(2):551-553.
- [7] David Hayes. Diamond sawing removes highway hazard [J]. IDR,1997,(3):94-95.
- [8] Pat O'Brien. Rapid runway removal [J]. IDR,2001,(1):20-24.
- [9] 刘保昌,张祖培,孙友宏,等.金刚石绳锯的锯切轨迹及锯切机理研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2002,132(4):17-20.
- [10] Keith Rule. Demonstrating diamond wire cutting of the TFTR. WM00 conference [Z]. PUCSON; Princeton plasma physics laboratory,2003.
- [11] 华川海,肖 鸿,姜荣超.国外锯切石材用金刚石工具发展趋势[J].石材,1999,(2):25-29.
- [12] 王世盛等译.核设施退役手册(1994) [M].北京:核科学技术情报研究所,1996.10,18-10,20.
- [13] 周 斌,郭 桦.国产绳锯的开发现状及发展前景[J].石材,2001,(6):30-33.