

核设施退役中爆炸切割的应用 与放射性微尘控制

孔劲松

中国人民解放军 92375 部队

摘要: 根据核设施退役的特点, 对控制爆破技术在核设施退役拆除活动中的应用进行阐述, 详细分析爆炸切割的机理特点及应用实例。对爆炸切割中的放射性微尘问题进行讨论, 论述爆炸切割中放射性微尘产生的来源、放射性微尘量, 同时提出放射性微尘控制和防护措施。

关键词: 核设施退役; 控制爆破; 爆炸切割; 放射性微尘

中图分类号: TL943 **文献标志码:** A

0 引言

核设施退役拆除阶段是整个退役过程中的关键一步, 因会产生大量的二次污染物, 对环境、公众存在很大的潜在危险。

在核设施退役过程中, 大量活化、污染部件的拆除工作是在一个高放射性环境中进行的, 是一项复杂的系统工程。核动力反应堆和其他燃料循环设施的拆除包括: 压力容器及堆内部件的拆除; 管路、容器及其他部件的拆除; 混凝土屏蔽的拆除。退役拆除对象的材质、几何形状、尺寸和放射性水平各不相同, 为了拆除大量的不同类别的带有极强辐射的放射性系统、设备、管路和厂房, 国际上针对拆除需要的不同, 开发了一些特殊的技术。

控制爆破技术在核设施退役拆除活动中主要用于爆炸切割各种金属材料(板材和管材)、爆破拆除钢筋混凝土屏蔽层和静态爆破混凝土结构物。爆炸切割以其成本低廉、操作简便、实施快捷、操作人员接受辐射剂量低, 以及在其他切割方法无法使用时(强放射性或空间十分狭小)倍受青睐。但同时, 人们也对爆炸的噪音、冲击波、放射性微尘的产生和污染扩散心存疑虑, 本文就爆炸切割的应用与放射性微尘问题进行了讨论。

1 爆炸切割技术

1.1 爆炸切割的机理

爆炸切割有 2 种方式: 一种是利用炸药燃烧

产生的巨大压力驱动刀片切割金属构件; 另一种是根据聚能效应原理, 利用炸药爆炸产生的高温、高压产物驱动金属药型罩产生高速的金属射流“刀”去切割金属构件。本文主要对后者进行分析。

爆炸切割中的“爆炸”是一种带空穴的装药爆炸。炸药引爆后, 在锥形槽线上出现一股汇集的、速度和压力都很高的爆炸产物流, 在一定范围内使炸药爆炸释放的化学能集中起来, 出现聚能效应。当装药空穴表面衬上金属药型罩时, 炸药爆炸后能量就传递到金属药型罩上, 使金属药型罩以 2000~3000 m/s 的速度轴向运动汇合, 金属药型罩碰撞闭合后形成速度更高(7000~9000 m/s)的细长金属射流。由于有了金属药型罩, 使原来仅仅依靠聚能爆炸气体对钢板的冲击作用转变为高能量密度的金属射流, 对钢板产生持续的冲击作用。

根据对象不同, 爆炸切割可采用不同的金属药型罩。切割板材用直线型线性聚能装药, 切割管路采用的是环形线性聚能装药。当由管子外部向管子内部切割时使用内环形切割器(金属药型罩口部向内)。当需由管子内部外部切割时, 用外环形切割器(金属药型罩口部向外)。爆炸后药形罩形成外向或内向的“环形刀片”, 其端部速度为 3500~4500 m/s。

1.2 爆炸切割的应用

线性切割器有刚性和柔性 2 种, 二者的

外形结构相似,不同的是后者具有柔性,可以在一定范围内用不同直径的管材上进行爆炸切割,但由于柔性切割器的外壳与金属药型罩采用的是同一种金属,所以它难以同时兼顾外壳的柔性和金属罩射流的有效性。因此,柔性切割器的切割效果通常要比同等尺寸的刚性切割器差一些,特别是当环形切割器的半径太小时,效果更差。其次,柔性切割器的外壳是金属,爆炸切割时会产生高速的金属破片,在应用中必须予以考虑。而刚性切割器正相反,它可以用塑料作外壳以消除外壳破片的危害,可以选择最适宜金属作药型罩,以确保最好的切割效果。刚性切割器的缺点是不具有柔性,对于切割管子,只能一种直径的管子用一种型号(直径)的环形切割器。在核设施退役拆除条件下,主要放射性管子型号的数量不多,综合比较切割效果与环境危害,刚性切割器是更加适用。

以切割 219 mm×20 mm 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管的刚性环形切割器为例。其装药量约为 300 g,不仅能切断给定的管子,而且环境危害效应也不大。实验测定在径向 33 cm 处和轴向 52 mm 处的冲击波峰值压力分别为 4.8 MPa 和 2.3 MPa,冲击波作用持续时间分别为 0.05 ms 和 0.08 ms。其压力远小于不锈钢的抗拉强度(550 MPa),而且作用时间短(小于 1 ms)。因此,它对周围设备不会造成严重的危害。实爆效果也证实了这一点,在径向 33 cm 处 5 mm 厚的钢筒和 52 cm 处 4 mm 厚的钢底板都没有产生肉眼可见的变形。切割实爆实验产物取样分析还表明,以铜作金属药型罩时产生的金属射流高速撞击切割钢靶板时,靶板材料不会产生熔化和气化。

1.3 爆炸切割的特点

与其他切割手段相比,爆炸切割的特点是:

(1) 体积小、重量轻。线性切割器的厚度一般不超过 80 mm,装药重量小于 5 kg/m,环形切割器的厚度一般不超过 30 mm,装药重量小于 500 g/环。

(2) 作业时间短,辐射剂量小。爆炸切割器为制式器材,安装作业时间一般只要几分钟,操作人员在辐射区工作的时间短,受到的辐射危害小。

(3) 适合于进出不便、空间狭窄的部位切割。特别是其他机械切割法无法应用的场所。

(4) 可以几处同时切割,提高作业进度。

(5) 适合于某些特殊构件的切割,如预应力梁的切割、无法临时支撑端部的切割等。

(6) 操作简便、易于掌握。一般爆破员在专家指导下都能操作。

(7) 单价低、投入少。一次性消耗器材,没有去污维修保养等后续问题。

2 爆炸切割微尘的产生

与其他方法一样,爆炸法必须考虑爆炸产生的环境效应。如爆炸产生的冲击荷载、冲击波震动、脉冲噪声和爆炸粉尘等。

2.1 理论分析

根据《碰撞动力学》的原理,典型结构及坚硬材料(铝、钢、石英)产生超高速碰撞的速度为 5~6 km/s。使铝、钢、石英产生初期熔化的速度分别为 5.5、6.6、7.9 km/s,产生初期蒸发的速度分别为 10.2、12.6 km/s。线性爆炸切割装药采用铜药形罩,利用爆炸产生的铜射流切割钢目标。计算表明铜射流高速撞击使钢板产生初期熔化的最小速度为 4.1 km/s,完全而线性聚能装药的金属罩产生的射流头部速度为 3.9 km/s(高速摄影测定),熔化的最小速度为 4.4 km/s。

由此可见,爆炸切割的金属射流的速度小于使钢板产生初期熔化的最小速度。因此,爆炸切割时钢板不会产生熔化,更不会产生气化。根据上述分析,在进行爆炸切割时,不会产生放射性气体。

2.2 实验及结果分析

试验靶板用 USU304 不锈钢板叠加而成,共 14 层,总厚度 20.5 mm。试验在一个钢筒中进行,分别对爆炸切割前后的气体进行取样分析。切割后取两个样品,一个为经过 10 μm 孔网过滤的气体样品,另一个为未经过滤的气体样品。

分析结果表明:与爆前气体样品比较,经过滤的样品中铬、镍、锰 3 种元素含量没有增加,说明爆炸切割时靶板材料未产生气化现象,与理论分析结论一致;未经过滤的气体样品中,铬、镍两元素(沸点分别为 2672 和 2732)的含量没有增加,而沸点较低的锰元素(沸点 1962)的含量略有增加(从 0.017 μg/cm³ 增加到 0.021 μg/cm³)。说明爆炸切割时产生了少量的粒度大于 10 μm 的粉尘。

2.3 爆炸切割的微尘量

爆炸切割的微尘量采用实验的方法进行估算。用 6.5 cm 长钢罩切割器爆炸切割厚 20 cm 铜靶板，实验结果为爆炸切割产生的铜微尘量为 111.3 μg 。爆炸切割单位长度靶板产生的微尘量为 17.1 $\mu\text{g}/\text{cm}$ 。

2.4 爆炸切割的放射性微尘量

通过理论分析与实验均表明爆炸切割不会产生气体，但会产生一定数量的微尘。对退役的核动力装置进行爆炸切割时，必然会产生一定数量的放射性微尘。爆炸切割的靶材有 2 种类型：一种为放射性活化部件，另一种为放射性污染部件。放射性微尘量既取决于靶材所属的部件，同时又取决于靶件的活化和污染程度。一般情况下，活化部件同时又有一定程度的污染。

2.4.1 活化部件产生的放射性微尘量 当需要对某一爆炸切割靶件产生的放射性微尘的活度和现场产生的放射性微尘浓度进行估算时，首先选用与爆炸切割靶件规格、材质相同的靶材，采用前述实验方法进行试爆，取得单位切割长度微尘量 H 。

活化部件的放射形微尘量可用下式估算：

$$G=HL \quad (1)$$

放射形微尘活度为：

$$A=HLQ \quad (2)$$

操作现场产生的放射形微尘浓度为：

$$C=HLQ/V \quad (3)$$

式中， G 为实爆切割的微尘量， kg ； $H=g/l$ ， kg/cm ； g 为切割试验产生的微尘量， kg ； l 为试验切割长度， cm ； L 为实爆切割长度， cm ； A 为实爆切割放射形微尘活度， Bq ； C 为实爆现场产生的放射形微尘浓度， Bq/cm^3 ； Q 为实爆靶件的比活度， Bq/kg ； V 为现场空气体积， m^3 。

2.4.2 污染部件产生的放射性微尘量 在对污染部件进行爆炸切割时，放射性微尘量是爆炸切割“刀口”的原表面污染和靶件其他部分表面污染被爆炸切割产生的冲击波冲击下来的污染的总和。一般情况下，放射性污染部件在进行爆炸切

割前对表面放射性污染已进行了去污，松散的表面污染已经去除。因此，爆炸切割时对放射性微尘的产生不会有太大的贡献。这一点在试验中已得到验证。

3 爆炸切割微尘的控制与防护

在对放射性部件进行爆炸切割时，操作现场的放射性微尘主要来自于 2 部分：一部分是爆炸切割本身所产生的；另一部分主要来自于其他切割拆除工艺的贡献。进行爆炸切割时所产生的冲击波将沉降的微尘再悬浮，有可能使操作现场放射性微尘浓度明显增高。

根据上述微尘的源项，可以采取如下措施进行防护：

(1) 爆炸切割的“刀口”与药形罩的设计和制造精密程度有关，需进行优化设计，并精密制作，减少放射性微尘的产生量。

(2) 进行爆炸切割时，被切割的系统、设备、管路应进行必要的去污清洗，尽量减少由于表面污染造成的放射性微尘量。

(3) 爆炸切割前，应对爆炸切割操作现场进行必要的去污，并使操作现场地面保持一定的湿度，降低沉降放射性微尘的再悬浮量。

(4) 为了减少爆炸切割引起的放射性微尘向环境的释放，核设施放射性部件的爆炸切割可在具有放射性通风系统的场地进行。

(5) 为了保证操作人员的辐射安全，减少放射性微尘的吸入。除了进行现场通风和佩带好个人防护用品外，还可在爆炸切割完成一段时间后（试验结束约半小时后，爆炸切割产生的微尘即可基本扩散沉降完毕），再进入操作现场。

4 结束语

爆炸切割可用于核设施退役中的某些局部管路拆除，虽然切割过程中会产生一定的放射性微尘，但只要科学对待，采取相应的控制与防护措施，操作人员和环境的安全是有保证的。

Application of Explosive Cutting and Control of Radioactive Dust in Decommissioning of Nuclear Facilities

Kong Jinsong

Unit 92375, Chinese People's Liberation Army

Abstract : The characteristics of nuclear facilities decommissioning are analyzed, the application of controlled blasting techniques is described in demolition activities of nuclear facilities decommissioning, then the mechanism, characteristics and application instance of explosive cutting are elaborated. The problem of radioactive dust during explosive cutting is discussed, including source and quantity of radioactive dust. The controlling and protective measures are raised at the same time.

Key words : Nuclear facilities decommissioning, Control blasting, Explosive cutting, Radioactive dust

作者简介 :

孔劲松 (1967—), 男, 高级工程师。2008 年毕业于中国原子能科学研究院核燃料循环与材料专业, 获博士学位。现主要从事放射性三废处理与管理方面的工作。

(责任编辑: 黄可东)