

模拟深水环境爆炸容器动力响应实验研究

钟冬望, 李琳娜

(武汉科技大学理学院, 武汉 430065)

[摘要] 对可模拟200 m水深、10 g TNT当量的爆炸容器在不同加载静压和内部爆炸载荷下的动力响应进行了实验研究,通过监测容器6个特征点的动态应变波形,分析了容器壳体的振动特性和动力学强度。测试结果揭示了在加载静压和内部爆炸载荷条件下容器的动态响应规律,为模拟深水环境爆炸容器的设计研制提供了参考。

[关键词] 深水爆炸;爆炸容器;动力响应;应变

[中图分类号] O389 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0078-04

1 前言

随着爆破技术的发展,水下爆破被越来越广泛地用于航道疏通、水工建筑物基坑开挖、水下爆破夯实和对石油工程深海开采后废弃物的爆破拆除等工程。炸药在水下爆炸时,随着周围介质和环境的不同,尤其是在深水环境下随着炸药的入水深度变化,其输出能量及爆破效果也不同。

爆炸容器是一种可承载内部爆炸载荷的特殊压力容器^[1-3]。利用爆炸容器进行爆炸实验具有实验仪器便于安放、实验数据便于采集、实验外部条件便于控制、实验样品便于回收、实验对周围环境的影响便于消除等优点。为了对水下爆破技术进行深入研究,可在爆炸容器中填充水介质,并在爆炸容器最大承载压力范围内,通过改变外加气压,模拟不同深水环境下的爆炸实验。由于水相对于空气具有可压缩性小、对爆炸冲击波能量传递效率高等特点,水中冲击波的衰减比空气中的慢,作用在容器壁面的冲击载荷峰值高、作用时间短,因此

空气介质爆炸容器的设计理论不能直接用于水介质爆炸容器的设计。

为了进一步深化对模拟深水环境爆炸容器力学规律的认识,提高其工程设计水平,有必要对其进行动力响应测试,分析爆炸瞬态载荷下的动态应变^[4,5]。因此,本文对模拟深水环境爆炸容器进行了实验研究,实验容器的设计当量为10 g TNT,最大加载压力为2 MPa,可模拟水深200 m。研究方法是采用爆轰加载的方式,监测容器外表面6个测点的应变波形,分析容器壳体在不同强度载荷及不同压力状态下的振动特性和动力学强度。

2 模拟深水环境爆炸容器动力响应实验研究

2.1 实验对象

圆柱形深水爆炸容器总体结构如图1所示,设备为两端标准椭圆封头、中部圆柱直段的卧式容器结构,总体尺寸为3 500 mm×2 500 mm×2 500 mm(长×宽×高),内部有效实验空间为 ϕ 2 000 mm×

[收稿日期] 2014-09-01

[基金项目] 国家自然科学基金(51174147);湖北省自然科学基金(2012FFA13)

[作者简介] 钟冬望,1963年出生,男,湖北新洲区人,教授,博士生导师,研究方向为矿山工程力学、爆炸理论及其应用等;

E-mail: zhongdw123@263.net

3 000 mm(含椭圆封头部分),有效厚度为 30 mm。容器壳体选用 16MnR 钢,其杨氏模量 $E=2.1 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.30$,常温下(20 °C)的屈服强度 $\sigma_s=325$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b=490$ MPa。各接口法兰及其他承载部件选用 16Mn 锻件和 16Mn 钢管,盖板和防护门用 16MnR 钢板切割后加工。

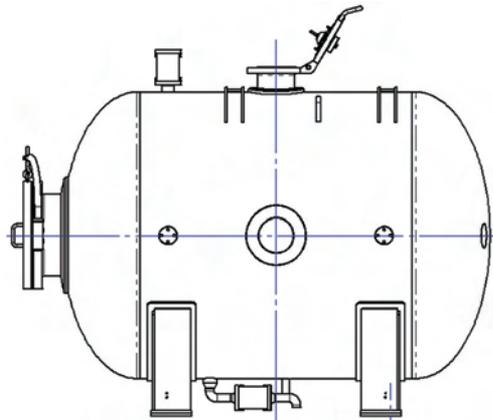


图1 容器结构简图

Fig. 1 Sketch of chamber structure

2.2 测试系统及实验方法

对容器分别进行不加载静压时,5 g TNT 当量爆炸载荷和 10 g TNT 当量爆炸载荷,以及加载 2 MPa 静压时,5 g TNT 当量爆炸载荷和 10 g TNT 当量爆炸载荷,共 4 种工况下的水下爆炸实验,实验中设 6 个应变测点,分别位于椭圆封头顶端(1#、2#)、中环面(3#、4#)和椭圆封头过渡段(5#、6#)。传感器位置示意图见图 2。应变片采用中航电测仪器股份有限公司 BA120-1AA(11) 型,电阻值为 $(120.1 \pm 0.1) \Omega$,灵敏系数为 $2.14\% \pm 1\%$ 。应

变测量桥路盒采用江苏联能 YE29003A。应变放大器采用江苏联能 YE3818C 型,灵敏系数 $k=2.00$,频响为直流斩波器(DC)~100 kHz-3 dB \pm 1 dB。应变标定为 $\pm 10 \sim 9\,990 \mu\epsilon$ 。



图2 应变传感器位置示意图

Fig. 2 Sketch of strain sensor location

2.3 测试结果及分析

2.3.1 壳体动力响应的总体特征

4 次爆轰加载实验,共获得 6 个测点的共 24 条动态应变波形曲线,如图 3 所示。从图 3 中可看出: a. 各种工况下,都是容器中环面处的动态应变最先达到峰值;b. 普遍存在应变增长现象(即最大应变不是在振动的第一个周期内出现,而是在稍晚时刻),但总体趋势是递减的;c. 在所有的应变波形中,未观察到明显的“拍动”现象,即两种振动频率间的互相调制;d. 绝大部分应变波形在振动基本结束后没有回复到 0,均有不同程度的直流偏量,偏量存在正负,这种正负偏量反映的是该测点受拉或受压的应变状态。

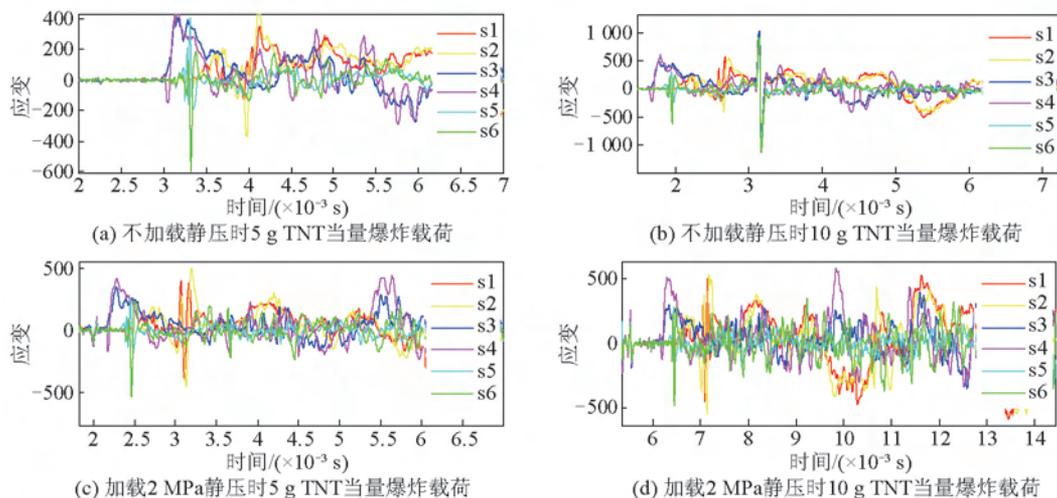


图3 不同工况下的动态应变波形

Fig. 3 Dynamic strain curves on different working conditions

2.3.2 载荷强度及加载静压对容器动态应变峰值的影响

表1中列出了4种不同工况下6个测点的动态应变峰值。从表1中可看出:a.当加载静压相同时,随爆炸载荷当量增加,容器封头处和中环面处的应变峰值都随之提高;b.在相同爆炸载荷当量下,加载静压对容器封头处和中环面处的动态应变峰值影响规律不明显,但总应变(即动态应变与加载静

压在容器壁上产生的静态应变之和)峰值随加载静压的增大而增大;c.椭圆封头过渡段处,由于其所处位置较特殊,其应变随加载静压和爆炸载荷当量的变化呈现一定的随机性;d.容器壳体表面各位置测得的最大总应变峰值为876 $\mu\epsilon$,远低于Q345钢板屈服极限时的应变1625 $\mu\epsilon$,说明容器处于弹性变形范围内。

表1 各测点的动态应变峰值 ($\mu\epsilon$)

Table 1 The peak strains of measuring points ($\mu\epsilon$)

工况	1#测点	2#测点	3#测点	4#测点	5#测点	6#测点
5 g	352	468	408	490	407	600
5 g+2 MPa	396	501	350	419	263	527
10 g	571	550	490	614	305	607
10 g+2 MPa	585	544	394	560	277	477

为了避免各测点的随机因素对测量结果的影响,分别用1#和2#测点的平均应变及3#和4#测点的平均应变作为容器中环面处和封头顶端的动态

应变,图4绘出了容器中环面处和封头顶端处的动态应变。

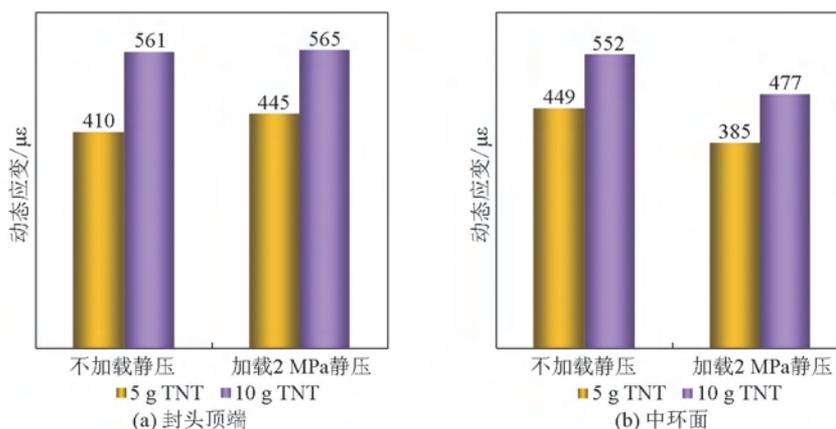


图4 不同加载静压和爆炸载荷时的动态应变对比(单位: $\mu\epsilon$)

Fig. 4 The contrast of dynamic strain between different static pressures and explosive loads (unit: $\mu\epsilon$)

可以进一步验证容器的动态应变主要是随爆炸载荷当量的增加而增加,加载静压大小对容器动态应变影响不明显;而且还可以看出容器封头顶端的应变基本与中环面处的应变相当,说明由于椭圆封头的汇聚作用,在容器设计过程中应选择合适

2.3.3 容器实测应变的频谱分析

通过对5 g TNT当量爆炸载荷和10 g TNT当量爆炸载荷分别在不加压和加载2 MPa静压下,容器在距爆心最近的中环面和最远点封头顶端的实测

应变波形进行频谱分析,可以得到应变的频谱特性。发现该容器主要表现为以下几种频率的振动:91 Hz、183 Hz、267 Hz、282 Hz、297 Hz、366 Hz和381 Hz等。其中,183 Hz、267 Hz、282 Hz和366 Hz出现的概率较高。图5给出了加载2 MPa静压下,10 g TNT当量爆炸载荷的应变波形和频谱。当爆炸载荷较小时,频率分布比较分散;当爆炸载荷增大时,峰值频率个数减少,并且向主频靠拢。说明较大的冲击载荷对某些频率具有掩盖作用。还可以看出当加载静压增加时,相同的冲击载荷所激发

出的峰值频率也随之增大。而封头处的激发峰值频率比中环面处的更加集中。

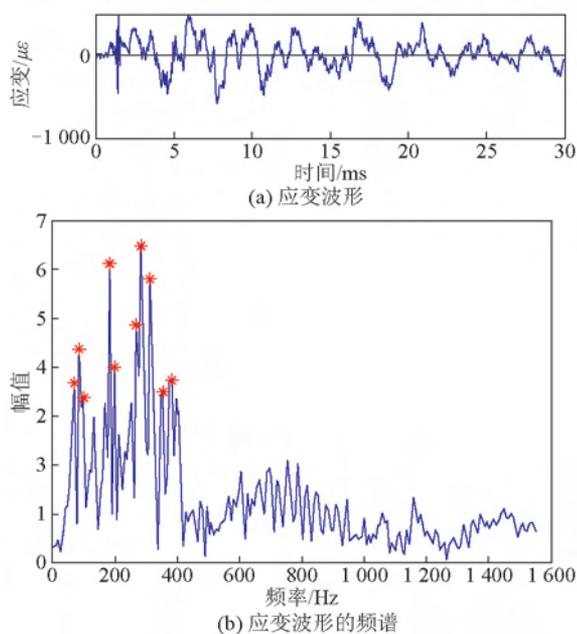


图5 典型应变波形和频谱

Fig. 5 Typical strain curves and frequency spectrum

3 结语

1)模拟深水环境爆炸容器中环面处的动态应

变最先达到峰值,各测点普遍存在应变增长现象,但总体趋势递减。绝大部分应变波形在振动基本结束后均有不同程度的直流偏量。

2)模拟深水环境爆炸容器封头顶端的动态应变大于中环面处的应变,说明容器封头对爆炸冲击波具有较强的汇聚作用,设计时要重点考虑封头处;容器在同等加载静压下,随爆炸载荷增加,容器封头顶端和中环面的应变均增大;在同等当量爆炸载荷下,加载静压大小对容器封头顶端和中环面处的动态应变的影响没有明显规律,但总应变增大。

3)模拟深水环境爆炸容器内爆炸冲击载荷具有明显的脉冲激励特征,其频谱分布在相当范围带宽内,而且低频分量远大于高频分量;当加载静压增加时,相同冲击载荷所激发出的峰值频率也增大。

参考文献

- [1] Baker W E. The elastic-plastic response of thin spherical shells to internal blast loading [J]. Journal of Applied Mechanics, 1960, 27(1): 139-144.
- [2] 赵士达. 爆炸容器[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(1): 85-96.
- [3] 朱文辉, 薛鸿陆, 韩钧万, 等. 爆炸容器动力学研究进展评述[J]. 力学进展, 1996, 26(1): 68-77.
- [4] 胡八一, 刘仓理, 谷岩, 等. 真实爆炸容器水压应变测试及分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 279-282.
- [5] 陈石勇, 胡八一, 谷岩, 等. 球形爆炸容器动力响应的实验研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 504-509.

Experimental investigation on dynamic response of chamber to simulate deepwater explosive

Zhong Dongwang, Li Linna

(College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

[Abstract] Experimental investigation was conducted for the dynamic response of a real spherical explosive chamber that can simulate 200 m deepwater explosive loaded 10 g TNT equivalent. The vibration characteristics and dynamic strength of the chamber were analyzed by measuring the strain profiles of six characteristic points on the chamber. The research results reveal the rule of the dynamic response of the chamber on different static pressures and explosive loads. It provides reference for the design and development of the chamber to simulate deepwater explosion.

[Key words] deepwater explosive; explosive chamber; dynamic response; strain

包装型乳化炸药生产线重大危险源分析及预防措施

吴晓梦

(湖南金能科技股份有限公司,长沙 410013)

[摘要] 乳化炸药具有良好的抗水性能、储存性能和爆轰性能,且制造工艺简单、成本低廉,已在全世界得到了广泛的推广应用。本文介绍了我国乳化炸药发展现状及生产工艺特点,结合当前国内外包装型乳化炸药的工艺技术特点,分析了乳化炸药生产线重大危险源,提出了确保乳化炸药生产本质安全的应对措施。

[关键词] 乳化炸药;危险源;预防措施

[中图分类号] TQ564 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0082-04

1 前言

乳化炸药是一类用乳化技术制备的油包水(W/O)型抗水工业炸药,它是以氧化剂(主要为工业硝酸铵等)水溶液的微细液滴为分散相,悬浮于有分散气泡或者空心玻璃微球或者其他一些多孔材料的类似油相材质构成连续介质中,形成一种W/O型的特殊乳化体系^[1]。乳化炸药具有良好的抗水性能和储存性能、优秀的爆轰性能,并且生产工艺相对简单,所需原材料来源广泛、成本低廉,组分简单。因此,乳化炸药自问世以来就作为新型抗水工业炸药被广泛应用于各种工程爆破领域,深受市场欢迎。2012年乳化炸药占工业炸药总产量为43.8%,较2011年同比增长3.5%。

我国于20世纪80年代开始乳化炸药得研究工作,经过几十年的发展,生产工艺日趋成熟,机械化、连续化、自动化水平日趋完善,产品质量好、成本低、工艺先进的技术相继问世。国内正在运行的包装型乳化炸药的生产工艺归纳起来主要有两种:

一种是国内自主研发开发工艺;另一种是国外引进工艺。

我国自主研发的包装型乳化炸药生产工艺技术特点归纳如下:工艺路线为连续乳化、连续冷却、连续敏化、塑膜装药、装箱包装;乳化温度90~100℃,乳化机速度为960 r·min⁻¹或1500 r·min⁻¹左右;冷却方式为钢带附载基质连续间接水冷或皮带附载基质直接连续浸水冷;敏化方式为无压敞开式,敏化温度为50~60℃;装药时的炸药温度为45~55℃。

国外引进的包装型乳化炸药工艺技术特点归纳如下:工艺路线为连续静态乳化、高温连续敏化、塑膜装药、药卷浸水连续冷却、装箱包装;乳化温度为90~100℃,乳化用静态混合的方式;敏化为密闭式带压搅拌,转速较高,冷却方式为网格钢带或塑料网格带药卷连续直接水冷;敏化温度为90~100℃;装药时的物料温度为90~100℃。

随着乳化炸药生产技术的革新步伐加快和安全主管部门安全监管措施的加强,我国乳化炸药从

[收稿日期] 2014-04-25

[作者简介] 吴晓梦,1970年出生,男,湖南岳阳市人,教授级高级工程师,主要研究方向为采矿工程、炸药工程;E-mail:wxm700608@sina.com

2007年开始,安全生产保持了良好的运行态势,全国民爆行业未发生一起有人员死亡的生产安全事故。但2013年相继发生3起乳化炸药爆炸事故,重新敲响了乳化炸药生产安全的警钟。本文针对现有连续化工艺技术条件下乳化炸药生产中的重大危险源进行分析,并就相应的安全设计、技术防护措施进行探讨,抛砖引玉,供行业相关技术人员参考。

2 乳化炸药生产线重大危险源分析

2.1 爆炸事故发生概率统计

我国20世纪90年代开始研制连续化自动化乳化炸药(含膏状乳化和粉状乳化)生产工艺技术,但自1994年至1998年,2002年至2006年我国出现爆炸事故高发期,经过6年的平安运行,2013年又发生三起爆炸事故。2011年在南非,也发生一起乳化炸药生产爆炸事故。事故统计见表1。

表1 乳化炸药生产线安全事故统计表(1994—2013)
Table 1 Safety accident statistics of emulsion explosive production line(1994—2013)

序号	事故时间、地点	原因
1	1994年9月10日河北唐山	螺杆泵断料干磨
2	1995年2月10日河南宜阳	螺杆泵断料干磨
3	1997年5月26日河北唐山	乳化器断料干磨
4	1998年7月22日山东平邑	乳化器断料干磨
5	2002年6月24日浙江兰溪	乳化器爆炸
6	2004年2月22日河北易县	乳化器断料干磨
7	2005年4月21日重庆东溪	雷击
8	2005年4月20日赞比亚中资企业	机械事故引爆敏化机
9	2005年9月14日吉林敦化	掺合火药搅拌机着火爆炸
10	2006年6月16日安徽当涂	螺杆泵断料干磨
11	2013年3月11日云南陆良	乳化器爆炸
12	2013年5月20日山东济南	含太安乳化包装时爆炸
13	2011年3月1日南非BME公司	螺杆泵处发生爆炸,炸药的能量积聚与非预期的能量释放

从上述事故来看,13起爆炸事故中,与螺杆泵有关的事故有4起,占30.77%;与乳化器有关的事故有5起,占38.46%,两者相加占69.23%。由此可见,乳化炸药生产线危险源在制药敏化工序,而重大危险源则集中在乳化器和螺杆泵。

2.2 乳化炸药热爆炸理论

炸药在均匀作用下的爆炸称为热爆炸,热爆炸理论既是炸药起爆机理的基础,同时对炸药的生产安全也具有十分重要的意义。在一定条件下随着温度升高和自身催化作用,炸药发生化学反应并伴随着大量的热效应,如果与外界能有良好的通风或能将产生的热量及时散去,且药量又少,一般反应会终止或不会发生爆炸。反之,炸药热分解反应的放热速度大于环境介质的散热速度,持续的相互间促进和循环必然导致热积聚从而引发爆炸。经典的炸药热点学说认为:在机械能作用下产生的热来不及均匀地分布到炸药的全部试样上,而是集中在炸药的一些局部小点上。热分解就在某小点开始,并且由于分解的放热性质,分解速度迅速加快,使小点的温度高于爆点。爆炸就在这些小点发生、成长并扩展到整个炸药。通常认为炸药热点的形成主要有两种方式:a.在有外部冲击能量传入炸药时,炸药或基质中散布的小气泡的部分绝热压缩;b.在机械能传入炸药时,炸药或基质中混入的硬杂质之间的摩擦、炸药颗粒体之间的摩擦或炸药与容器壁表面的摩擦产生大量的热量积累。

2.3 乳化炸药生产线爆炸原因分析

在乳化炸药实际生产过程中,热点的形成是多方面的,究其原因,主要有两种情况值得关注:一种是乳化器由于断料空转发生爆炸;二是螺杆泵空转干磨而造成螺杆泵爆炸。多起事故案例说明热点是由于乳化基质在静止状态下被强大的机械力摩擦、剪切而形成的。

2.3.1 乳化器爆炸原因分析

对于乳化器爆炸而言,其原因可能有:一是乳化器结构件之间因转子与定子之间间隙变小出现碰撞摩擦生热形成热点;二是乳化器内部结构设计有缺陷,油水相物料在强力机械剪切下,机械能转化为热能;三是由于水相管路保温问题,硝酸铵在乳化器内形成结晶;外界坚硬的物体(或松动掉落的结构件)落入乳化腔内造成强烈的摩擦,形成热点。

乳化生产过程中,机械设备不停的运转,机械剪切与物料之间有强力摩擦;固定间隙之间的设备金属零件有可能相互摩擦;转动的转动轴处势必会因摩擦而产生热量。如果发生上述摩擦而产生的热大于散热就会发生热积聚,腔体内的乳化炸药温

度会逐渐升高,若此时乳化腔为相对密闭的体系,极易造成局部压力增高,当各种条件重叠在一起时,热点就会加速乳胶基质分解,形成腔内热量快速积聚,进而形成物料被连续分解,导致爆炸发生。

2.3.2 螺杆泵爆炸原因分析

乳化炸药常压下的热分解测试结果表明,明显的热分解一般在200℃以上。国内外针对乳化炸药泵送过程的安全性做了大量研究。南京理工大学徐志祥等对国内常用单螺杆泵研究结果表明^[2],当螺杆泵转动时,螺杆泵最高升温处在转子与定子接触处,当转速从14.3 r·min⁻¹升高至180 r·min⁻¹时,泵内基质温度会升高5.8℃,温升速率从0.278℃/min升至13.4℃/min,基质温度可在极短时间内升至爆发点。而瑞典Hans Perlid研究表明,在“干泵”情况下,运行6~7 min,就有烟从管中冒出来,继续运行21 min后,定子末端温升超过100℃,直接将定子完全烧毁,如果螺杆泵内有基质时发生空转,基质在螺杆泵内不到160℃就发生爆炸。ICI炸药集团研究认为,在正常条件下,泵送炸药所产生的能量能够得以消散,不正常的技术故障会破坏这种平衡,例如,出现堵塞或流量下降的情况时,泵送对炸药所施加的能量就会转化为热,经实测,此时温升的速度为1~10℃/min,可引起泵中的炸药燃烧,使得泵中的压力迅速上升至炸药最低燃烧压力以上,在定子与外层夹套强约束下,最终导致爆炸发生。例如,在2014年江西“3.20”事故中,螺杆泵在断料干磨11 min就发生爆炸。

螺杆泵作为常用的定容泵,转子与定子之间一直是相互接触在一起的,只要转子转动,它们之间就有相互摩擦,就会产生热量,定子是由氟橡胶制成的,它是热的不良导体,外面再加一个钢制夹套,成为一个封闭强约束体系,易导致热积累。此外,螺杆泵的定子一般为氟橡胶制造而成,运转一定时间后会有磨损,而磨损会影响其容积效率和输送效率,只能靠提高转速来弥补,转速高就会增加热积聚的可能。国内外多起事故表明,螺杆泵输送炸药或基质已经成为炸药生产中最危险的工序。

3 具体应对措施

目前我国乳化炸药生产技术、工艺越来越简单、自动化程度越来越高、在线人员越来越少,但从影响安全的人、机、物、环、测等因素来说,主要还取决于设备的安全性、配方原料自身因素和操作人员

的因素,最大危险源还是乳化炸药设备的安全性,尤其是乳化器、螺杆泵的安全性。

3.1 坚持使用符合国情的乳化炸药配方原料

我国乳化炸药经过多年的研究发展如今已有若干个系列品种,但各家配方有一定的差别,硝酸铵含量、水含量以及油相含量和种类均不同。乳化基质组分的不同直接影响了油水相被乳化的难易程度和其感度的差异。

从水相组成来看,各品种的乳化基质中水含量有所不同,硝酸铵的析晶点会随水含量的减小而升高,含水量降低会提高水相在乳化过程中析晶的可能性,同时提高乳化基质的机械感度和热感度等,热分解容易发生。

从油相组成来分析,常用的复合油相成分差别很大,在形成“W/O”结构时,膜的厚度、强度和传热速率等会有不同,尤其是某些高分子乳化剂,在生产过程必须基于氯气的氛围,国内大量试验研究发现,在酸性条件下,氯化物可大大加速硝酸铵的分解。

此外,油相成分和乳化剂种类、含量在一定程度上决定了乳化基质的黏度,乳化作用需要一定的剪切力才能将硝酸铵水溶液分割成小液滴,黏度增加后为得到较好的乳化效果必然要更大的剪切力,而摩擦和剪切加剧,会产生更多的热量,黏度增大后乳化基质的传热速率和导热系数减小,不利于安全生产。

因此,应基于我国国情,推广经广泛使用得到安全验证、来源广泛、物美价廉的国产乳化炸药配方原料。

3.2 推广常压或敞口、低剪切的乳化生产工艺

我国《民用爆炸物品生产专用设备安全使用年限管理规定》(科工爆[2007]684号)对列入目录的乳化器主要技术参数作了详细规定。基于多次安全事故的分析,要重点针对乳化器的安全性和乳化质量可靠性进行系统研究,一级连续乳化器要采用低常压或敞口式、低转速、大间隙设计,具备振动、声音、温升、负载、欠流、冷却等监控手段。湖南金能科技股份有限公司确定的一种结构最简单的动态乳化工艺,具有结构紧凑、罐体体积小、各部分结构无机械碰撞、动力容量小、不易引起摩擦的特点,转子为简单的十字形状,确保定子与转子之间的间隙只有4个点为4~4.5 mm,其余间隙超过50 mm。该连续乳化系统已在全国安全运行了10多年,并经

过了“5.20”事故的严峻考验。

3.3 限制或淘汰使用螺杆泵输送基质或炸药的工艺技术

螺杆泵输送基质或炸药存在重大安全隐患,湖南金能科技股份有限公司自主研发开发的工艺技术路线全线只有两台泵,仅用于输送油水相材料,成乳后的基质或炸药均是在敞开体系下通过,不再需要使用螺杆泵。被国内外多起重大事故反复证明为重大危险源的螺杆泵应该也具备条件被限制或淘汰使用。

3.4 推广使用中低温敞开式敏化技术

硝酸铵的热分解在乳化炸药生产过程中是一直存在的,但其分解速度可调节。热分解会放出热量,在强约束下,其分解速度只会向加快的方向转变。而基质在高温密闭状态下输送,系统内基质或具有一定感度的基质发生热爆炸的倾向性比敞口无压状态要大得多。

目前国内自主研发的敏化技术已实现了中低温敞开式敏化,系统不带压,且搅拌分散速度只有 $100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右。国外引进生产工艺技术采用的高温密闭式化学敏化,高压静态乳化后的基质,再次通过螺杆泵将基质送至快速搅拌的密闭式化学敏化机中,与发泡剂、促进剂一起在其中搅拌分散。《工业和信息化部关于民用爆炸物品行业技术进步的指导意见》(工信部安[2010]227号)中明确规定:自2010年6月1日起,淘汰的技术中(第二条)就包括“密闭式包装型乳化炸药低温敏化机”等内容,因此推广应用中低温、敞开式敏化技术符合行业发展方向。

4 建议

1)众所周知,汽车行驶有一个最经济速度,一般是 $80\sim 90\text{ km/h}$ 。目前,我国民爆企业进行技术改造时,总想把生产线产能做大,按照《民用爆炸物品行业技术进步指导意见》(工信部安[2010]227号)规定,在线人员二期发展目标是9人,三期目标是5人,联建生产线在线药量 2.5 t ,以年产 $1.2\times 10^4\text{ t}$ 计算(小时产能 3.6 t),从油水相进入乳化机生产出基质开始,到成品箱最后出防爆土堤,在线时间不能超过 41.6 min ;如果是年产 $2.4\times 10^4\text{ t}$,则时间不能超过 20.8 min ;每条生产线的成品中转车在厂区内的行

驶速度不能超过 15 km/h ,年产量超过 $1.2\times 10^4\text{ t}$ 需要大量成品中转车转运才能满足存药量和安全要求。

是否分建生产线,建议由行业主管部门组织行业生产企业、科研单位、检测单位、安评机构采用统一标准来验证现有防传爆(或隔爆)措施是否充分、有效,存药量是否超标。否则名义上是分建,实际上则是联建,这就存在着如何选择工艺技术和设备的问题。

2)目前,无论是国内自主研发的乳化炸药生产技术,还是国外引进的技术,油水相配制和制药技术均能满足大产能生产线单位小时产能的要求。由于我国各地爆破技术发展存在差异,包装型产品规格差别很大,对所配置的装药、包装机械设备的规格、产品、产能要求均不同,装药、包装机械设备运行可靠性与制药产能之间存在一个匹配性的矛盾。

因此应确定在保证安全生产的前提下以满足在线人员、存药量及各工序之间最佳匹配性的一个符合中国国情的最佳生产线年产能。

5 结语

1)在目前自动控制、智能监控、故障自诊断及门禁系统技术水平相差无几的情况下,我国乳化炸药生产技术应该重点关注乳化、冷却、敏化等关键且危险工序的本质安全程度,从技术先进性、安全可靠、运行经济性、售后服务方便等因素发展我国乳化炸药生产技术。

2)乳化工艺应该选择基于我国国产乳化剂、复合蜡等原料的弱机械剪切敞口乳化工艺或无机械剪切低压静态混合乳化工艺。

3)敏化工艺应选择敞开式无需容积式泵输送的无后效快速化学敏化工艺技术。

4)选择敞开式无压非接触冷却方式,既安全又环保,还能有效防传爆隔爆。

参考文献

- [1] 于亚伦. 工程爆破理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004: 78-80.
- [2] 徐志祥,叶志文,胡毅亭,等.基于有限元分析的泵送过程螺杆泵受热研究[J].爆破器材,2009,38(6): 9-13.

(下转 102 页)

近基础设施的爆破开采区安全性分析与控制

施富强

(四川省安全科学技术研究院,成都 610045)

[摘要] 结合长期开展爆破开采区保护对象安全性论证的实例,系统分析爆破振动对桥梁、隧道及边坡的影响以及相互间的力学关系。应用风险分析原理提出安全论证方法和控制危险有害因素的技术手段,并以划区控制爆破参数的普适工艺建立标准化的过程控制体系。

[关键词] 爆破开采;安全论证;桥梁;隧道;高陡边坡

[中图分类号] TU443 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0086-04

1 前言

由于缺乏长远的科学规划,矿山采区经常会遇到与周边铁道、公路等基础设施建设相邻的问题,特别是涉及桥梁、隧道及高边坡穿越矿山造成冲突。要在保证交通运输安全的前提下,最大限度地降低对既有矿山资源利用的影响,并采用最简便有效的开采工艺,达到基础建设与资源开发和谐发展的目标,是安全分析与控制技术^[1]的责任^[1]。2003年以来,四川省安全科学技术研究院先后完成了《株六线增建第二线及电气化工程进入贵阳枢纽川黔货车外绕线经贵州水泥厂采区边缘安全性论证评估报告》、《成昆铁路渡口支线攀枝花徐家沟铁矿采矿爆破安全性论证》和《攀枝花徐家沟铁矿与丽攀高速公路临近区域爆破开采限界安全性论证报告》等影响较大的论证项目。在经历十余年的安全生产考验、深化、总结后,技术方法日臻成熟,供其他学者分享。

2 依据法律、法规及技术标准研究制定方案

安全性论证应充分体现科学、公平、公正、合法,在实地勘察的基础上,系统地分析和预测论证对象存在的固有风险、条件风险和关联风险,从法律层面考虑刚性要求和弹性尺度,从技术层面剖析本构关系并优化实施工艺,在管理层面制定科学方案和过程控制方法,为服务对象提供全方位的技术支持。法律、条例、标准及办法、通知、批复等内容涉及面广且常有自相矛盾之处,特别是不同管理部门从各自管理角度出发颁布的文件多有相背之处,应本着共同遵守上位法的原则,提出与现实和谐妥协的安全建议,这往往是论证工作的难点,通常需要严谨的技术分析提供支撑。据此,设计出论证工作的主体方案,编制出详细的实验研究计划和安全论证报告大纲。

[收稿日期] 2014-04-21

[作者简介] 施富强,1961年出生,男,山西大同市人,教授级高级工程师,硕士,主要从事工程爆破与安全工程研究;E-mail:sfq@swjtu.cn

3 桥梁安全性分析

通常桥梁具有较高的抗震能力,当临近爆破开采区时,一方面要分析持续的爆破振动对桥梁结构本身的作用和影响;另一方面要分析桥梁基础的承载能力与开采设计的安全保障。

3.1 桥梁抗震稳定性分析

由于桥梁结构类型繁多,使用状况差异很大,在此条件下,不易通过载荷实验判定其安全现状。通常参考《爆破安全规程》(GB 6722—2003)规定的安全允许振速,并结合现场勘察结果,在征求运维专家意见的基础上,综合确定安全允许质点峰值振动速度,经过几年的实践,认为取 $[V_{\max}]_b=8 \text{ cm/s}$ 比较符合常规桥梁的安全要求,测振点选择在桥梁主跨的跨中位置。对于采区高程高于桥墩承台顶面工况,一般只做上述分析即可。当爆破开采区低于桥墩承台顶面时,则必须进行基础稳定性分析。

3.2 桥梁基础稳定性分析

近二十年建设的大桥多为承台+群桩基础,桥面与桥墩以及基础自身的载荷都由桩体直接传至基岩,理论上不需要桥墩周围的岩体提供承载力即能保证大桥桩基的稳定性。实际上,桩身与岩体之间存在摩擦,会影响到桥墩周围岩体的应力状态。爆破开挖后形成边坡,打破了岩体原有的局部平衡状态,对桥墩周边岩体产生不良影响。

西南交通大学赵文等对高陡边坡桥基安全距离提出了经验公式^[2]:

$$S=0.031\alpha 1.482 3[(1-1.865 5B)q/K_r]^{0.696 5} \quad (1)$$

式(1)中, S 为桥基水平距离,m; α 为边坡坡角, $(^\circ)$; K_r 为岩体质量系数,通过现场勘测获取; q 为荷载强度,MPa; B 为桥基宽度,m。

丽攀高速徐家沟大桥测得基岩质量系数 $K_r=0.805$,边坡角 $\alpha=60^\circ$,桥基宽度 $B=8.5 \text{ m}$,荷载强度 $q=0.8 \text{ MPa}$,于是得到桥基水平安全距离为 10.5 m ,即要求爆区边坡上缘距桥基边缘应大于 10.5 m 。

4 隧道安全性分析

隧道抗震能力通常高于桥梁,根据《爆破安全规程》(GB 6722—2003)确定安全允许质点峰值振

速 s 较为常见。当隧道高程高于采区时,则还应当计算分析边坡卸荷带对隧道安全性的影响。

重庆交通大学陈洪凯等建立了开挖岩体边坡卸荷带宽度计算公式^[3]:

$$B=0.045 \alpha \frac{CH \text{tg} \beta}{b\gamma \text{tg} \varphi} \quad (2)$$

式(2)中, B 为边坡开挖卸荷带平均宽度,m; H 为边坡开挖高度,m; b 为边坡开挖台阶宽度,m; β 为边坡开挖坡度, $(^\circ)$; C 为边坡岩体粘聚力,KPa; φ 为边坡岩体内摩擦角, $(^\circ)$; γ 为边坡岩体容重, kN/m^3 ; α 为开挖修正数,爆破开挖时 α 取1.2,机械、人工开挖时 α 取1.1。

丽攀高速徐家沟隧道附近采区永久性边坡设计参数为台阶高度 $H=12 \text{ m}$,台阶宽度 $b=2 \text{ m}$,边坡角 $\beta=60^\circ$,岩体容重 $\gamma=30.38 \text{ kN/m}^3$, $\alpha=1.2$, $C=1\ 000 \text{ kPa}$, $\varphi=46^\circ$ 。于是得出开挖边坡卸荷带宽度为 17.8 m ,即要求采区边坡限界应保持在隧道外廓 17.8 m 之外。

5 边坡稳定性分析

为了全面掌握矿区永久性边坡对桥梁隧道的时效性影响,还应该对边坡设计进行安全性、稳定性分析。采用有限元法,建立开挖后的二维边坡有限元模型,研究不同坡角的荷载分布,为工程控制和持续运维提供技术依据。图1~图4给出应用Midas GTS Trial 软件,研究徐家沟矿区(微风化辉长岩)当台阶高度为 12 m ,台阶宽度为 2 m ,坡角分别为 65° 、 60° 、 55° 和 50° 时的变形分析结果。

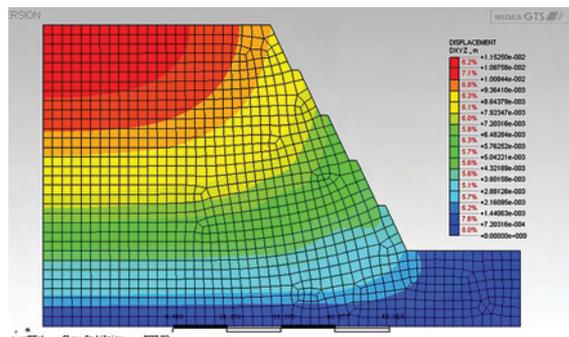


图1 边坡位移 ($\alpha=65^\circ$)

Fig. 1 Slope displacement ($\alpha=65^\circ$)