

文章编号: 1000-7598-(2009) 增 1-0005-05

钢管爆炸破坏的数值模拟分析与试验研究

李新平¹, 代翼飞¹, 刘金焕², 曾 明³, 刘立胜¹, 张开广³

(1. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 武汉 430070; 2. 大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610016;
3. 葛洲坝集团公司三峡工程施工指挥部, 宜昌 443134)

摘 要: 在三峡工程二期下游围堰拆除爆破中, 其难点问题为混凝土防渗墙的一次性爆破拆除成功。由于混凝土防渗墙内有预埋的灌浆钢管及固定钢管的保持架, 这种结构在以往的围堰水下防渗墙爆破拆除工程中是没有先例的。如果混凝土防渗墙爆破拆除仅仅只将混凝土爆碎, 而钢管不炸断、保持架不散则会使得爆渣的水下开挖无法进行, 因此将混凝土预埋灌浆钢管炸断及保持架炸散是关系到二期下游围堰拆除爆破成败的关键问题。针对这一问题, 利用 ANSYS/LS-DYNA 计算软件和现场试验, 研究了不同装药结构、药包直径等因素对钢管爆炸破坏效果的影响, 讨论了钢管爆炸炸断破坏形态与装药结构之间的关系, 在此基础上确定钢管爆炸炸断破坏的合理爆破参数及装药结构形式。二期围堰爆破拆除结果表明研究成果是可靠的。

关 键 词: 三峡工程; 混凝土防渗墙; 钢管爆炸; 数值模拟; 现场试验

中图分类号: O242 **文献标识码:** A

Test study and numerical simulation analysis of explosion in steel tubes

LI Xin-ping¹, DAI Yi-fei¹, LIU Jin-huan², ZENG Ming³, LIU Li-sheng¹, ZHANG Kai-guang³

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Daduhe Hydropower Development Co. Ltd., Chengdu 610016, China;
3. Gezhouba Group Corporation, Yichang 443002, China)

Abstract: To demolish concrete cutoff wall successfully in one blasting is a difficulty which arose in the demolition blasting of downstream cofferdams in the second stage of Three Gorges Project (TGP). The problem was caused by grouting steel tubes and supports to immobilize them, both of which were pre-buried in concrete cutoff wall. This kind of structure was never encountered before in demolition blasting of cofferdams' underwater cutoff wall. If the demolition blasting just exploded concrete into pieces, leaving those steel tubes unbroken and their supports compact, the underwater excavation of explosion residues could not proceed. The key element of the demolition blasting of downstream cofferdams in the second stage was to destroy both the grouting steel tubes and their supports. To solve this problem, this paper used ANSYS/LS-DYNA computational software and in-situ experiments to study the effects of different charge structures and diameters of cartridges on the destruction of steel tubes in explosions. The relationships between the destruction configurations of steel tubes after explosions and charge structures are discussed; and the proper blasting parameters and charge structure are determined based on these discussions. The research achievements are proved by the results of the demolition blasting.

Key words: TGP; concrete cutoff wall; explosion of steel tube; numerical analysis; field test

1 引 言

二期下游围堰是三峡工程主要的 III 级临时建筑物之一, 全长 1 075.9 m。三峡工程三期明渠截流前需拆除二期上下游围堰, 下游围堰最终拆至高程 53 m (局部至高程 50 m)。二期下游围堰堰体内布置有塑性砼防渗墙 (单排), 左岸段、右岸段砼防渗墙墙顶高度 79.0 m; 河床段砼防渗墙墙顶高程

70.0 m。防渗墙内预埋有塑料管或钢管及其保持架。墙体高度大于 40 m 时 (围堰桩号 0+199.72~909.4 m), 沿墙轴线以 1.5 m 的间距埋设直径 100 mm 钢管, 每根预埋钢管用长 6~8 m 的钢管焊接而成, 为固定钢管拉孔, 按 6~8 m 一层安装特制钢筋保持架 (钢筋直径 22 mm)。墙体砼浇筑后钢管内也灌满高标号水泥浆, 构成了由钢管及钢筋保持架组成的类似钢筋砼防渗墙。

收稿日期: 2009-05-21

第一作者简介: 李新平, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、爆破工程方面的教学与研究工作。Email: xinpinglei@whut.edu.cn

砼防渗墙水下一次爆破拆除成功是二期下游围堰拆除成功的关键,其难点在于砼防渗墙内有预埋的灌浆钢管及固定钢管的保持架,如果砼防渗墙爆破拆除仅仅只将砼爆碎,而钢管不炸断、保持架不散则水下开挖出渣无法进行,因而将钢管炸断及保持架松散是砼防渗墙拆除爆破成败的关键。为了确保二期下游围堰拆除的顺利进行,在下游围堰砼防渗墙正式拆除爆破之前进行防渗墙墙体拆除爆破现场试验和钢管爆破试验。

2 现场钢管爆破试验

钢管爆破试验包括不同装药结构、药包直径爆破效果比较,及不同堵塞方式、堵塞长度对钢管爆破破碎效果的影响,研究钢管爆破炸断形态与装药结构的关系,寻求炸断钢管合理的爆破参数及装药结构形式,为砼防渗墙拆除爆破试验设计提供可靠的参考依据。

2.1 确定试验材料及加工

通过查阅二期下游围堰砼防渗墙施工竣工资

料,砼防渗墙所埋钢管长 5~6 m,外径为 100 mm,内径约 92~96 mm。为了模拟实际防渗墙上钢管内钻孔情况,对实验钢管进行了加工,将钢管底部用钢板焊牢封闭,并在底部浇筑 50 cm 水泥浆;用外径 75 mm 或 80 mm 钢管套在试验钢管内,在两钢管之间灌注水泥浆,初凝以后拔出套管,龄期达到 28 d 以后进行试验,采用这种方法各加工 5 根钢管,另外再加工 2 根只浇孔底 50 cm 水泥浆、不用套管灌注水泥浆的钢管,共计 12 根钢管。

2.2 爆破参数设计

根据以往工程实践经验及装药可行性,拟采用三种直径的药包进行试验,即 $\Phi 70$ mm、 $\Phi 50$ mm 及 $\Phi 32$ mm (两个 $\Phi 32$ mm 药包并列绑扎成一个长 20 cm 药包)。对每种直径的药包以不同的装药形式和药包间距,组成不同的装药结构形式进行钢管爆破试验。具体装药结构见图 1。 A 点为药卷中心, C 点为两相邻药卷的中点, B 点为 AC 中点。药卷长度 $l=20$ cm, L 表示两相邻药卷间的净距, d 表示药卷直径。钢管内径为 92 mm,外径为 100 mm。

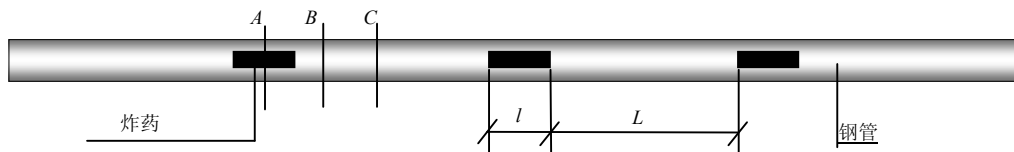


图 1 药包分布示意图
Fig.1 Typical sketch of explosive arrangement

2.3 爆破试验结果分析

爆破试验后观察爆破效果,包括不同药卷直径及装药结构爆破钢管的断裂情况,堵塞长度、材料及质量对爆破效果的影响,钢管孔口飞石及断裂处钢管碎片飞散情况等。通过钢管爆破试验,寻求达到钢管爆破试验目标的优化爆破参数及装药结构,作为防渗墙拆除爆破的钢管装药结构的基本设计依据。钢管爆破试验的主要结果分析如下:

(1) 钢管炸断部位均在装有药包的部位,当药包间隔段距离较大时钢管爆后尚能保留管状。药包部位钢管被炸成碎块的破碎程度与药包直径密切相关,两者成正比关系。炸药将装药部位钢管炸碎,但炸碎的长度并不是正好等于药卷的长度,炸碎的长度为卷长度的二分之一,其部位在药卷的中间部位,药卷两端各四分之一的钢管没有炸碎,而炸成齿条形成喇叭状张开,爆后短钢管的长度一般应大于药卷净间距长度。

(2) 钢管爆破断裂长度与药卷净间距的关系

钢管爆破断裂试验结果均表明在爆炸应力的作用下,断裂钢管的长度与药卷净间距关系最为密切,药包净间距是控制钢管断裂长度的主要因素。

直径 $2 \times \Phi 32$ mm 的药包进行了二组钢管爆破试验,药包净间距分别为 40、65 cm 时,装药段钢管被炸成 86~108.5 cm 的短管。

直径 50 mm 的药包进行了七组钢管爆破试验,药包净间距在 30~115 cm 之间变化,随着药包净间距由大变小,装药段钢管断裂长度也由大变小。药包净间距小于 40 cm 时,钢管被炸成碎片,随着净间距的进一步减小,钢管爆破块度更碎,且抛散距离更远。药包净间距大于 85 cm 时,钢管爆破成短管,短管长度大于 10 cm,随着药包净间距进一步增大,短管长度更大。

直径 70 mm 的药包进行了三组钢管爆破试验,药包净间距为 65~100 cm,净间距为 65 cm 时,装

药段钢管被炸成碎片, 净间距为 100 cm 时, 装药段钢管炸成 115 cm 的短管。

随着药包净间距由大变小, 钢管爆破块度由短管状逐渐变为碎片状态间有一个临界值, 控制钢管块度大小的药包净间距对应也有一个临界值, 不同的药包直径其临界值不同, 本次钢管爆破试验并未刻意寻找具体的临界值, 但从试验成果中可以推断不同药包直径的临界值所处的范围, $\Phi 70$ mm 药包间距临界值处于 65~100 cm 之间, $\Phi 50$ mm 药包间距临界值处于 40~65 cm 之间, $2\times\Phi 32$ mm 药包间距临界值处于 40~65 cm 之间。

(3) 钢管爆破破碎程度与药卷直径的关系

药卷直径的变化对钢管装药部位和整个钢管装药段的破碎作用是不同的。由于钢管爆破时是爆炸冲击波作用将其破碎的, 因而, 钢管装药部位的局部破碎程度与药包直径关系密切。药包直径愈大, 药卷部位的钢管破碎程度愈高, 如 $\Phi 70$ mm 药包爆破时药包部位钢管的破碎程度明显高于 $\Phi 32$ mm 药包, 反之亦然。

(4) 装药耦合系数对钢管爆破破碎的影响

从 50 mm 药包装入孔径 75 mm 和 80 mm 孔径及 $\Phi 70$ mm 药包装入孔径 80 mm 和 102 mm 孔径的钢管爆破试验的效果看: 装药耦合系数(d/D , d —药包直径, D —炮孔直径)对钢管爆破块度大小的影响不大; 在药包间距一定的情况下, 爆后钢管的长度并未因为装药耦合系数的增大(一定范围)而减小, 实际上当装药耦合系数在一定范围内变化时不会影响钢管爆破短管长度的变化。

(5) 药包净间距一定时不同药包直径爆破效果比较

三种药包直径的钢管爆破试验效果比较: 第一组、第三(六)组和第十组试验的药包直径分别为 70 mm、50 mm 和 2×32 mm, 药卷净距均为 65 cm。爆破后第二组装药段全部炸成碎片, 碎片抛散距离较远; 第三(六)组装药段炸成长度为 75~91 cm 的钢管片(短钢管沿纵向劈开), 较碎的钢片抛散较远; 第十组装 5 个药包装钢管炸成 6 段, 6 段短钢管全部留在爆破点附近 1 m 范围以内, 装药段的短管长度为 86~108.5 cm。由此可见, 药包净间距一定的情况下, 药包直径和线装药密度越大, 钢管爆破块度越碎、抛散距离越远。仅炸断钢管而言 $\Phi 70$ mm@65 cm 装药结构钢管爆破块度过碎、碎片飞散距离过远, 爆炸能量明显过大。而 $2\times\Phi 32$ mm@65 cm 装药结构钢管爆破既在药包部位炸断钢管, 又不使钢管短抛太远, 爆炸能量控制较为适中。

(6) 两药包连续绑扎和单个药包爆破效果比较

直径 70 mm 的药包采用两种药包布置方式, 即 $\Phi 70$ mm@100 cm (第十一组) 和 $2\times\Phi 70$ mm@100 cm (两节 70 mm 药卷一字形排列组成一个药包。第一组)。前者装药段钢管被炸成 120 cm 的短管段, 后者装药段钢管被炸成 115 cm 的短管段。药包间距相同的情况下, 后者的装药量较前者大一倍, 而爆后短管长度两者却差别不大。

试验结果表明: 由于单个药包均匀布置, 装药集中度更趋均匀合理, 故单药包均匀间距装药爆破效果较两药包连续装药好。

3 钢管爆破数值模拟分析

目前, 国内为对于爆炸荷载的研究主要集中于理论分析和相关的数值模拟方面, 如李宁和 G. Swoboda^[1], 陈士海^[2], 周传波^[3], 夏翔^[4]等。本文利用 LS-DYNA 软件来模拟爆炸过程, 从而得到有效应力随着研究部位至药卷中心间距变化的关系以及钢管内壁压力随时间变化的关系。

3.1 材料参数

3.1.1 钢管参数

建模过程中, 钢管采用双线性动力塑性硬化材料模型, 相关材料参数如表 1 所示。

表 1 钢管参数表
Table 1 Parameters of steel tubes

密度 /(kg/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服限 /GPa	割线模量 /kPa	临界应变
7 850	210	0.3	1.32	1.8	0.120

3.1.2 炸药参数

采用 JWL 状态方程来模拟炸药爆轰过程中压力和比容的关系, 即

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 是材料常数; P 是压力; V 是相对体积; E_0 是初始比内能。乳化油炸药的具体参数如表 2。

3.1.3 空气参数

空气状态采用多项式状态方程来描述:

$$P = c_0 + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu^2) E_0 \quad (2)$$

具体参数如表 3 所示。

3.1.4 混凝土参数

混凝土参数如表 4 所示。

表 2 乳化炸药参数表

Table 2 Parameters of emulsified explosive

密度 /(kg/m ³)	爆炸速度 /(m/s)	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /(J/m ³)	V
1 310	5 500	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192	1.0

表 3 空气参数表

Table 3 Parameters of atmosphere

C_0 /MPa	C_1 /MPa	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0 /(J/m ³)
0.1	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^4

表 4 混凝土参数表

Table 4 Parameters of concrete

密度/(kg/m ³)	剪切模量/GPa	体积模量/GPa
2 500	13.9	0.13

3.2 数值模拟结果分析

(1) 某一时刻有效应力随研究部位距药卷中心之间距离变化的关系

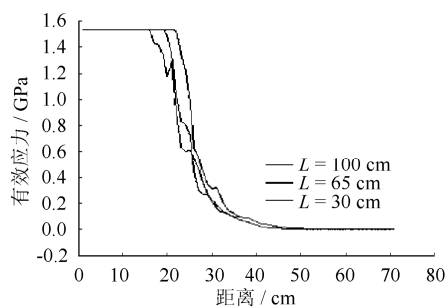


图 2 有效应力与研究部位距药包中心距离的关系

Fig.2 The curve of effective stress vs. the distance to centre of charge

图 2 显示的是直径 $d=50$ mm 的药卷, 净距在 30~100 cm 之间变化时, 有效应力随研究部位至药卷中心距离的变化曲线。由图可知, 当药包净距增大时, 有效应力显著下降的位置距 A 点的距离减小, 这意味着钢管破碎的长度增大了。并且, 有效应力显著降低的位置位于药包的端部, 其距离药包中心点 A 点的距离在 15~25 cm 之间变化。

(2) 钢管内壁压力随时间的变化情况

图 3~5 反映了当药卷净距 $L=65$ cm 时, A 、 B 、 C 三点位置处钢管内壁压力随时间的变化情况。可以看出当药卷直径变化时, A 点位置压力变化最小, C 点其次, 而 B 点位置变化则最大。这表明在药卷中心位置附近, 由于药卷直径变化而导致的钢管内壁压力变化并不明显。随着距 A 点距离的增大, 例如 B 点处, 压力随药卷直径的变化就比较大, 这会引起钢管断裂位置发生变化。

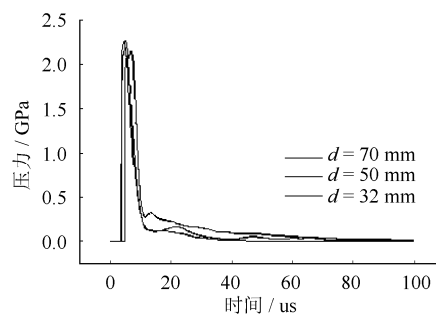
图 3 A 点位置处钢管内壁压力与时间的关系

Fig.3 The curve of pressure on the inner steel pipe vs. time at point A

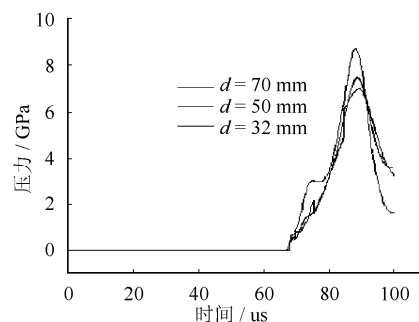
图 4 C 点位置处钢管内壁压力与时间的关系

Fig.4 The curve of pressure on the inner steel pipe vs. time at point C

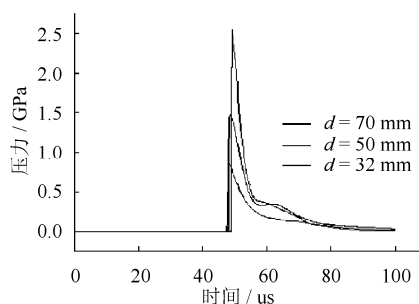
图 5 B 点位置处钢管内壁压力与时间的关系

Fig.5 The curve of pressure on the inner steel pipe vs. time at point B

随着药卷直径的增加, 破碎的范围就会扩大而碎片的尺寸会减小。当距 A 点的距离进一步增加时, 例如 C 点, 压力变化的幅度比 B 点处要小, 各种药卷直径条件下钢管内壁压力的变化趋于一致, 并且不会使钢管产生破坏。这表明药卷直径对钢管破碎长度的影响较为明显。

4 结 论

本次钢管爆破试验及数值模拟分析的主要结论如下:

(1) 试验的三种药卷直径 (70 mm、50 mm 及 2×32 mm) 均能将钢管炸断。钢管被炸断的部位均为钢管的装药部位。

(2) 钢管爆破破碎程度主要与装药结构、药卷净间距密切相关, 间距大钢管爆破块度大, 间距小钢管爆破块度小。

(3) 单纯炸断钢管试验表明药包直径 $2 \times \Phi 32 \text{ mm}$ (两个药包并成一个药包)净距 65 cm 的装药结构即可满足钢管断裂长度 1 m (空间长度) 的要求, 炸药能量绝大部分用于炸断钢管, 用于抛掷的能量极少。

(4) 两药包一字形连续装药不如单个药包 均匀间隔装药的爆破效果好。

(5) 连续装药结构爆破钢管会将钢管炸成细长条和过度飞散, 其断裂段长度不易控制。而单个药包均匀间隔装药断裂段长度可以控制, 能达到设计控制的标准。

(6) 数值模拟的结果表明: 当药卷直径 $d = 50 \text{ mm}$ 时, 钢管破裂位置与药卷中心的距离在 15~25 cm 之间变化。药卷直径对于钢管破碎长度有很大的影响。数值模拟的结果与现场试验观察到的现象比较一致。

参 考 文 献

- [1] 李宁, SWOBODA G 爆破荷载的数值模拟与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13 (4): 357—364.
- [2] 陈士海, 王明洋, 赵跃堂. 岩石爆破破坏界面上的应力时程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1784—1788.
- [3] 周传波, 谷任国, 罗学东. 坚硬岩石一次爆破成井掏槽方式的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (13): 2298—2303.
- [4] 夏祥, 石永强, 李海波. 岩体单孔及群孔齐发爆破爆炸荷载数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (Supp.1): 3390—3396.
- [5] 杨军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值分析计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] WANG J. Simulation of landmine explosion using LS-DYNA3D software: benchmark work of simulation of explosion in soil and air [M]. Victoria : DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
- [7] 令狐可, 王雅, 陆丹. 动载作用下钢筋混凝土梁非线性有限元分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6): 685—692.