

文章编号: 1001-4888(2013)01-0134-07

内爆炸下钢管混凝土结构变形与破坏 的试验分析及数值模拟^{*}

龚志刚, 沈兆武, 马宏昊

(中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027)

摘要: 钢管混凝土结构由于具有良好的力学性能和低经济成本而受到广泛应用, 因此对它的研究很多, 但对它在爆炸作用下尤其是内爆炸作用下的研究很少, 故分析钢管混凝土结构在内爆炸下的变形与破坏具有重要意义。本文通过试验与数值模拟方法, 分析了内爆炸下钢管混凝土结构在具有二条预制狭缝时的变形与破坏情形。结果表明, 钢管变形主要发生在靠近狭缝处, 变形大小随药量的增加而增大, 最终导致钢管在狭缝两端出现约 45° 方向的裂纹, 引起钢管混凝土剪切破坏。

关键词: 钢管混凝土结构; 内爆炸; 狭缝; 剪切破坏

中图分类号: O38

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-11-191

0 引言

钢管混凝土结构由于具有以下优点: 优越的力学性能, 其承载力高, 延性、抗震性好; 良好的耐火、耐腐蚀性能; 架设轻便、施工快速、省工省料; 经济成本低, 因此被广泛应用于各种工程实践。如深圳建成的 291.6m 的赛格广场, 地下 4 层、地上 72 层全部采用钢管混凝土结构; 重庆万县建成的跨度 420m 的万县长江公路大桥也采用钢管混凝土结构^[1]。在军事防护工程中, 后勤工程学院的石少卿等人提出了六边形钢管混凝土制作的单层及多层蜂窝状遮弹结构, 并证明该结构具有理想的抗侵略性能^[2]。由于钢管混凝土结构受到广泛应用, 广大学者对它开展了从静态载荷下抗压、抗弯性能到低强度动态载荷下延性、滞回性能的研究^[3-4]。但对爆炸、冲击等极其剧烈载荷作用下钢管混凝土结构的特性的研究还不多, 长安大学的冯红波等人通过有限元模拟分析了钢管混凝土结构在表面爆炸载荷下的特性^[5]。由经验可知, 内爆炸下炸药的破坏能力更强, 故而分析内爆炸下钢管混凝土结构的性能有重要意义。本文基于巢湖水泥厂钢管混凝土结构水泥立窑爆破拆除实践^[6], 通过试验与数值模拟, 分析了具有二条狭缝的钢管混凝土柱在条形药柱、横向装药下 4 组不同药量时的变形及破坏情形, 可为类似工程及防爆设计提供参考和借鉴。

1 试验分析

1.1 试验准备

钢管混凝土的性能不仅与混凝土强度等级有关, 而且与钢管的几何参数有关, 如径厚比、长径比等。试验所用钢管为 45# 钢, 外径为 114mm, 壁厚为 4mm, 径厚比是 28.5 (直径与壁厚之比)。每组钢管长

^{*} 收稿日期: 2011-12-04; 修订日期: 2012-05-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51174183)、国家自然科学基金重点项目(51134012)

通讯作者: 沈兆武, 教授, 博士生导师, 主要从事爆炸力学研究。E-mail: zwshen@ustc.edu.cn

度为 50cm,在距一端 17.5cm 处开始沿轴向切开一条长 15cm,宽 4mm 的细长狭缝,再在对称位置切开另一条,这样狭缝中心与钢管中心就在同一位置。混凝土用水泥砂浆替代,水泥砂浆制作原料采用水泥、砂子、水,配方为 $m_{\text{水泥}} : m_{\text{砂子}} : m_{\text{水}} = 17\text{kg} : 50\text{kg} : 12\text{kg}$,配方比约为 1 : 3 : 0.6。水泥砂浆浇注完毕后,在室温下常规养护 28 天,强度达到 C30 混凝土等级^[7]。钢管混凝土结构如图 1 所示。



图 1 钢管混凝土结构

Fig. 1 Structure of concrete-filled steel tube

表 1 装药参数

Tab. 1 Parameters of loading explosive

序号	密度	装药量	装药长度
1	1.56g/cm ³	6g RDX	4cm
2	1.56g/cm ³	9g RDX	6.5cm
3	1.56g/cm ³	12g RDX	4.6cm
4	1.56g/cm ³	16g RDX	6.3cm

炸药选用黑索金,在内径 $\Phi 10\text{mm}$ 的橡胶管里分别把 5g RDX、8g RDX 压成密度约为 $1.56\text{g}/\text{cm}^3$ 的条形药柱,药柱长度分别为 4cm 和 6.5cm;在内径 $\Phi 14\text{mm}$ 的橡胶管里把 11g RDX、15g RDX 分别压成密度约为 $1.56\text{g}/\text{cm}^3$ 的条形药柱,药柱长度分别为 4.6cm 和 6.3cm。上述药柱都用自制的装有 1g RDX 药的雷管引爆,这样作用于钢管混凝土结构的药量简化如表 1 所示。

1.2 试验结果

炸药在钢管混凝土内部爆炸时,内层混凝土出现空腔,外层钢管向外变形。钢管变形越大,说明受到的破坏越强,钢管混凝土结构的破坏程度可通过钢管变形量大小来衡量。在本文的装药形式下,钢管在靠近狭缝处受到的载荷比别处的大,由板壳理论可知,作用在开口圆柱壳体边界处的载荷具有边缘效应,载荷在远离边界时会衰减,所以钢管的变形在靠近狭缝处大而与两狭缝正对位置却较小(见图 5 所示)。钢管混凝土在 6g、9g、12g、16g RDX 药量作用下的变形与破坏情况分别如图 2、图 3、图 4、图 5 所示。



图 2 6g RDX 作用时的情形

Fig. 2 Situation of 6g RDX



图 3 9g RDX 作用时的情形

Fig. 3 Situation of 9g RDX

从上述 4 个图可知,钢管的变形发生在狭缝处,狭缝正对处变形较小。钢管在 6g RDX 作用时,变形很小,显示出优良的抗爆性能。钢管在狭缝处的变形随药量的增加而增大,由于狭缝端部受到约束且其四角是直角,引起很大的应力集中,由图 5 可知,16g RDX 作用时,钢管变形很大,最大变形量为 5.25cm,在狭缝端部出现约 45° 方向的裂纹。试验中发现在此药量下,狭缝段内的水泥砂浆完全破碎,

钢管变形很大,且在狭缝端部出现较长的裂纹,此时钢管混凝土受到严重破坏已不能承受载荷。各药量下的径向最大变形量及最小变形量如表 2 所示。



图 4 12g RDX 作用时

Fig. 4 Situation of 12g RDX



图 5 16g RDX 作用时

Fig. 5 Situation of 16g RDX

表 2 不同药量下的最大及最小位移

Tab. 2 Maximum and minimum displacements in condition of various explosive amounts

药量	6g RDX		9g RDX		12g RDX		16g RDX	
变形量	A	B	A	B	A	B	A	B
	0.60cm	0.1cm	1.02cm	0.24cm	3.04cm	0.50cm	5.25cm	1.24cm

2 数值模拟分析

数值模拟在某种意义上对问题的认识更加深刻,利用数值模拟能进一步分析钢管混凝土变形及破坏因素,本部分主要分析钢管在狭缝处和狭缝正对位置应力大小及沿狭缝处剪应力分布等。

2.1 有限元模型

按试验尺寸建立有限元模型,为节省计算量,建模采用 1/4 模型;单位制采用 cm-g- μ s;算法使用流固耦合方法,把炸药当作流体处理,用 ALE 算法,钢管和混凝土用 LAGRANGE 算法,建立的有限元模型如图 6 所示。

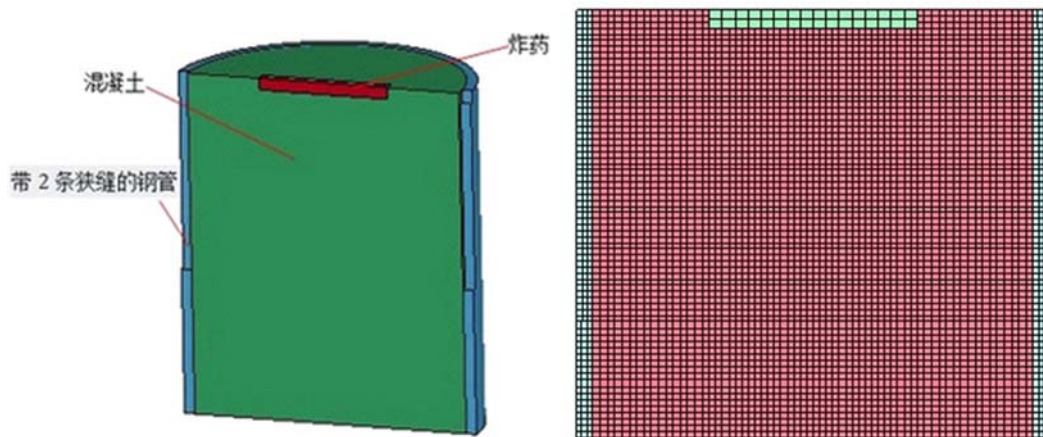


图 6 数值模拟有限元模型

Fig. 6 Finite element model of simulation

2.2 数值模拟材料模型及材料参数

炸药采用 MAT_HIGH_EXLPOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方程描述,JWL 方程为:

$$p = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$
 (1)

式中: p 为爆轰产物压力; V 为相对比体积; E 为比内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数。对于本次试验, 装药密度为 $1.56\text{g}/\text{cm}^3$, 爆速 D 为 $7740\text{m}/\text{s}$, C-J 爆轰压力为 25.9GPa , JWL 参数如表 3 所示^[8-9]。

表 3 JWL 状态方程参数

Tab. 3 Parameters of JWL equation

A	B	R_1	R_2	ω
622GPa	24GPa	5.70	1.63	0.34

混凝土采用 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 材料模型, 该模型适用于混凝土受到大应变、高应变率和高压力载荷作用的情形, 模型可表示为:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*]$$
 (2)

式中: $\sigma^* = \sigma/f'_c$, $P^* = P/f'_c$, σ 、 P 分别为实际应力、实际压力; f'_c 为静态单轴压缩强度。各参数如表 4 所示^[10-11]。

表 4 混凝土 JHC 模型参数

Tab. 4 Parameters of JHC model of concrete

参数名称	数值	参数名称	数值	参数名称	数值
RO 密度	$2.17\text{g}/\text{cm}^3$	T 静态最大抗拉强度	2.28MPa	UL 压实应变	0.15
G 剪切模量	9.2GPa	EPS0 参考应变率	$10/\text{s}$	D1 损伤常数	0.04
A 归一化凝聚强度	1.02	EFMIN 损伤常数	0.02	D2 损伤常数	1.0
B 归一化压力硬化常数	1.62	SFMAX 归一化最大强度	6.2	K1 损伤常数	85GPa
C 应变率系数	0.028	PC 压碎应力	0.01GPa	K2 损伤常数	-171GPa
N 压力硬化指数	0.78	UC 压碎体应变	0.003	K3 损伤常数	208GPa
FC 静态单轴压缩强度	28.8MPa	PL 压实应力	0.5GPa		

钢管采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型, 该模型与应变率有关, 分为随动硬化、各向同性硬化、随动和各向同性混合硬化三种类型, 该模型可表示为^[12]:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p)$$
 (3)

$$E_p = \frac{EE_t}{E - E_t}$$
 (4)

$$\epsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}} dt$$
 (5)

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^e$$
 (6)

上式中: σ_0 为初始屈服应力; E_p 为塑性硬化模量; E_t 为切线模量; C 、 P 为材料常数; ϵ_{eff}^p 为有效塑性应变; β 为硬化类型参数, 取值从 0 到 1, $\beta=0$ 对应随动硬化, $\beta=1$ 对应各向同性硬化, $0<\beta<1$ 对应混合硬化。各参数如表 5 所示。

表 5 钢管的随动硬化参数

Tab. 5 Parameters of steel tube for kinematic hardening

参数名称	数值	参数名称	数值	参数名称	数值
RO	7.83g/cm ³	SIGY	325MPa	SRC	404
E	200GPa	ETAN	16GPa	SRP	5
PR	0.3	BETA	0	FS	0.15

2.3 数值模拟结果分析

本文装药形式下,钢管在靠近狭缝处受到的载荷较大,而在狭缝正对处较小。图 7 对应的是 6g RDX 时钢管在狭缝处与狭缝正对处的主应力时程曲线,由图可知,钢管在狭缝处的主应力比狭缝正对处的主应力明显要大一些,且其值比屈服应力要大,而钢管在狭缝正对处的主应力值随着爆炸产生的冲击波的衰减很快降下来,其平均值在屈服应力以下,由此可知,这种情形下钢管的变形主要发生在狭缝处。

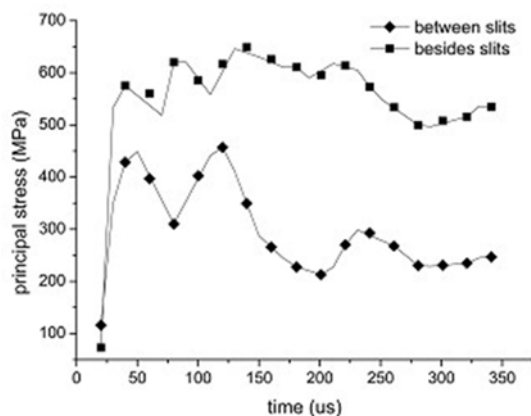


图 7 钢管在狭缝处与狭缝中间处的主应力

Fig. 7 Principal stress of the position of besides slits and between slits

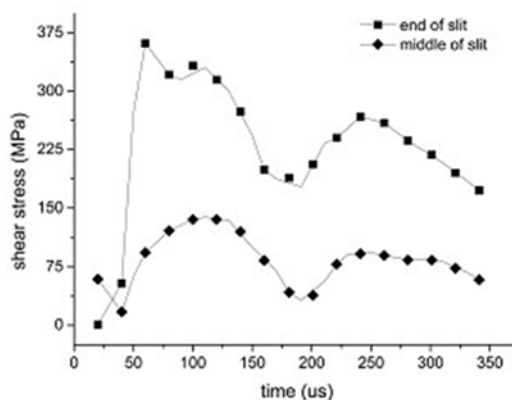


图 8 钢管在狭缝端部与中间处剪应力

Fig. 8 Shear stress of the position of end and middle of slits

钢管沿狭缝变形时,狭缝端部处会受到其它位置的约束,产生剪切应力并在狭缝端部直角处发生应力集中。图 8 所示为剪应力在狭缝端部和中间位置的时程曲线,由图所知,剪应力在狭缝端部处比狭缝中间处大得多,钢管剪切破坏发生在狭缝端部处。

由上述可知,钢管混凝土结构在钢管上有二条对称狭缝时,对于本文的装药形式,钢管变形主要发生在靠近狭缝处,其破坏是在狭缝端部出现剪切裂纹。在 16g RDX 时,其变形与破坏的试验与数值模拟情况如图 9 所示,两者较为相近。

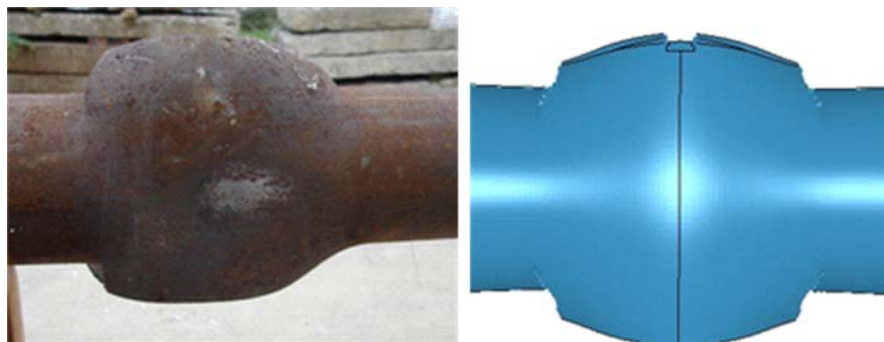


图 9 16g RDX 时试验与模拟结果比较

Fig. 9 Comparison of experiment and simulation in condition of 16g RDX

内爆炸下,钢管混凝土在上述药量的最大变形量如图 10 所示。与试验情况的对比如表 6 所示。

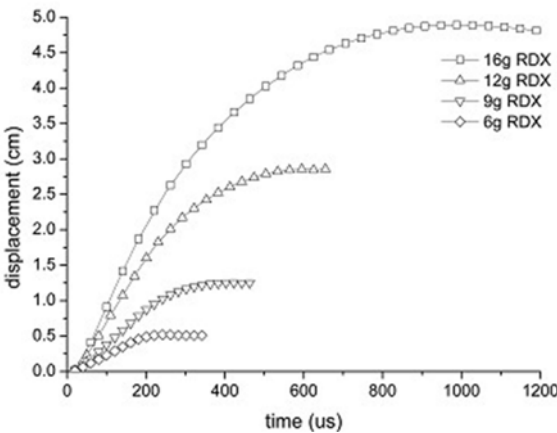


图 10 各药量下的最大变形量
Fig. 10 Maximum displacement of steel tube in condition of various explosive amount

表 6 试验与模拟对比

Tab. 6 Comparison of experiment and simulation

药量	试验	模拟
6g RDX	0.6cm	0.52cm
9g RDX	1.02cm	1.24cm
12g RDX	3.04cm	2.85cm
16g RDX	5.25cm	4.88cm

3 结论

钢管混凝土结构具有良好的抗爆性能,本文通过试验与数值模拟表明钢管混凝土在具有狭缝时能显著降低其抗爆性能,这对于爆破拆除工程实践有很好的指导意义。

在本文装药形式下,钢管的变形主要发生在靠近狭缝处而与狭缝正对处却较小,在 16g RDX 作用时,虽然受到非常严重的破坏,但钢管在狭缝正对处的变形依然不大,说明采用在钢管上切出狭缝的措施能降低其抗爆性能。同时对防爆设计而言,在钢管上采用加强筋等加强措施可以提高其抗爆能力。

对于本文的钢管混凝土结构,它在内爆炸下的破坏主要是在钢管狭缝端部出现约 45°方向的裂纹,导致钢管剪切破坏。

参考文献:

[1] 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展[J]. 土木工程学报, 1998, 32(4):16—25 (Cai Shaohuai. Recent development of steel tube-confined concrete structures in China[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 32(4): 16—25(in Chinese))

[2] 石少卿, 黄翔宇 等. 多边形钢管混凝土短构件在防护工程中的应用[J]. 混凝土, 2005, 2:95—98 (Shi shaoqing, Huang xiangyu, et al. Application of polygonal short steel tube filled with concrete on the defense work[J]. Concrete, 2005, 2:95—98(in Chinese))

[3] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论—研究与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006 (Zhong Shantong. Unified theory of concrete-filled steel tube—research and application[M]. Beijing:Qinghua University Press, 2006(in Chinese))

[4] Susantha K A S, Hanbin Ge, et al. Cyclic analysis and capacity prediction of concrete-filled steel box columns[J]. Earthquake Engineering And Structure Dynamics, 2002, 31(2):195—216.

[5] 冯红波, 赵均海 等. 爆炸载荷作用下钢管混凝土柱的有限元分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6):680—684(Feng Hongbo, Zhao Junhai, et al. Finite element analysis for CFST columns under blast load[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(6):680—684 (in Chinese))

[6] 龚志刚, 沈兆武 等. 组合结构水泥窑定向爆破拆除[J]. 工程爆破, 2011, 17(3):66—68 (Gong Zhigang, Shen Zhaowu, et al. Directional blasting demolition of a cement kiln with composite structure[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(3):66—68 (in Chinese))

[7] JGJ/T 98—2010. 中华人民共和国行业标准——砌筑砂浆配合比设计规程[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2010 (JGJ/T 98—2010. Specification for mix proportion design of masonry mortar[S]. Beijing:China Building Industry Press, 2010 (in Chinese))

- [8] Mohammad Hossein Keshavarz, Hamid Reza Pouretedal. An empirical method for predicting detonation pressure of Chnofci explosives[J]. *Thermochimica Acta*, 2004, 414:203—208.
- [9] Lee E, Finger M, Collins W. JWL Equation of State Coefficients for High Explosives[J]. Lawrence Livermore Laboratory, 1973.
- [10] Holmquist T J, Johnson G R, et al. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures[C]. Fourteenth International Symposium on Ballistics, Quebec City, Canada, 1993.
- [11] 施绍裘, 王永忠 等. 国产 C30 混凝土考虑率型微损伤演化的改进 Johnson-Cook 强度模型[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(增 1):3250—3257 (Shi Shaoqiu, Wang Yongzhong, et al. Improved Johnson-Cook's strength model taking account of rate-dependent micro-damage evolution for domestic C30 concrete[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(supplement 1):3250—3257(in Chinese))
- [12] LSTC. LS-DYNA Theoretical Manual[M]. Livermore Software Technology Corporation, 1998.

Experimental Analysis and Numerical Simulation of Deformation and Destruction of CFST Subjected to Internal Blasting

GONG Zhi-gang, SHEN Zhao-wu, MA Hong-hao

(Department of Modern Mechanics, University of Science Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Structure of concrete-filled steel tube (CFST) is extensively applied due to its excellent mechanical properties and low economic cost. There are lot of investigations about CFST, but only little investigation is contributed to CFST subjected to blasting load especially to internal blasting load. So it is very significant to analyze the deformation and destruction of CFST subjected to internal blasting. Deformation and destruction of CFST with 2 precut slits subjected to internal blasting was analyzed based on experiment and numerical simulation. Results show that the deformation of outer steel tube occurs mainly near the precut slits, and the deformation size increases with the increase of explosive amount. The deformation eventually leads to cracks at both ends of slit towards about 45° direction and causes CFST shear failure.

Keywords: structure of concrete-filled steel tube(CFST); internal blasting; slit; shear destruction