

文章编号: 1001 - 487X(2007)02 - 0001 - 06

# 基于纤维模型的钢筋混凝土框架结构 爆破倒塌破坏模拟<sup>\*</sup>

陆新征, 张炎圣, 江见鲸

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 结构在爆炸荷载下的倒塌破坏模拟日益受到关注。采用基于 MSC/MARC 有限元软件开发的钢筋混凝土纤维模型程序 THUFBER, 对一钢筋混凝土框架结构在爆炸荷载下的倒塌破坏进行了模拟, 并根据国家规范特点考虑了框架的正截面和斜截面破坏。计算结果表明, THUFBER 程序可以较好地模拟钢筋混凝土框架结构的倒塌破坏, 并对一些关键模型参数进行了讨论。

**关键词:** 爆炸; 倒塌; 纤维模型; 钢筋混凝土; 有限元

**中图分类号:** ID 235.1 **文献标识码:** A

## Simulation for the Collapse of Reinforced Concrete Frame by Blasting Based on Fiber Model

LU Xin-zheng, ZHANG Yan-sheng, JIANG Jian-jing

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The collapse of a reinforced concrete (RC) frame under blast load is simulated with the fiber model based program THUFBER, which is developed with the MSC/MARC commercial finite element (FE) software. The flexural and shear failures of RC frame designed according to Chinese building codes have been considered in THUFBER. The numerical results show that THUFBER can correctly simulate the collapse of RC frame structure. And several important parameters are discussed with the FE model.

**Key words:** blast; collapse; fiber model; reinforced concrete; finite element

### 1 概 述

随着全球军事斗争形势的发展,特别是精确制导武器的大量应用(如中国前南使馆遭到美军导弹攻击)和恐怖活动的日益活跃(如美国肯尼亚使馆遭到恐怖袭击),结构底层爆破倒塌破坏受到越来越多的关注。由于倒塌破坏代价甚大,因此目前试验手段研究还有较大难度,而数值模拟则显得尤其重要。在倒塌分析中,合理的建筑结构数值模型对

计算结果影响甚大。虽然现在基于 LS-DYNA 或 ANSYS 等通用有限元软件的倒塌分析已经使用得非常广泛<sup>[1-5]</sup>,但是仍然有一些局限性,主要表现在:

1) 这些通用有限元软件最初设计时并不是主要针对土木市场的,因此它们在材料、结构模型上都或多或少的有所欠缺,特别是针对钢筋混凝土这样的由 2 种以上材料复合而成的结构,尚缺少非常合适的材料模型<sup>[6-7]</sup>;

2) 即使少数通用有限元软件考虑了土木类材料和构件,由于这些软件都是进口软件,因此对构件的承载力等分析计算也多基于国外相关设计原则。而土木行业是一个地区特性非常强的行业,按照我国相关规范设计的建筑结构和国外同类结构之间可

收稿日期: 2007 - 04 - 17.

作者简介: 陆新征 (1978 - ), 男, 北京: 清华大学土木工程系博士, 讲师。

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划子课题。

能有明显差异,因此直接采用这些进口软件,也未必能够很好满足国内应用的需要<sup>[8-9]</sup>。

鉴于以上问题,清华大学土木工程系在通用有限元软件 MSC MARC的基础上,利用用户自定义子程序功能,结合中国规范,开发了具有自主知识产权的钢筋混凝土框架结构纤维模型程序 THUFIBER<sup>[10-11]</sup>。利用该程序对一钢筋混凝土框架结构在底层爆炸作用下的破坏过程进行了模拟,说明 THUFIBER程序可以较好地模拟框架结构的倒塌破坏,为研究结构的破坏机理和鲁棒性提供参考。

## 2 THUFIBER程序简介

在通用有限元软件 MSC MARC的基础上,利用其二次开发功能,本研究基于其用户自定义梁单元子程序 UBEAM 开发了适用于钢筋混凝土杆系结构的 THUFIBER程序<sup>[10-11]</sup>。THUFIBER程序可以

分别考虑构件的正截面破坏和斜截面剪切破坏,其基本原理分别介绍如下。

### 2.1 正截面受力非线性行为模拟

在 THUFIBER程序中,每个钢筋混凝土杆件截面被划分成若干个混凝土纤维和钢筋纤维,如图 1(a)所示。用户可以分别定义每个纤维的位置、截面积和本构关系。程序自动根据平截面假定得到每个纤维的应变,并迭代计算确保截面受力平衡。混凝土和钢筋的本构关系如图 1(b)—图 1(e)所示,详细公式可参阅文献[12]。由于是自行开发的程序,所以可以根据我国规范的相关规定设置混凝土本构模型。例如混凝土的骨架线受拉部分采用我国学者建议的江见鲸曲线<sup>[6]</sup>。钢材的塑性流幅、屈服比、极限拉伸率等关键参数都按照我国典型钢材设置<sup>[8]</sup>。这样可以使得分析结果能够尽可能的和我国建筑的实际情况相吻合,保证分析结果的正确性。

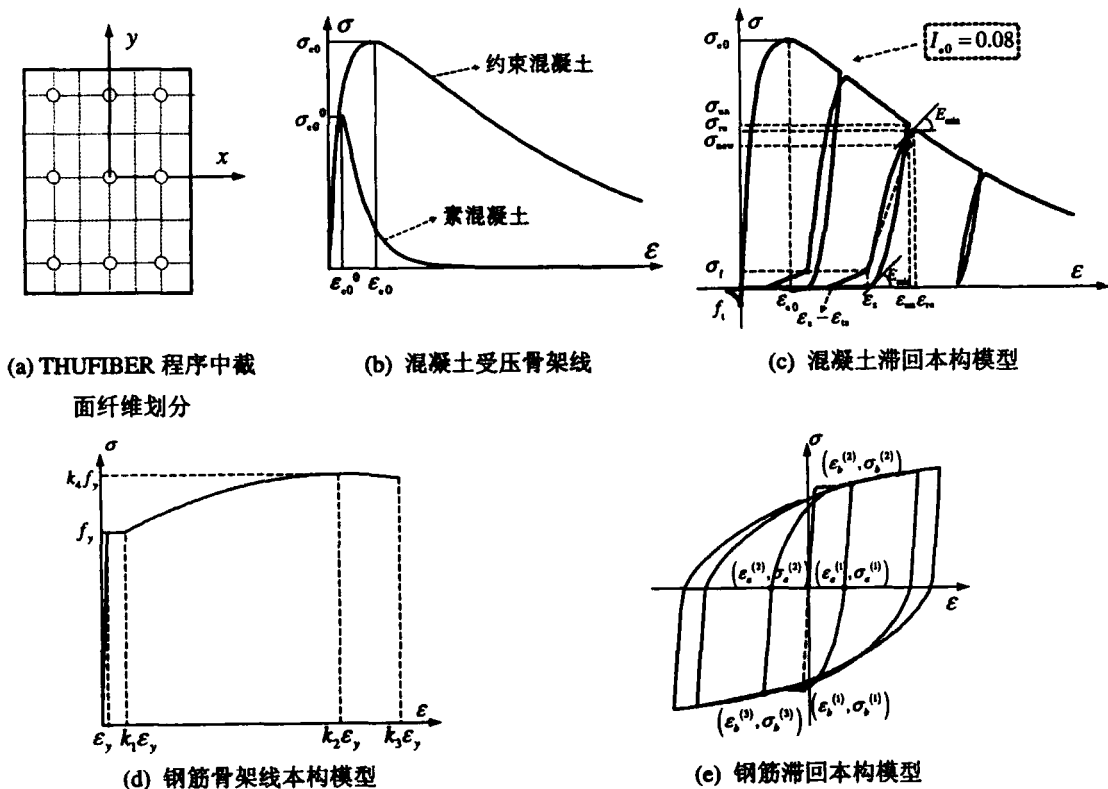


图 1 THUFIBER程序中的截面纤维划分及其材料的本构模型

Fig 1 Section fiber model and material constitutive models in THUFIBER program

### 2.2 斜截面受力非线性模拟

在爆炸破坏下,与地震倒塌分析不同,必须考虑框架的剪切破坏。因为爆炸荷载作用时间很短、位置集中且荷载升高很快,所以框架结构的直接受荷部位往往不能自由弯曲变形直至塑性铰出现。而不同国家、不同规范对抗剪承载力的设计方法、设计标

准差异甚大<sup>[9]</sup>。所以,要分析我国的框架结构倒塌,就必须密切结合我国的相关设计规范。在 THUFIBER程序中,基于 Timoshenko 梁单元原理,可以考虑梁单元的剪切变形影响。根据我国混凝土规范<sup>[8]</sup>,框架柱单元的最大抗剪承载力为

$$V_x = \frac{V_{ux}}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_{ux} \tan \alpha}{V_{uy}}\right)^2}} \quad (1)$$

$$V_y = \frac{V_{uy}}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_{uy} \tan \alpha}{V_{ux}}\right)^2}} \quad (2)$$

式中,  $V_x$ 、 $V_y$  为  $x$ 、 $y$  方向的剪力,  $\alpha = \arctan \frac{V_y}{V_x}$ ,  $V_{ux}$ 、 $V_{uy}$  为  $x$ 、 $y$  方向的抗剪承载力, 由下式计算。

$$V_{ux} = \frac{1.75}{x + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{svx}}{s} h_0 + 0.07N \quad (3)$$

$$V_{uy} = \frac{1.75}{y + 1} f_t h b_0 + f_{yv} \frac{A_{svy}}{s} b_0 + 0.07N \quad (4)$$

式中,  $x$  为剪跨比,  $f_t$  为混凝土抗拉强度,  $f_{yv}$ 、 $A_{sv}$  和  $s$  为箍筋抗拉强度、截面积和间距,  $N$  为轴力,  $b$ 、 $h$ 、 $b_0$ 、 $h_0$  为构件宽度、高度、有效宽度、有效高度。

对于框架梁单元, 其抗剪承载力

$$V_u = 0.7 f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (5)$$

考虑到抗剪破坏的脆性, 如果截面达到剪切破坏后, 则单元退出工作。利用 MSC/MARC 软件提供的 UACTIVE 用户自定义子程序, 可以自行定义单元的失效准则。因此采用该子程序来设定单元剪切破坏后的失效, 使得计算结果能尽可能符合我国建筑的实际情况。

### 3 爆炸荷载

根据有关资料, 导弹战斗部爆炸后冲击波计算公式为

$$P_m = A \frac{W_e^{\frac{1}{3}}}{R} + B \frac{W_e^{\frac{2}{3}}}{R^2} + C \frac{W_e}{R^3} \quad (6)$$

式中,  $P_m$  为冲击波超压值 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ );  $R$  为距爆炸中心的距离 (m);  $W_e$  为考虑等效系数后等效药量,

$A$ 、 $B$ 、 $C$  为系数。冲击波超压时程取为一线性衰减过程, 冲击波的大小、到达时刻和衰减至零的时刻如表 1 所示。

表 1 计算爆炸荷载

当量 /TNT	$R/\text{m}$	冲击波荷载 / ( $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
120 kg	5	7.90
	6	4.64
	7	2.97
	8	2.02

根据表 1 计算得到的冲击波荷载, 根据距离将其施加到结构构件表面, 就可以得到相应的节点冲击荷载。

### 4 框架结构模型

图 2 所示为待分析的框架结构模型, 为一 11 层钢筋混凝土框架结构。层高为 3 m, 柱距为 6 m。其他几何信息和材料信息参见表 2、表 3。设定爆破中心位于底层, 参见图 3。

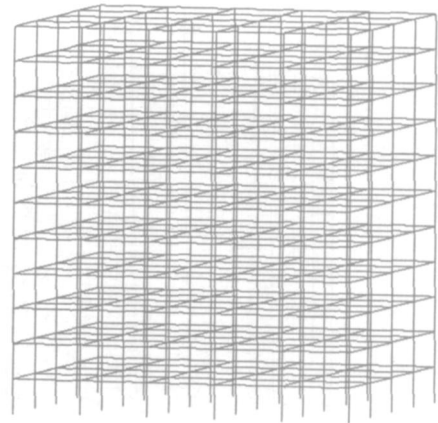


图 2 框架计算模型

Fig 2 Frame numerical model

表 2 梁柱截面尺寸及配筋

构件	楼层	一	二—四	五—七	八—十一	说明
梁	截面 / $\text{mm}^2$	300 × 800	250 × 700	250 × 700	250 × 700	
	配筋 / $\text{mm}^2$	4 000	2 500	2 500	2 500	
	配箍	$\phi 10@200$	$\phi 8@200$	$\phi 8@200$	$\phi 8@200$	
边柱	截面 / $\text{mm}^2$	700 × 700	700 × 700	600 × 600	500 × 500	梁柱皆为 对称配筋
	配筋 / $\text{mm}^2$	2 500	2 500	1 700	1 100	
	配箍	$\phi 8@150$	$\phi 8@150$	$\phi 8@200$	$\phi 8@200$	
中柱	截面 / $\text{mm}^2$	700 × 700	700 × 700	600 × 600	500 × 500	
	配筋 / $\text{mm}^2$	3 000	3 000	2 200	1 500	
	配箍	$\phi 8@150$	$\phi 8@150$	$\phi 8@200$	$\phi 8@200$	

表 3 材料计算参数

Table 3 Material parameters

混凝土	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	残余强度/MPa	峰值压应变	极限压应变
钢筋	36	37	22	0.002	0.004
纵筋	200	435			0.15
箍筋	200	280			0.15

注:表中数值已考虑应变率的影响

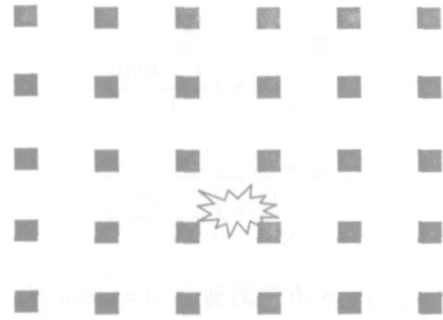


图 3 爆心位置

Fig 3 Blast center position

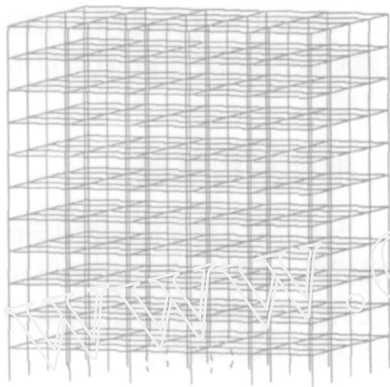
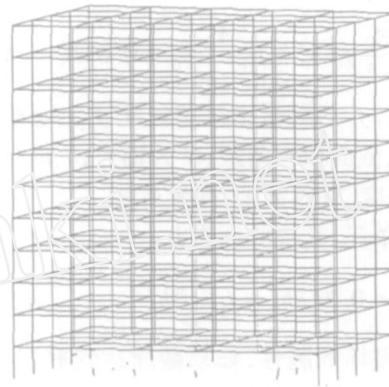
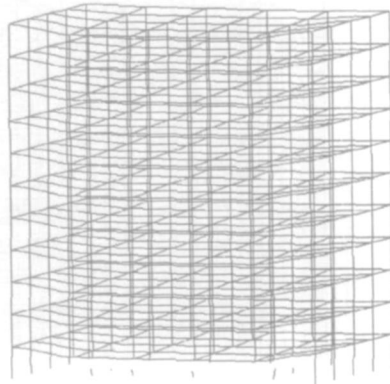
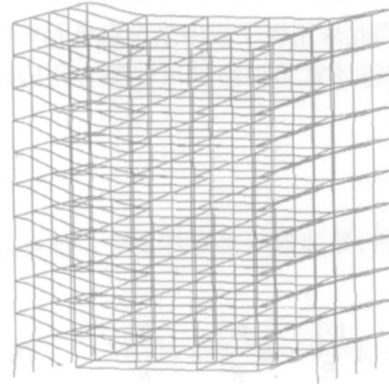
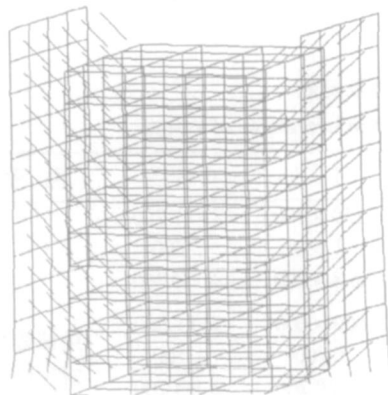
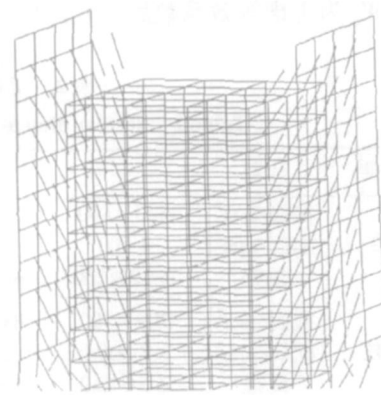
(a)  $t=0.023$  s(b)  $t=0.055$  s(c)  $t=0.78$  s(d)  $t=1.199$  s(e)  $t=1.599$  s(f)  $t=1.999$  s

图 4 结构倒塌破坏过程

Fig 4 Collapse process from numerical model

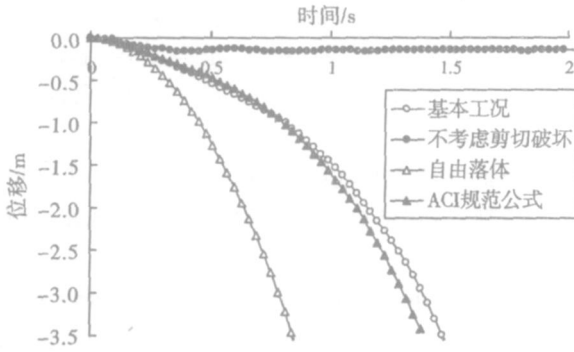


图 5 二层梁板竖向位移 时程曲线

Fig 5 Vertical displacement time-history curve for the beams and slabs in second floor

### 5 计算结果

图 4 所示为框架在爆破荷载作用下的倒塌破坏全过程。在荷载作用最初,底层柱子受到爆炸冲击作用而迅速破坏,基本都是剪切破坏,塑性区集中于破坏的柱子附近(图 4(a))。随着破坏部分的柱子退出工作,二层楼板失去支撑,大量构件开始进入塑性,同时,荷载向四周未破坏的柱子传递,这些柱子柱脚和柱头也出现塑性铰(图 4(b)中深色区域)。接着,随着二层楼板大量进入塑性,开始向下坠落,附着引起上面各层楼板的梁陆续进入塑性(图 4(c))。随着楼板变形的增大,二层楼板的梁端部开始出现破坏,梁端拉断(图 4(d))。随着变形的继续发展,上面各层梁也陆续出现梁端破坏。同时一层剩余柱脚也开始出现断裂破坏(图 4(e))。最后,结构整体倒塌,各构件破碎断裂,彻底破坏(图 4(f))。

计算得到二层楼板中部构件的竖向位移 时程曲线如图 5 所示。为了和后面的参数对比区分,上文分析的模型称为基本工况。可见由于采用了合适的钢筋混凝土构件模型,可以较好地考虑其延性变形,特别是钢筋对受弯延性的提高作用,所以在受荷早期结构变形发展速度比自由落体速度要慢很多。而目前很多通用有限元程序中的结构模型由于不能正确考虑钢筋混凝土构件的这种延性耗能能力,所以得到的破坏模拟要明显偏“脆”,和真实情况差异较大。而超过 1.2 s 之后,当二层楼板的梁均发生断裂破坏(图 4(d)),这时其下落速度开始接近自由落体破坏。

为了比较不同模型的影响,除了上面计算的工况外,还分析了另外 2 个工况:

1) 不考虑斜截面的剪切破坏。

2) 考虑斜截面的剪切破坏,但是剪切承载力计算公式不是采用我国规范建议的公式,而是采用美国混凝土协会 ACI 建议的公式。

计算结果表明,如果不考虑剪切破坏,则会明显高估结构破坏的承载力,甚至使得整个结构不发生倒塌破坏。因此,一些通用程序中不考虑梁单元的剪切破坏,其计算得到的倒塌过程可能存在一些问题。而采用 ACI 规范公式,由于其计算得到的构件抗剪承载力比我国规范建议的要低,所以倒塌破坏的结果也会有所差异,构件最大变形差异可能超过 20%。可见结合我国规范特点,开发适用于我国建筑的,有自主知识产权的倒塌计算程序,无论是从理论上还是从应用上都有着较大的价值。

### 6 结 论

基于纤维模型,在 MSC. MARC 通用有限元软件基础上开发了适用于我国建筑结构的 THUFBER 程序,对一钢筋混凝土框架结构在爆炸荷载下的倒塌破坏进行了模拟,并根据我国规范特点考虑了框架的正截面和斜截面破坏。计算结果表明,THUFBER 程序可以较好地模拟钢筋混凝土框架结构的倒塌破坏,为研究结构的破坏机理和鲁棒性提供参考。

### 7 致 谢

感谢“十一五”国家科技支撑计划子课题“台风、地震、滑坡等重大自然灾害耦合及其引发建筑和工程设施破坏的综合预测预警与智能决策技术”对本研究的资助,感谢清华大学土木工程系数字防灾与虚拟工程实验室提供高性能计算环境。

### 参考文献

[1] Luccioni B M, Ambrosini R D, Danesi R F. Analysis of Building Collapse under Blast Loads [J]. Engineering Structures, 2004, 26: 63-71.

[2] 袁望蛟, 吴运新, 邓义芳. 钢筋混凝土框架爆破拆除时后承重柱的应力分布 [J]. 爆破, 2006, 23 (1): 19-25.

[2] Yuan W J, Wu Y X, Deng Y F. The Stress Distribution of the Back Bearing Pillar in Blasting Demolishing Reinforced Concrete Frame Structures [J]. Blasting, 2006, 23 (1): 19-25.

[3] 刘 伟. 建筑物爆破拆除有限元分析与仿真 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

[3] Liu W. Finite Element Analysis and Simulation for Demo-

- lition of Constructions due to Controlled Blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006
- [4] 许沛,杨军,安二峰. 爆破拆除筒仓构筑物的倒塌过程动态仿真 [J]. 工程爆破, 2005, 11(4): 8-14
- [4] Xu P, Yang J, An E F. Dynamic Simulation for Collapse of Silo Structure Using Blasting Demolition [J]. Engineering Blasting, 2005, 11(4): 8-14
- [5] 陆新征,江见鲸. 世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析 [J]. 土木工程学报, 2002, 34(6): 8-10
- [5] Lu X Z, Jiang J J. Dynamic Finite Element Simulation for the Collapse of World Trade Center [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 34(6): 8-10
- [6] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005
- [6] Jiang J J, Lu X Z, Ye L P. Finite Element Analysis of Concrete Structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
- [7] 江见鲸,何放龙,何益斌,等. 有限元法及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006
- [7] Jiang J J, He F L, He Y B, et al. Finite Element Method and Application [M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2006
- [8] GB 50010—2002. 混凝土结构设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002
- [8] GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structure [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002
- [9] 江见鲸,陆新征,江波. 钢筋混凝土基本构件设计 [M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2006
- [9] Jiang J J, Lu X Z, Jiang B. Fundamental Concrete Structures [M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2006
- [10] 陆新征,缪志伟,江见鲸,等. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟 [J]. 山西地震, 2006, 126(2): 7-11
- [10] Lu X Z, Miao Z W, Jiang J J, et al. Simulation for the Collapse of Concrete Tall Building under Static and Dynamic Load [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2006, 126(2): 7-11
- [11] 张正威,陆新征,宋二祥,等. 核爆冲击波作用下高层框架结构对附建式人防地下室的倾覆荷载分析 [J]. 防护工程, 2006, 28(3): 1-8
- [11] Zhang Z W, Lu X Z, Song E X, et al. Analysis for the Turnover Load of Underground Structures of High-rise Building under Nuclear Blast [J]. Protective Engineering, 2006, 28(3): 1-8
- [12] 汪训流,陆新征,叶列平. 无粘结预应力混凝土框架的动力分析 [A]. 第一届全国城市与工程安全减灾研究与进展研讨会论文集 [C]. 北京: [s n], 2006: 689-694
- [12] Wang X L, Lu X Z, Ye L P. Influence of Bond Modes of Prestressed Tendon to the Seismic Performances of Structures [A]. Proc 1st National Conference on Post-tension Prestress Concrete [C]. Beijing: [s n], 2006: 689-694

## 专利介绍 (一)

**专利名称:**无后坐力爆炸物销毁器

**申请人:**吉林江北机械制造有限公司特种设备研究所

**专利申请号:** 03252203.7      **公开号:** CN2641585

**申请日:** 2003. 09. 17      **公开日:** 2004. 09. 15

一种属于排爆领域的无后坐力爆炸物销毁器,适用于公安、武警对爆炸物实施排除、销毁,特别适用于装备在排爆机器人上,它包括发射管,发射管变径喷水嘴,在变径喷水嘴的头端设有堵水塞,设有发射药筒,电发火机构,其特点是:设有止退管,在止退管的头端设有止退管变径喷水嘴,止退管与发射管等容积,止退管、发射管变径喷水嘴的出水口等截面积,在止退管变径喷水嘴内置有堵水塞,发射管、止退管分别连接于连接体的两端,在连接体内的中间垂直方向设有爆压室,在爆压室的下端设有圆锥分水体,圆锥分水体的上方置有发射药筒,电点火机构与连接体连接,发射药筒的点火头与电点火机构电连接。具有结构紧凑,排爆效果好,使用安全,无后坐力等优点。