

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0094-05

# 高层建筑围护结构地震破坏导致 次生灾害的初步研究

黄秋昊<sup>1</sup>, 黄盛楠<sup>2</sup>, 陆新征<sup>1</sup>, 胡皓宇<sup>1</sup>, 汪家继<sup>1</sup>

(1. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 近年来, 我国在众多城市的中心地区建设了很多高层和超高层建筑。这些建筑物出于建筑外观考虑, 大量采用玻璃幕墙等围护结构。一旦因地震导致围护结构破坏脱落, 可能会造成严重的次生灾害。结构层间位移角过大是导致建筑物围护结构破坏的主要原因。因此, 该文认为当层间位移角超过破坏临界层间位移角 1/300 时, 会有玻璃幕墙围护结构破坏, 并以一定的初速度飞出。基于高层建筑弹塑性时程分析的结果, 计算得出围护结构脱落可能导致的伤害范围, 并建议其安全避难距离, 其成果可供地震逃生及避难研究参考。

**关键词:** 玻璃幕墙; 高层建筑; 地震; 次生灾害; 避难距离

中图分类号: TU318 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S095

## A PRIMARY STUDY ON THE SECONDARY DISASTERS INDUCED BY THE DAMAGE OF HIGH-RISE BUILDING ENVELOPS UNDER EARTHQUAKE

HUANG Qiu-hao<sup>1</sup>, HUANG Sheng-nan<sup>2</sup>, LU Xin-zheng<sup>1</sup>, HU Hao-yu<sup>1</sup>, WANG Jia-ji<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Civil and Environmental Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Many high-rise and super high-rise buildings have been constructed in the city centers of China. Due to the architecture requirement, glass curtain is widely used in high-rise buildings. If the glass curtain falls down from the high-rise building due to earthquake, serious secondary disaster may occur. The glass curtain damage is mainly induced by the large storey drift angle of a structure. In this paper, the glass curtain damage is considered when the storey drift angle exceeds the critical deformation, which is followed by the falling down of the fragments with a certain velocity. Based on the elasto-plastic time-history analysis results of a high-rise building, the injure range of glass curtain falling is predicted and the evacuation distance is suggested, which provides a reference for the earthquake evacuation research.

**Key words:** glass curtain; high-rise building; earthquake; secondary disaster; evacuation distance

随着我国城市化率的迅速提高, 为解决用地矛盾, 我国各大中型城市均在大力发展高层和超高层

建筑。出于建筑外观等因素的考虑, 这些高层建筑大量采用玻璃幕墙、外挂石材等作为围护结构。一

收稿日期: 2012-05-28; 修改日期: 2013-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178249); 国家科技支撑计划课题项目(2012BAJ07B012); 清华大学自主研究项目(2010THZ02-1, 2011THZ03); 霍英东教育基金项目(131071)

通讯作者: 黄盛楠(1982-), 女, 天津人, 讲师, 博士, 主要从事结构工程领域的研究(E-mail: huangcn03@mails.tsinghua.edu.cn).

作者简介: 黄秋昊(1992-), 男, 广东人, 主要从事结构工程领域的研究(E-mail: huangqh09@gmail.com);

陆新征(1978-), 男, 安徽人, 教授, 博士, 所长, 主要从事结构非线性计算和仿真研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn);

胡皓宇(1991-), 男, 浙江人, 主要从事结构工程领域的研究(E-mail: hxdtc123@163.com);

汪家继(1993-), 男, 安徽人, 主要从事结构工程领域的研究(E-mail: ahfyxc@163.com).

且遭遇强地震灾害, 这些围护结构可能会发生破坏并脱落。由于高层和超高层建筑高度很高, 这些围护结构一旦脱落可能造成严重的次生灾害。特别是高层建筑多位于城市中心地区, 人口密度很大, 地震时人员从建筑物内部蜂拥而出避难, 会导致高层建筑附近人员密度很大, 进而因围护结构脱落导致严重人员伤亡的风险很高。目前国内对该问题尚无系统研究, 故本文以某高层建筑为例, 通过弹塑性时程分析, 研究围护结构脱落的伤害范围, 其成果可供地震逃生及避难研究参考。

## 1 分析对象和方法

### 1.1 围护结构破坏的分析

根据现有研究, 结构层间位移角过大是导致建筑物围护结构破坏的主要原因<sup>[1-3]</sup>。我国相关规定, 幕墙结构的层间变形能力应大于主体结构弹性层间位移角 $[\theta_e]$ 限值的 3 倍, 以保证非结构构件中小震下不被破坏<sup>[4-6]</sup>。按照“小震不坏, 大震不倒”的抗震设计原则, 我国规范规定了不同类型建筑物在多遇地震和罕遇地震下的层间位移角限值, 参见表 1<sup>[7-8]</sup>。从表 1 不难看出, 各类结构的弹塑性层间位移角 $[\theta_p]$ 限值都远大于弹性层间位移角 $[\theta_e]$ 限值的 3 倍。也就是说, 按照现行规范设计的高层建筑, 在遭遇强地震作用时, 完全可能出现虽然主体结构并未倒塌, 但是层间变形已经远大于外围护结构的容许变形并导致其破碎脱落的情况。

表 1 层间位移角限值

Table 1 Allowable values of the storey drift angle

结构体系	多遇地震弹性层间 位移角 $[\theta_e]$ 限值		罕遇地震弹塑性 层间位移角 $[\theta_p]$ 限值	$[\theta_p]/[\theta_e]$
框架	1/50	1/50		11
框架-剪力墙、框架- 核心筒、板柱-剪力墙	1/800	1/100		8
筒中筒、剪力墙	1/1000	1/120		8.3
除框架结构外的转换层	1/1000	1/120		8.3

此外, 文献[9]通过综合国内玻璃幕墙试验的结果, 并参考了日本 JCMA 标准采用的幕墙平面内变形性能限值, 提出了不同结构类型的建筑物的幕墙变形临界限值的分级标准, 如表 2 所示。

表 2 幕墙变形临界建议值

Table 2 Critical values of the curtain deformation

幕墙变形临界限值	1/300	1/250	1/200	1/150	1/130
等级	1	2	3	4	5

其中, 5 级(1/130)表示可满足框架(轻质隔墙)的变形要求, 4 级(1/150)表示可满足框架(砖填充墙)

的变形要求, 1 级~3 级则可满足所有类型的建筑物的变形要求。

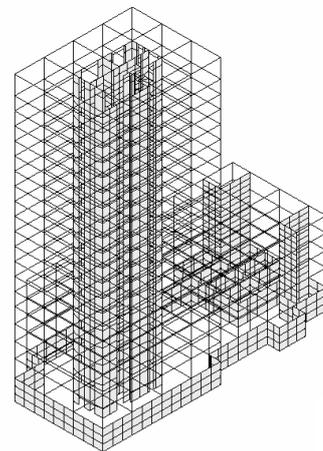
对比表 1 中弹塑性层间位移角 $[\theta_p]$ 限值和表 2 中幕墙变形临界限值, 同样可以看出, 在遭遇强地震作用时, 外围护结构可能先于主体结构破坏发生破坏和脱落。

由于围护结构类型多种多样, 和主体结构连接的方式也多种多样, 目前还难以给出一个很精确的围护结构破坏脱落的数值。因此本文参考表 2 建议, 取层间位移角达到 $[\theta_c]=1/300$ 作为玻璃幕墙围护脱落的判据。

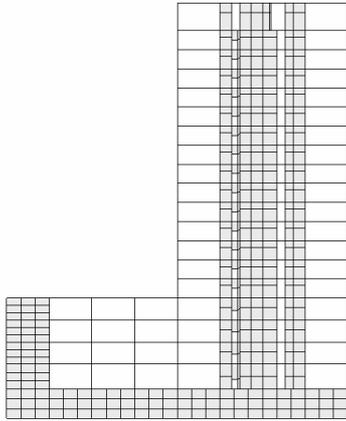
### 1.2 弹塑性时程分析

弹塑性时程分析方法是目前研究结构地震下非线性响应最为常用、也是最为准确的分析方法<sup>[10]</sup>。弹塑性时程分析方法是一种直接基于结构动力方程的数值方法, 可以得到结构在地震作用下各时刻各个质点的位移、速度、加速度和构件的内力、变形、损伤等各方面信息。对于本研究而言, 一方面我们需要了解结构在强地震作用下的非线性位移响应; 另一方面, 外围护结构脱落时结构处于晃动状态, 围护结构具有一定的水平初速度, 这个水平初速度在分析碎片分布时非常重要。为准确得到结构在强地震作用下的非线性位移响应和围护结构的水平初速度, 本文选用弹塑性时程分析方法来计算结构地震下的响应。

选取一幢 20 层的框架-核心筒高层建筑, 如图 1 所示, 该建筑的详细信息参见文献[10]。输入在地震工程中广泛使用的 El Centro EW-1940 地震动记录, 并根据我国抗震规范的规定, 将地震加速度峰值按 7 度、8 度、9 度罕遇地震调幅至 220gal、400gal、620gal, 分别进行弹塑性时程分析。



(a) 三视图



(b) 立面图

图1 建筑结构简图

Fig.1 The structural diagram

### 1.3 外围护结构碎片坠落行为分析

当外围护结构的变形达到层间位移角临界值时,它将发生损坏,碎片将从高处坠落。在地震作用下,建筑物处于晃动状态,破碎的外围护结构碎片具有一定的水平初速度。因此,坠落的碎片将分布在建筑周围的一定区域内。若动能较大的碎片击中区域内的人员,则有可能造成伤亡事故。这种伤害发生的可能性对高层建筑尤为明显。由于建筑高度较大,碎片的下落时间较长,因此高层建筑外围护结构破坏后碎片的分布范围更广,末动能更大。

基于1.2节的弹塑性时程分析,可获得建筑的层间位移角、速度及加速度时程。当层间位移角达到破坏临界层间位移角 $[\theta_c]=1/300$ 时,会有玻璃幕墙围护结构破坏发生。在本文分析中,假设每次玻璃幕墙破坏会在单位面积 $1\text{m}^2$ 内产生一个 $100\text{cm}^2$ 的玻璃碎片。根据《建筑结构荷载规范》<sup>[11]</sup>,取玻璃幕墙的面密度 $\rho=1.5\text{g}/\text{cm}^3$ ,那么单位面积幕墙每次坠落的碎片质量 $m_0=150\text{g}$ 。

当某时刻建筑第 $i$ 层层间位移角达到 $[\theta_c]$ 时,在垂直于地震作用方向的立面上,玻璃幕墙由于层间位移角而破碎坠落,整个立面坠落的碎片数 $N_{iL}$ 和碎片质量 $m_{iL}$ 分别为:

$$N_{iL} = Lh_i \quad (1)$$

$$m_{iL} = m_0 Lh_i \quad (2)$$

其中: $h_i$ 为第 $i$ 层对应的层高; $L$ 为垂直地震作用方向的立面总宽度。

根据自由落体的运动规律计算碎片掉落时间 $t$ ,其中 $H_i$ 为第 $i$ 层距地面的高度。

$$t = \sqrt{\frac{2H_i}{g}} \quad (3)$$

再利用破碎时第 $i$ 层的速度时程数据作为碎片初速度 $v_{xi}$ ,得出单个碎片 $j$ 的射程 $d_j$ 及落到地面时的动能 $E_{kj}$ :

$$d_j = v_{xi}t \quad (4)$$

$$E_{kj} = \frac{1}{2}m_j v_{xi}^2 + m_j g H_i \quad (5)$$

而对于平行于地震作用方向的两个侧向立面上的玻璃幕墙,由于受到建筑物自身的遮挡,认为不会被平抛出去,而是发生自由落体运动。

同时,定义动能密度:

$$E_{kd} = \frac{\sum E_{kj}}{A} \quad (6)$$

其中: $\sum E_{kj}$ 为某一射程区间 $d$ 所有碎片的动能之和; $A$ 为射程区间 $d$ 的面积。

文献[12]建议如碎片动能 $\geq 78\text{J}$ 时,即认为具有杀伤能力。按人头颅的投影面积为 $0.3\text{m}^2$ 计算,则能对其造成杀伤的动能密度限值为:

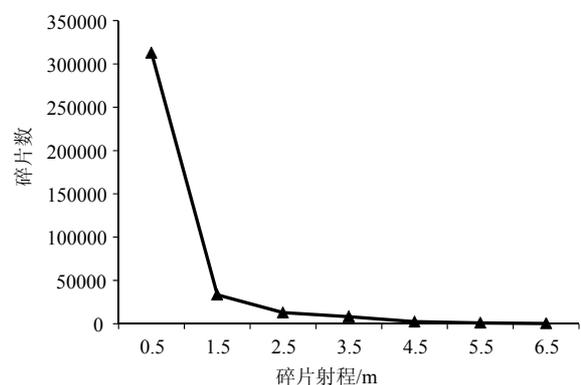
$$[E_{kd}] = \frac{78}{0.3} = 260\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \quad (7)$$

按以上方法求得所有碎片的射程及动能后,按射程区间进行统计,可做出碎片坠落次数及动能密度随射程的分布图。

## 2 分析结果

### 2.1 碎片坠落分布分析

对上文所述的20层结构,根据时程分析结果对碎片分布情况进行分析。该建筑的整体尺寸为 $36.8\text{m} \times 26.1\text{m}$ 。在 $x$ 向和 $y$ 向分别加载加速度峰值 $220\text{gal}$ 、 $400\text{gal}$ 、 $620\text{gal}$ 的El-Centro地震动,由时程分析结果可统计得到整幢建筑物周边的碎片数量如图2所示。其中,对平行于地震作用方向立面的碎片,统计时归入 $[0, 1\text{m}]$ 区间内。



(a) x向400gal下碎片数随射程的分布

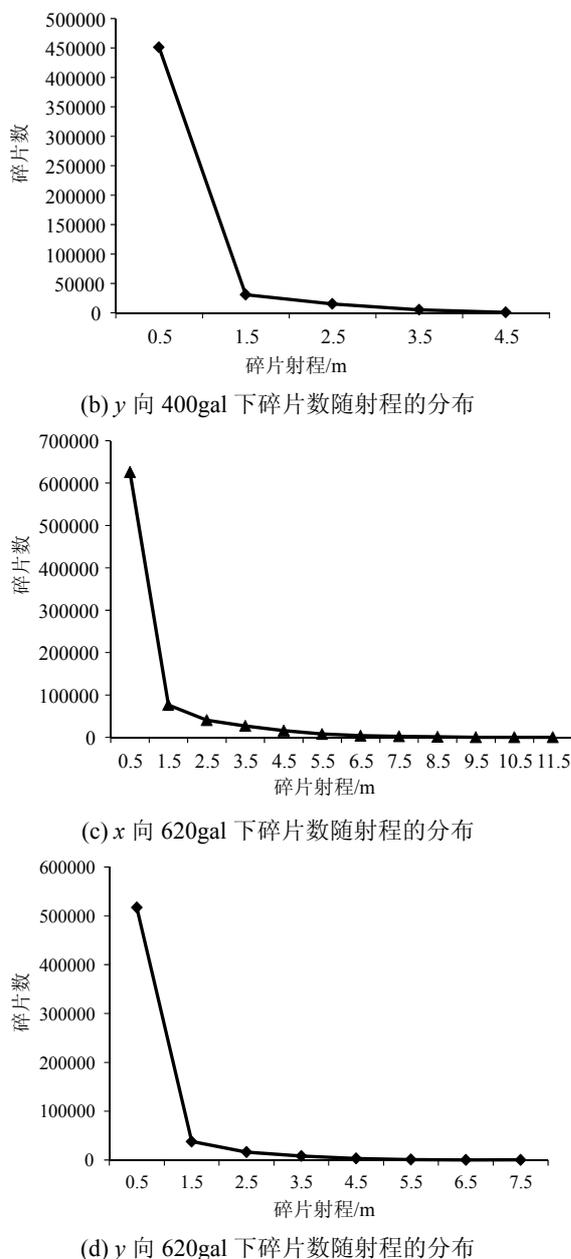


图2 不同加速度峰值下碎片数的分布图

Fig.2 The distribution of the fragment amounts under different PGA

在 220gal 的加速度峰值下,幕墙损坏情况较轻,碎片数量较少。其中, x 向加载时碎片只分布在建筑周围 2m 的范围内,碎片数合计只有 7371 个,远小于 440gal 和 620gal 的情况; y 向加载时幕墙甚至未出现层间位移角超限的情况。而当峰值调至 440gal 和 600gal 时,碎片破坏坠落的次数明显增加。

从以上几组碎片分布图可看出,随着加速度峰值增大,碎片数量也随之增大,分布范围更广。在同一加速度峰值下,碎片数呈现在靠近建筑附近的区域内密、远离建筑的区域疏的分布规律。其中,

在最靠近建筑的区域内(如本模型中的第一个统计区间[0, 1m]),碎片尤其密集。

碎片数的分布图给出了碎片数量上的分布,说明越靠近建筑处,被碎片击中的可能性越大,但只有当碎片达到一定动能时,才会对人造成伤害。因此,对碎片数量较大的 400gal、620gal 的情况,以 x 向加载为例,进一步分析坠落碎片的动能分布情况,可做出动能密度随射程的分布图,如图 3 所示。为了清晰起见,图 3(b)将动能密度用对数坐标系显示。

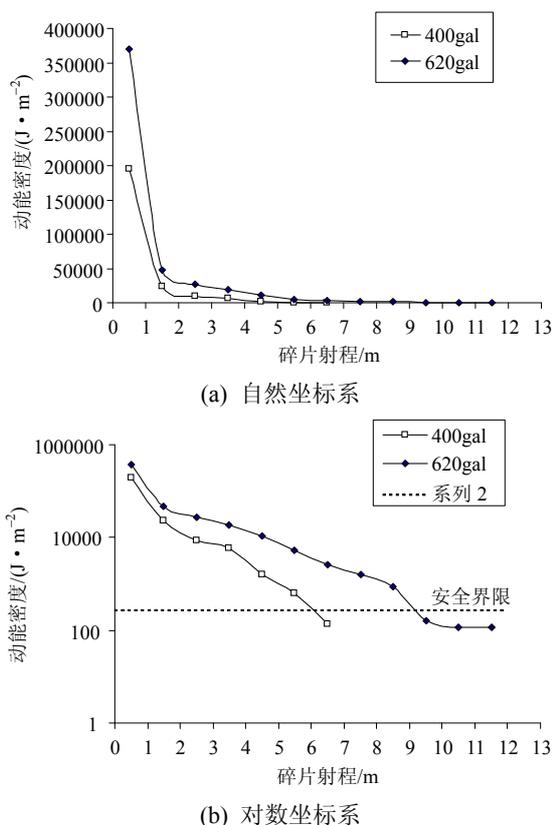


图3 不同加速度峰值下动能密度的分布图

Fig.3 The distribution of the kinetic energy density under different PGA

从图 3 可以看出,620gal 下的动能密度显著大于 400gal 作用下的动能密度。在同一加速度峰值下,动能密度随射程增大而急剧减小,表明越远离建筑受到碎片坠落打击的危险伤害越小。尤其是靠近建筑附近的区域,由于侧立面的碎片大量聚集,动能密度比 5m 外的区域大 2-3 个数量级,说明在靠近建筑附近的区域,坠落碎片对人员的杀伤力较大,可能造成严重的伤亡事故。

### 2.2 避难距离

根据上面的分析,可以定义避难距离  $D$ 。在地

震作用下,当人员距离建筑物距离大于 $D$ 时,将不会受到坠落碎片的杀伤。通过上面的模型得出的动能密度分布与给出的限值 $[E_{kd}] = 260\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ 比较,可给出避难距离 $D$ 的值。对该20层建筑,在400gal下,在建筑附近约6m范围内,模型计算得出的动能密度值高于限值,因此避难距离 $D$ 约为6.0m;而在620gal作用下,在建筑附近约9.2m范围内的人员将受到碎片杀伤,因此避难距离 $D$ 约为9.2m。

避难距离一方面与地震烈度有关,地震烈度越强,避难距离越大;另一方面,避难距离也与建筑物自身的特性有关,其中建筑物高度是一个重要因素。建筑物高度越大,坠落碎片的动能越大,避难距离也相应增大。

避难距离反映了地震作用下人员可能受到坠落碎片杀伤的区域范围。因此,对高层和超高层建筑,估算其避难距离可供地震逃生和避难作为参考,对于减少围护结构脱落引发的次生灾害具有重要意义。

### 3 结论

按我国现行规范设计的高层和超高层建筑,完全有可能出现主体结构未发生倒塌,但围护结构发生损坏的情况。围护结构损坏并脱落,其碎片分布在建筑周围,如果碎片动能超过人体能承受的限值,将有可能造成人员伤亡。因此,通过建立模型分析坠落碎片的动能分布情况,给出保证人员不会受到碎片杀伤的安全避难距离,具有重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] Behr Richard A. Seismic performance of architectural glass in mid-rise curtain wall [J]. *Journal of Architectural Engineering*, 1998, 4(3): 94—98.
- [2] 黄宝锋, 卢文胜, 曹文清. 建筑幕墙抗震性能指标探讨[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(9): 7—12.  
Huang Baofeng, Lu Wensheng, Cao Wenqing. Discussion on the seismic performance indices of architectural curtain walls [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(9): 7—12. (in Chinese)
- [3] Nagae Takuya, Fujitani Hideo, Fukuyama Kunio, Kido Shirou. Performance of an exterior metal curtain wall in seismic responses of a high-rise building [J]. *AIJ Journal of Technology and Design*, 2010, 16(33): 535—540.
- [4] JGJ102-2003, 玻璃幕墙工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [5] JGJ102-2003, Technical code for glass curtain wall engineering [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [6] CECS127:2001, 点支式玻璃幕墙工程技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2001.  
CECS127:2001, Technical specification for point supported glass curtain wall [S]. Beijing: China Association for Engineering Construction Standardization, 2001. (in Chinese)
- [7] JGJ133-2001, 金属与石材幕墙工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
JGJ133-2001, Technical code for metal and stone curtain walls engineering [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [8] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [9] JGJ3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
JGJ3-2010, Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 马彩霞. 铝合金玻璃幕墙抗震性能试验分析及分级标准探讨[J]. *宁夏工学院学报(自然科学版)*, 1996, 8(2): 16—20.  
Ma Caixia. Seismic performance testing analysis and classification criterion for aluminum-alloy framed glass curtain walls [J]. *Journal of Ningxia Institute of Technical (Natural Science)*, 1996, 8(2): 16—20. (in Chinese)
- [11] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 212—216.  
Lu Xinzheng, Ye Lieping, Miao Zhiwei. Elastic-plastic analysis of buildings against earthquake [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2009: 212—216. (in Chinese)
- [12] GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
GB50009-2001, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [13] 陈强华, 王永娟. 轻武器杀伤效能评估理论与计算[J]. *兵工自动化*, 2007, 30(7): 28—30.  
Chen Qianghua, Wang Yongjuan. Evaluation theory and calculation of kill efficiency for small arms [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2007, 30(7): 28—30. (in Chinese)