建筑物爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论和应用

Discussion and Application of Calculation Formula of the Collapse Vibration Demolished Building by Blasting

周家汉

（中国科学院力学研究所，北京 100190）

摘　要：如何设计计算高大烟囱建筑物爆破拆除塌落振动，作者回顾了以往提出的塌落振动速度计算公式，并讨论了落锤夯击地面振动传播规律，给出了烟囱爆破拆除塌落振动速度计算公式及参数。作者以实际工程实例说明了计算公式的应用。同时，监测数据说明了当采用土埂沟槽减震措施后，高大烟囱爆破拆除时的塌落振动速度可以减小70%左右。

关键词：爆破拆除；塌落振动；振动速度

1　建筑物爆破拆除塌落振动研究的回顾

建筑物拆除爆破时周围地面产生振动的原因，一是被拆建筑物构件中药包爆破所产生的振动，二是由于建筑物毁坏塌落解体构件对地面撞击造成的振动。

建筑物在爆破拆除后塌落至地面撞击造成的地面振动，随着高大建筑物拆除工程的增多引起了人们的重视。对于同一建筑物，不同的爆破拆除方案，拆除解体尺寸和落地次序不同，都会在不同程度上影响塌落时的地面振动。有的设计方案以少量装药一次爆破就可以拆毁一座高大建筑物，如高20层楼房的定向倒塌爆破拆除工程，这时虽然爆破造成的振动不大，但塌落的振动则不可忽视。当然，我们可以在建筑物倒塌的地方敷设缓冲材料等措施，减少地面的振动强度。我们知道，好的设计方案可以通过合理布药，控制结构物拆除的解体尺寸，达到减小塌落时的振动。

作者[1]（1980）在秦皇岛耀华玻璃厂爆破拆除工程中，通过临近地面振动速度的监测，分析了爆破振动和塌落振动的传播衰减规律，认为建筑物爆破拆除，塌落对地面的作用似一冲量作用，其大小与建筑物的质量和所在的高度有关，通过量纲分析和数据整理给出的经验公式是 $v_2=0.284\left(\frac{I^{1/3}}{R}\right)^{1.67}$，1986年作者在总结石景山电厂爆破拆除工程中监测的数据和分析后，修正了冲量作用的看法[2]，认为建筑物爆破拆除，塌落造成对地面的振动应是建筑物具有的势能在造成构件和地面破坏后，塌落冲击造成周围地面的振动，是剩余能量传播的结果。其振动大小与建筑物的质量和所在的高度有关，随传播的距离衰减。修改后的塌落振动衰减经验公式 $v_2=K\left(\frac{M2gH}{\sigma R^3}\right)^{\alpha}$。

1999年，作者在成都会议上（2001年）发表了题为《高烟囱拆除爆破及塌落振动测量与分析》研究报告[3]。在对烟囱爆破时产生的塌落振动进行了系统监测后，对烟囱类高大建

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（构）筑物爆破拆除的物理过程有了进一步的认识，根据实测数据分析和整理，作者将振动塌落公式改写成 $v_2 = K\left(\frac{R}{\left(\frac{MgH}{\sigma}\right)^{1/3}}\right)^{\beta}$ 式中将 α 改写成 β，以区别炸药爆炸产生的爆破振动；去掉公式中的2，将其归并到系数 K 中。

爆破引起的振动，还是建筑物爆破拆除塌落引起的地面振动都是随着传播距离衰减的，或者说是随着比例距离而衰减。我们知道，物理上衰减的现象，数学上表述的是一负幂次函数或负指数函数。爆破振动速度衰减的经验公式中的指数或是幂次应为一负数。但我们习惯性的把比例距离倒写，而将指数或是幂次取为正数。改变过去习惯性错误的写法，通过多项工程实测数据回归，给出 $K=3.39$，$\beta=-1.8$。

2　建筑物拆除爆破塌落振动的力学分析

2.1　集中质量撞击地面造成的振动

强夯加固地基落锤砸到地面上是典型的集中质量下落撞击问题。建筑物爆破拆除构件解体塌落对地面的冲击和落锤夯击一样，一定距离内的地面有明显的振动感觉。影响下落物体撞击地面振动传播的因素很多，实际观测表明，落锤至地面的撞击作用造成的地面振动与它的质量和下落高度有关。建筑物爆破拆除构件下落撞击地面时，地面被砸破坏，构件自己也被破坏。随着至撞击落点距离远，地面振动强度是衰减的。若以地面振动速度表示振动强度，我们可以把地面振动速度 v 表示成如下关系：

$$v = f(M, H, g, \rho_h, E_h, \rho_g, E_g, R) \tag{1}$$

式中　M——落锤（或构件）的质量；

H——落锤（或构件）的高度；

g——重力加速度；

ρ_h，E_h——落锤的密度和杨氏模数；

ρ_g，E_g——地面岩土层的密度和杨氏模数；

R——观测点至塌落中心的距离。

从量纲分析得到

$$v/C_g = f(M/(\rho_g R^3), H/R, \rho_g R/E_g, \rho_b/\rho_g, E_h/E_g) \tag{2}$$

式中，$C_g = E_g/\rho_g$，若我们研究的下落物体的材料和撞击地面的介质性质不变，又假定撞击地面在一定距离远处造成的只是一种弹性振动，于是我们可以简化上式，得到：

$$v/C_g = f(M/(\rho_g R^3), H/R, (\rho_g R)/E_g)$$

通过无量纲参数组合，以 $H \sim R$，$(E_g/\rho_g) \sim R$ 替换无量纲参数 $M/(\rho_g R^3)$ 中的 R，于是：

$$v = f\{(MgH)/(ER^3)\}$$

若以破坏强度 σ 表示地面介质的材料特性，替换 E。可以将上式改写成下式：

$$v = f\left(\frac{R}{\left(\frac{MgH}{\sigma}\right)^{1/3}}\right) \tag{3}$$

为了寻找和爆炸震动衰减类似的关系来描述解体构件对地面的塌落振动，可按比例距离实

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测振动数据采用回归方法处理给出如下经验公式：

$$v = K\left(\frac{R}{\left(\frac{MgH}{\sigma}\right)^{1/3}}\right)^{\beta} \tag{4}$$

式（4）说明建筑物爆破拆除时解体构件冲击地面是它所在高度具有的重力势能转变成下落运动动能、构件着地破坏的变形破坏能（包括地面破坏）后，其余的能量将转变为地面的振动。

2.2 落锤夯击地面振动位移

落锤试验是将重3kg的夯锤从不同高度下落撞击地面，监测不同距离处地面产生的振动位移。假定振动频率为10Hz的谐波换算成振动速度，地面土介质破坏取 $\sigma = 1\text{MPa}$。按上述比例距离整理并回归处理得到式（5）：

$$v = 1.8\left(\frac{R}{\left(\frac{MgH}{\sigma}\right)^{1/3}}\right)^{-1.26} \quad (1.2 \leqslant R \leqslant 120) \tag{5}$$

一些试验结果说明落锤撞击地面的振动可用式（5）来描述[7]。

2.3 建筑物爆破拆除塌落过程和公式参数分析

式（3）说明建筑物拆除爆破塌落地面产生的振动与结构的解体尺寸和下落的高度有关，振动强度或传播特性和构件材料性质、地面土体性质有关。为了减小对地面的撞击作用，控制下落建筑物解体的尺寸十分重要，高度是改变不了的。同样，改变和地面接触的方式也可以减小振动的影响范围。

通过对建（构）筑物的倒塌机理研究，我们发现建（构）筑物爆破拆除的塌落过程一般不是整体下落撞击地面，而是被分成许多大小各不相同的解体构件，依次下落撞击地面并相互撞击，上层构件的撞击作用经过先已着地的下层构件传给地面，其过程是相当复杂的。依次下落撞击地面的过程使我们看到控制第一时间着地的解体构件的尺寸十分重要，首先着地的构件作为垫层可以缓冲上层结构物下落对地面的冲击。

定向爆破拆除高大烟囱时，爆破后烟囱将似一刚杆定向转动塌落。原则上我们可以把分解的烟囱段（ΔH 段高，相应质量 ΔM）当成类似于落锤的集中质量体下落，整个烟囱逐段依次下落撞击地面为一线性震源。线性震源导致观测点处的振动叠加可以通过积分获得，我们假定是弹性振动，同时不考虑相位和频率的影响，其值必将和烟囱的全高和总质量有关。因此，应用式（3）计算烟囱爆破塌落振动时，H 为总高，M 为总质量。楼房建筑爆破时 M 和 H 则为第一塌落的构件质量和所在的高度。g 是重力加速度（10m/s^2），σ 为建筑物爆破后解体构件混凝土破坏强度，包含地面介质破坏的折合强度，以混凝土结构破坏为主一般取值10MPa。

作者[4,5]根据数座高烟囱爆破拆除实测数据整理分析给出式（3）中的衰减参数 $K = 3.37$，$\beta = -1.66$。

框架结构的高大楼房爆破拆除时的塌落振动衰减系数 K 为烟囱爆破的1/3～1/2。当在地面开挖沟槽、垒筑土墙改变烟囱触地状况时，塌落振动速度衰减系数 K 仅为原地面状况的1/4～1/3。

描述波动特征的基本参数是振动幅值和振动频率，爆破振动和塌落振动波不是单一频率的谐波，爆破振动波的频谱分析说明谱峰代表的主频率比其他分量重要。大量拆除爆破工程的爆

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

破振动监测数据表明，爆破振动的主频一般在 20 ~ 30Hz，距离远的地方振动频率低。建筑物塌落振动的主频较低，一般在 10Hz 左右。

3 应用举例

3.1 温州中银大厦爆破拆除

2004 年 5 月浙江温州中银大厦爆破拆除，大厦临近的楼房建筑工地正在浇灌混凝土，该工程提出中银大厦爆破时建筑工地的振动速度不得超过 1cm/s。如何分析计算塌落振动速度，设计爆破方案，确保大厦爆破拆除时临近工地振动小于控制值，要进行准确的设计校核。

中银大厦主楼高 93.05m，23 层。爆破拆除设计总体方案是分别在 1 ~ 4 层，9 ~ 10 层，15 ~ 16层设计了三个爆破缺口。第一个缺口先起爆，依次由下至上分段延迟起爆，将楼房分成多段塌落，减小塌落对地面的冲击震动，缩小塌散范围。为了减少爆破震动和塌落震动对周围建筑的影响，在楼房倒塌一侧开挖减震沟，沟宽 1.5m，深 2.5m；用软土和沙包堆砌四道土堤，土堤底宽 2.5m，顶宽 1m，高 1.5m，顶层码砌 0.6m 高的沙袋。

基于多个烟囱爆破拆除塌落振动的监测和对中银大厦爆破拆除方案的分析，作者对大厦爆破可能产生的塌落振动进行了预报。预报计算用参数是衰减参数 $K = (1/3) \times 3.39$，$\beta = -1.66$；第一时间落地构件质量 $M = 6000t$，$H = 30m$，重力加速度 $g = 9.8m/s^2$，材料破坏强度 $\sigma = 10MPa$。表 1 为爆破时监测的爆破塌落振动速度（包括噪声）和预报值，监测数据为长江科学院爆破与振动研究所提供。预报给出距离大厦爆破塌落中心 116.5m 处的中建五局工地的振动速度为 0.337cm/s，实测值为 0.276cm/s，小于工程提出的控制值。爆破时大楼略向观测点 D 过渡房处一侧倒塌，该点实测塌落振动值（1.08cm/s）略大于预报值（图 1）。

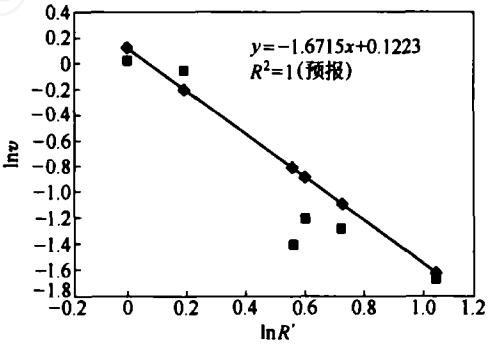

图 1　中银大厦爆破拆除塌落振动速度

Fig. 1　Collapsed vibration speeds of Zhongyin Building demolished blasting

表 1　温州中银大厦拆除爆破振动监测结果（时间 2004 年 5 月 18 日 6：00）

Table 1　Vibration measurement results of Wenzhou Zhongyin Building demolished blasting (time:6：00,18/5/2004)

测点部位	至震源	测量方向	最大振动速度 /cm · s⁻¹	最大振动速度 /cm · s⁻¹	频率 /Hz	预报
检疫局 A	99	水平切向	0.559	0.486	1.9	0.442
		垂　直	0.28	0.244	3.2	
		水平纵向	0.305	0.265	3.4	
		噪　声	500Pa			
国土资源局办公楼 B	56.5	水平切向	0.508	0.44	3.4	1.13
		垂　直	1.17	1.02	3.6	
		水平纵向	1.08	0.94	1.4	
		噪　声	500Pa			

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续表 1

测点部位	至震源	测量方向	最大振动速度 /cm·s^{-1}	最大振动速度 /cm·s^{-1}	频率 /Hz	预报
中建五局工地 C	116.5	水平切向	0.673	0.586	1.9	0.337
		垂 直	0.317	0.276	5	
		水平纵向	0.457	0.4	2.3	
过渡房 D	68.5	水平切向	0.978	0.85	3.5	0.818
		垂 直	1.08	0.94	3.4	
		水平纵向	0.71	0.62	2.8	
华尔顿酒店西北角 E	160	水平切向	0.152	0.132	2.2	0.198
		垂 直	0.216	0.188	5.3	
		水平纵向	0.305	0.26	1.5	
车站大道东侧民房空地 F	103	水平切向	0.483	0.42	2.1	0.414
		垂 直	0.343	0.298	2.9	
		水平纵向	0.406	0.353	2.9	

注：校正系数 0.87，长江科学院爆破与振动研究所。

3.2 包头 150m 高钢筋混凝土烟囱爆破拆除

2007 年 9 月 26 日，包头第三热电厂爆破拆除了一座高 150m 的钢筋混凝土烟囱，烟囱整体向南倒塌，爆破缺口为梯形，位于烟囱底部。最大爆高约 3.0m，总装药量为 97kg。

为了减少烟囱倒塌冲击引起的地面振动，爆破前在预计的倒塌范围（从 50m 开始，每 10m 一道）铺设高度不小于 2.0m、长 20～40m 的松软土层堆，土堆上用沙袋堆起高约 2.0m 的减震土墙。并在土堆侧挖深约 2.0m 减震沟，以改变烟囱触地状况，降低烟囱触地时所产生的振动强度。

根据多个烟囱爆破拆除塌落振动的监测数据分析和该烟囱爆破设计参数、地面减震措施，作者对该烟囱爆破可能产生的塌落振动进行了预报。预报计算用参数是衰减参数 $K=(1/3)\times4.09$，$\beta=-1.8$；烟囱总体质量为 $1114.3\times2.6=2890$t，$H=150$m，重力加速度 $g=9.8$m/s^2，材料破坏强度 $\sigma=10$MPa。预测距离倒塌中心线 56m 处的 3 号观测点塌落振动速度为 2.29cm/s，实测 1.97cm/s。预测距离倒塌中心线 70m 处的 2 号观测点塌落振动速度为 1.53cm/s，实测 1.33cm/s。图 2 为爆破时监测的爆破塌落振动速度（三角形标记）和预报值，监测数据为中国水利水电科学院提供。方块点另为一座 80m 烟囱爆破实测数据。

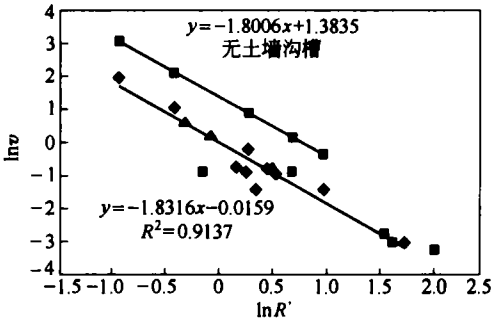

图 2 塌落振动速度实测和预报值比较

Fig. 2 Contrast test results to forecasting for collapsed vibration speeds

烟囱、水塔结构物爆破拆除定向倒塌时，产生的塌落振动可能大于炸药爆破产生的振动。在一般情况下，对高大、多层楼房建筑物，只要采用分层、分段解体的爆破设计方案，在预计塌落的地面上采用减震措施，即使是高大的烟囱定向

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

爆破拆除，其塌落振动是可以得到有效控制的。以上实例监测数据说明当采用土埂沟槽减震措施后，高大烟囱爆破拆除时的塌落振动速度可以减小70%左右。

参 考 文 献

[1] 周家汉，杨人光，庞维泰．建筑物拆除爆破塌落造成的地面振动［C］．土岩爆破文集（第二辑）．北京：冶金工业出版社，1984. 317～326.

[2] 周家汉，陈善良，杨业敏，戴铭荣．爆破拆除建筑物时震动安全距离的确定［C］．工程爆破文集（第三辑）．北京：冶金工业出版社，1988. 112～119.

[3] Sander Nagy Building and Structural Blasting in Hungary "Proceedings of Third Conferences on Explosive and Blasting Technique"，1977.

[4] 周家汉，金保堂，陈善良．高烟囱拆除爆破及塌落振动测量与分析［C］．工程爆破文集（第七辑）．乌鲁木齐：新疆青少年出版社，2001. 707～712.

[5] 于亚伦，主编．工程爆破理论与技术［M］．北京：冶金工业出版社，2004. 323～358.

[6] 吕毅，等．控制爆破拆除钢筋混凝土整体框架的试验研究［C］．土岩爆破文集（第二辑）．北京：冶金工业出版社．1985.

[7] 王兴雁，张可玉，等．黄岛热电厂152. 8m高烟囱拆除爆破振动测试［J］．工程爆破．2007，13（1）：59～61.

[8] 曲广建，崔允武，吴岩，等．温州市93m结构不对称楼房拆除爆破［C］．见：中国典型爆破工程与技术．北京：冶金工业出版社，2006.

[9] 王迪安．79m高烟囱拆除爆破振动与塌落触地振动对比分析［J］．工程爆破．2006，12（1）：86～89.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net