

文章编号: 1006 - 7051(2009)01 - 0001 - 04

爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论

周家汉

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 就如何设计计算高大烟囱或楼房爆破拆除时的塌落振动速度, 作者回顾了以往所提出的塌落振动速度计算公式, 并对公式及其中参数表述的物理意义与取值作了阐述, 以澄清一些引用中对有关参数理解的差异。文中还列举了工程实例, 说明公式的应用和公式中各参数的选择。实测数据表明, 地面采取减振措施后塌落振动速度可以减小 70%。

关键词: 高大建筑物; 爆破拆除; 塌落振动; 振动速度

中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A

DISCUSSION ON CALCULATION FORMULA OF COLLAPSING VIBRATION VELOCITY CAUSED BY BLASTING DEMOLITION

ZHOU Jia-han

(Chinese Academy of Sciences, Institute of Mechanics, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: The author, regarding the method of predicting collapsing vibration velocity of high chimney or building during blasting demolition, reviewed the formulas for calculating the collapsing vibration velocity given in references and discussed the formula in terms of its physical significance and its parameter selection for clarifying the discrepancy quoted. The paper explained some applicable formulas and discussed the selection of parameters by taking some practical engineering instances for the calculation of collapsing vibration velocity, and with a statement supported by real time data measurement that the intensity of collapsing vibration velocity could be reduced by about 70% when vibration reduction method was adopted.

KEY WORDS: Tall structure; Blasting demolition; Collapse vibration; Vibration velocity

1 问题的提出

建筑物爆破拆除塌落撞击地面造成的振动, 随着高大建筑物拆除工程的增多已引起人们的广泛关注和重视。拆除爆破工程实践表明, 建筑物拆除时塌落振动往往比爆破振动大。为了估算爆破拆除建筑物塌落的振动强度, 郭跃良等^[1]在文章中说, 引用相关资料估算的塌落振动速度值比实测数值大很多。为此, 他在接受并参照已有爆破振动速度经验公式结构形式的基础上, 重新定义相关参数的物理意义, 根据实测资料回归振动速度计算公式中的 K 值, 其结果和工程实测数据接近。他引用塌落

振动速度计算公式时, 认为中国科学院力学研究所于 20 世纪 80 年代初根据拆除爆破振动速度实测结果, 以量纲分析为基础, 最早提出的塌落振动速度计算公式为 $v = 0.08 \times (I^{1/3} / R)^{1.67}$ 。他还认为, 随后其他一些研究报告基于各自的认识和拆除爆破施工实践提出的塌落振动速度都只是上述公式的修正形式。

1980 年在秦皇岛耀华玻璃厂爆破拆除工程中, 周家汉等在分析建筑物拆除爆破时周围地面产生振动的原因时就注意到有两种振动, 一是被拆建筑物构件中药包爆破所产生的振动, 二是由于建筑物塌落解体构件对地面撞击造成的振动。通过实测振动速度分析, 1982 年在全国爆破学术会议(福州)上我们发表了“建筑物拆除爆破塌落造成的地面振动”^[2]

收稿日期: 2008 - 06 - 17

作者简介: 周家汉, 研究员、中国工程爆破协会副理事长。

研究报告(该文收录在冶金工业出版社出版的《土岩爆破文集》第二辑)。当时,我们认为建筑物爆破拆除的塌落作用似一冲量作用到地面,冲量大小与建筑物构件的质量和所在的高度有关。通过力学参数的量纲分析,给出的振速计算公式是 $v = 0.284 \times (I^{1/3}/R)^{1.67}$,其适用范围是 $0.2 < (I^{1/3}/R) < 2.0$ 。可是在郭跃良等文章(还有一些讨论塌落振动的文章)中,却把公式系数 0.284 变成了 0.08,我认为他们引用的参考文献不是作者的原文。

1986年周家汉等在总结和分析石景山电厂爆破拆除工程中监测的塌落振动速度数据后,修正了冲量作用的想法^[3]。我们认为建筑物爆破拆除塌落造成地面的振动的物理过程是:建筑物所在高度具有的重力势能转变成构件的下落运动或是转动;下落冲击地面造成构件和地面破坏转变成破坏能;剩余能量在地面传播造成了周围地面的振动。地面的振动波形和能量不是单一脉冲波动的结果,因此以冲量表述塌落振动是不准确的。显然塌落造成的地面振动的大小与其具有的重力势能相关,即与下落构件的质量和所在的高度有关,随传播的距离增加而衰减。修改后的塌落振动衰减经验公式为 $v_t = K[M2gH/(R^3)]$ 。

参考文献[2]、[3]收录在《土岩爆破文集》第二、三辑中,中国科学院力学研究所是作者工作过的单位。这里,作者有责任 and 权利对自己提出的论点进行修正和解释,或是讨论。为方便读者查询,作者已将本文及相关文献登录在《中国爆破网专家栏目》。

2001年作者在成都会议上发表了题为“高烟囱拆除爆破及塌落振动测量与分析”的研究报告^[4]。我们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(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,作者将塌落振动速度公式改写成 $v_t = K_t \left[\frac{R}{(MgH)^{1/3}} \right]$,以 K_t 表示衰减指数,区别炸药爆炸产生的爆破振动公式中的衰减指数;原公式中的 2 归并到系数 K_t 中。

2 塌落振动速度计算公式的物理意义和参数选择

建筑物爆破拆除时的塌落振动速度计算公式:

$$v_t = K_t \left[\frac{R}{(MgH)^{1/3}} \right] \quad (1)$$

式中: v_t 为塌落引起的地面振动速度,cm/s; M 为

下落构件的质量,t; g 是重力加速度,9.8m/s²; H 是构件的高度,m; R 为地面介质的破坏强度,一般取 10 MPa; R 为观测点至冲击地面中心的距离,m; K_t 、为塌落振动速度衰减系数和指数。

我们知道,一个随距离衰减的物理现象,在数学上表述为一负幂次函数或负指数函数。建筑物爆破拆除引起的地面振动,无论是炸药爆破振动,还是构件下落引起的地面振动都是随着传播距离衰减的。通过量纲分析,我们可以采用无量纲参数组合的比例距离作为自变量,振动是随比例距离衰减的幂函数或指数函数,振动速度衰减的经验公式中的指数或是幂次应为一负数。但我们不少人习惯性地把比例距离倒着写,一些教科书还习惯性地照排,误将指数或是幂次写为正数。

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。原则上我们可以把烟囱分解成很多小段(H 段高的相应质量 M),每一小段的塌落可当成集中质量体像落锤的下落。这样,我们可以将整个烟囱逐段依次下落撞击地面看成为有多点依次冲击地面的线性震源,线性震源导致观测点处的振动叠加可以通过积分获得。可以假定地面振动是弹性振动,同时不考虑相位和频率的影响,积分的结果必将和烟囱的全高和总质量有关。因此,应用上述塌落振动速度公式计算烟囱爆破塌落振动时, H 为烟囱的高度; M 为总质量; R 为建筑物爆破后解体构件混凝土的破坏强度,包含地面被砸介质的破坏强度,但以混凝土构件破坏为主,一般取值 10 MPa。

公式(1)说明建筑物拆除爆破时的塌落振动速度与结构的解体尺寸和下落的高度有关,和构件的材料性质、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,逐段延时爆破可以控制减小下落物体的质量;尽管建筑物的总体高度不能改变,但可以通过设置上下切口分层爆破,控制先后下落的解体构件的大小;改变地面土体状态也可以减小振动的影响范围。

对于钢筋混凝土高烟囱的拆除,整体定向爆破拆除是最简单、节省的方案。但爆破拆除时塌落振动很大,这时只能在地面采用减振措施,在地面开挖沟槽、垒筑土墙改变烟囱触地状况,减小地面振动。

作者^[4,5]根据数座高烟囱爆破拆除实测数据整理分析,不同数据组回归分析拟合给出公式中的衰减参数 $K_t = 3.37 \sim 4.09$ 、 $n = -1.66 \sim -1.80$,其值是在地面没有开挖沟槽、不垒筑土墙减振措施的条

件下。当在地面开挖沟槽、垒筑土墙改变烟囱触地状况时,塌落振动将明显减小,塌落振动速度公式中衰减系数 K_t 仅为原状地面的 $1/4 \sim 1/3$ 。

高烟囱拆除采用折叠爆破方案时,显然可以减小烟囱塌落振动强度。

通过对建(构)筑物的倒塌机理研究,我们发现楼房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,下层构件在被上层构件撞击破坏过程中就吸收了上层下落的动能。

框架结构的高大楼房爆破拆除时的塌落振动衰减系数 K_t 为烟囱爆破的 $1/3 \sim 1/2$,即为 $1.1 \sim 2.1$; 值变化不大。若在地面采用减振措施,振动还能降低。

高大楼房建筑物爆破拆除时不宜选择简单的定向倒塌方案,应采用上下楼层分割或是分片逐段解体的爆破方案。这时,塌落振动速度公式中的 M 就不是总质量,而是设计分段爆破第一时间着地的那部分的质量 M_1 , H 应为 H_1 了。高大楼房建筑物采用简单的定向倒塌方案, M 和 H 值大,产生的塌落振动就不小,因此高大楼房爆破拆除时,应采用多切口爆破方案,无论单向还是双向折叠爆破。大量的地震波形记录分析说明,第一时间落地的解体尺寸对控制塌落振动大小的作用最重要。

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 1 cm/s 。

中银大厦主楼高 93.05 m , 23层。爆破拆除设计总体方案是分别在 $1 \sim 4$ 层、 $9 \sim 10$ 层、 $15 \sim 16$ 层设计了三个爆破切口。第1个切口先起爆,依次由下至上分段延时起爆,将楼房分成多段塌落,减小构件对地面的冲击振动和塌散范围。为了减小爆破振动和塌落振动对周围建筑的影响,在楼房倒塌一侧开挖了减振沟,沟宽 1.5 m 、深 2.5 m ;用软土和沙包堆砌4道土堤,土堤底宽 2.5 m 、顶宽 1 m ,高为

1.5 m ,顶层码砌 0.6 m 高的沙袋^[6]。

基于多次烟囱爆破拆除塌落振动监测数据的整理和对中银大厦爆破拆除方案的分析,作者对大厦楼房爆破可能产生的塌落振动速度进行了预报。预报计算选用的衰减参数为 $K_t = (1/3) \times 3.39 = 1.13$ 、 $\alpha = -1.66$;第一时间落地构件质量 M 为 6000 t 、 $H = 30 \text{ m}$,重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,材料破坏强度 $\sigma = 10 \text{ MPa}$ 。表1为温州中银大厦爆破时监测的塌落振动速度和预报值,监测数据(包括噪声)为长江科学院爆破与振动研究所提供。预报给出距离中银大厦爆破塌落中心 116.5 m 处的中建五局工地的振动速度为 0.337 cm/s 。实测值为 0.276 cm/s ,小于该工地要求提出的控制值 (1.0 cm/s),其振动强度不会影响该工地的混凝土浇灌施工质量。爆破后大楼略偏向观测点 D 一侧的过渡房处倒塌,观测点 D 处实测塌落振动值 (1.08 cm/s) 略大于预报值,如图1所示。图中直线为计算预报值,方块符号为实测值,图中横坐标 $R = R' / (MgH)^{1/3}$ 。

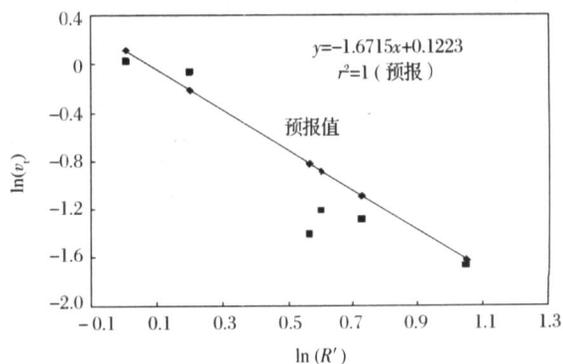


图1 中银大厦爆破塌落振速测量与预报值

Fig 1 The measuring and the predicting values of collapse vibration velocities for blasting Zhongyin Building

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1座高 150 m 的钢筋混凝土烟囱。烟囱周围环境较复杂,东侧 15.0 m 是楼房、南侧有较开阔的狭长空地约 180.0 m 、西侧距离主厂房 20.0 m 。烟囱拆除采用定向爆破设计方案,烟囱整体向南倒塌。爆破切口为梯形,位于烟囱底部,最大爆破高度约为 3.0 m 。总装药量为 97 kg 。

为了减小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 50 m 开始,每 10 m 一条)铺设高度不小于 2.0 m 、长 $20 \sim 40 \text{ m}$ 的袋装土埂,土埂两侧挖深约 2.0 m 减振沟,以改变烟囱触地时的地面状况,降低烟囱触地时的振动强度。

表1 中银大厦拆除爆破塌落振动速度监测结果

Table 1 The measurement results of the collapse vibration velocities for blasting Zhongyin Building

测点部位	至震源 距离/m	测量方向	振速读数 /(cm·s ⁻¹)	最大振速校正 值*/(cm·s ⁻¹)	频率/Hz	预报值 /(cm·s ⁻¹)
A 检疫局	99	水平切向	0.559	0.486	1.9	0.440
		垂直	0.28	0.244	3.2	
		水平纵向	0.305	0.265	3.4	
		噪声	500Pa			
B 国土资源局办公楼	56.5	水平切向	0.508	0.44	3.4	1.120
		垂直	1.17	1.02	3.6	
		水平纵向	1.08	0.94	1.4	
		噪声	500Pa			
C 中建五局工地	116.5	水平切向	0.673	0.586	1.9	0.336
		垂直	0.317	0.276	5	
		水平纵向	0.457	0.4	2.3	
D 过渡房	68.5	水平切向	0.978	0.85	3.5	0.811
		垂直	1.08	0.94	3.4	
		水平纵向	0.71	0.62	2.8	
E 华尔顿酒店西北角	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	
F 车站大道东侧民房空地	103	水平切向	0.483	0.42	2.1	0.412
		垂直	0.343	0.298	2.9	
		水平纵向	0.406	0.353	2.9	

* 读数校正系数 0.87 为长江科学院爆破与振动研究所提供。表 1 监测时间为 2004 - 05 - 18 早 6:00。

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、地面减振措施,作者对该烟囱爆破可能产生的塌落振动进行了预报(图 2 中直线是计算预报值)。预报计算用参数值是衰减参数 $K_t = (1/3) \times 4.09$ 、 $= -1.80$, 烟囱总体质量为 $1114.3 \times 2.6 = 2890 \text{ t}$, $H = 150 \text{ m}$, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 材料破坏强度 $= 10 \text{ MPa}$ 。预测距离倒塌中心线 56 m 处的 3[#] 测点的塌落振动速度值为 2.42 cm/s , 实测为 1.97 cm/s 。预测距离倒塌中心线 70 m 处的 2[#] 测点塌落振动速度为 1.56 cm/s , 实测 1.33 cm/s 。监测数据(图 2 中方块点)为中国水利水电科学研究院提供的。图 2 的横坐标中的 $R = R / (MgH)^{1/3}$ 。

图 2 中三角形标记点的数据是一座高 40m 烟囱爆破拆除时距离 30m 处的塌落振动速度。图中圆点数据为深圳一座 80m 钢筋混凝土烟囱爆破实测的数据^[1]。深圳市梅林赛格三星旧址烟囱于 2005 年 10 月 27 日爆破,倒塌方向地面采用了间隔 10~15 m 垒筑高 1.0~1.5 m 的沙袋墙的缓冲减振措施,实测数据和塌落公式预测计算值接近,有一点实测值偏小。

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,在预计塌落的地上采用减

振措施,即使是高大的烟囱定向爆破拆除,其塌落振动也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、沟槽减振措施后,高大烟囱爆破拆除时的塌落振动速度可以减小 70% 左右。

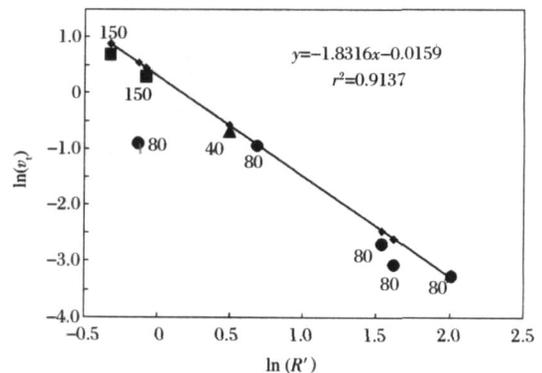


图 2 烟囱爆破塌落振速测量和预报结果

Fig. 2 The measuring and the predicting values of the collapse vibration velocities for chimnies

4 结论

(1) 基于对烟囱类高大建(构)筑物爆破拆除塌落过程的认识,作者在以往发表的文章中,修正提出的塌落振动速度计算公式最终形式为: $v_t =$

$$K_t \left(\frac{R}{(MgH)^{1/3}} \right), \text{ 其中振动衰减指数 } K_t \text{ 为负值。}$$

(下转第 40 页)

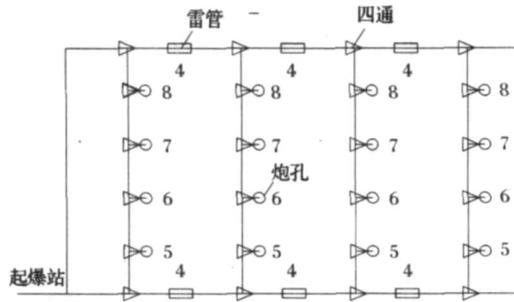


图2 无限分段爆破网路改进设计

Fig.2 Improved design of infinite division firing circuit

下一发孔外延时雷管起爆,从而不影响后面接力延时雷管的传爆。实践证明,采用改进后的爆破网路,施工中很少出现盲炮。

4 工程实践及实际效果

经过爆破网路设计及改进,某次土石方爆破施工参数如下:孔径两侧为 $\phi 90\text{mm}$ 、中间 $\phi 115\text{mm}$,孔深 $8.0 \sim 9.5\text{m}$,孔数 196 个, $\phi 90\text{mm}$ 炮孔填塞长度为 3m , $\phi 115\text{mm}$ 炮孔填塞长度为 3.5m ,边孔装药量控制在 50kg 以下,中间孔最大单孔装药量为 60kg 。总共装药量为 10t ,爆破土石方量约 33000m^3 ,该次

爆破无一例盲炮出现。

这次爆破距离保护建筑物 45m ,通过振动监测,最近民房最大振速为 2.76cm/s ,爆破振动仅使房屋内极少量抹灰掉落,没有产生较大的损坏,村民未向施工单位及有关部门进行投诉。

5 结论

按照土石方工程爆破中无限分段理念,采用了改进后的起爆网路,提高了爆破网路传爆的可靠性,较好地解决了爆破施工中的难题。使爆破开挖工程扩大了规模,相应地减少了爆破次数,可以更合理地安排爆破作业时间,降低爆破安全风险。此项技术的应用,具有明显的经济效益及社会效益。

参考文献:

- [1] 何广沂. 大量石方松动控制爆破新技术[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [2] 占时春, 李山存. 孔内孔间微差爆破试验研究[J]. 工程爆破,2006,(2):45-48.
- [3] 于亚伦. 工程爆破理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.

(上接第4页)

(2) 作者根据多座高烟囱爆破拆除实测数据整理分析,得出塌落振动速度公式在地面无减振措施时, $K_t = 3.37 \sim 4.09$, $\alpha = -1.66 \sim -1.80$;当地面采取挖沟槽、垒筑土墙减振措施时, K_t 值是前者的 $1/4 \sim 1/3$,即减振 70% 。

(3) 框架结构高大楼房爆破拆除时的计算 K_t 值为烟囱爆破 K_t 值的 $1/3 \sim 1/2$,而 α 值变化不大;若地面采取减振措施, K_t 值还会降低。

参考文献:

- [1] GUO Yue-liang, ZUO Yu-jun, WANG Di-an. Discussion on Collapse Vibration Caused by Demolition Blasting [A]. New Development on Engineering Blasting APS Blasting 1[M], 2007 Kunming China. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [2] 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[A]. 土岩爆破文集(第二辑)[C]. 北京:冶金工业出版社,1984, 317-326.
- [3] 周家汉, 陈善良, 杨业敏, 戴铭荣. 爆破拆除建筑物时振

动安全距离的确定[A]. 工程爆破文集(第三辑)[C]. 北京:冶金工业出版社,1988, 112-119.

- [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[A]. 工程爆破文集(第七辑)[C]. 乌鲁木齐:新疆青少年出版社,2001, 707-712.
- [5] 于亚伦. 工程爆破理论与技术[M](全国工程爆破作业人员统一培训教材). 北京:冶金工业出版社,2004, 323-358.
- [6] 曲广建, 崔允武, 吴岩, 等. 温州市 93m 结构不对称楼房拆除爆破[A]. 中国典型爆破工程与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [7] 蒋跃飞, 张正忠, 郭大胜, 等. 13 层框剪结构楼房爆破拆除[J]. 工程爆破, 2007, 13(4): 63-65.
- [8] 朱朝祥, 崔允武, 高星, 等. 两座高 120m 钢筋混凝土烟囱的爆破拆除[J]. 工程爆破, 2008, 14(2): 61-63.
- [9] 吕淑然, 杨军, 刘国振. 高大建筑物定向爆破地震振动效应监测与控制研究[J]. 爆破, 2003, 20(3): 71-74.
- [10] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国等译. 北京:科学出版社,1987.