DOI: 10.11883/bzycj-2017-0414

冷却塔爆破拆除倾倒解体及振动研究*

费鸿禄[1],张超逸[1],吕金齐[1],张龙飞[2]
(1.辽宁工程技术大学爆破技术研究院,辽宁 阜新 123000;
2.内蒙古宏大爆破工程有限责任公司,内蒙古 包头 014010)

摘要:针对采用复式切口的冷却塔爆破拆除,利用塑性铰理论对冷却塔整个倒塌过程中的运动状态进行深入分析。通过建立塔体触地瞬间的数学模型,以最大线应变理论作为塔壁破碎的力学依据,利用 MATLAB 数值软件进行分析,得到在塔体触地瞬间,除切口处塔壁发生破碎外,塔壁上部也将发生破碎解体,这与冷却塔实际倒塌过程中的破碎现象相吻合。当被爆物确定后,破碎截面坐标值随塑性铰转动极值的增大而减小。另外,对冷却塔爆破过程中对周围建筑危害最严重的塔体连续塌落进行分析,得出塔体连续塌落诱发的振速峰值随保留区截面塑性铰转动极值的增大而增大。鉴于此,提出对于今后冷却塔爆破应避免整体延期时间过大的建议,从而控制塔体转动角度,降低冷却塔爆破对周围建筑的危害。

关键词:冷却塔;爆破拆除;塑性铰;破碎解体;连续塌落;振动
中图分类号:O389;TU746.5 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在冷却塔爆破拆除倒塌中,由于塔体倾覆造成塔体发生下坐现象。对于在转动过程中的下坐问题可从两个角度进行分析:(1)保留区人字柱的最大承载能力,即认为当塔体在转动过程中,保留区人字柱所承受的最大垂向荷载大于人字柱可提供的最大承载能力,此时保留区人字柱受压破坏造成塔体失稳下坐;(2)保留区截面塑性铰转角达到转动极值,即当爆破切口形成瞬间,保留区人字柱与塔体接触部分形成塑性铰。当塔体转动角度大于塑性铰转角极值时,塑性铰部位发生压剪破坏而造成塔体下坐。通过观察以往冷却塔爆破拆除效果[1],可以发现当塔体完全倒塌后保留区部分人字柱未发生整体受压破坏,而是柱端破碎。由此证明应用塑性铰理论分析塔体下坐前的偏转角度更符合工程实际。

鉴于此,本文中根据保留区人字柱的破坏形态对塑性铰转动机理进行分析,利用达朗贝尔原理和拉格朗日方程得到塑性铰转动极值,从而对冷却塔整个倾倒过程中的运动状态进行深入研究,并且通过建立塔体触地瞬间的力学模型分析塔壁的破碎情况及其影响因素;最后基于现场振动监测结果,对降低拆除过程中的振动危害提出合理化建议。

1 冷却塔倾倒过程及解体力学分析

冷却塔从爆破切口形成瞬间,到塔体触地前,塔体在倾覆力矩作用下绕中性轴做定轴转动[2]。在转动过程中,由于塔体底部圈梁作用,保证了冷却塔的整体性,因此认为在倾倒过程中塔体完好未发生解体破坏。在这个过程中,保留区人字柱与塔体圈梁接触部分形成塑性铰。为分析塔体运动机理,对塑性铰的转动极限进行分析。由以往冷却塔拆除现场观测情况[1]可知,由于圈梁截面尺寸较大且承载能力较高,因此在倾倒过程中破坏主要发生在人字柱与圈梁连接部位。因此判定塔体倾倒时保留区形成的塑性铰为弱柱型塑性铰[3]。为简化计算,假定在转动过程中,中性轴位置保持不变。

1.1 塔体倾倒塑性铰分析

设截面塑性铰转角极值为 $[\theta]$,则其计算公式为[4]:

* **收稿日期**:2017-11-17;**修回日期**:2018-03-04
基金项目:海洋核动力平台总体关键技术研究及装备研发(NY20150202)
第一作者:费鸿禄(1963—),男,博士,教授,博士生导师,feihonglu@163.com;
通信作者:张超逸(1992—),男,硕士,738927620@qq.com。

$$[\theta]=\theta_y+\theta_u \tag{1}$$

式中：θ_y 为屈服状态时塔体转动角度，θ_u 为极限状态时塔体转动角度。起爆后塔体开始转动，倾覆角度增大，切口附近人字柱逐渐受压破坏失效，截面抗剪强度随人字柱的逐渐破坏而逐渐降低，当截面受到的剪应力达到人字柱截面提供的抗剪强度时，人字柱柱端开始发生压剪破坏[5]，塑性铰转动能力丧失[6]，塔体开始下坐，则认为此时倾覆角度达到混凝土塑性铰的转角极值 $[\theta]$。塑性铰转角极值越大，塔体开始下坐的时间越晚，则塔体在触地瞬间转动角度越大。转动过程中塔体受力分析简图如图 1 所示。

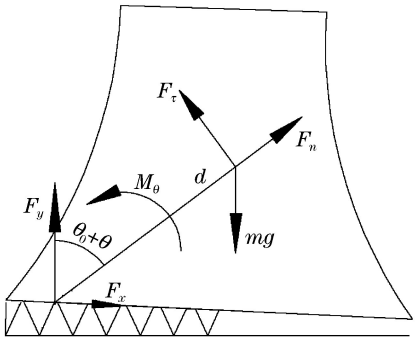


图 1 冷却塔受力分析简图

Fig. 1 Force analysis of the cooling tower

根据达朗贝尔原理，列出平衡方程：

$$\begin{cases}F_y=F_n\cos(\theta_0+\theta)+F_\tau\sin(\theta_0+\theta)-mg-F_x\sin\theta=0\\F_x\cos\theta+F_n\sin(\theta_0+\theta)-F_\tau\cos(\theta_0+\theta)=0\\mgd\sin(\theta_0+\theta)-M_\theta-F_\tau d=0\end{cases} \tag{2}$$

式中：m 为塔体质量；d 为塔体质心到中性轴距离；F_y 为塔体转动过程中保留区人字柱提供的竖向支持力；θ_0 为塔体质心与保留区截面中性轴的连线与竖直方向的夹角；M_θ 为转角为 θ 时对应的塑性铰弯矩，$M_\theta=\sum_{i=1}^{n}(E+E_s\eta)A_1\frac{\tan\theta\cdot x_i^2}{h_1}$，$E$ 和 E_s 分别为混凝土和钢筋的弹性模量，A_1 为人字柱截面面积；η 为人字柱纵筋配筋率，当人字柱受到的垂向荷载大于其极限破坏强度时，人字柱破碎，支撑强度为零；h_1 为人字柱垂直高度；F_x 为塔体转动过程中保留区人字柱截面提供的剪力，其方向平行于圈梁截面，假设在倾覆过程中未破碎的人字柱截面面积保持不变；$F_n=m\omega^2 d$ 和 $F_\tau=m\varepsilon d$ 分别为作用在塔体质心处法向和切向的惯性力，ω 为塔体转动角速度，ε 为角加速度。利用拉格朗日方程[7]进行求解，设顺时针方向为正，则列出方程：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial q_k'}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_k}=Q_k \tag{3}$$

式中：T 为塔体转动动能，$T=\frac{1}{2}J(\theta')^2$；$q_k$ 为广义坐标，本式中自由度唯一，则 $q_k=\theta$；Q_k 为广义坐标对应的广义力，$Q_k=\frac{[mgd\sin(\theta_0+\theta)-M_\theta]\delta\theta}{\delta\theta}$；$J$ 为塔体对于转动轴的惯性矩。代入公式(3)，得到塔体转动角加速度 $\varepsilon=\frac{mgd\sin(\theta_0+\theta)-M_\theta}{J}$。

根据动能定理列出方程：

$$\frac{1}{2}J\omega^2=mgd\,[\cos\theta_0-\cos(\theta_0+\theta)]-\int_0^\theta M_\alpha\mathrm{d}\alpha$$

式中：M_α 为偏转到任意角度 α 时的塑性铰弯矩。则：

$$\omega=\sqrt{\frac{2\left\{mgd\,[\cos\theta_0-\cos(\theta_0+\theta)]-\int_0^\theta M_\alpha\mathrm{d}\alpha\right\}}{J}}$$

将上述计算结果代入式(2)，得到当塔体转动时截面剪力关于转角的计算公式：

$$F_x=\frac{md}{J\cos\theta}[-2mgd\cos\theta_0\sin(\theta_0+\theta)+3mgd\sin(\theta_0+\theta)\cos(\theta_0+\theta)+$$
$$2\sin(\theta_0+\theta)\int_0^\theta M_\alpha\mathrm{d}\alpha-M_\theta\cos(\theta_0+\theta)] \tag{4}$$

当 $F_x=n'A_1[\tau]$ 时，$\theta=[\theta]$，即当人字柱截面所受剪力等于其抗剪强度时，偏转角度达到塑性铰转

动极值，式中 n' 为未破坏的人字柱对数，$[\tau]$ 为人字柱截面抗剪强度。由此可知，冷却塔的塑性铰转动能力由自身设计参数决定。由于塑性铰转动极值计算无法直接列出表达式，因此在计算时利用 MATLAB 进行离散试探计算得到塑性铰转动极值。当塔体偏转角度达到塑性铰转动极值后，保留区人字柱柱端发生压剪破坏并丧失承载能力，塑性铰消失，塔体开始发生下坐。由于在开始下坐瞬间，塔体自身存在角速度，因此在塔体下坐过程中伴随着塔体转动。

根据上述分析得到的塔体运动规律和几何关系，列出方程求解塔体从开始下坐到触地所经历的时间 t 和触地瞬间塔体转动角度 θ：

$$\begin{cases} h_1 - \sin[\theta](e_2+R) = \omega(e_2+R)t\cos[\theta] + \dfrac{1}{2}gt^2 \\ \tan\theta = \dfrac{h_1 - \dfrac{1}{2}gt^2}{(e_2+R)\cos[\theta] - \omega(e_2+R)t\sin[\theta]} \end{cases} \tag{5}$$

式中：R 为塔体底部外半径，e_2 为塔身重心至人字柱截面中性轴的偏心距。因 t 与 θ 的表达式过于繁琐，不便直接列出，因此代入 MATLAB 中进行求解分析。

1.2　塔体触地瞬间受力分析

在冷却塔与地面碰撞的过程中，塔体处于非剧烈冲击状态[8]，计算这类低速碰撞中塔壁钢筋混凝土的整体冲击作用时，可利用经典模型（弹性、刚塑性模型）以准静态进行分析[9-10]。在这种状态下塔体耗能远高于地面，因此忽略在碰撞过程中地面的能量损失。假设塔体触地瞬间，塔体静止且无任何运动趋势，塔体触地瞬间计算计算简图如图 2 所示。由于开设了卸荷槽，在塔体触地瞬间塔体的触地状态为塔壁柱触地[11]。因此，为简化分析，假设在塔体触地瞬间，塔体与地面间的冲击力均匀地作用在中间卸荷槽两侧的塔壁柱底部。

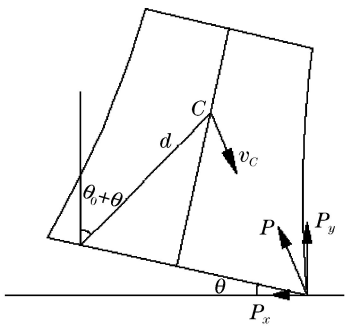


图 2　触地瞬间塔体碰撞力分析简图

Fig. 2　Sketch for calculating the collision force of the tower body at the moment of touchdown

图 2 中 C 为塔体质心；v_C 为触地瞬间塔体质心速度；θ 为塔体触地瞬间的偏转角度；P 为塔体触地瞬间的碰撞力，其方向与塔体质心速度方向平行；P_x 和 P_y 分别为碰撞力在水平和竖直方向的分量，根据几何关系列出方程：

$$\begin{cases} P_y = \left(1 + \sqrt{1 + \dfrac{(d\omega\sin(\theta_0 + [\theta]) + gt)^2}{g\Delta_{st}}}\right) mg \\ P_x = P_y \dfrac{d\omega\cos(\theta_0 + [\theta])}{d\omega\sin(\theta_0 + [\theta]) + gt} \end{cases} \tag{6}$$

式中：Δ_{st} 为塔体在静载作用下的变形。由于高卸荷槽两侧塔壁刚度较低，则变形主要发生在倒塌中心线两侧的塔壁柱上，因此 $\Delta_{st} = \dfrac{mgh_1}{(E+E_s\eta)A'}$；$A'$ 为触地瞬间倒塌方向上 2 个塔壁柱的面积，$A' = 2\left(\dfrac{R^2-r^2}{2}\right)(\beta_2 - \beta_1)$；$\beta_1$ 和 β_2 为塔壁柱两侧分别与倒塌中心线构成的夹角；R、r 分别为塔体底部的外、内半径。

1.3　冷却塔触地瞬间解体力学分析

由于开设了高卸荷槽，降低了切口下部塔壁的整体强度，而且卸荷槽顶部发生应力集中，因此在塔体触地碰撞瞬间，塔壁必将在卸荷槽顶部发生破碎[11]。但上部塔体完好，其是否因受冲击而发生破碎解体仍为未知。现任取上部塔壁一垂直于母线的截面为研究对象，且设该截面在母线轴上的坐标为 L。由于在低峰值、长持时的准静态荷载作用下，钢筋混凝土倾向于发生整体性的弯曲破坏[12]，因此确定截面在倒塌方向的中心点为最易破坏点。则该点应力状态为：

$$\begin{cases}\sigma_{\min}=-\dfrac{F_n}{A}-\dfrac{2\left(\dfrac{R+r}{2}\right)R_1\cos\beta\displaystyle\int_{\beta_2}^{\beta_1}\overline{F}_n\left(\dfrac{R^2-r^2}{2}\right)\mathrm{d}\beta}{I'_x}+\dfrac{2LR_1\displaystyle\int_{\beta_1}^{\beta_2}\overline{F}_\tau\left(\dfrac{R^2-r^2}{2}\right)\mathrm{d}\beta}{I'_x}\\ \tau=F_\tau/A\end{cases}\tag{7}$$

式中：$\sigma_{\min}$ 和 τ 分别为塔壁柱截面最大压应力和剪应力；A 为上部塔壁截面面积，$A=\pi(R_1^2-R_2^2)$；I'_x 为横截面对称轴的惯性矩，$I'_x=\pi(R_1^4-R_2^4)/64$；R_1、R_2 为该截面外、内半径，根据塔体设计尺寸将截面内外半径拟合为关于母线坐标的函数，$R_1=aL^2+bL+c_1$，$R_2=aL^2+bL+c_2$；F_n、F_τ 分别为碰撞力在平行和垂直于塔体母线方向上的分量，$F_n=P_y\cos\theta-P_x\sin\theta$，$F_\tau=P_y\sin\theta+P_x\cos\theta$；$\overline{F}_n=F_n/A'$，$\overline{F}_\tau=F_\tau/A'$。

塔壁混凝土受压而产生脆性断裂破坏，因此选用最大线应变理论[13]作为判断塔壁破坏的力学依据，为方便表述，设 σ 为等效应力，$[\sigma]$ 为钢筋混凝土许用拉应力，经整理得到：

$$\sigma=(1-\nu)\frac{\sigma_{\min}}{2}+(1+\nu)\sqrt{\left(\frac{\sigma_{\min}}{2}\right)^2+\tau^2}<[\sigma]\tag{8}$$

式中：ν 为混凝土的泊松比。将式(6)与(7)代入式(8)得到等效应力 σ 的表达式，因其表达式过于繁琐，不能直接列出，因此需要代入塔体具体参数并利用 MATLAB 软件进行求解，并对塔壁破碎条件及破碎位置进行分析。

2　工程实例

某冷却塔为钢筋混凝土结构，总高度为 125 m，人字柱高度 $h_1=8.328$ m。塔体下人字柱共 40 对横截面直径为 0.65 m 的圆柱。筒壁设计为双曲线形，底部半径为 42.746 m，最顶部半径为 27.56 m，中间位于高程 91.847 m 处的圆周为双曲线的顶点，该处半径最小为 25.365 m。通风筒的底部圈梁厚度为 0.7 m，自底部至高程 +26.815 m 渐变至 0.18 m，自此处以上的通风筒壁厚均为 0.18 m。本次冷却塔拆除采用只对人字柱进行爆破并在塔体开设高卸荷槽的复合型切口的爆破方案。爆破区分为 3 个区，切口高度为 26.8 m，圆心角为 216°，对应需爆破的人字柱为 24 对，爆破切口和分区如图 3 所示。

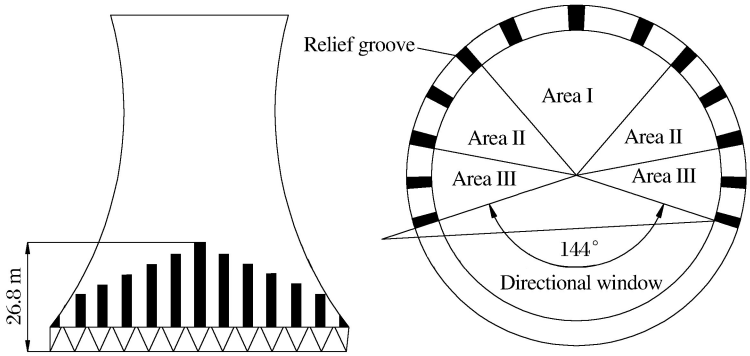


图 3 冷却塔爆破切口与爆破区示意图

Fig. 3 Diagram of blasting incision and area of the cooling tower

2.1　塔体倒塌过程分析

观察实际冷却塔爆破过程(图 4)可知，冷却塔倒塌过程分为 2 个部分。首先，爆破切口形成瞬间，塔体在倾覆力矩的作用下前倾；在塔体前端触地前，塔体偏转至一定角度后，塔体开始下坐；在下坐过程中，伴随着塔体偏转。这与利用塑性铰理论分析塔体运动状态得到的结论相吻合。塔体触地后，塔壁上有 2 个位置的钢筋混凝土同时受到挤压而破碎，且破碎范围随着塔体偏转幅度的增大而增大。而观测冷却塔倒塌视频，测量得到上部破碎截面位置在母线轴上的坐标约为 46.589 m，下部破碎截面在母线轴上的坐标为 18.5 m。而后，破碎区下方塔体受纵向冲量作用导致其混凝土不断被压溃[14]，从而丧失承载能力，诱发塔体连续倒塌。



图 4 冷却塔爆破倒塌过程图

Fig. 4 The blasting collapse process of the cooling tower

2.2 触地瞬间塔壁解体位置分析

根据塔体设计尺寸，将塔体外、内半径与母线长度拟合成函数关系：

$$\begin{cases} R_1 = -0.363\ 1l + 43.445\ 3 \\ R_2 = -0.335l + 42.745\ 6 \end{cases} \quad 0\ \text{m} \leqslant l \leqslant 18.488\ \text{m} \tag{9}$$

$$\begin{cases} R_1 = 0.002\ 6l^2 - 0.436\ 6l + 43.955\ 5 \\ R_2 = 0.002\ 6l^2 - 0.436\ 6l + 43.775\ 5 \end{cases} \quad 18.488\ \text{m} < l \leqslant 113.296\ \text{m} \tag{10}$$

计算得到塔壁质量 $m=1.4731\times10^7$ kg，爆破前塔体重心到人字柱支撑面的垂直距离 $h_0=40.633$ m，转动惯量 $J=5.281\ 5\times10^{10}$ kg·m^2。爆破切口形成瞬间，塔身重心至人字柱截面中性轴的偏心距 $e_2=35.316$ m，人字柱截面质心到塔身质心的距离 $d=\sqrt{e_2^2+h_0^2}=53.835\ 7$ m；则初始时刻塔身质心和中性轴中心的连线与竖直方向的夹角 $\theta_0=\arctan(e_2/h_0)=40.995\ 1°$。每对人字柱截面面积 $A=0.717\ 6$ m^2。人字柱混凝土抗压强度为 30 MPa，弹性模量为 30 GPa；纵筋配筋率为 1.8%，弹性模量为 200 GPa；塔壁混凝土为 C30 混凝土，其许用拉应力 $[\sigma]=7.33$ MPa。将上述参数代入公式(4)中，求得到保留区人字柱截面塑性铰转角极值 $[\theta]=1.503°$，对应塑性铰转动能力丧失瞬间塔体角速度 $\omega_{[\sigma]}=0.072\ 4$ rad/s，触地瞬间塔身转动角度 $\theta=4.337\ 3°$。

将上述塔体参数代入式(8)中，利用 MATLAB 求解，求解结果如图 5 所示。

图 5 中，L 为塔壁截面在母线轴上的坐标，$[\theta]$为塔体塑性铰偏转角度。由图 5 可知，MATLAB 数值计算结果为一曲面。这说明，在触地瞬间，塔壁截面等效应力值与母线轴上的坐标值及塔体塑性铰转角极值有关。在塔体触地瞬间，塔壁在应力值最大的截面处发生破坏，而后应力释放，其余位置保持完好。当 18.488 m$<L\leqslant$113.296 m 时，根据公式(4)的计算得到塑性铰转角极值 $[\theta]=1.503°$。则此时等效应力的大小只与截面在母线轴上的坐标值有关，则令 $\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}L=0$，得到上部塔体破

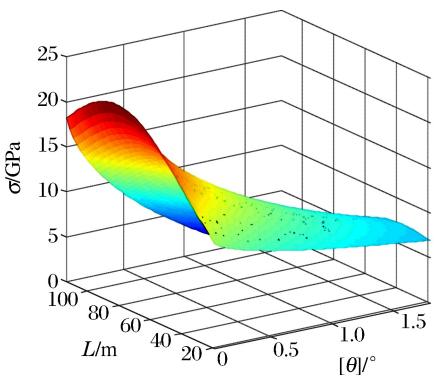


图 5 MATLAB 数值计算结果

Fig. 5 Result of numerical calculation by MATLAB

碎截面坐标 $L=43.043$ m，此时 $\mathrm{d}^2\sigma/\mathrm{d}L^2<0$ 为极大值点。说明触地瞬间，塔体约在中部发生破碎，理论计算结果与现场倒塌过程中的破碎解体现象吻合。

为分析塔体触地瞬间上部塔体破碎位置与塑性铰转角极值 $[\theta]$ 之间关系，则令 $\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}L=0$，则得到坐标值 L 与塑性铰转角极值 $[\theta]$ 之间的函数关系，利用 MATLAB 软件进行求解，求解结果如图 6 所示。根据图 6 可知，上部塔壁破碎截面在母线轴上的坐标随塑性铰转角极值的增大而减小。

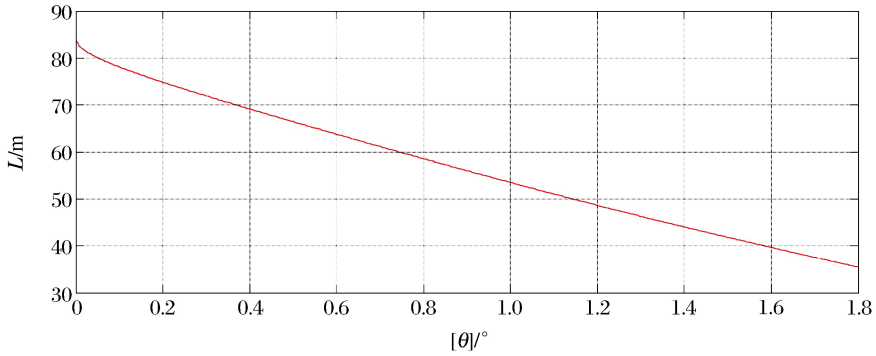


图 6　塔体破碎截面坐标与塑性铰转角极值的关系

Fig. 6　Relationship between the broken section coordinate and the deflection angle of the tower body

3　冷却塔爆破拆除振动监测及分析

为确定本次冷却塔爆破拆除对周围重点建筑物的影响，采用 TC-4850 测振仪对冷却塔爆破及触地塌落振动进行现场监测。监测点分别位于冷却塔南侧 28 m 的电厂医院处与东南侧 47m 的住宅楼处，振动监测结果如图 7 所示。

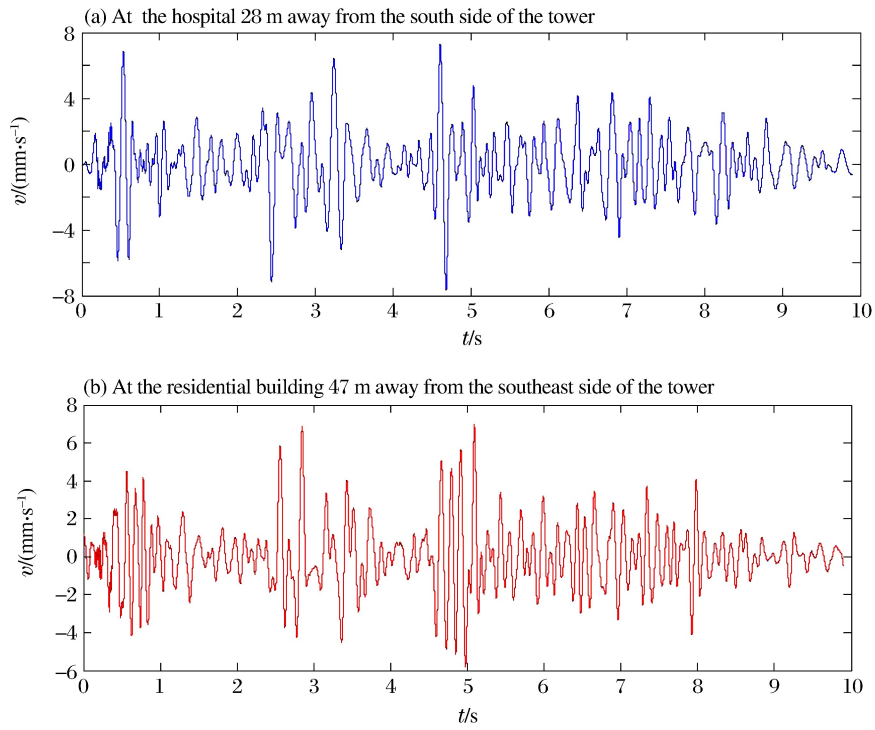


图 7　两个检测点处质点振动速度的变化

Fig. 7　Particle vibration velocity-time curves at two vibration monitoring points

根据现场监测结果可知，采用高卸荷槽复式切口的冷却塔爆破拆除诱发的地表振动可分为 3 个部

分。第 1 部分为 0～1 s，该部分振动是由炸药爆炸引起的；第 2 部分为 2.5～3.5 s，该部分振动是由爆破切口范围内塔壁柱陆续触地所诱发的；第 3 部分为 4.5～10.0 s，该部分为塔体连续塌落诱发的塌落振动，这个过程中振动持时较长并且由以往研究成果[15]可知该过程的振动频率与周围建筑物频率相近，因此认为冷却塔连续倒塌时对周围建筑物的振动危害最严重[16]。通过比较现场监测结果与倒塌视频可知，在连续塌落过程地表的振速峰值是由塔壁解体后上部塔体塌落触地所诱发的。因此，为了有效降低整个拆除过程中产生的振动危害，应从控制连续塌落过程中的振速峰值入手。

根据建筑物爆破拆除时的塌落振动计算公式[17]：

$$v_t = K_t \left[\frac{D}{(MgH/\sigma_d)^{\frac{1}{3}}} \right]^{\beta} \tag{11}$$

式中：v_t 为塌落引起的地表振动速度；M 为建筑物的质量；H 为建筑物重心下落高度[18]；σ_d 为建筑物材料的破坏强度；D 为塌落中心距观测点的距离；K_t、β 分别为衰减系数和指数，其中 β 为负值。

根据式(11)可知，在塔体连续塌落过程中振速峰值随解体后上部塔体重力做功的增多而增大。根据几何关系推导出 $H = L_0' \cos\theta + R\sin\theta$，式中 R 为塔体底部外半径；L_0' 为解体后上部塔壁质心在母线轴上的坐标，$L_0' = \int_L^{l_2} \pi\rho l(R_1^2 - R_2^2)\mathrm{d}l / M$；$M$ 为上部塔体质量，$M = \int_L^{l_2} \pi\rho(R_1^2 - R_2^2)\mathrm{d}l$。则：

$$MgH = (c_1 - c_2)\pi\rho g \left[R\sin\theta \int_L^{l_2} (2al^2 + 2bl + c_1 + c_2)\mathrm{d}l + \cos\theta \int_L^{l_2} (2al^3 + 2bl^2 + c_1 l + c_2 l)\mathrm{d}l \right] \tag{12}$$

式中：l_2 为冷却塔总高度减去人字柱高度。由式(12)可知，当被爆物确定之后，解体后上部塔体的重力做功与塔壁解体位置 L 及塔体触地瞬间转角 θ 有关。经上述分析可知，塔体触地瞬间转动角度 θ 随塑性铰转角极值 $[\theta]$ 的增大而增大，即 $\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}[\theta] > 0$；塔壁解体位置 L 随塑性铰转角极值 $[\theta]$ 增大而减小，即 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}[\theta] < 0$，因此 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta = (\mathrm{d}L/\mathrm{d}[\theta])(\mathrm{d}[\theta]/\mathrm{d}\theta) < 0$，证明塔壁解体位置 L 随塔体触地瞬间转角 θ 的增大而减少，则将式(12)对转动角度 θ 求导得：

$$\frac{\mathrm{d}(MgH)}{\mathrm{d}\theta} = (c_1 - c_2)\pi\rho g \int_L^{l_2} (2al^2 + 2bl + c_1 + c_2)(R\cos\theta - l\sin\theta)\mathrm{d}l - (c_1 - c_2)\pi\rho g(2aL^2 + 2bL + c_1 + c_2)(R\sin\theta + L\cos\theta)\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta} \tag{13}$$

对式(13)进行分析，由塔体参数可知，$(c_1 - c_2)\pi\rho g$ 为正值，而由上述证明可知 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta < 0$，则 $-(2aL^2 + 2bL + c_1 + c_2)(R\sin\theta + L\cos\theta)\mathrm{d}L/\mathrm{d}\theta$ 为正值。因此为判断 $\mathrm{d}(MgH)/\mathrm{d}\theta$ 的正负，只需对 $R\cos\theta - l\sin\theta$ 的数值进行分析，将塔体参数代入 MATLAB 中进行求解，求解结果如图 8 所示。

由图 8 可知，$R\cos\theta - l\sin\theta$ 的数值恒为正，因此 $\mathrm{d}(MgH)/\mathrm{d}\theta > 0$，即解体后的上部塔体在连续塌落过程中的重力做功随塔体触地瞬间的偏转角度增大而增大。由此证明，解体后上部塔体在连续塌落过程中诱发的地表振速峰值随触地瞬间塔体转动角度的增大而增大。由人字柱截面受力状态可知，当第一区起爆后，余下人字柱截面即承受偏心荷载。根据冷却塔倾覆条件[19]可知，在爆破切口形成的瞬间，塔体重力产生的倾覆力矩大于截面屈服弯矩。因此在第 3 区起爆前，塔体的转动角度小于屈服状态时塔体的转动角度，则冷却塔不会下坐且转动角度随整体延期时间的增长而增大。由此判断，当爆破切口圆心角确定之后，保留区塑性铰转动极值和冷却塔触地瞬间的转动角度随整体延期时间的增长而增大。因此，在今后冷却塔爆破工程中应避免过长的整体延期时间，从而减小塔体触地瞬间的偏转角，降低冷却塔爆破对周围建筑的振动危害。

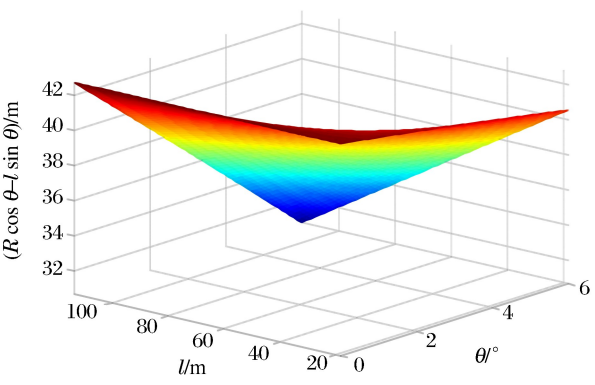


图 8　MATLAB 数值计算结果

Fig. 8　Result of numerical calculation by MATLAB

4 结　论

(1)根据保留区人字柱的破坏形态,判定塔体倾倒时保留区形成的塑性铰为弱柱型塑性铰。当塔体偏转角度达到塑性铰转动极值后,保留区人字柱柱端发生压剪破坏并丧失承载能力,塔体开始下坐并伴随着塔体转动。在触地瞬间,塔体的转动角度随塑性铰转角极值的增大而增大。

(2)通过建立塔体数学模型,以最大线应变理论作为塔体触地破碎的力学依据,分析塔体触地瞬间塔壁截面应力状态,求得等效应力最大位置,比较该处应力与许用拉应力的大小,得出塔体在碰撞瞬间除切口处塔壁发生破碎外,塔壁上部也将发生解体破碎,这与冷却塔实际倒塌过程中破碎现象相吻合。当被爆物确定后,上部塔壁破碎截面在塔体母线上的坐标值随塑性铰转动极值的增大而减小。

(3)冷却塔连续倒塌过程诱发的塌落振动对周围建筑的危害最严重,而其振速峰值随塔体触地瞬间转动角度的增大而增大。鉴于此,对今后的冷却塔爆破拆除施工,在保证冷却塔正常倾覆条件的前提下,应避免爆破延期时间过长,从而控制触地瞬间塔体的转动角度,降低冷却塔爆破对周围建筑的危害。

参考文献:

[1] 谢先启,姚颖康,贾永胜,等.冷却塔爆破拆除失稳机制与变形破坏特征研究[J].爆破,2017,34(2):40-46.
XIE Xianqi, YAO Yingkang, JIA Yongsheng, et al. Study on instability mechanism and deformation characteristics of hyperbolic cooling tower explosive demolition[J]. Blasting, 2017,34(2):40-46.

[2] 李守巨,费鸿禄,张立国,等.爆破拆除冷却塔倾倒过程的研究[J].爆炸与冲击,1995,15(3):282-288.
LI Shouju, FEI Honglu, ZHANG Liguo, et al. Research on the falling process of cooling towers in destruction work[J]. Explosion and Shock Waves, 1995,15(3):282-288.

[3] GLAISTER S, PINHO R. Developmengt of a simplified deformation-based method for seismic vulnerability assessment[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2003,7(1):107-140.

[4] PRIESTLEY M J N. Displacement-based seismic assessment of reinforced concrete buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 1997,1(1):157-192. DOI:10.1080/13632469708962365.

[5] 司炳君,孙治国,杜修力,等.钢筋混凝土桥墩地震弯剪破坏机理与震后快速修复技术研究[J].土木工程学报,2011,44(7):90-99.
SI Bingjun, SUN Zhiguo, DU Xiuli, et al. Study on the seismic flexural-shear damage mechanisms and rapid repair techniques for earthquake damage bridge piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(7):90-99.

[6] BAYRAK O, SHEIKH S A. Plastic hinge analysis[J]. Journal of Structural Engineering, 2001,127(9):1092-1100. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:9(1092).

[7] 邓国红,郭长文.理论力学[M].重庆:重庆大学出版社,2013:289-291.

[8] 周泽平,王明洋,冯淑芳,等.钢筋混凝土梁在低速冲击下的变形与破坏研究[J].振动与冲击,2007,26(5):99-103;157.
ZHOU Zeping, WANG Mingyang, FENG Shufang, et al. Deformation and failure of a reinforced beam under low velocity impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007,26(5):99-103;157.

[9] 龙源,纪永适,张可玉.高耸筒形结构物爆破切口计算原理研究[J].工程爆破,1995(2):16-21.
LONG Yuan, JI Yongshi, ZHANG Keyu. Study on calculation principle of blasting cut of towering tubular buildings[J]. Engineering Blasting, 1995(2):16-21.

[10] 钱七虎.防护结构计算原理[M].南京:工程兵工程学院,1981:170-178.

[11] 褚怀保,侯爱军,徐鹏飞,等.冷却塔高卸荷槽复式切口爆破控制振动机理研究[J].振动与冲击,2014,33(9):195-199.
CHU Huaibao, HOU Aijun, XU Pengfei, et al. Vibration control mechanism of composite cut blasting technology of high load relieving groove of a cooling tower[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(9):195-199.

[12] 田力,朱聪,王浩,等.碰撞冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的动态响应及破坏模式[J].工程力学,2013,30(2):150-155.
TIAN Li, ZHU Chong, WANG Hao, et al. Dynamic response and failure modes of RC columns under impact[J].

Engineering Mechanics, 2013,30(2):150-155.

[13] 孙训方.材料力学:I[M].北京:高等教育出版社,2009:234-246.

[14] 魏晓林.建筑物倒塌动力学(多体-离散体动力学)及其控制爆破拆除控制技术[M].广州:中山大学出版社,2011:59-60.

[15] 徐鹏飞,褚怀保,张英才.冷却塔在高卸荷槽切口下爆破拆除振动数值分析[J].工程爆破,2014,20(4):11-14.
XU Pengfei, CHU Huaibao, ZHANG Yingcai. Vibration numerical analysis of cooling tower blasting at high unloading slot incision[J]. Engineering Blasting, 2014,20(4):11-14.

[16] 言志信,彭宁波,江平,等.爆破振动安全标准探讨[J].煤炭学报,2011,36(8):1281-1284.
YAN Zhixin, PENG Ningbo, JIANG ping, et al. Research about blasting vibration safety criteria[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(8):1281-1284.

[17] 周家汉.爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J].工程爆破,2009,15(1):1-4;40.
ZHOU Jiahan. Discussion on calculation formula of collapsing vibration caused by blasting demolition[J]. Engineering Blasting, 2009,15(1):1-4;40.

[18] 蒋耀港,沈兆武,龚志刚.构筑物爆破拆除振动规律的研究[J].振动与冲击,2012,31(5):36-41.
JIANG Yaogang, SHEN Zhaowu, GONG Zhigang. Vibration law of structure blasting demolition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(5):36-41.

[19] 李守巨,上官子昌,张立国,等.爆破拆除冷却塔倾倒条件的研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),1999(1):9-14.
LI Shouju, SHANGGUAN Zichang, ZHANG Liguo, et al. Study of collapsing condition for demolition of cooling tower[J]. Journal of Lianning Technical University (Natural Science), 1999(1):9-14.

On collapsing disintegration and vibration of a cooling tower subjected to blasting demolition

FEI Honglu[1], ZHANG Chaoyi[1], LÜ Jinqi[1], ZHANG Longfei[2]

(1. *Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin* 123000, *Liaoning*, *China*;
2. *Neimenggu Hongda Blasting Engineering Co. Ltd.*, *Baotou* 014010, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: In order to study the blasting demolition of the cooling tower with compound incisions, the plastic hinge theory is used to analyze the motion state of the cooling tower in the whole collapse process. The mathematical model for the tower body instantly hitting the ground is established. And the maximum linear strain theory is considered to be the mechanical basis for the breakage of the tower wall. Analysis is carried out by the MATLAB numerical software. Analyzed results display that in addition to the wall at the incisions, the upper tower wall will undergo breakup and disintegration. This phenomenon coincides with the actual situation. When the explosive is determined, the coordinate value of the upper broken section decreases with the increase of the rotational extremum of the plastic hinge. In addition, the peak vibration velocity induced by the continuous collapse of the tower body hit the ground with blink section plastic hinge extreme increases. This conclusion is deducted by analyzing the of the tower-body continuous collapse that is the most harmful to the surrounding buildings during the blasting process. In view of that, the excessive total delay time should be avoided for the cooling-tower blasting in the future, so as to control the rotation angle of the tower and reduce the harm induced by cooling-tower blasting to surrounding buildings.

Keywords: cooling tower; blasting demolition; plastic hinge; breakup and disintegration; continuous collapse; vibration　　(责任编辑　张凌云)