

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.01.011

矮胖式筒仓集群爆破切口参数设计及预处理技术^{*}

孙 飞^① 郭文华^② 顾 云^① 王旭鸣^② 单 浩^② 李 飞^①

①核工业南京建设集团有限公司(江苏南京,211102)

②苏州市公安局(江苏苏州,215131)

[摘 要] 以张家港联峰钢铁筒仓集群爆破拆除工程为例进行研究。为确保筒仓集群顺利失稳倾倒,结合周围环境,选择分 3 次逐排定向爆破的总体方案。通过对单个筒仓爆破失稳倒塌机理的分析,借鉴烟囱爆破切口设计的成功经验,对筒仓爆破切口圆心角与切口高度进行了精心设计与安全校核,最终确定爆破切口圆心角 $\alpha = 252^\circ$,爆破切口高度 $H_p = 10\text{ m}$ 。在此基础上,结合筒仓自身结构特征,对筒仓关键部位进行预处理,进一步确保筒仓集群爆破失稳倾倒的可靠性。实践证明,筒仓集群 3 次逐排定向爆破效果与预期基本一致,可为类似工程提供参考。

[关键词] 筒仓集群;控制爆破;失稳机理;预处理

[分类号] TU746.5

Parameters Design of Blasting Cut and Pretreatment Technology of Chunky Silo Cluster

SUN Fei^①, GUO Wenhua^②, GU Yun^①, WANG Xuming^②, SHAN Hao^②, LI Fei^①

① Nuclear Industry Nanjing Construction Group Co., Ltd. (Jiangsu Nanjing, 211102)

② Suzhou Public Security Bureau (Jiangsu Suzhou, 215131)

[ABSTRACT] The blasting demolition project of silo cluster in Lianfeng Steelworks in Zhangjiagang was researched. In order to ensure the silo cluster to collapse smoothly, combined with the surrounding environment, the overall scheme of directional blasting in three rows was selected. Based on the analysis of the collapse mechanism of single silo blasting and the successful experience of chimney blasting cut design, the center angle and cut height of silo blasting cut were carefully designed and checked for safety. Finally, the center angle of the blasting cut $\alpha = 252^\circ$ and the height of the blasting cut $H_p = 10\text{ m}$ were determined. On this basis, combined with the structural characteristics of the silo itself, the key parts of the silo were pretreated to further ensure the reliability of the unstable dumping of the silo group blasting. The practical results show that the effect of three times of directional blasting is basically the same as expected, which can provide reference for similar projects.

[KEYWORDS] silo cluster; controlled blasting; instability mechanism; pretreatment

引言

近几十年,爆破作为一种经济有效的手段^[1],被广泛应用于烟囱、楼房等高耸建(构)筑物的拆除。查阅大量文献可知^[2-5],被爆破拆除的建(构)筑物通常是单个或者多个相距较远的,对类似筒仓集群式的高耸构筑物的爆破拆除工程较少^[6-7]。为确保施工安全,以张家港联峰钢铁筒仓集群爆破拆除工程为研究背景,对筒仓集群的爆破切口参数设

计及预处理技术展开研究。

1 工程概况

该爆破拆除工程位于江苏省张家港市南丰镇永联村。因焦化场地用途调整,需对场地内筒仓集群进行拆除。场地内共建 3 排筒仓,每排 9 个,合计 27 个,工程现场见图 1。为便于设计施工,对筒仓集群统一编号(图 2)。其中,49.97 m 高筒仓 18 座,47.77 m 高筒仓 5 座,9.80 m 高筒仓 4 座。为确保

^{*} 收稿日期:2020-06-08
第一作者:孙飞(1989-),男,硕士,工程师(采矿专业),研究方向为爆炸与毁伤作用机理研究及其应用。E-mail:1326662880@qq.com



(a) 地面拍摄



(b) 斜上方拍摄

图 1 待爆筒仓集群

Fig. 1 Silo cluster to be blasted

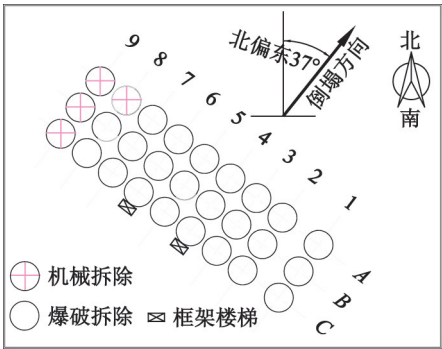


图 2 待爆筒仓集群平面图

Fig. 2 Plan of silo cluster to be blasted

拆除施工安全,经综合比较,对 9.80 m 高筒仓采取机械拆除,47.77 m 高和 49.97 m 高筒仓采取爆破拆除,具体参数见表 1。表 1 中,因筒仓下部横墙及漏斗于爆破前已预处理拆除,故筒体质量未计算此部分。

2 筒仓集群结构特征及总体爆破方案

2.1 筒仓集群结构特征

需使用控制爆破法拆除的筒仓共 23 座,具体结构特征如下。

1)待爆筒仓集群共有 A、B、C 3 排。其中,A 排待爆筒仓 7 座,B 排及 C 排待爆筒仓各为 8 座;筒仓

排间距 3.0 m,各排筒仓除前两座间距 10.0 m 外,其余间距均为 2.5 m。

2)在编号 C4 与 C6 筒仓背部各有一座与筒仓连为一体的框架楼梯,见图 1(b)。

3)相邻筒仓顶部之间均由 6 条截面 200 mm × 200 mm 的 H 型钢连接,见图 3。

4)49.97 m 高的筒仓顶部覆有钢制仓顶板,47.77 m 高的筒仓顶部无仓顶板,其他结构特征均相同。见图 3。



图 3 筒仓顶部 H 型钢连接图

Fig. 3 Connection drawing of H-section steel at the top of silo

5)筒仓内径 20.62 m、外径 21.38 m;筒仓底部由钢筋混凝土仓底梁及漏斗板连为一体,基础顶到仓底板顶面(+9.800 m)混凝土标号 C35,其他部位混凝土标号为 C30。

6)筒壁、仓壁混凝土外侧保护层厚度 30 mm,内侧保护层厚度 35 mm;竖向钢筋为 $\varnothing 18$ mm,环向钢筋: -2.00 ~ 4.00 m 高度为 $\varnothing 18@150$; 4.00 ~ 8.00 m 高度为 $\varnothing 20@150$; 8.00 ~ 12.00 m 高度为 $\varnothing 20@100$ 。

7)仓底梁及漏斗板连成整体。仓底与漏斗板共设置 3 道横墙,沿筒体四周分布 10 根 70 cm × 70 cm 起支撑作用的暗柱;中间横墙厚度为 0.6 m,两侧横墙厚度为 0.5 m;横墙之间设置 6 个倒圆锥形漏斗,锥底至漏斗板高度 6.0 m,锥底距离筒仓底部 3.8 m。见图 4。

2.2 总体爆破方案

根据筒仓自身结构特征及四周环境,确定总体爆破方案如下。

1)倒塌方向:选择逐排定向爆破,倒塌方向北偏东 37°,见图 2。

表 1 筒仓结构基本参数

Tab. 1 Basic parameters of silo structure

高度/ m	筒仓编号	外径/ m	内径/ m	壁厚/ m	筒体体积/ m ³	筒体密度/ (t · m ⁻³)	筒体质量/ t
49.97	A1 ~ A6、B1 ~ B6、C1 ~ C6	21.38	20.62	0.38	1 252.00	2.60	3 255.20
47.77	A7、B7 ~ B8、C7 ~ C8	21.38	20.62	0.38	1 197.00	2.60	3 112.20

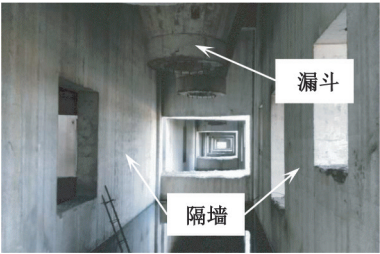


图 4 横墙及漏斗现场

Fig. 4 Actual view of transverse wall and funnel

- 2)爆破切口形式:正梯形^[8]。
- 3)起爆顺序:分 3 次爆破,每次爆破一排,待场地清理完毕再爆破下一排。

3 筒仓爆破失稳机制分析

筒仓具有重心底且高宽比小的特点。利用控制爆破法拆除的倒塌机制^[9]:在筒仓底部一定位置,采用炸药爆炸能量形成爆破切口,而后爆破切口上部筒体在自身重力与支座反力共同形成的倾覆力矩作用下发生失稳,从而沿预定方向发生倾倒触地,达到拆除的目的。

在筒仓爆破切口形成后,切口处起支撑作用的部分(环型筒体)为余留支撑体(图 5 所示阴影部分)。若余留支撑体处钢筋混凝土的极限抗压强度小于爆破切口上部筒体的重力,则余留支撑体便会瞬间被压垮,从而导致筒体后坐。这样极易出现筒体炸而不倒或倾倒方向失去控制的危险情况。如果余留支撑体处钢筋混凝土的极限抗压强度大于爆破切口上部筒体的重力,则上部筒体会在自身重力与支座反力共同形成的倾覆力矩作用下,以余留支撑体为轴发生偏转,进而倒塌。此过程中,余留支撑体处存在一条中性轴 CD ,以中性轴为界,一侧受拉,为拉应力区;另一侧受压,为压应力区;均呈中性轴处为零、边缘区域最大的三角形分布。如图 6 所示。

当最大压应力处达到钢筋混凝土的最大极限抗

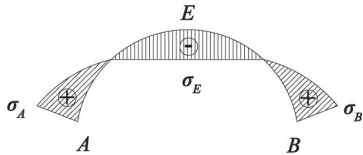


图 6 余留支撑体截面应力分布

Fig. 6 Stress distribution of remaining support section

压强度时,即出现压碎区;中性轴 CD 随着压碎区范围的不断扩大后移,同时拉应力区范围逐渐变大,压应力区范围逐渐减小。随着拉应力区不断增大,在余留支撑体正后方会出现裂缝,并向中性轴 CD 方向发展;支撑体压应力区面积不断减小,压应力不断增大;进而筒仓会以 CD 轴为支点定向朝爆破切口方向旋转;当切口闭合时,重心偏移出原爆破筒体,筒仓在倾覆力矩的作用下发生倒塌^[10]。

4 筒仓爆破切口参数选取

根据筒仓爆破失稳机制分析可知^[11],为确保筒仓爆破后沿预定方向顺利倒塌,爆破切口参数设计至关重要。主要参数有爆破切口圆心角 α 和爆破切口高度 H_p 。

4.1 爆破切口圆心角 α

筒仓爆破后沿预定方向顺利倾倒的基本条件是^[12]:

- 1)余留支撑截面处钢筋混凝土的极限抗压强度大于爆破切口上部筒体的重力作用,避免余留支撑截面瞬间被压垮进而发生安全事故。
- 2)倾倒过程中,筒体产生的倾覆力矩大于余留支撑截面的抗弯力矩。

针对基本条件 2),筒仓材料为钢筋混凝土,底部由筒壁与暗柱组成,结构复杂,其倾倒过程中余留支撑截面处的动力学行为异常复杂,尽管已有大量学者对其倾倒过程动力学运动方程做了深入的研究,但计算过程繁杂,很难应用于实际工程。

由于筒仓与烟囱均属于筒式结构,且烟囱定向爆破在国内已经积累了丰富的经验,因此筒仓爆破圆心角 α 可参照烟囱爆破切口参数的经验值进行确定。

假设烟囱与筒仓高度均为 H ,爆破切口处内、外直径分别为 r 、 R ,切口圆心角均为 α 。可知,烟囱的重心高度约为 $H/3$,筒仓的重心高度约为 $H/2$,且烟囱爆破切口上部筒体的质量小于筒仓的质量,故在倒塌过程中筒仓的倾覆力矩远大于烟囱的倾覆力矩。因此,在上述假设条件下,开设相同切口圆心角

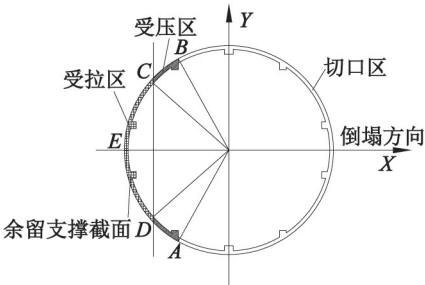


图 5 切口横截面示意图

Fig. 5 Cut cross section

α 时,筒仓更容易失稳倾倒。

参照大量的烟囱定向爆破成功经验,最佳切口圆心角 α 取值在 $210^\circ \sim 230^\circ$ 之间。考虑筒仓底部暗柱的影响,结合切口预处理设计,爆破切口圆心角 α 取 252° ,见图 7。

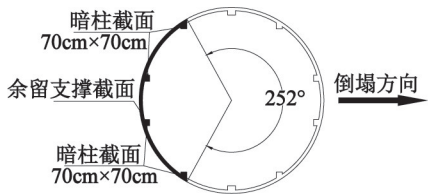


图 7 爆破切口截面图
Fig. 7 Section of blasting cut

针对基本条件 1), 爆破切口圆心角 $\alpha = 252^\circ$, 余留支撑截面对应圆心角 108° (图 7), 余留支撑截面积 $S = 8.56 \text{ m}^2$; 可粗略计算出余留支撑截面处由筒仓自重引起的平均压应力:

$$\delta_1 = \frac{m_1 g}{S} = 3.77 \text{ MPa}; \quad (1)$$

$$\delta_2 = \frac{m_2 g}{S} = 3.56 \text{ MPa}. \quad (2)$$

式中: δ_1 、 δ_2 分别为高 49.97、47.77 m 的筒仓余留支撑截面处平均压应力; m_1 、 m_2 分别为高 49.97、47.77 m 的筒仓质量。

余留支撑截面主要抗压材料为 C35 混凝土, 抗压强度为 35 MPa, 远远大于 δ_1 、 δ_2 。由此可见, 爆破切口圆心角 $\alpha = 252^\circ$ 符合两个基本条件要求, 能确保筒仓爆破后沿预定方向倾倒。

4.2 爆破切口高度 H_p 选取及校核

4.2.1 爆破切口高度 H_p 选取

大量烟囱类高耸构筑物爆破拆除工程实践表明^[4-8], 爆破切口高度 H_p 是决定被爆对象结构能否整体失稳、顺利倾倒的重要参数。迄今为止, 大多数高耸构筑物的爆破切口高度的选取方法, 均先参照构筑物具体结构特征, 拟定爆破切口高度 H_p , 再以重心偏出理论进行计算, 即只需确保爆破切口闭合时上部结构的重心偏移距离大于筒仓外直径即可。

由于筒仓底部由钢筋混凝土仓底梁及漏斗板连为一体, 高度为 9.8 m, 为便于预处理, 爆破切口高度 H_p 取 10.0 m。

4.2.2 切口闭合时筒仓重心偏移距离校核

根据几何关系, 爆破切口闭合角 α_0 可用式(3)确定:

$$\alpha_0 = \arctan \left(\frac{H_p}{R - r \cos \frac{\alpha}{2}} \right). \quad (3)$$

式中, r 为筒仓切口处内半径, 取 10.31 m; R 为筒仓的外半径, 取 10.69 m; α 为切口圆心角, 取 252° 。

由式(3)可计算出爆破切口的闭合角 $\alpha_0 = 30.84^\circ$ 。闭合后, 参照烟囱爆破倾倒重心偏移计算原理, 筒仓重心偏移距离 L 由式(4)计算:

$$L = [z^2 + (-r \cos \frac{\alpha}{2})^2]^{\frac{1}{2}} \cdot \cos \left(\arctan \frac{z}{-r \cos \frac{\alpha}{2}} - \alpha_0 \right) + r \cos \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

式中: z 为筒仓重心高度, 49.97 m 高筒仓取 25.00 m, 47.77 m 高筒仓取 24.00 m。

分别代入式(4)得, 49.97 m 高筒仓重心偏移距离 $L_1 = 11.96 \text{ m}$; 47.77 m 高筒仓重心偏移距离 $L_2 = 11.45 \text{ m}$ 。计算结果均大于筒仓外半径 $R = 10.69 \text{ m}$ 。可知筒仓爆破切口高度设计符合要求。

5 预处理关键技术

由于筒仓高宽比约为 2.3, 且筒仓集群结构复杂, 为使筒仓在爆破后沿预定方向顺利倒塌, 爆破前在确保筒体稳定的基础上, 须预先对筒仓进行一定程度的预处理^[13]。

5.1 筒仓内部预处理

使用机械对内部横墙及漏斗进行破除, 并清运出筒仓。仅留漏斗板, 见图 8。



图 8 筒仓内部预处理

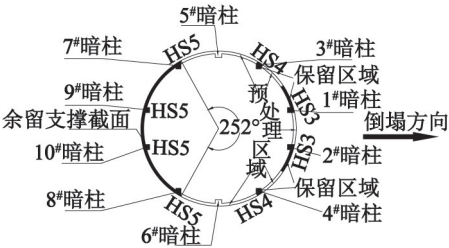
Fig. 8 Internal pretreatment of silo

5.2 筒仓爆破切口预处理

为增加装药部分的临空面, 确保爆破切口处筒壁混凝土完全破碎, 失去承压作用, 使用机械将爆破切口处进行预处理。切口处共有暗柱 6 根, 其中 1#~4#保留, 5#、6#破除; 除 1#、2#旁保留弧长 3 m 的筒壁外, 其余爆破切口内筒壁全部破除; 使用长臂机械在筒仓切口上部凿出三角形缺口, 可避免爆破时切口闭合后切口上沿的支撑作用。见图 9。



(a)筒仓切口及切口上部预处理



(b)截面图

图 9 筒仓切口预处理

Fig. 9 Pretreatment of silo cut

5.3 筒仓顶部预处理

考虑爆破顺序要求,为确保爆破时后排筒仓不对前排筒仓倾倒产生不利影响,使用氧割枪将筒仓顶部排间 6 条 H 型钢隔断,见图 10。每排筒仓间连接的 H 型钢不做处理,可使爆破时单排筒仓间增加相互牵引力,利于筒仓的顺利倾倒。

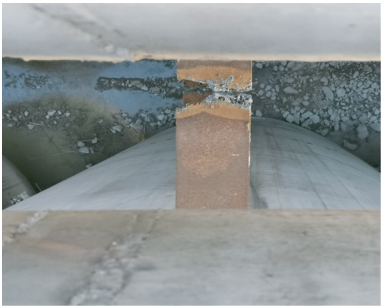


图 10 筒仓顶部排间 H 型钢预处理

Fig. 10 Pretreatment of H-section steel in the top row of silo

5.4 楼梯预处理

为避免楼梯对 C 排筒仓倾倒的影响,使用机械将楼梯及内侧立柱破除,仅保留后侧两根立柱。

6 爆破参数设计及爆破效果

6.1 爆破参数设计

根据筒仓预处理后的受力特征,具体爆破参数

- 如下。
- 1)孔径选取 38 mm,梅花形布孔,选用 $\varnothing 32$ mm 乳化炸药。
 - 2)切口保留筒壁处孔深 28、38 cm,排距 38 cm;暗柱处孔深 0.55 cm,孔距 36 cm,排距 42 cm;考虑钻孔误差,单个筒仓总装药量 44 ~ 48 kg,单耗 2.2 ~ 3.0 kg/m³。
 - 3)1[#]、2[#]暗柱及与之相连的筒壁部分采用 HS3 段延期雷管;3[#]、4[#]暗柱采用 HS4 段延期雷管;为避免余留支撑中的暗柱部分对筒仓倒塌产生的牵制作用过大,在 7[#] ~ 10[#]暗柱底部装填少量炸药,采用 HS5 段延期雷管。待单个筒仓网路连接成闭环以后,为防止整排筒仓同时倒塌触底产生较大振动,在相邻筒仓之间采用 MS9 段延期雷管,从单侧进行起爆。
 - 4)为控制爆破飞石飞散距离,在爆破部位外侧固定两层竹笆,加一层密目网进行近体防护^[14]。

6.2 爆破效果

3 排筒仓依次爆破后,均沿预定方向准确倒塌,解体充分,触地振动速度及飞石均控制在安全范围内,达到了预期效果。

7 结论

- 1)在筒仓、烟囱等高耸构筑物爆破拆除时,爆破参数设计切勿完全照搬经验参数,应在完全熟悉构筑物结构特征及周围环境后,借鉴经验参数进行精心设计与安全校核。余留支撑部分在有暗柱的情况下,爆破切口圆心角 α 可适当增大 10% ~ 15%。
- 2)拆除爆破中,对爆破切口的预处理至关重要,处理不当可能会导致爆前倒塌或爆后不倒等现象;因此,在工程实施前期,爆破切口附近非承重结构物须清除干净,承重部分预处理前须进行安全校核,确保在施工安全的情况下,达到最佳爆破效果。

参 考 文 献

[1] 汪小艳,孟祥栋,游晓丽,等. 大型断裂筒体精确控制爆破拆除[J]. 工程爆破,2013,19(6):38-40.
WANG X Y,MENG X D,YOU X L,et al. Blasting demolition of the large fractured cylinder by precise control [J]. Engineering Blasting,2013,19(6):38-40.

[2] 李玉景,张宝亮,赵文,等. 电厂建筑群大解体式控制爆破实践[J]. 工程爆破,2019,25(4):56-61.
LI Y J,ZHANG B L,ZHAO W,et al. The practice of

- macro disjoint controlled blasting for power plant building complex. [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(4): 56-61.
- [3] 罗福友,陶明,王云茂,等. 复杂环境下薄壁式倒锥形水塔爆破拆除[J]. 工程爆破,2019,25(1):38-44.
LUO F Y,TAO M,WANG Y M,et al. Blasting demolition of thin-walled inverted cone water tower in complex environment[J]. Engineering Blasting,2019,25(1):38-44.
- [4] 谢钱斌,张先东. 3 座内部结构复杂的烟囱的爆破拆除[J]. 工程爆破,2017,23(2):62-66.
XIE Q B,ZHANG X D. Blasting demolition of 3 chimneys with complex internal structure [J]. Engineering Blasting,2017,23(2):62-66.
- [5] 涂胜,周献忠,胡方华. 复杂环境下 85m 两并立钢筋混凝土烟囱爆破拆除[J]. 爆破,2018,35(4):99-103.
TU S,ZHOU X Z,HU F H. Explosive demolition for 85 m “twins” steel concrete chimney in complicated surroundings[J]. Blasting,2018,35(4):99-103.
- [6] 赵小龙,晁雯雯,李传水,等. 联体砖混结构圆筒仓的控制爆破拆除[J]. 工程爆破,2014,20(4):27-29,44.
ZHAO X L,CHAO L L,LI C S,et al. Demolition of the brick-concrete structure silo by controlled blasting[J]. Engineering Blasting,2014,20(4):27-29,44.
- [7] 龚相超,钟冬望,韩芳,等. 爆破拆除钢筋混凝土烟囱切口关键参数的研究[J]. 爆破,2013,30(4):32-35,59.
GONG X C,ZHONG D W,HAN F,et al. Research of key parameters of blast cut in explosive demolition of reinforced concrete chimney [J]. Blasting,2013,30(4):32-35,59.
- [8] 蒋超. 爆破切口对冷却塔定向爆破效果影响的数值模拟研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2014.
JIANG C. The blast demolition of reinforced concrete hyperbolic cooling tower and its numerical simulation[D]. Huainan: Anhui Univeristy of Science and Technology, 2014.
- [9] 李洪伟,颜事龙,郭进,等. 爆破拆除切口形状对冷却塔爆破效果影响及数值模拟[J]. 爆破,2013,30(4):92-95.
LI H W,YAN S L,GUO J,et al. Numerical simulation of effect of cut parameters on explosive demolition of cooling towers[J]. Blasting,2013,30(4):92-95.
- [10] 司君婷,吕小师,曹娟. 210 m 钢筋混凝土烟囱高位缺口控制爆破拆除实践[J]. 爆破,2017,34(1):124-128.
SI J T,LÜ X S,CAO J. Application of controlled explosive demolition of 210 m reinforced concrete chimney with high blast-cut[J]. Blasting,2017,34(1):124-128.
- [11] 陈晨,钟冬望,司剑锋,等. 箍筋切口位置对支撑梁爆破拆除影响数值分析[J]. 爆破,2018,35(2):101-106.
CHEN C,ZHONG D W,SI J F,et al. Numerical analysis of influence of stirrup-cutting position on explosive demolition of support beam[J]. Blasting,2018,35(2):101-106.
- [12] 叶振辉. 高耸(高层)建筑物定向爆破拆除倒塌过程研究[D]. 兰州:兰州大学,2011.
YE Z H. Research of collapsing process of directional blasting demolition of towering building and tall building [D]. Lanzhou:Lanzhou Univeristy,2011.
- [13] 曾志. 高烟囱拆除爆破预处理技术[J]. 科技经济导刊,2018,26(34):40-43.
- [14] 孙飞,龙源,纪冲,等. 复杂环境下 200 m 高烟囱爆破拆除及缓冲减振技术[J]. 工程爆破,2015,21(5):63-67.
SUN F, LONG Y,JI C,et al. Blasting demolition of a 200 m high chimney and buffer damping technology in complicated surroundings [J]. Engineering Blasting, 2015,21(5):63-67.