

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.004

钢筋混凝土结构立柱钢筋爆破失稳机理对比研究

蒙云琪

(中铁四院集团岩土工程有限责任公司,武汉 430063)

摘要: 钢筋混凝土结构爆破倒塌的前提是其立柱钢筋失去支撑能力,这是爆破设计的关键内容。传统爆破设计采用压杆失稳机理判断钢筋失稳,压杆失稳机理是建立在钢筋直轴受力刚度不足失稳的基础上的,由于假设条件过于理想,具有较大的局限性,特别是一些上部结构自重较轻,立柱钢筋直径较密较粗的情况下,压杆失稳机理往往不能适用。研究一个更符合实际的钢筋失稳机理,对于钢筋混凝土结构立柱的爆破设计尤为重要。对压杆失稳机理和弯曲钢筋受力进行了材料力学理论剖析,提出了用弯筋压屈机理作为爆破立柱钢筋破坏的理论,并将其与传统的压杆失稳机理进行比较。弯筋压屈机理强调的是钢筋的弯曲变形量对极限承载力的影响,认为钢筋是最大应力超过极限强度而破坏,而非刚度不够失稳。弯筋压屈机理是更为贴近工程实际的钢筋混凝土结构爆破倒塌理论。

关键词: 压杆失稳; 柔度; 弯曲钢筋; 压弯构件; 极限强度

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0020-06

A Comparative Study on Mechanism of Blasting Instability of Reinforced Concrete Columns

MENG Yun-qi

(China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The premise of blasting collapse of reinforced concrete structure is the loss of supporting capacity of the blasting column steel bar, which is the key content of blasting design. The instability mechanism of the compression bar is used in the traditional blasting design to judge the instability of the reinforcement. The instability mechanism of the compression bar is established on the basis of the insufficient rigidity of the reinforcement in the straight axis. Due to too ideal assumption conditions, there are great limitations, especially when the weight of the upper structure is relatively light and the diameter of the vertical column reinforcement is relatively thick, the instability mechanism of the compression bar is often not applicable. It is very important for the blasting design of reinforced concrete columns to develop a more practical mechanism of steel instability. Based on the instability mechanism analysis of the compression bar and the stress of the bending bar with material mechanics theory, the theory of using the bending bar as the failure of the reinforcement of the blasting column is put forward, which is compared with the traditional instability mechanism of the compression bar. The bending mechanism emphasizes the influence of the bending deformation on the ultimate bearing capacity of the steel bar, if the maximum stress of the steel bar exceeds the ultimate strength, the steel bar will be destroyed, rather than the instability due to insufficient rigidity. The bending mechanism is closer to the blasting collapse theory of reinforced concrete structure.

Key words: buckling of compression bar; flexibility; bending reinforcement; bending member; ultimate strength

收稿日期: 2020-01-14

作者简介: 蒙云琪(1966-),男,高级工程师,从事爆破方面的研究,
(E-mail) myqemail@sohu.com.

钢筋混凝土结构失稳的关键是承重立柱的失

稳,关键是要验算爆后残留钢筋的失稳^[1]。为确保钢筋混凝土框架结构物失稳倒塌,必须爆破破碎承重立柱一定高度内的混凝土,使之脱离钢筋,当暴露部分承受的荷载超过抗压极限强度或达到压杆失稳的临界荷载时,钢筋必将发生塑性变形而使立柱失稳^[2]。通常在设计钢筋混凝土立柱爆破切口高度时,主要是通过爆破高度范围残留钢筋失稳计算来确定爆破高度是否合适,用到的是压杆失稳机理。压杆失稳验算是各类工程建筑构件压杆设计的主要方法,是强度满足要求的前提下对压杆刚度是否满足设计稳定的计算。钢筋是爆破拆除工程研究的特殊压杆,随着钢筋柔度的增加,钢筋的承载能力逐渐降低,当钢筋不足以承受上部以结构自重形式的荷载时,其上部结构随即倒塌,这是通常的钢筋混凝土结构失稳判定方法^[3]。

而对于一些自重较轻,立柱中钢筋直径相对较大的钢筋混凝土结构,如钢筋混凝土储料罐、公路桥、无桥面的报废桥墩,以及上部切口以上楼层少的巨型框架结构,特别是在使用状态时承受较大动荷载的框架构件,其在爆破拆除时用直轴压杆失稳机理设计则存在现实中无法达到设计爆高的问题,爆破后钢筋都会有所弯曲,而用弯曲钢筋压屈机理可以解释结构自重较轻的粗钢筋立柱爆破失稳问题^[4]。

1 压杆失稳机理

爆破立柱失稳理论认为,钢筋混凝土立柱爆破后残余的钢筋,是标准的直轴压杆,其能承受的上部荷载取决于钢筋的强度、刚度、截面面积和杆件相对长度。计算压杆临界力的结构设计规范是按压杆柔度(按小柔度、中柔度和大柔度分为短杆、中长杆和细长杆)分段计算的。

压杆的承载力与杆件的柔度 λ 有关。柔度 $\lambda = \mu L/i, i = (I/A)^{1/2}$ 。I为压杆的截面惯性矩,A为压杆截面面积,L为压杆长度, μ 为计算长度系数。 $\lambda_p = (\pi^2 E/\sigma_p)^{1/2}$, σ_p 为比例强度。当压杆柔度 $\lambda \geq \lambda_p$ 时,按大柔度杆欧拉公式计算临界力;当 $\lambda < \lambda_p, \lambda \geq \lambda_s$ 时,按(直线)经验公式 $P_{ij} = (a - b\lambda)A$ 计算压杆临界力,其中a、b为钢筋材料经验系数; $\lambda < \lambda_s$ 时按截面强度计算压杆临界力 $P_{ij} = \sigma_s A$ 。不同柔度分段计算压杆临界应力如图1所示。

由图1可见,压杆的柔度越大,其能支撑的临界应力越小。在压杆截面面积一定的情况下,杆件的长度越长,杆件的轴向支撑力也越小。对于拆除爆破而言,压杆失稳机理认为,钢筋混凝土立柱爆破

后,混凝土被抛出,剩下直立的钢筋承受上部结构的重力。如果重力荷载小于钢筋截面强度时,要通过加大立柱爆破高度以增加支撑钢筋的柔度,降低临界支撑力,从而使钢筋失稳。为能确保建筑物顺利倒塌,要使得立柱爆破后裸露的钢筋不足支撑上部倒塌结构重量而产生失稳,而钢筋的临界支撑力与钢筋柔度呈反比,立柱的爆破高度要根据上部倒塌结构的重量、钢筋截面及数量、钢筋材料刚度等参数以计算其最小爆破高度条件,即要求杆件的柔度最小不能低于某临界计算值。

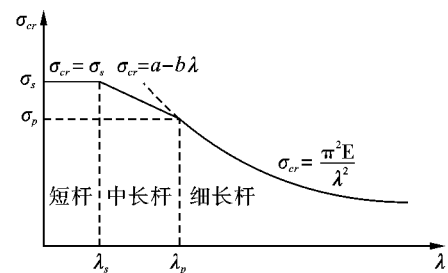


图 1 压杆柔度与压杆临界应力关系图

Fig. 1 Diagram of the relationship between the flexibility of the compression bar and the critical stress of the compression bar

对于同一杆件截面,影响临界支撑力的柔度与计算长度呈正比例。拆除爆破钢筋混凝土立柱的爆破高度可看作钢筋的露出长度,但不是压杆柔度对应的计算长度。钢筋除露长度与计算长度系数的乘积是钢筋压杆的计算长度,而计算长度系数与压杆的两端约束有关。压杆两端的运动自由度约束越紧固,计算长度系数越小,对应的杆件柔度也越小,钢筋的支撑力越大。在爆破设计中应用压杆失稳机理时,往往容易忽略钢筋两端的约束类型对压杆临界支撑力的影响^[5],实际上压杆两端的约束不同,临界支撑力有较大的差别。

如将爆破后的压杆临界支撑力模型视为压杆下端固定,上端无约束地承受垂直力,如图2所示,显然这与实际受力和约束情况不符。实际上立柱钢筋不止1根,爆破后出露的钢筋两端镶嵌在混凝土中,钢筋上端并不是可自由水平晃动和绕水平转动的,它仍然固定在立柱残余部分上,上端的水平移动自由度和转动自由度均受到约束,对于每根钢筋而言,上端是固定约束地承受垂直力,如图3所示,钢筋上端受到约束无法水平方向晃动和绕水平轴转动,实际钢筋压杆的计算长度要小于上端无约束的假设,即实际上钢筋更难压屈失稳。

对于上端无约束的压杆,建立压杆绕曲的近似微分方程,计算简图如图4。

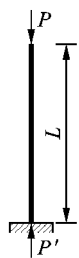


图 2 上端无约束的压杆

Fig. 2 Upper unconstrained strut

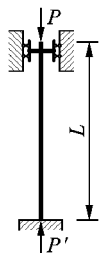


图 3 上端固定约束的压杆

Fig. 3 Compression bar with upper fixed constraint

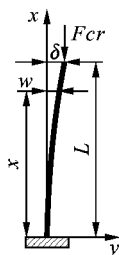


图 4 上端无约束的压杆承载力计算图

Fig. 4 Calculation diagram of bearing capacity of compression bar without constraint at the upper end

任意 x 横截面上的弯矩为

$$M(x) = -Fcr(\delta - w) \quad (1)$$

杆的绕曲线近似微分方程则为

$$EI w'' = -M(x) = Fcr(\delta - w) \quad (2)$$

将上式改写为

$$\ddot{w} + \frac{Fcr}{EI} w = \frac{Fcr}{EI} \delta \quad (3)$$

令 $k^2 = Fcr/EI$, 得 $w'' + k^2 w = k^2 \delta$, 由边界条件得解 $w = \delta(1 - \cos kx)$, 利用 $x = l$ 时 $w = \delta$, 得出 $\delta = \delta(1 - \cos kl)$ 亦即 $\delta \cos kl = 0$, 满足此条件的 kl 的最小值为 $kl = \pi/2$, 从而得到此压杆临界力的欧拉公式

$$Fcr = \frac{\pi EI}{(2l)^2} \quad (4)$$

对应的绕曲线方程为 $w = \delta(1 - \cos \pi x/2l)$ 。

对于上下端约束的压杆, 建立压杆绕曲的近似微分方程并求解, 计算简图如图 5。

任意 x 横截面上的弯矩为

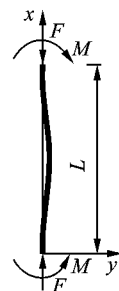


图 5 上端约束的压杆承载力计算图

Fig. 5 Calculation diagram of bearing capacity of compression bar with upper end constraint

$$M(x) = Fw - M \quad (5)$$

杆的绕曲线近似微分方程则为

$$EI w'' = -M(x) = -Fw + M \quad (6)$$

令 $k^2 = F/EI$, 得 $w'' + k^2 w = k^2 M/F$, 由边界条件得绕曲线方程为 $w = -M/F \cos kx + M/F$, 满足边界条件的 kl 的最小值为 $kl = 2\pi$, 从而得到此压杆临界力的欧拉公式

$$Fcr = \frac{\pi^2 EI}{(L/2)^2} \quad (7)$$

由此可见^[6], 上端无约束的压杆计算长度系数为 2, 而上端约束的压杆计算长度系数为 0.5。对比上端无约束的压杆临界力与上端约束的压杆临界力, 在爆破后钢筋出露长度相同的情况下, 压杆计算长度相差 4 倍, 即上端无约束的压杆临界力仅为上端约束的压杆临界力的 1/16, 可见上端约束状态的选择不同, 计算结果相差悬殊, 而上端约束的压杆更加符合立柱爆破后钢筋实际受力状态, 即实际需要更大的爆高才能满足压杆失稳条件。

上下端约束的压杆绕曲线如图 6, 线型如 $y = 1 - \cos(2\pi x/L)$, 在离两端 $L/2$ 处为弯曲拐点, 该处弯矩为 0。

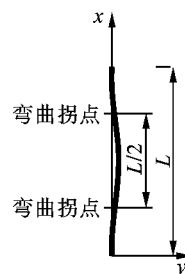


图 6 上下端约束的压杆绕曲线图

Fig. 6 Curve of compression bar restrained by upper and lower ends

2 弯筋压屈机理

当爆破立柱纵向钢筋较粗且数量较多, 摊到每

根钢筋上的压力较小,要求立柱爆破高度较大,而往往因为楼层高度的限制,立柱爆高不能满足按两端约束的压杆临界力计算的钢筋长度,按原有的直轴压杆失稳理论,立柱的爆高设计无法进行,这就提出了弯筋压屈机理。

弯筋压屈机理认为,立柱爆破后露出的钢筋不是直线的,都会受到爆破时的炸药膨胀作用有所弯曲^[7],将弯曲的钢筋作为压弯构件来分析其最大应力,当上部倒塌结构重量施加到钢筋上时,钢筋中的最大应力超过极限强度,则钢筋被破坏失去支撑上部结构的能力,上部结构顺利倒塌。

弯筋压屈机理与压杆失稳机理不同之处是两端固定约束的钢筋不是直线,而是钢筋中部凸出有一定的弯曲偏离变形量,弯筋压屈机理就是分析这一偏离变形量对钢筋支撑力的影响。

通过静力学分析一根弯曲的钢筋,钢筋两端约束,在钢筋两端施加压力,由于钢筋弯曲,整个钢筋受到的正压力相同但在钢筋长度方向不同位置截面受到的弯矩是不同的,正压力在截面上产生压应力,弯矩则在钢筋截面的不同部位产生压应力或拉应力,应力的叠加使得某一位置的截面边缘产生最大压应力或最大拉应力,当最大应力超过了钢筋的极限强度时,钢筋即被破坏。两端固定约束钢筋如图 5,假设钢筋弯曲线型上下对称,从中点取一半做受力分析如图 7,根据对称性,中点截面保持水平不变。

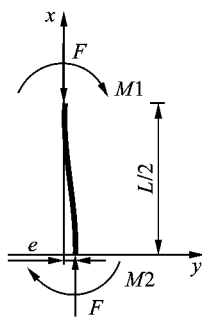


图 7 弯曲钢筋半幅受力分析图

Fig. 7 Half stress analysis diagram of bending reinforcement

在弯曲钢筋半幅受力分析图中,压力大小相等方向平行相反,钢筋在中点处轴线偏移量为 e ,压力产生的弯矩由半幅钢筋两端的弯矩之和平衡,即 $F \times e = M_1 + M_2$ 。 M_1 、 M_2 分别为钢筋端部、中部受到的弯矩。因为弯矩为零的位置位于端部与中点之间,所以 M_1 、 M_2 是极大值。整个钢筋某一截面弯矩最大,该处截面的最大应力也是整个钢筋中最大的应力。 M_1 、 M_2 中的最大值要大于 $(M_1 + M_2)/2$,即

整个钢筋中最大弯矩 $M_{\max} \geq (M_1 + M_2)/2 = F \times e/2$ 。用 $F \times e/2$ 代替钢筋受到的最大弯矩偏于保守,但对于钢筋破坏计算的可靠性无不利影响。当钢筋的弯曲线型是以钢筋端部与中部之间的中点对称时,比如两端固定压杆受压扰度变形曲线(如余弦线型), $M_{\max} = M_1 = M_2$ 。

根据弹性力学压弯杆件的应力计算可知,弯矩造成钢筋弯曲凸面外侧产生最大拉应力,凹面内侧产生最大压应力,与轴向的压应力叠加,既是钢筋截面的应力情况。

钢筋直径为 d ,钢筋截面面积为 $\pi d^2/4$;弯矩截面系数 $W_z = \pi d^3/32$ 。两端压力 F 产生的截面压应力为 $F/(\pi d^2/4)$ 。

弯矩 $M = F \times e/2$ 产生的截面压应力拉应力值为 $M/(\pi d^3/32) = F \times e/(2\pi d^3/32)$ 。

叠加后最大压应力值为 $F/(\pi d^2/4) + F \times e/(2\pi d^3/32)$;最大拉应力值为 $F/(\pi d^2/4) - F \times e/(2\pi d^3/32)$ 。

当弯曲的钢筋偏移量 e 等于钢筋直径 d 时,最大压应力值为 $F/(\pi d^2/4) + F \times d/(2\pi d^3/32) = F/(\pi d^2/4) + 4 F/(\pi d^2/4) = 5F/(\pi d^2/4)$,即弯曲钢筋有 1 倍直径的弯曲偏移量时,钢筋的最大压应力是没有发生偏移直钢筋压应力的 5 倍;当钢筋偏移量 e 等于 $2d$ 时,弯曲钢筋的最大压应力是直钢筋压应力的 9 倍。可见,钢筋越弯曲,钢筋的最大压应力越大,这根钢筋抵抗压力的能力越弱。当弯曲钢筋的最大压应力 $F/(\pi d^2/4) + F \times e/(2\pi d^3/32)$ 超过钢筋材料的极限抗压强度 σ_c 时,钢筋随即压垮再无法支撑上部倒塌结构重量,也就是说弯筋压屈机理是通过提高钢筋的弯曲程度,以削弱钢筋的支撑力,实现上部结构顺利倒塌。

用 ANSYS 对弹性变形的弯曲钢筋进行应力分析计算,钢筋弯曲线型为余弦线型,当受力后钢筋绕度变形不增加弯矩附加应力,即不考虑材料刚度的影响时,数值分析结论与以上理论计算一致。

当考虑材料刚度,弯曲钢筋因受压力产生绕度进一步增加了偏心量^[8],钢筋中最大弯矩有所增大,取图 6 下部 $4/L$ 段作力学分析如图 8。

e 为钢筋中点偏移量,受力后整个钢筋 y 方向最大位移量为 $e + \delta$;在图 8 中, A 点弯矩为 0, y 方向位移量为 $(e + \delta)/2$, oA 段弯矩为 $M = \cos(2\pi x/L) F(e + \delta)/2$,受力后弯矩作用使 A 在 y 方向的 2 倍变形近似解为

$$\delta = \frac{F(e + \delta)}{EI} \int_0^{1/4} \cos^2(2\pi x/L) dx^2 \quad (8)$$

$$\delta = \frac{F(e + \delta)}{EI} (L/2\pi)^2 \quad (9)$$

两端固定约束的直轴压杆临界支撑力

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(L/2)^2} \quad (10)$$

式(10)代入式(9)得

$$\delta = \frac{Fe}{F_{cr} - F} \quad (11)$$

即附加变形与作用力和初始变形成正比, F 接近 F_{cr} 时附加变形激增。

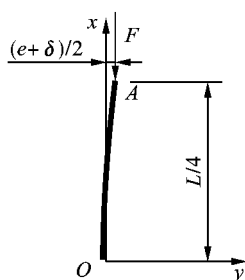


图8 弯曲钢筋受力变形分析图

Fig. 8 Stress and deformation analysis diagram of bending reinforcement

弯曲钢筋的最大弯矩为

$$M_{max} = \frac{Fe}{2} \left(1 + \frac{F}{F_{cr} - F} \right) \quad (12)$$

式中, F_{cr} 为直线压杆的临界承载力。可见, 在考虑弹性变形增加的绕度情况下, 最大弯矩是在不考虑变形的弯矩基础上乘了一个大于1的系数, 这个系数当受力接近压杆临界力时趋近于无穷大, 当压力为直杆临界力的1/2时, 该系数为2, 即将钢筋受到的弯矩较初始状态增加一倍。式(12)也说明弯筋压屈机理计算的承载力小于压杆失稳机理计算的临界力。实际上讲, 直轴压杆并不存在, 任何压杆都有不为0的偏移量, 这就从应力的角度解释压杆破坏原因。另一方面也可得出结论, 由于钢筋弯曲初始偏移的存在, 减小了杆件的临界承载力, 弯曲偏移程度越大, 临界承载力减小越甚。

弯筋压屈机理钢筋中的最大压应力为

$$\sigma = \frac{F}{\pi d^2/4} + \frac{Fe}{2\pi d^3/32} \left(1 + \frac{F}{F_{cr} - F} \right) \quad (13)$$

钢筋破坏条件是 $\sigma > \sigma_s$, 这就建立了钢筋强度与钢筋弯曲量和承载力的关系。根据钢筋的极限强度 σ_s 、每根钢筋分摊的上部倒塌结构重量压力 F 、钢筋弹性模量 E 、钢筋直径等参数, 可计算出保证钢筋被压垮时的最小钢筋爆破弯曲程度条件 e 。钢筋的弯曲程度与立柱的爆破强度有关, 钢筋受弯的应力还与箍筋的分布有关^[9], 可通过立柱试爆查看某一

炸药单耗对应的钢筋弯曲程度, 核算上部结构自重是否能压垮钢筋。

3 压杆失稳机理与弯筋压屈机理比较

压杆失稳机理与弯筋压屈机理都是关于钢筋混凝土立柱在爆破后暴露出的钢筋能否被压垮破坏的爆破理论分析方法, 但两者有着明显的不同。对爆破拆除工程中应用的压杆失稳机理与弯筋压屈机理进行比较分析如下:

1) 假设条件不同

压杆失稳机理是以直轴受力为假设, 认为压杆是呈直线, 在杆件轴向承受压力。

弯筋压屈机理认为爆破后立柱出露的钢筋是弯曲的, 钢筋是一种特殊的压弯构件, 钢筋受到的弯矩是钢筋弯曲造成的。

当立柱爆破时, 爆炸产生的冲击波和气体膨胀对原本笔直的钢筋有较大的拉伸作用。随着混凝土从钢筋笼中粉碎抛出, 钢筋拉伸屈服增加了钢筋长度, 同时由于钢筋两端钢筋混凝土受到钢筋变形过程中的牵引, 产生了残余变形, 两端距离的拉近及钢筋的拉伸, 就造成了钢筋的弯曲。可见钢筋是直线的假设过于理想, 弯筋压屈机理比压杆失稳机理的受力条件更接近于实际。

2) 设计方式和应力特性不同

压杆失稳机理的力学设计方式是刚度设计, 即压杆是否失稳与钢筋弹性模量和压杆长度有关, 与钢筋的强度关系并不大。计算所使用的是诸如欧拉公式得出的临界承载力, 计算过程中的应力是钢筋截面的虚拟应力, 并不能直接说明应力与钢筋强度的关系。

弯筋压屈机理的力学设计方式是强度设计, 即把弯曲钢筋作为特殊的压弯构件, 通过对钢筋中的最大应力计算与钢筋极限强度的比较, 来判定钢筋是否能支撑上部倒塌结构重量, 最大应力是实际的应力。

3) 与爆破的相关性不同

压杆失稳机理计算的爆高, 是与爆破相关性不大的理论值, 有可能受到楼层高度的限制, 而不能达到压杆失稳理论计算的爆高。而弯筋压屈机理依赖的是钢筋的弯曲程度, 与爆破装药直接相关, 爆破装药强度大则钢筋越弯曲, 弯筋的承载力就越小, 即能在可有效防护的立柱部位提高装药强度的方法, 减弱弯筋的支撑梁, 即使楼层高度有限制也不妨碍实现爆破倒塌的目的。

比如钢厂低层钢筋混凝土栈道、质量不合格爆

破清除的桥墩等构筑物,自身荷载较轻而立柱钢筋配置相对密集,钢筋直径大。按常规单耗爆破,钢筋虽然有所弯曲,但由于钢筋不够弯曲,仍然能扛住上部自重而不能顺利倒塌的案例十分常见。解决的办法是局部加大单耗以制造更大的钢筋弯曲而降低弯曲钢筋的抵抗力。钢筋混凝土巨型框架结构楼房立柱爆破也常常会有按通常的压杆理论设计不能满足倒塌要求的问题^[10],都是应用弯筋压屈理论进行设计的。

4 结论

通过钢筋混凝土立柱爆破钢筋失稳机理的对比研究,得出以下结论:

(1)作为钢筋混凝土立柱爆破的基本理论,弯筋压屈机理比压杆失稳机理更加贴近工程实际,弯筋压屈机理是对钢筋混凝土楼房建筑爆破倒塌理论的发展。

(2)与压杆失稳机理以刚度设计强调的是刚度不足失稳不同,严格意义上讲,弯筋压屈机理并非刚度不足失稳的机理,弯筋压屈机理是以极限强度破坏为条件,是强度设计,其破坏较为稳定、直接、可靠。

(3)因为考虑了钢筋弯曲,弯筋压屈机理计算的钢筋极限承载力要小于压杆失稳机理计算的临界承载力。对于钢筋混凝土立柱爆破设计用压杆失稳计算的爆高无法在工程中实现的立柱,用弯筋压屈机理可以设计在限制爆高的位置爆破立柱钢筋弯曲量,达到设计目的。

(4)弯筋压屈机理将立柱压垮结构倒塌与爆炸强度建立了关联,通过增加爆炸强度提高钢筋的弯曲程度,可进一步削弱钢筋的支撑力而实现楼房的顺利倒塌。

参考文献 (References)

- [1] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 冶金工业出版社,2014.
- [2] 宗琦,吕渊. 钢筋混凝土框架结构物定向爆破拆除[J]. 爆破,2007,24(3):52-54.
- [2] ZONG Qi,LYU Yuan. Demolition of a reinforced concrete frame structure by directional blasting [J]. Blasting, 2007,24(3):52-54. (in Chinese)
- [3] 焦永斌,张丹. 桥墩柱定向倒塌拆除爆破后坐分析[J]. 爆破,2003,20(4):52-55.
- [3] JIAO Yong-bin,ZHANG Dan. Analyses of recoil in demolishing the pier of bridge by directional blasting[J]. Blasting,2003,20(4):52-55. (in Chinese)
- [4] 李小贝,蒙云琪,吴剑锋,等. 基于 Vague Sets-topsis 理论的爆破方案优选[J]. 爆破,2018,35(2):94-100.
- [4] LI Xiao-bei,MENG Yun-qi,WU Jian-feng, et al. Blasting scheme optimization based on vague sets-topsis[J]. Blasting,2018,35(2):94-100. (in Chinese)
- [5] 王汉军,黄风雷,付跃升. 高耸钢筋混凝土框架结构的定向爆破拆除[J]. 爆破,2003,20(4):56-58.
- [5] WANG Han-jun,HUANG Feng-lei,FU Yue-sheng. Direction demolition of a tall frame-structured reinforced concrete tower by controlled blasting [J]. Blasting, 2003, 20 (4):56-58. (in Chinese)
- [6] 甄梦阳,李本伟,陈德志,等. 1160 m 长城市高架桥爆破拆除[J]. 爆破,2017,34(2):91-95.
- [6] ZHEN Meng-yang,LI Ben-wei,CHEN De-zhi, et al. Explosive demolition of 1160 m long urban viaduct[J]. Blasting,2017,34(2):91-95. (in Chinese)
- [7] 何庆锋,易伟建. 爆破移除钢筋混凝土框架柱倒塌性能试验研究[J]. 爆破,2017,34(1):20-26.
- [7] HE Qing-feng,YI Wei-jian. Experimental study on collapse-resistant behavior of RC frame structures in explosion demolition [J]. Blasting, 2017, 34 (1): 20-26. (in Chinese)
- [8] 姚颖康,谢先启,孙金山,等. 钢筋混凝土立柱爆破后钢筋骨架承载特性研究[J]. 爆破,2017,34(4):1-6.
- [8] YAO Ying-kang,XIE Xian-qi,SUN Jin-shan, et al. Bearing characteristics of reinforcement steel cage after reinforced concrete pillar blasting[J]. Blasting,2017,34(4):1-6. (in Chinese)
- [9] 陈晨,钟冬望,司剑峰,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.
- [9] CHEN Chen,ZHONG Dong-wang,SI Jian-feng, et al. Numerical analysis of influence of stirrup-cutting position on explosive demolition of support beam[J]. Blasting,2018, 35(2):101-106. (in Chinese)
- [10] 蒙云琪,倪明亮,操鹏,等. 基于数值模拟的铁四院前大楼拆除爆破方案优化[J]. 爆破,2018,35(1):96-103.
- [10] MENG Yun-qi,Ni Ming-liang,CAO Peng, et al. Optimization of demolition blasting scheme of TieSiYuan former building based on numerical simulation [J]. Blasting, 2018,35(1):96-103. (in Chinese)