

露天浅孔爆破抵抗线计算方法的探讨及其应用

丁汉堃¹, 西子阳², 王彦军³

(1.中国科学院力学研究所, 北京 100190;

2.保利生态环境工程有限责任公司, 河北 唐山市 064000;

3.北京理工北阳爆破工程技术有限责任公司, 北京 100190)

摘要:为解决露天浅孔爆破时由于炮孔抵抗线选择及网孔布置不合理造成的无序飞石、冲炮及残留根底等问题, 根据柱状岩石体运动及断裂过程的分析, 采用压杆稳定理论推导得出了浅孔爆破炮孔抵抗线的计算公式, 并基于能量方法推导得到了炮孔间距的计算公式。结果表明: 炮孔抵抗线及间距计算公式具有较好的适用性, 已在实际爆破施工中取得了较好的效果。

关键词:浅孔爆破; 压杆理论; 抵抗线

露天浅孔爆破(台阶和沟槽)时常出现无序爆破飞石、冲炮、残留根底等不良现象, 极大地影响爆破安全和爆破质量, 给下一步施工造成很大困难。

经分析, 造成上述现象的主要原因是炮孔抵抗线选择不当进而孔网布置不合理, 因此, 提出一种新思路, 以解决这类问题。引入压杆理论解释条形药包运动过程; 利用条形药包径向作用形成破碎圈等特点, 推导出浅孔爆破抵抗线及孔间距计算公式, 并应用到爆破施工中, 取得了满意的效果。

1 柱形药包爆破运动模型

露天钻孔爆破实质是柱形药包爆破。药包在爆炸瞬间, 沿抵抗线方向形成岩石柱体, 脱离岩石母体, 在自重作用下柱体呈弓形向外抛移, 运动中的柱体经历变形、压弯、断裂, 分成上下二部分, 继续塌落、碰撞, 挤压为一体向前冲击形成爆堆, 示意图见图1。



图1 岩柱体运动示意

药包爆炸后, 柱形岩体运动过程如同压杆失稳状态。压杆失稳即在轴向压力作用下, 不仅产生轴向变形, 而且还在横向产生弯曲变形, 塑性变形, 从而导致破坏。以上分析得出, 用压杆失稳状态的判断公式即欧拉公式适用于岩柱运动状态计算。

2 抵抗线的计算方法

2.1 浅孔爆破炮孔抵抗线的推导

(1) 压杆的欧拉公式:

$$P_y = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{4L^2} \quad (1)$$

式中, P_y 为临界压力; E 为岩石弹性模量, MPa; I_{\min} 为柱体横截面最小惯性矩, m^4 ; L 为柱体长度(炮孔长度), m。

(2) 三角形截面惯性矩公式。

条形药包爆炸后, 岩体形成截面为三角形的柱体, 见图2。三角形截面惯性矩计算为:

$$I = \frac{n \cdot W^4}{18} \quad (2)$$

式中, n 为爆破指数; W 为抵抗线。

将式(2)代入欧拉公式, 得:

$$P_y = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot n \cdot W^2}{18 \times 4 \times L^2} \quad (3)$$

设 $K = \frac{\pi^2 E n}{72}$ 代入式(3), 得:

$$P_y = k \frac{W^4}{L^2} \quad (4)$$

式(4)表明, 临界压力与柱长成反比, 与抵抗线成正比, 在同一抵抗线下, 长柱体易发生弯曲断裂, 短柱体不易发生弯曲断裂。要达到同样的爆破效果, 则只有同一临界压力 P_y 条件下, 调整(缩小)炮孔的抵抗线尺寸。见图3。

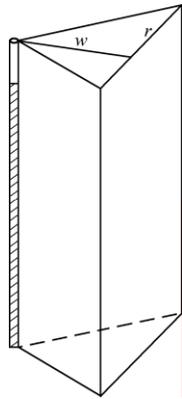


图2 截面为三角形的岩石柱体

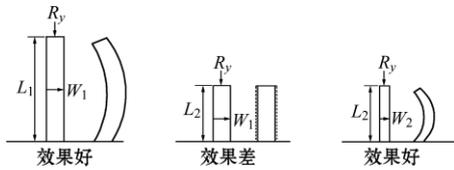


图3 效果示意

在同一爆区, 不同孔深的柱体达到相似压杆破坏状态, 则有 $P_{y1}=P_{y2}$, 开方得:

$$\frac{W_1^2}{L_1} = \frac{W_2^2}{L_2} \quad (5)$$

公式(5)是忽略压杆自重条件下推导出的, 考虑自重压杆对临界压力的影响, 可得:

$$P_{cr}=P_{cr0}-0.3132q \cdot L$$

式中, P_{cr} 为自重压杆临界压力; P_{cr0} 为无自重压杆临界压力; q 为单位长度柱体重量; L 为柱体长度。

与上述相同, 同一爆区不同孔深相似的压杆状态下, 则有 $P_{cr1}=P_{cr2}$ 。

设 $K_1 = \frac{\pi^2 EI}{4 \times 18}$ $K_2 = 0.3132 \rho g$, 则:

$$K_1 \cdot \frac{W_1^4}{L_1^2} - K_2 \cdot W_1^2 \cdot L_1 = K_1 \cdot \frac{W_2^4}{L_2^2} - K_2 \cdot W_2^2 \cdot L_2 \quad (6)$$

同爆区的炮孔 $\Phi 90$ mm, $L=10$ m, $W=3$ m 为基础, 利用公式(5)、(6)计算的不同孔深抵抗线见表1。

由表1可知, 利用公式(5)、(6)计算出的抵

表1 不同孔深抵抗线

| 孔深/m | 抵抗线/m | | 单耗 $q/(kg \cdot m^{-3})$ |
|------|-------|-----|--------------------------|
| | 无自重 | 有自重 | |
| 3 | 1.6 | 1.5 | 2.5 |
| 5 | 2.1 | 2.0 | 1.45 |
| 7 | 2.5 | 2.4 | 1.02 |
| 10 | 3 | 3 | 0.71 |
| 12 | 3.3 | 3.4 | 0.59 |
| 15 | 3.7 | 3.5 | 0.47 |

抗线数值相近, 因此在工程施工中完全可以使用简明的公式(5)进行计算, 其结果可靠。

露天钻孔爆破中, 炮孔加深, 抵抗线相应增大, 孔深缩短, 抵抗线相应减少, 经验表明, 压杆理论及计算数据可靠。

2.2 开槽爆破孔间距计算

开方槽或开圆槽爆破时, 炮孔间距的确定是至关重要的, 目前只是根据经验确定孔网参数, 难以保证稳定爆破效果。经分析研究提出一种方法计算开槽爆破孔间距。

开槽爆破, 只有向上的临空面, 炮孔置于无限岩体之中, 炮孔炸药爆炸时, 周围岩石在冲击波、应力波作用下形成圆柱形破坏范围。

其体积 $V=\pi R^2 \cdot L$, 药量 $Q=q_1 \cdot V$, 则破坏半径为:

$$R=0.56 \cdot W \quad (7)$$

式中, R 为破坏半径, m; W 为炮孔抵抗线, m; q_1 为炮孔单耗, kg/m^3 。

孔间距应使破坏半径重叠, 若使 $a=1.5 \cdot R$, 则有:

$$a=0.84 \cdot W \quad (8)$$

根据公式(5)或(6)求出浅孔抵抗线 W , 以公式(8)求出 a 值, 综合考虑确定孔间距值。

3 某竖井爆破工程

3.1 工程概况

怀九河竖井位于北京市怀柔区花木村外, 怀九河两岸边, 其西南向分别距村庄 500 m 和 200 m, 东北向区域广阔没有房屋。竖井内径 12.5 m, 井壁已用钢筋混凝土浇筑成型, 壁厚 0.6 m, 井内上部 9 m 为沙砾卵石层, 已被清理干净, 下部 4 m 为微风化石灰岩层, 其上水深约 2 m, 该岩层急待爆破清除。

3.2 爆破基本条件要求

井壁不能破坏, 岩石破碎便于清渣, 井底标高达到要求; 爆破时不能产生失控飞石。

3.3 方案选择

竖井加深爆破属于开槽爆破, 可以采取环形、条形两种布孔形式, 经分析研究, 两种方案都是可行的, 最后选定环形布孔(见图4), 其钻孔数量少, 孔位布型规整, 便于施工。虽然逐环起爆可能发生拱形夹制, 但可以采取雷管段位变化予以消除(破坏拱形整体性)。

3.4 炮孔间距计算

怀柔地区石灰岩爆破, 孔径 $\Phi 90$ mm, 孔深 $L=10$ m 时抵抗线 $W=2.5$ m, 由式(5)可得, 当 $L=5.5 \sim$

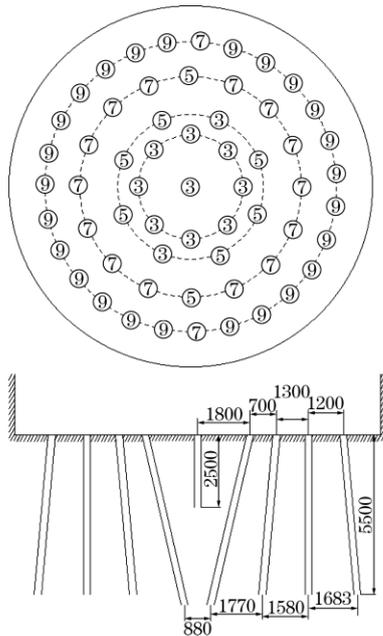


图4 环形布孔

6 m 时, $W=1.85\sim 1.94$ m, $a=1.55\sim 1.63$ m。

考虑竖井内水深 2 m, 最后确定布孔参数为 1.5 m×1.5 m。

综上所述, 爆破设计参数见表 2, 其中掏槽孔与辅助掏槽孔之间的排距为 0.7 m, 辅助掏槽孔与辅助孔之间的排距为 1.3 m, 辅助孔与周边孔之间的排距为 1.2 m。

表 2 爆破设计参数

| 类别 | 个数 | 孔深/ m | 孔间 距/m | 角度/ (°) | 环直 径/m | 堵塞/ m | 单孔药 量/kg | 雷管 段位 |
|-----------|----|----------|-----------|------------|-----------|----------|-------------|----------|
| 中心孔 | 1 | 2.5 | 0 | 90 | 0 | 1.9 | 3 | 3 |
| 掏槽孔 | 8 | 6 | 1.4 | 77 | 3.6 | 3.4 | 13 | 3 |
| 辅助掏 槽孔 | 8 | 5.5 | 1. | 85 | 5.0 | 3.5 | 10 | 5 |
| 辅助孔 | 16 | 5.5 | 1.5 | 90 | 7.6 | 2.7 | 9.6 | 7 |
| 周边孔 | 27 | 5.5 | 1.2 | 90 | 10 | 2.7 | 9.6 | 9 |

注: 孔径 $\Phi 90$ mm, 药卷: $\Phi 70$ mm; 总药量: 599.8 kg。

3.5 爆破效果

起爆时, 爆破点形成伞状水柱, 炸区范围碎石隆起, 呈现中心高的山形爆堆, 石块粉碎, 井壁完好, 四周边缘炮孔半孔残留, 表面圆顺, 清渣顺畅, 井底达到标高, 地面平整, 没有根底。爆破效果验证了爆破设计的合理性。

4 结 论

从露天浅孔爆破的问题出发, 运用压杆原理解释条形药包爆炸的岩体抛移过程, 并推出深孔与浅孔抵抗线关系式, 根据炸药在无限岩体爆炸形成的圆柱形破坏区, 推导出开槽爆破孔间距参数公式, 将爆破设计应用到北京怀九河竖井爆破中, 取得了较好的爆破效果, 进一步验证了浅孔爆破计算方法的可靠性。

参考文献:

- [1] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [2] 刘延强. 工程中两个杆柱稳定性问题分析[J]. 力学与实践, 1995(03): 32-35.
- [3] 于淑宝, 王伯银, 付占华, 等. “黄金分割法”在爆破工程中的应用探讨[J]. 工程爆破, 2012(04): 57-60.
- [4] 方正峰, 邹 飞, 唐 旭. 灰岩和白云岩动态压缩力学性能的 SHPB 实验[J]. 工程爆破, 2017, 23(1): 21-28.
- [5] 董贵法, 刘连生, 兰德沛, 等. 一维动静组合加载下深部石英片岩破坏研究[J]. 工程爆破, 2018, 24(2): 8-14.
- [6] 杨亨衢. 爆破漏斗叠加成槽技术在管沟开挖中的应用[J]. 工程爆破, 2004, 10(1): 44-47.
- [7] 陈章林, 熊华明. 深孔爆破合理参数选择[J]. 工程爆破, 2007, 13(2): 39-41.
- [8] 武 旭, 张云鹏, 朱晓玺. 柱状装药端部等效药量及合理堵塞长度计算[J]. 工程爆破, 2015(02): 13-16.
- [9] 林爱民, 马增光, 徐全军, 等. 台阶爆破抵抗线对块度影响试验研究[J]. 工程爆破, 2006(02): 37-40.
- [10] 周 游, 陈作彬, 王 静, 等. 最小抵抗线对深孔岩石爆破块度的影响[J]. 工程爆破, 2016, 22(6): 70-74.

(收稿日期: 2020-04-27)

(上接第 163 页)

泡效果最好, 时间最短, 大块率和炸药单耗最低, 说明助剂 C 更适合促进敏化。

参考文献:

- [1] 李 杰, 刘 露, 赵明生. 基于混装乳化炸药配方调整改善爆破效果的研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(05): 27-31.
- [2] 黄 麟, 田 丰, 田愷哲, 白建伟. 现场混装乳化基质快速敏化影响因素分析[J]. 中国矿业, 2017, 26(S2): 307-309.
- [3] 杨敏会. 现场混装乳化炸药敏化的试验研究[J]. 煤矿爆破, 2019, 37(06): 1-4+10.
- [4] 夏珍珍, 储国平, 吴红波, 夏曼曼. 低温对不同敏化方式的乳化炸药爆轰性能影响[J]. 火工品, 2017(05): 20-22.
- [5] 刘世宝. 优化现场混装乳化炸药敏化工艺的应用研究[J]. 煤矿爆破, 2018(05): 16-19.

- [6] 刘震宇, 谢 强. 乳化炸药中硝酸铵-亚硝酸钠的发泡动力学研究[J]. 爆破器材 2020, 49(03): 10-15.
- [7] 李 杰, 张 力, 汪帅文. 结构面对露天矿山台阶爆破大块率的影响研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(10): 16-18.
- [8] 刘 露, 李 杰. 露天矿山并敷装药结构爆破数值模拟研究[J]. 采矿技术, 2020, 20(02): 139-142.
- [9] 洋红星. 混装乳化炸药在露天石矿中的应用及爆速测量[J]. 采矿技术, 2019, 19(03): 128-130.

(收稿日期: 2020-07-31)

作者简介: 张家田, 男, 工程师, 从事爆破器材研发及工程爆破工作, Email: zhangjt-gd@petrochina.com. cn.
通信作者: 黄胜松, 男, 助理工程师, 从事爆破器材生产研发及工程爆破工作, Email: 1042867695@qq.com.