

硐室爆破法采石级配预测^{*}

丁希平^a 冯叔瑜^a 魏伴云^b

(^a 铁道科学院 北京 100081)

(^b 中国地质大学 武汉 430074)

摘要 引入岩体裂隙分布的统计理论,探讨了爆堆岩块的分形特性,从统计岩体力学及爆炸分形的角度建立爆炸过程并对硐室爆破进行级配分析,级配预测结果和实际工程吻合较好。

关键词 硐室爆破 堆石坝 分形 级配预测

中图法分类号 TD 235 34

1 问题的提出

随着我国水力资源的不断开发和利用,混凝土面板堆石坝在我国大量兴建。现在已建和在建的堆石坝已达30多座,据不完全统计,各地还有50多座已进入立项和方案比较阶段。面板堆石坝施工除少量采用天然砂砾石料作为坝体堆石料外,绝大多数采用爆破开采的堆石料。目前堆石坝主堆石料开采基本上采用深孔爆破法。实践表明:深孔爆破法开采级配料技术已渐趋成熟,深孔爆破堆石基本上能达到一次上坝级配要求。但深孔爆破采石存在着不少问题:(1)深孔爆破开采成本高,约是硐室爆破采石的2倍;(2)机械设备多,生产效率低。水电大坝施工时,为了保渡汛高程,加快填筑速度,施工企业必须增加大孔径钻机数量,因而增加了成本。在实际堆石坝料开采过程中,由于填筑材料用量大,当采用深孔爆破法开采堆石坝料时因坝料供应不足而延误工期,被迫修改渡汛方案,另选料场的工程实例屡见不鲜^[1]。

在堆石坝工程中,爆破工作者尝试或为保渡汛高程被迫采用硐室爆破法施工,部分工程获得了成功。不可否认,采用硐室法开采堆石料存在相当的难度,很多施工中的问题有待解决。但从成功的工程实践来看,硐室爆破法采石是一种非常有潜力和经济价值的优选方案。当前的任务就是摸索大爆破采石的规律,采用合理的设计方法,优化爆破参数,降低大爆破采石的大块率以达到合理地控制级配,提高硐室法开采堆石料技术的可靠性,降低开采成本,提高经济效益。

满足堆石坝主堆石料级配要求是硐室法采石方案的一个关键问题,同时是衡量硐室法采石方案可行性及爆破成败的重要指标,因而对硐室爆破法采石方案进行级配预测就成了迫切需要解决的问题。前人在爆破块度分布预测方面做了很多有意义的工作,如Harries模型^[2]、BMM C模型^[3]、KUZ-RAM模型^[4]、别兹马特雷赫模型^[5]、GAMA模型^[6]等。以上模型都是在小孔径药包爆破作用下做出的,同时仅以单个天然块度指标反映原始

* 1996-12-28收到原稿,1997-03-25收到修改稿。

岩体中裂隙分布,不能充分体现原始裂隙对爆破块度的影响作用,因而将以上模型应用到爆破块度预测和工程实践中还有较大的差距。

我们从统计岩石力学及爆炸分形的角度对硇室爆破进行级配分析和预测,并用实际工程加以比较,对硇室爆破级配预测进行有益的尝试。

2 岩体中裂隙分布的统计理论

由于用硇室法开采级配料的实践都是在裂隙比较发育的岩体中进行的,爆破后,堆石料的级配和大块率与原岩的裂隙分布具有很大的相关性^[1]。因此只有在基本了解原岩体中裂隙分布情况的前提下才能较好地把握裂隙岩体的爆破规律,从而达到控制级配和大块率的目的。

无论哪一类岩体都无一例外地经历了形成和改造两类地质作用。形成作用造成了岩体的物质基础和宏观结构与微观结构的非均质性;而改造作用不仅加剧了这种非均匀性,更导致了岩体的非连续性,即在岩体中含有大量方向不同尺度各异的破裂结构面。

2.1 结构面产状的优势集中性

结构面产状是描述结构面在三度空间中方向性的几何要素。大量结构面的不同产状组合就决定了岩体结构的方向性即各向异性特征。

采用产状要素法表述结构面产状,即用结构面上最陡倾斜线的倾斜方向 T 及倾斜角 U 来表示,通常组合为 $T \angle U$ 将所测到的结构面产状用等面积赤平投影法投影到赤平投影网上,可得到如图 1 所示的投影图^[7]。

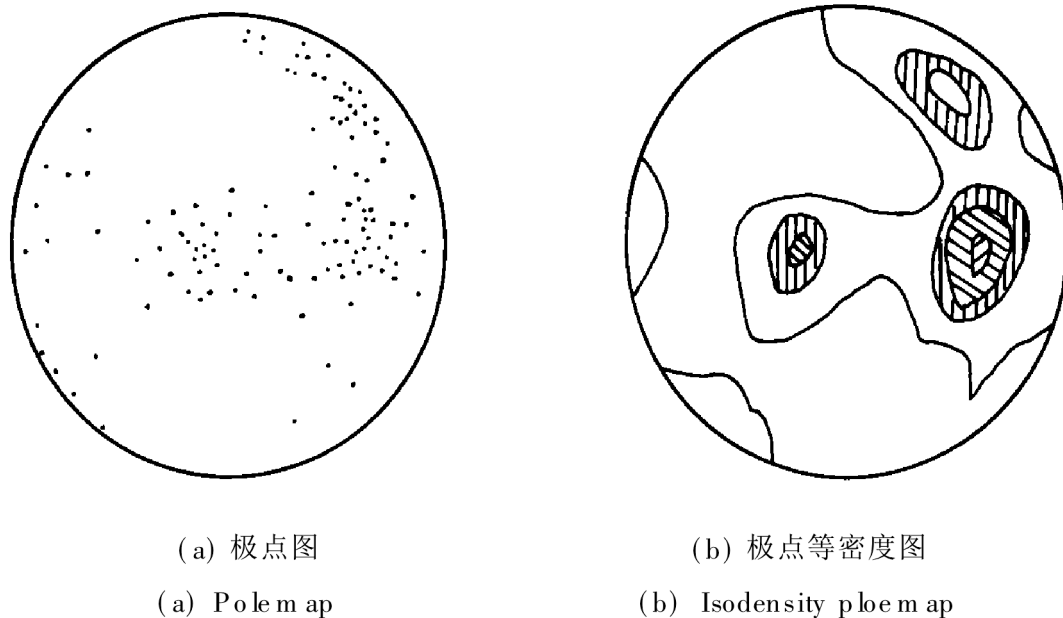


图 1 结构面法线等面积赤平投影图

Fig. 1 Distribution of polar of discontinuities

在岩体露头面上或巷道中布置三条近于正交的测线,测量与测线相交切的结构面一般能保证测到不同产状组的结构面。从结构面极点分布图(图 1)可看出,结构面分布具有若干极点高密度区,即产状具有优势集中性。据此可将结构面划分为若干个产状组,并以各极密中心产状或优势产状表征各组结构面的产状。

2.2 结构面的间距和密度

结构面间距 x 是指同一组结构面在法线方向上两相邻面的距离, 结构面密度为 $\lambda=1/x$ 。大量实测资料已经证实, 结构面间间距的分布形式为负指数分布^[8-9]

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad 0 \leq x < \infty \quad (1)$$

3 爆堆岩块的分形特性研究

分形是指具有自相似的几何对象。所谓自相似性是局部与整体在形态功能和信息等具有统计意义上的自相似性, 适当地放大或缩小分形对象的几何尺寸整个结构不变。用来描述分形的参数就是分维。

爆堆岩块的形状是不规则的, 但经过仔细观察和统计分析, 在这种杂乱的复杂性下面蕴藏着统一性——自相似性。李悦墀等^[10]采用统计方法研究不规则岩体几何相似的程度, 并用最小的包裹六面体作为测量的统一标准测定了三种矿岩(赤铁矿、混合岩、千枚岩)爆堆块体的几何形状。实测数据表明, 相同类型的爆破岩块, 其几何形状是基本相似的。

致使自然界中的物质产生破碎有很多方式, 如风化、爆破、撞击等。各种物体强度不同, 并且还会因位错、微观损伤、宏观损伤而降低强度。研究表明很多破碎结果具有幂指数分布^[11]

$$N(m) = Cm^{-b}$$

式中: $N(m)$ 为质量大于 m 的碎块数量。又由于 $m \propto r^3$, r 为岩块的特征边长, 所以

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (2)$$

图2中一个典型的例子是 Bennet^[11]所做的工作。数据是从6个煤矿矿井13个工作面直接采集所平均得到的数据, 离散度较小, 表明这种分布和式(2)非常吻合, 分维 $D =$

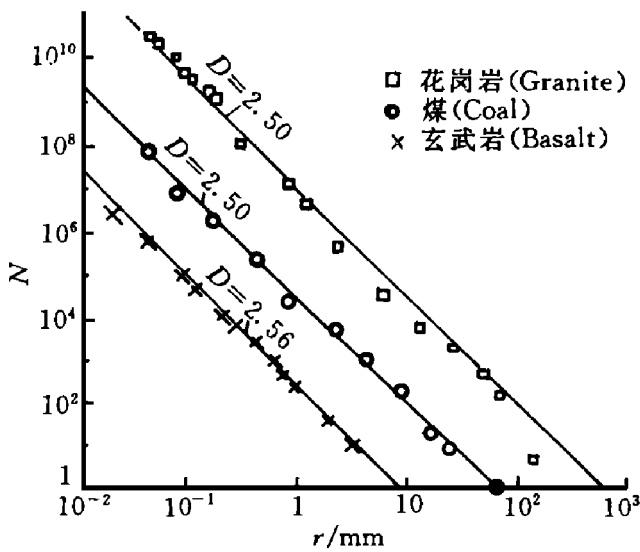


图2 破碎分形分布

Fig. 2 Fractal distribution of the fragment

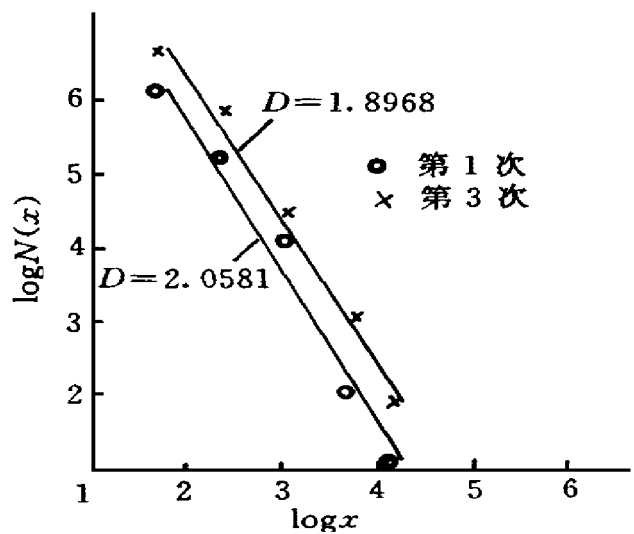


图3 爆破分形分布

Fig. 3 Fractal distribution of the fragment by blasting

2 50 岩堆爆破通常也满足 $N-r$ 的负指数分布, Schontens^[12]总结了在花岗岩中 61kt 级地下核爆炸距爆源 457m 处砖块 (Chimney rubble) 的 $N-r$ 分布, 分维 $D=2.50$ Fujisara^[13]用聚碳酸酯弹头以 2.6km/s 的速度冲击玄武岩表面, 分维 $D=2.56$

东北大学在桦子峪镁矿采用抽样法分别统计三次爆破后的碎块数和特征尺寸 (最大尺寸) 间的关系, 分维分别为 2.0581, 1.5936, 1.8968 (图 3)^[14]。

4 裂隙岩体爆破级配预测

裂隙岩体爆破级配预测的基本思路为: 假设 $P_1(x < X)$ 为原始岩体中特征尺寸为 X 的岩块筛下累积率; 原岩中大于特征尺寸 X 的岩块, 在爆炸能量作用下破碎成尺寸不一的小块, 原岩中特征尺寸为 Y_i 的岩块 ($Y_i > X$) 被分解成小于 X 的概率为 $P_2(x < X | Y_i > X)$; 则在爆炸能量作用下, 爆堆岩块的筛下累积率 $P(X)$ 为前两项的和, 即

$$P(X) = P_1(x < X) + \sum_{i=1}^n P_2(x < X | Y_i > X)$$

4.1 原岩筛下累积率

由于结构面的分布形式为负指数分布, 分布函数为 $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$, 爆破前原始岩体已被各种节理面切割成具有负指数分布特征的天然岩块, 爆破过程中岩体沿节理面破碎, 岩石在爆炸能量作用下破裂。对爆破块度分布的统计分析表明: 爆前天然岩块较粗的, 爆后仍然较粗; 爆后的最大块度和天然块度分布的最大块度相差不大^[14]。由于爆后岩块具有自相似性, 可以认为在爆炸作用下被特征结构面 X 控制的岩体不会产生大于 X 的岩块, 因而原始岩体中任一尺寸 X 的筛下累积率为

$$P_1(x < X) = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} dx = 1 - (1 + \lambda x) e^{-\lambda x}$$

4.2 大块破碎概率

爆破破碎具有幂指数分布即分形分布, 破碎特征方程为 $N = Cr^{-D}$ 。

设被特征结构面间距 y 控制的岩块破碎后, 最大碎块的特征尺寸为 X_{max} , 则特征边长在区间 $[r, r+dr]$ 的体积为

$$[N(r) - N(r+dr)]r^3 = -\frac{DN(r)}{r} r^3 dr$$

因而, 小于尺寸 x 的碎块体积为

$$\int_0^x -\frac{DN}{r} r^3 dr$$

岩体的体积为

$$\int_0^{X_{max}} -\frac{DN}{r} r^3 dr$$

所以, 岩块在爆炸能量作用下, 特征尺寸 x 的筛下累积率为

$$\frac{\int_0^x -\frac{DN}{r} r^3 dr}{\int_0^{X_{max}} -\frac{DN}{r} r^3 dr} = \left(\frac{x}{X_{max}}\right)^{3-D}$$

4 3 裂隙岩体爆破筛下累积率

岩体爆破后的最大块度和天然块度分布的最大块度相差不大^[14]。不妨假设被特征结构面尺寸控制的岩块在爆炸能量作用下产生的最大块尺寸 X_{max} 和结构面间距尺寸相等, 即 $X_{max} = Y$ 。则对于原始岩体中某一特征结构面间距 Y , 在爆炸作用下产生小于 x 的体积含量为

$$- y \frac{Lf(y)}{Ly} \left(\frac{x}{y}\right)^{3-D}$$

设在原始岩体中, 在抵抗线 W 作用范围内, 最大结构面间距为 s_{max} , 则对于特征间距在区间 $[x, s_{max}]$ 中的岩体, 在爆炸作用下产生边长小于 x 的岩块体积含量为

$$P_2(x < X | Y > X) = \int_x^{s_{max}} - y \frac{Lf(y)}{Ly} \left(\frac{x}{y}\right)^{3-D} dy$$

因而, 裂隙岩体在爆炸作用下, 筛下累积率为

$$P(X) = P_1(x < X) + P_2(x < X | Y > X) = 1 - (1 + \lambda x) e^{-\lambda x} + x^{3-D} \int_x^{s_{max}} \lambda^2 y^{D-2} e^{-\lambda y} dy = h(x, \lambda, D)$$

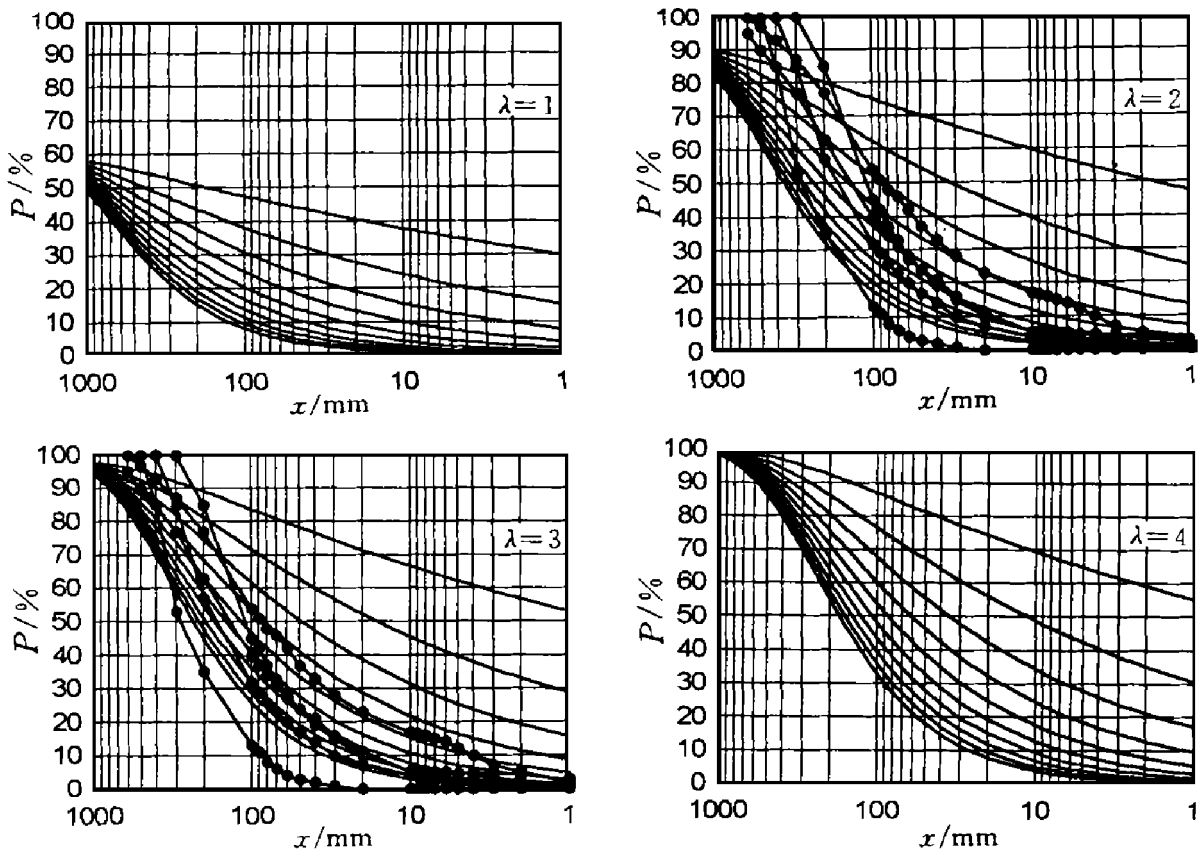


图 4 计算结果

Fig 4 Results of calculation

由于上式第三项不可积, 只能用计算机进行数值模拟, 结果如图 4 其中取 $s_{max} = 2m, \lambda = 1, 2, 3, 4, D = 2.0, 2.1, \dots, 2.9$ 曲线越高, 它所对应的 D 越大, 表明破碎效果越好。其中五条带点的曲线为实测大爆破级配曲线, $\lambda = 2.3, D = 2.2 \sim 2.6$ 由于本次级配试验系小

型随机抽样,由图可看出,五条试验曲线中60cm筛孔筛下累积率为100%,这和现场有较大差异。本次级配爆破大块率(>80cm)控制在10%左右,因而60cm筛下累积率应为80%以上,该数据和理论预测曲线吻合。由理论预测曲线可看出,爆后级配和原岩裂隙分布及技术设计综合指标 $D(W, q, T, \dots)$ 相关性大。

5 结 论

(1)无论哪一类岩体都存在大量裂隙,只有对岩体建立定量模型并引入到爆炸过程中才能正确反映爆破规律。

(2)从级配理论预测结果可看出,在合适的地质条件下,采用合理的设计方法优化爆破参数可以控制级配并达到堆石坝主堆石料级配要求,因而采用硇室爆破法开采级配料是一项非常可行并具有相当经济价值的施工方案。

(3)爆堆岩块具有自相似的分形特征,但分维是一项综合指标,它和地形地质条件、岩石类型、单耗、药室布置型式、抵抗线、起爆方式等因素相关。分维与上述因素的定量关系有待进一步研究。

(4)模拟结果表明:采用统计岩体力学和爆炸分形相结合对硇室爆破级配进行预测是一种可行的研究方法,理论预测曲线和工程实际吻合较好。

参 考 文 献

- 1 傅志安,凤家骥. 混凝土面板堆石坝. 武汉:华中理工大学出版社,1993
- 2 Harries G. A Mathematical Model of Cratering and Blasting. In: Natl Symp Rock Fragmentation. Adelaide: Geomech Soc, 1973. 41~54
- 3 邹定祥. 计算露天矿台阶爆破块度分布的三维数学模型. 爆炸与冲击, 1984, 4(3): 48~59
- 4 Cunningham. 预估爆破块度的 KUZ-RAM 模型. 见: 第一届爆破破岩国际会议论文集(译文集). 长沙:中国长沙岩石力学工程技术咨询公司, 1985. 251
- 5 邹定祥. 矿岩爆破块度分布规律及其在爆破工程中的应用. 爆破, 1985, (2): 35~41
- 6 Gamma D. 应用破碎理论预测裂隙发育岩石在爆破作用下的破碎. 见: 第一届爆破破岩国际会议论文集(译文集). 长沙:中国长沙岩石力学工程技术咨询公司, 1985. 306
- 7 伍法权. 统计岩体力学原理. 武汉:中国地质大学出版社, 1993
- 8 Priest S D, Hudson J A. Discontinuity Spacings in Rock. Rock Mechanics and Engineering, 1976. 13~135
- 9 Hudson J A, Priest S D. Discontinuities and Rock Mass Geometry. Rock Mechanics and Engineering, 1979. 16~339
- 10 李悦墀,范忠. 用垂直摄影法测定爆堆块度分布. 中国有色金属学报, 1992, 2(4): 6
- 11 Turcotte. Fractals and Fragmentation. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2): 1921
- 12 Schoutens J E. Empirical Analysis of Nuclear and High-explosive Cratering and Ejecta. Nuclear Geoplosics Sourcebook, Part 2. Section 4. 1979. 55
- 13 Fujiwara A, Kamimoto G, Tsukamoto A. Destruction of Basaltic Bodies by High-velocity Impact. Icarus, 1977, 31: 277
- 14 张继春. 节理岩体爆破的块度研究: [博士学位论文]. 沈阳:东北大学, 1992

PREDICTION OF ROCK FRAGMENT DISTRIBUTION FOR CHAMBER BLASTING

Ding Xiping^a, Feng Shuyu^a, Wei Banyun^b

(a *China Academy of Railway Science, Beijing, 100081*)

(b *China University of Geosciences, Wuhan, 430074*)

ABSTRACT The fragment size distribution is the main problem of production of materials for rock fill dam by means of chamber blasting. In this paper, the author refers to the statistical distribution of cracks in rock body, and analyzes its fractal characteristics of the fragments. The prediction of fragment distribution for chamber blasting is deduced in this paper. The result is in agreement with that of the practice.

KEY WORDS chamber blasting, rock fill dam, fractal, fragment distribution