工程爆破药量计算的基本公式

铁道部科学研究院　金骥良

利用炸药爆炸产生的巨大能量对周围固体介质做功，这个过程是十分复杂的。它涉及到炸药爆炸的高温、高压、高速的反应过程和固体介质力学破坏的机理。由于目前对于高速（微秒级）、高压（几十万个大气压）的测试手段尚未完备，加上固体介质（土壤、岩石等）结构、状态的复杂性，迄今为止，在理论上对于"爆破"这一现象还未能做出圆满的解说，在定量计算上也就没有一个完全成熟的公式。

根据爆破工程的实践，人们总结了不少经验公式。这些公式都是针对不同的工程目的，采用不同的施工方法，由局部的经验积累归纳而得到的。如峒室大爆破，常采用抛掷爆破公式

$$Q=Kf(n)W^3 \tag{1}$$

深孔爆破的药量计算公式

$$Q=qaW_{底}H \tag{2}$$

一般城市控制爆破的经验公式有

$$Q=KaWH \tag{3}$$

和

$$Q=K_1K_2WH \tag{4}$$

式中　K，K_1，K_2为系数；w为药包埋深；$f(n)$为爆炸作用指数函数；q为单位体积炸药消耗量；a为孔间距；H为爆除高度。

综合上述公式，可分两类：一类是药量随爆破破碎介质的体积V变化，即$Q\propto \cdot V$，或$Q\propto w^3$，公式(1)～(3)即属于此类。另一类是药量随爆破介质破裂面积S而变化，即$Q\propto S$，或$Q\propto w^2$，例如公式(4)。

兰格福尔斯（*Langefors*）一九七八年在《岩石爆破现代技术》一书中，提出一个药量计算公式

$$Q=K_2w^2+K_3w^3+K_4w^4 \tag{5}$$

这个公式中，第一项是与面积$S(w^2)$有关，第二项是与体积$V(w^3)$有关，第三项则与抵抗线w的四次方有关。

下面对这个公式做一仔细的分析和讨论。

一、公式的推导及其物理意义

现在考察炸药包在一半无限均匀岩体中的爆炸现象。假定炸药包药量Q。埋于离自由面一定深度w（小于临界深度）处，其爆炸后在介质中产生一个底面半径为r的倒圆锥形爆破漏斗。

这个物理现象涉及到炸药和岩体两种介质及其在重力场中的相互作用。用次下主要物理量予以描述。

对于炸药，选择Q—药量，U_0—比能，ρ_0—密度，三个物理量。

对于爆破岩体介质，用物理量：ρ—密度，C—纵波速度，σ—抗拉强度，K_s—表示岩体韧性的强度因子（即岩体开裂所需表面功），r—爆破漏斗底面半径，w—药包埋深，来描述其破坏状态和特征。

对于重力场的作用用重力加速度g表示。

以上共有10个独立的物理量，下面用量纲方法来推导这些物理量之间的关系。由量纲分析的π定理可知，十个独立量纲参数可组合得到七个独立的无量纲参数，它们为$\frac{Q}{\rho_0 w^3}$，$\frac{Ku}{\rho w U_0}$，$\left(\frac{\sigma}{\rho C}\right)^2 \Big/ U_0$，$\frac{gw}{U_0}$，$\frac{r}{w}$，$\frac{C}{\sqrt{U_0}}$，$\frac{\rho_0}{\rho}$。若选定$\frac{Q}{\rho_0 w^3}$为因变量，其余为自变量，则其函数关系可表示为

$$\frac{Q}{\rho_0 w^3}=F\left(\frac{KU}{\rho w U_0},\ \frac{\sigma^2}{(\rho c)^2 U_0},\ \frac{gw}{U_0},\ n,\ \frac{C}{\sqrt{U_0}},\ \frac{\rho_0}{\rho}\right) \qquad (6)$$

式中：$n=\frac{r}{w}$—爆炸作用指数。

分析式中各无量纲参数，可以看出其物理意义如下：

第一个参数$\left(\frac{KU}{\rho w}\right) \Big/ U_0$，它表示单位质量岩体形成破裂面所需的能量与炸药比能之比。

第二个参数$\left(\frac{\sigma}{\rho C}\right)^2 \Big/ U_0$，它代表单位质量岩体变形所需能量与炸药比能之比。

第三个参数gw/U_0，它表示单位质量岩体克服重力势能所做功与炸药比能之比。

爆炸作用指数n是反映爆破漏斗形状变化的，其他参数$\frac{e}{\sqrt{U_0}}$，$\frac{\rho_0}{\rho}$则表示炸药与岩体两种介质匹配作用的相互关系。

若令

$$K_2=\frac{Ku\rho_0}{\rho U_0}, \quad K_3=f_1\left[\left(\frac{\sigma}{\rho c}\right)^2 \frac{\rho_0}{U_0}, \frac{\rho_0}{\rho}, \frac{C}{\sqrt{U_0}}, n\right]=Kf(n)$$

$$K_4=\frac{g\rho_0}{U_0}$$

并对变量做一变换，公式（6）即可化为

$$Q=F_2[K_2 w^2,\ K_3 w^3,\ K_4 w^4] \qquad (7)$$

根据能量迭加原理，用w的幂次项线性组合成多项式来近似，则可得到兰格福尔斯公式：

$$Q=K_2 w^2+K_3 w^3+K_4 w^4$$

式中第一项表示岩体介质形成破裂面所需的表面能，系数K_2与岩体性质、炸药性质有关，在炸药和岩体不变情况下，K_2应为常数。

第二项表示岩体介质变形所需的能量，系数K_3不仅与炸药、岩体性质有关，而且还是爆炸作用指数n的函数。

第三项代表岩体介质克服重力势能作用所需做的功，在炸药、岩体不变条件下系数K_4应为常数。

二、公式的分析与讨论

兰格福尔斯根据瑞典一般基岩爆破的实践经验，给出了在台阶松动爆破条件下的具体系数，其公式为

$$Q=0.07w^{2}+0.35w^{3}+0.004w^{4} \quad (8)$$

为便于分析讨论，将（8）式化为

$$Q/w^{3}=0.07/w+0.35+0.004w \quad (9)$$

对于$w=0.3$米～20米的情况下进行计算，所得各项列于表1。

公 式 各 项 比 较 分 析 表1

抵抗线 W（米）	第一项 $q_1=\frac{0.07}{w}$		第二项$q_2=0.35$		第三项$q_3=0.04w$		总单耗 $q=\frac{Q}{w^3}$（公斤/米³）
	q_1（公斤/米³）	q_1/q%	q_2（公斤/米³）	q_2/q%	q_3（公斤/米³）	q_3/q%	
0.3	0.233	39.9	0.350	59.9	0.0012	0.2	0.584
0.5	0.140	28.5	0.350	71.1	0.002	0.4	0.492
0.8	0.088	19.9	0.350	79.4	0.003	0.7	0.441
1.0	0.070	16.5	0.350	82.5	0.004	1.0	0.424
1.5	0.047	11.6	0.350	86.9	0.006	1.5	0.403
1.8	0.039	9.8	0.350	88.4	0.007	1.8	0.396
2.0	0.035	8.9	0.350	89.1	0.008	2.0	0.393
3.0	0.023	6.0	0.350	90.9	0.012	3.1	0.385
4.0	0.018	4.7	0.350	91.1	0.016	4.2	0.384
5.0	0.014	3.6	0.350	91.1	0.020	5.3	0.384
8.0	0.009	2.3	0.350	89.5	0.032	8.2	0.391
10.0	0.007	1.8	0.350	88.2	0.040	10.0	0.397
12.0	0.006	1.4	0.350	86.7	0.048	11.9	0.404
15.0	0.005	1.2	0.350	84.3	0.060	14.5	0.415
20.0	0.004	0.8	0.350	78.9	0.090	20.3	0.444

由计算可见，在$w\geqslant1.8$米时，第一项与总能量之比在10%以下；当$w\leqslant10$米时，第三项与总能量之比不超过10%，因此若按工程爆破允许的误差值±10%而言，当抵抗线满足$1.8\leqslant w\leqslant10$（米）的条件，可以将公式（5）的第一项与第三项忽略不计，则对于松动爆破可简化为

$$Q=qw^{3} \quad (10)$$

式中q为松动爆破单位体积用药量。

进一步分析，若按第一项和第三项之和与总能量之比不超过10%为条件，则公式（10）只有在$2\leqslant w\leqslant8$（米）的条件下才能应用。

再看在$w>10$米的情况下，对于一般岩石的松动爆破，公式（5）第三项由于变重力作用将随着抵抗线的增大而增大，因此公式（5）可化为

$$Q=K_{3}w^{3}+K_{4}w^{4} \quad (11)$$

在$w<1.8$米的条件下，第一项表面能的比重随着抵抗线w的减少而越来越大，因而公

式（5）可变为

$$Q=K_2w^2+K_3w^3 \tag{12}$$

对于岩体的抛掷爆破，从有关资料可知，当单位体积炸药消耗量$Q/V \geqslant 0.6$公斤/米^{3}时，才能出现抛掷运动。由此，同样可以计算得到，在$1\leqslant w\leqslant 15$（米）条件下，公式（5）的第一项和第三项可以勿略不计，这时即得到一般抛掷爆破经验公式$Q=K_3w^3=Kf(n)w^3$。

再对公式（5）做进一步分析，公式（5）化为

$$q=\frac{Q}{w^3}=\frac{K_2}{w}+K_3+K_4w \tag{13}$$

对公式（13）求w的一次导数，即令$\frac{dq}{dw}=0$

可得到

$$w_j=\sqrt{\frac{K_2}{K_4}} \tag{14}$$

在此深度时可得到最小的单位炸药消耗量

$$q_{min}=K_3+2\sqrt{K_2K_4} \tag{15}$$

例如$K_2=0.07K_3=0.35K_4=0.004$代入（14）和（15）式，可求得$w_j=4.18$米，$q_{min}=0.383$公斤/米^3。

这个结果与利文斯登爆破漏斗理论指出的："存在着一个最佳深度w_j，在此深度时可得到最大的爆破漏斗体积"。的结论是一致的。

三、公式的启示和推析

由以上推导分析可以看出兰格福尔斯公式不仅有它的物理意义，而且有它的普遍性。

现在进一步对其在$w\geqslant 15$米和$w\leqslant 1$米条件下的特殊情况做一推析。

（1）大抵抗线（$w\geqslant 15$米）条件下药量计算

当$w\geqslant 15$米时，可简化为公式（11），将（11）式化为$Q=(K_4+K_4w)\ w^3$

又由$K_3=Kf(n)$，因此$(K_3+K_4w)=K\cdot F_3\ (n,\ w)$

则式（11）化为

$$Q=F_3(n,\ w)\cdot Kw^3$$

根据爆破经验用分离变量方法，，令函数$F_3(n,\ w)=F'(w)\cdot f(n)$

则有

$$Q=F'(w)f(n)\cdot Kw^3 \tag{16}$$

式中$F'(w)$是大抵线条件下的修正函数。对于修正函数$F'(w)$的具体形式，可以由试验来探求。苏联学者，总结了定向大爆破的大量资料，提出了一些公式。例如颇克罗夫斯基公式，

其修正项为

$$F(w)=\sqrt{\frac{w}{15}}$$

药量计算公式为

$$Q=(0.4+0.6n^3)Kw^3\sqrt{\frac{w}{15}} \tag{17}$$

最近，他们又根据阿尔玛—阿金大型定向爆破筑坝和巴依巴金水利枢纽抛石坝的定向爆破经验，提出了一个新的公式，其修正项$F'(w)=e^{0.009w}$，药量计算公式为

$$Q=(0.33+0.67n^3)e^{0.009w}Kw^3 \tag{18}$$

因此，对于大抵抗线情况下，可在原有抛掷爆破经验公式基础上做一修正，其修正项应是抵抗线w的增函数。

（2）小抵抗线（$w\leqslant 1$米）条件下的药量计算。

在$w\leqslant 1$米时，公式（12）可以化为

$$Q=\left(\frac{K_2}{w}+K_3\right)w^3$$

令$\left(\frac{K_2}{w}+K_3\right)=f\left(\frac{K_0}{w}\right)$则得$Q=f\left(\frac{K_0}{w}\right)w^3$ （19）

以此式与控制爆破体积公式（3）比较可见，它们都是以考虑体积变形能量为主的，且对比可得知公式（3）中的关系K，除了与炸药、岩体性质有关以外，还应该是变量$\frac{1}{w}$的函数，$K=f_1\left(\frac{1}{w}\right)$，即当抵抗线$w$越小时，$K$值应越大。这一点与实际经验所得的数据是完全一致的。如下表2为浆砌砖墙的单位用药量系数K和单耗q，随着抵抗线的减小而增大。

浆砌砖墙用药量宇数K值表 表2

墙厚 B（厘米）	37	50	63	75
抵抗线W（厘米）	17.5	25	31.5	37.5
K（克/米^3）	1200～1400	950～1100	700～800	500～600
q（克/米^3）	850～1000	700～800	500～600	330～430

注：在一个临空面条件下，用2$^{\#}$岩石硝铵炸药。

同理，公式（12）可表示为 $Q=(K_2+K_3w)\ w^2$若令$(K_2+K_3w)=K_2g(w)$则有$Q=g(w)K_2w^2$ (20) （20）

此式与控制爆破的药量计算面积公式（4）相比较可知，它们都是以介质破裂所需的表面能量为依据的。对比可得，$K_1=g(w)$，即系数K_1应是抵抗线w的增函数。这一点同样已为实践经验所证明。下表3是在混凝土中用2$^{\#}$岩石硝铵炸药爆破时，在密集系数$m=\frac{a}{w}=1.0\sim1.2$时，系数K_1随抵抗线w增加的变化情况。

$Q=K_1K_2WH$公式中系数K_1随W变化 表3

抵抗线W（米）	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
系数K_1	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8

上述分析可知，现有的控制爆破药量计算公式（3）和（4），都有其一定的偏面性，为了弥补这种不足，都对用药量系数K值按其变抵抗线w的影响做了适当地修正。应该说，公式（12）$Q=K_2w^2+K_3w^3$在计算小抵抗线条件（$W<1$米）下的药量是比较全面的。但是由于K_2和K_3的值涉及到不同介质中爆炸能量的分配，而且目前积累的资料也还不多，因此在具体运用上尚有一定的困难。

综上所述，若将兰氏公式进一步扩展，可得到一个更为普遍的公式

$$Q=f(n)\cdot(K_1w^2+K_2w^3+K_3w^4) \quad (21)$$

对于一般松动爆破，令$f(n)=1$即得兰氏公式。尽管公式(23)中的系数K_1、K_2、K_3尚未能取得足够丰富的资料，但是可以预料，随着爆炸力学理论研究的深入和现代爆破技术的发展，这个问题是不难得到解决的。

于一九八四年八月

参 考 文 献

1. U. 兰格福尔斯：“岩石爆破现代技术”

冶金工业出版社 1983.12

2. 杨人光：“工程爆破中的能量准则”

中科院力学所资料 1983.4

3. Josef.Henrych，“Tha Dynamics of Explosion and Its Use” Prague，1979

中国专利局开始受理专利申请

中国专利局已开始接受专利申请，申请者均获得印有中华人民共和国主席令的、烫金的“首日申请纪念卡”。

中国专利局黄坤益局长介绍了专利法实施前的准备工作和对专利申请趋势的估计。中国专利局在一年多的时间里，草拟了《专利法实施细则》，并制定了内部工作规程，共十五页，颁发了八次公告，我国专利法被译成英、日、德、法、匈、西班牙等多种文字，在国外进行了宣传；专利审查队伍的建设成绩也是显著的。目前，已有三百多名审查人员，他们当中的不少人曾被送到国外进行过培训。在中国专利局的指导下，各地区还培训了专利工作人员一万四千多名，其中专利代理人有四千名，他们大部分已陆续进入工作岗位受理专利申请。

黄坤益局长还说，专利法的实施要依靠全国的专利体系。实施前的准备工作得到了全国各地的大力支持。目前，各地已建立专利管理局或专利管理处五十个；各省会中级人民法院的经济庭都设立了专利审判员，专利法实施后，即可受理专利纠纷案件。

黄局长估计，各方面迹象表明，申请专利的趋势是踊跃的，近日内，我国的申请将达数千件，国外的申请会有一千一百多件。

航天工业部已派人前去排队，二〇七所争得申请专利第一号。继他们之后，已有千百人来这里提出申请。黄局长说：“专利局的任务是繁重的，面向千军万马，背靠花果山，送到这里来的新技术，都是花果山上的财宝。我们将严肃认真地依法对待提出的每项专利申请。