

井下空气冲击波

JINGXIA KONGQI CHONGJIBO

TD235.1

井下空气冲击波

C. K. 萨文科
A. A. 古林 著
П. С. 马雷

龙维祺 于亚伦 译

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书系根据苏联“矿藏”出版社1973年出版的《Ударные воздушные волны в подземных выработках》一书翻译的。

本书是作者对井下大爆破时空气冲击波的形成机理、传播规律、它的破坏作用和降低空气冲击波强度的研究成果。书中扼要地介绍了空气冲击波形成的机理和参数计算的有关基础理论；研究了柱状药包爆炸作用机理的物理基础的理论前提和降低空气冲击波的强度、合理利用爆炸能量的途径；阐述了用人工阻波墙削弱和消除空气冲击波的措施和井下构筑物抗空气冲击波作用的计算方法，以及确定空气冲击波对人作用的危险范围的最简便方法。

本书可供从事矿山设计、生产和科研的技术人员、工程师、科研人员、高等中等院校采矿专业师生参考。

井 下 空 气 冲 击 波

C.K.萨文科 A.A.古林 П.С.马雷 著

龙维祺 于亚伦 译

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 5 1/2 字数 142 千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷

印数00,001~2,300 册

统一书号：15062·3496 定价 0.72 元

目 录

第一章 空气冲击波概论.....	1
§ 1 说明空气冲击波特性的基本参数.....	1
§ 2 空气冲击波从障碍物的反射.....	10
§ 3 空气冲击波对人和建筑物的作用.....	11
§ 4 矿床回采时的爆破工作和影响空气冲击波参数的因素.....	13
§ 5 研究爆破时的空气冲击波的发展简史.....	14
第二章 爆破时空气冲击波的形成机理和它的初始参数.....	18
§ 6 柱状药包中爆炸气体生成物所作的功.....	18
§ 7 药包结构对爆炸能量分配的影响.....	27
§ 8 柱状药包爆破时空气冲击波的初始参数.....	47
§ 9 柱状药包爆破时空气冲击波的形成过程.....	51
第三章 井下爆破时对空气冲击波初始能量的试验研究	62
§ 10 测量空气冲击波参数所使用的仪器.....	62
§ 11 裸露药包爆破.....	68
§ 12 覆土药包爆破.....	71
§ 13 深孔(炮眼)药包爆破.....	73
§ 14 硐室药包爆破.....	88
§ 15 试验研究空气冲击波初始能量的结论.....	89
第四章 矿房顶柱冒落时的气浪.....	92
§ 16 气浪的概述.....	92
§ 17 岩石冒落的气体动力学.....	92
§ 18 防护垫层参数的确定.....	95
第五章 空气冲击波沿井下巷道的传播.....	98
§ 19 空气冲击波沿断面不变的直巷道运动时的衰减.....	98
§ 20 空气冲击波通过巷道分岔和转弯处的衰减	100
§ 21 巷道断面缩小和扩大对空气冲击波压力的影响	103
§ 22 药包爆破时对空气冲击波危险范围的确定	114
§ 23 沿井下巷道传播的空气冲击波的冲量	117
§ 24 空气冲击波沿巷道传播时波的作用时间和波长	120

第六章 预防形成强烈的空气冲击波	122
§ 25 概述	122
§ 26 防爆阻波墙	122
§ 27 某些阻波墙削弱空气冲击波的效果	135
§ 28 空气冲击波互相碰撞时波的削弱	138
§ 29 毫秒延期爆破对空气冲击波参数的影响	142
§ 30 大爆破时减弱空气冲击波的实例	145
第七章 构筑物抗空气冲击波作用的计算	149
§ 31 构筑物抗空气冲击波作用的基本计算方法	149
§ 32 障碍物抗随时间而变化的空气冲击波作用的计算	149
§ 33 金属防护门抗空气冲击波作用的计算	160
§ 34 障碍物抗空气冲击波冲量的计算	162
§ 35 确定结构强度的简便方法	163
结论	164
参考文献	167

第一章 空气冲击波概论

§ 1 说明空气冲击波特性的基本参数

当炸药爆炸时从爆炸中心传出的爆炸生成气体并不取决于炸药的数量。裸露药包在大气中爆炸时空气的阻力把爆炸生成物的抛散距离局限在8~15倍药包半径范围内。其实爆炸破坏作用波及的距离远比空气冲击波所能达到的大。

A.C.康帕涅耶茨对空气冲击波的形成机理作了最恰当的 解释^[37]。当活塞在无限长的管中（图 1）以大大低于声速的速度运动时，受压缩气体的前端面在未受压缩的空气中以声速向前运动。当活塞运动逐渐加速时，在端面的前面便会形成压缩波，在压缩波中的空气受到加热并且向右运动。因为在加热的气体中声音传播的速度较大，并且它还与空气流的速度叠加，这样由压缩波引起的扰动就将到达前端面。假定说压力不大的“突出” α 叠加在压缩波波形图上（图

2）。那末这种“突出”甚至在相对于产生它的那部分气体的地方也不可能保留下来，而是像气体每次扰动一样，将以当地的声速移动。

但是任何线段，例如线段

6，都可以作为以虚线表示的弦上的小“突出”来考虑。因此在波形图上大压力可能与小压力同时出现。如果发生这种情况，那末波形图（参阅图 2）就变成在一个点上的气体的压力具有二个值的波形图。类似这样的现象是不可能的，于是在气体中就产生压缩的飞跃（图 3），这种压缩的飞跃就叫做空气冲击波。在气体动力学中根据数学方程对压缩波形成断裂式飞跃的必然性已经作

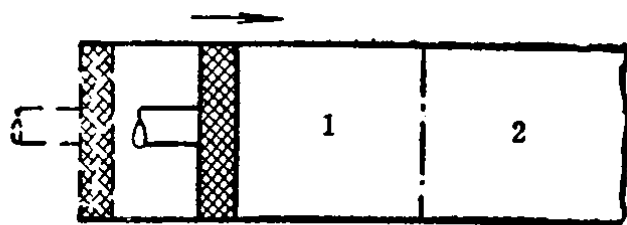


图 1 在无限长的管中运动的活塞

1—压缩波；2—未受扰动的空气

过结论。由于对峰值超过低压范围的压缩波的研究结果，曾经作出了空气冲击波的理论基础。

在上世纪末创立的空气冲击波理论^[28]，一直到现在仍没有失去它的意义。理论上认为，冲击波是具有温度、密度和压力急剧飞跃的气体压缩区，并且以超过声速的速度在未受扰动的空气中传播。

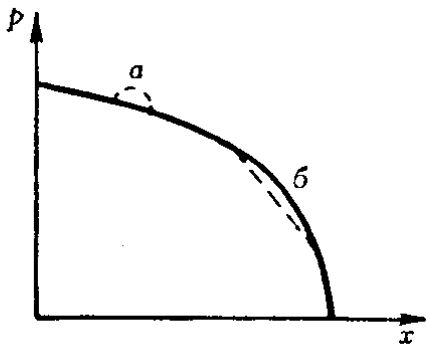


图 2 亚声速运动时活塞前面的压缩波

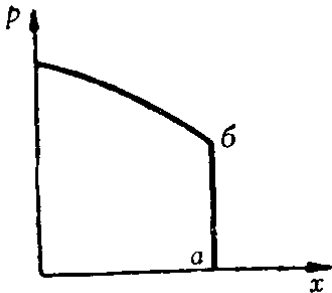


图 3 断裂的形成

跟随活塞运动（参阅图 1）的空气：最初是附在活塞上的薄层，然后是邻接的各层。在运动 and 没有运动的空气之间的界面以声速在气体中向左迅速运动。这个界面左侧的空气尚未运动，而右侧的空气紧跟活塞流动。在界面与活塞之间产生压力下降区。如果在此区中发生任何扰动的话，那末扰动的信号永远也达不到界面，这是因为在密度减小了的气体中的声速下降了，除此以外，声音的信号被紧跟活塞运动的空气送向右边。此空气的扰动区叫做稀疏波。在稀疏波中的温度、密度和压力低于未受扰动的气体的相应参数，而它的运动速度总是低于静大气中的声速。

Ю.А.尤尔马诺夫利用СФР-1高速摄影机和ИАБ-451暗室设备相配合摄下了常用炸药爆炸时空气冲击波形成的过程（图 4）。

当药包在无限的空气介质中爆炸时，在有限的空间中迅速释放出大量的能量，这就导致爆炸气体生成物的压力和温度局部上升。

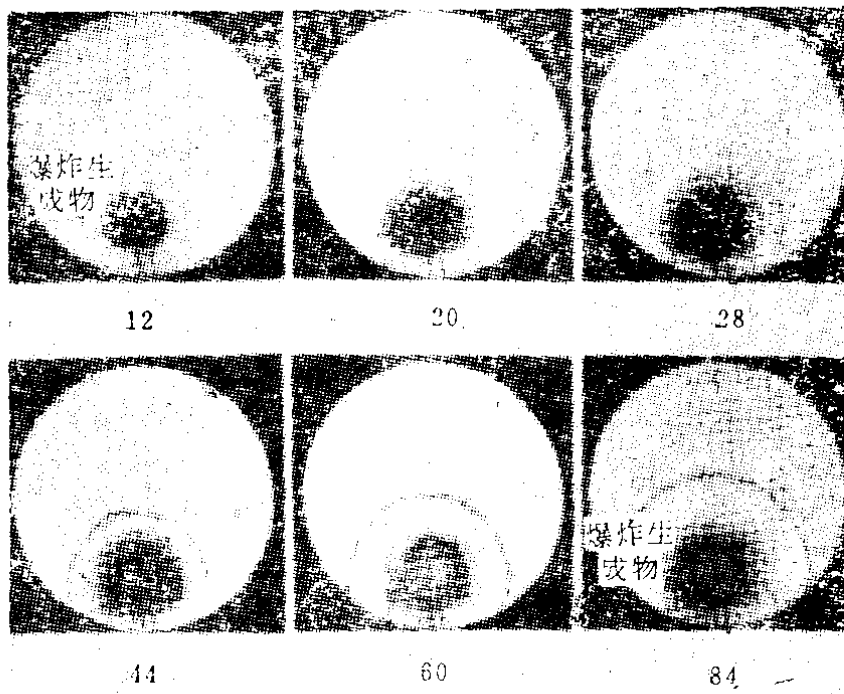


图 4 在无限空气中裸露药包爆炸时空气冲击波的形成
(时间从爆炸开始起算, 数字表示微秒)

爆炸气体完成活塞作用的同时急剧冲击压缩与药包毗邻的空气。冲击压缩的结果便产生了空气冲击波, 在它形成的初始阶段它以爆炸气体生成物一样的速度运动。在此瞬间爆炸气体生成物的抛散速度接近于炸药的爆轰速度^[39]。爆炸气体生成物的高速抛散决定了它与空气冲击波的协同运动。

尔后爆炸气体生成物逐渐膨胀并且席卷了全部增大了的空气质量, 因而爆炸气体生成物的抛散速度随着它的膨胀程度而下降并且产生空气冲击波的断离。具有高速的空气冲击波借助从爆炸气体生成物中所获得的动能继续往前传播。在裸露药包爆炸的条件下空气冲击波的断离是发生在距爆炸中心8~15倍药包半径的距离上。

空气冲击波与爆炸气体生成物断离后在爆炸气体生成物与波阵面之间形成压力下降区, 在压力下降区中压力逐渐下降到大气压和低于大气压(稀疏区)。从长度达6~10倍药包半径的稀疏区, 稀疏波从波阵面移向扰动中心。在波中由于压缩的不可逆性会发生能量的弥散, 机械能转变为热能, 导致波强下降。空气冲击波

波强的下降也是在波的传播过程中由于被波卷入的空气质量的增加的结果。空气冲击波逐渐衰减，最终转变为声波。空气冲击波的

波阵面位于波的前端（图5），波阵面的厚度不超过两倍分子的自由行程，并等于 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 厘米。空气流以小一些的速度跟在波阵面的后面运动，气流中的压力随着离开波阵面的距离而逐渐下降到大气压，更远则转变为稀疏波。

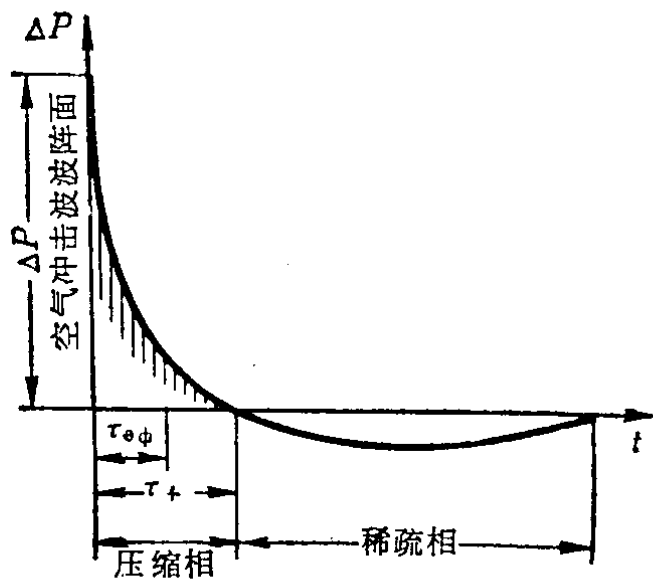


图5 在空气冲击波波阵后面的压力变化

说明空气冲击波特性的基本参数是：波阵面上的压力 ΔP ，压缩相的作用时间 τ ，波阵面速度 D_y ，波阵面上的温度 T_ϕ 和有效作用时间 τ_{ϕ} 。

冲击波理论给出了波阵面上不同特性之间的关系，这些特性可以用下列诸式来确定：

在空气冲击波波阵面上的超压：

$$P - P_a = \Delta P = \frac{2\rho_0 D_y^2}{g(1 + \gamma)} \left(1 - \frac{c_0^2}{D_y^2} \right)$$

或
$$\Delta P = \frac{7}{6} P_a \left(\frac{D_y^2}{c_0^2} - 1 \right), \text{ 牛顿/米}^2 \tag{1}$$

空气冲击波波阵面的运动速度：

$$D_y = \sqrt{(P - P_a) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) g \text{①}}, \text{ 米/秒} \tag{2}$$

空气压缩层的运动速度

①原文为 10^3 应改为 g （重力加速度）。——译者

表 1

超 压 千牛顿/米 ²	空气冲击波波 阵面运动速度 米/秒	被压缩空气层 运动的 速度 米/秒	介质的密度 公斤/米 ³	空气冲击波波阵 面上的 温 度 度 (K)
0	340	0	1.25	288
1	341	2.34	1.258	289
10	354	22.6	1.335	296
20	367	43.6	1.42	303
40	392	82.0	1.58	316
60	416	115	1.73	329
100	460	174	2.01	353
140	500	224	2.27	375
180	537	268	2.50	395
200	555	287	2.61	405
300	635	378	3.09	455
400	707	453	3.49	503
500	772	518	3.81	552
600	832	576	4.08	600
700	888	630	4.32	649
800	940	680	4.53	697
900	990	727	4.72	742
1000	1040	772	4.89	787
2000	1430	1120	5.85	1250
3000	1730	1380	6.29	1720
4000	1990	1610	6.55	2180
5000	2220	1800	6.72	2650
7000	2620	2180	7.31	3340
10000	3110	2580	8.06	4160
20000	4420	3740	10.88	5680
30000	5380	4760	13.15	6740
40000	6180	5570	13.75	7750
50000	6940	6330	—	8700
60000	7580	6940	—	9650
80000	8740	7690	—	11250
100000	9780	8840	—	13600

$$u = \frac{2}{1+\gamma} D_y \left(1 - \frac{c_0^2}{D_y^2} \right), \text{ 米/秒} \quad (3)$$

空气冲击波波阵面上的温度

$$T_\phi = 288 \times \frac{(100 + \Delta P)(720 + \Delta P)}{6\Delta P + 720}, \text{ 度 (K)} \quad (4)$$

式中 ρ_0 , P_a 和 c_0 ——在未受扰动的空气中的密度, 压力和声速;

P ——在空气冲击波波阵面上的绝对压力, 牛顿/米²;

ρ ——在空气冲击波波阵面上的空气密度, 公斤/米³;

$\gamma = 1.4$ ——对不太强的波的绝热指数;

g ——重力加速度, 米/秒²。

根据公式 (1)~(4) 计算出来的不同超压 ΔP 时的波的参数值列在表 1 中。这样, 对于空气冲击波波阵面上的全部特性只需测出 P , u , D_y , ρ , ΔP 中的一个, 其余的参数用算法就可以求得。

为了对药包爆炸时形成的空气冲击波有更全面的了解, 我们研究了它的基本参数: 波阵面上的压力, 波阵面的运动速度, 作用时间和冲量。同时我们认为应当在无限介质中或地表面上爆炸无外壳的药包。

空气冲击波波阵面上的压力 波阵面上的超压遵从相似定律是炸药爆炸时形成的空气冲击波的衰减特性, 此特性首先被 M. A. 萨多夫斯基, Л. И. 谢多夫和捷伊洛夫所证明。这就是说, 空气冲击波波阵面上的压力不取决于药包的绝对尺寸和重量, 而完全决定于离爆炸地点的距离与药包半径的比值、该炸药爆炸的比能和周围空气的压力。

由于受超压压缩的空气中的补充能量与空气的初始能量之比, 取决于炸药爆炸时释放出来的能量与爆炸瞬间被冲击波占领的容积中在爆炸前所含的全部初始能量之比, 这一假说就是空气

冲击波波阵面上超压计算的理论基础。

单位体积空气从冲击波超压中所获得的能量与超压成比例。在单位体积空气中最初所含的能量与未受扰动的空气的压力成比例。爆炸时所释放出来的总能量等于 qQ 。从自由布置在空气中的集中药包爆炸地点传至距离 R 上的空气冲击波所席卷的空气中所含的能量与 $\frac{4\pi}{3}R^3P_a$ 成比例。

根据假说^[53]可以写成：

$$\frac{\Delta P}{P_a} = f\left(\frac{qQ}{\frac{4\pi}{3}R^3P_a}\right) \quad (5)$$

式中 q ——药包的重量，公斤；

Q ——比能，焦耳/公斤。

借助选择能满足实验观察和在电子计算机上计算的方程式，确立了下面的关系式：

$$f\left(\frac{qQ}{\frac{4\pi}{3}R^3P_a}\right) = 10g\left[a_1\frac{qQ}{R^3P_a} + a_2\left(\frac{qQ}{R^3P_a}\right)^{2/3} + a_3\left(\frac{qQ}{R^3P_a}\right)^{1/3}\right], \text{ 千牛顿/米}^2 \quad (6)$$

式中 a_1, a_2, a_3 ——引进了乘数 $\frac{4}{3}\pi$ 的常数。

根据(5)和(6)式，得到

$$\frac{\Delta P}{P_a} = 10g\left[a_1\frac{qQ}{R^3P_a} + a_2\left(\frac{qQ}{R^3P_a}\right)^{2/3} + a_3\left(\frac{qQ}{R^3P_a}\right)^{1/3}\right], \text{ 千牛顿/米}^2 \quad (7)$$

在置换了未受扰动空气的压力值、单位面积的比能和根据实验与用电子计算机计算确定了三硝基甲苯的系数 a_1, a_2, a_3 以后，M.A.萨多夫斯基导出了下式

$$\Delta P = 10g \left(7 \frac{q}{R^3} + 2.7 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 0.84 \frac{q^{1/3}}{R} \right), \text{ 千牛顿/米}^2 \quad (8)$$

对于比能与三硝基甲苯不同的其他炸药，上式可改写成

$$\Delta P = 10g \left[7 \frac{Q}{Q_T} \cdot \frac{q}{R^3} + 2.7 \left(\frac{Q}{Q_T} \right)^{2/3} \frac{q^{2/3}}{R^2} + 0.84 \left(\frac{Q}{Q_T} \right)^{1/3} \frac{q^{1/3}}{R} \right], \text{ 千牛顿/米}^2 \quad (9)$$

当爆炸周围都是空气的球形裸露药包时上述各式是正确的。

当爆炸放置在地面上的药包时，吸入到空气冲击波运动中的空气数量减少了 $\frac{1}{2}$ 。在这种情况下为了固定空气冲击波的压力，就必须将药包重量增加一倍。此时 M. A. 萨多夫斯基的公式变为

$$\Delta P = 10g \left(14 \frac{q}{R^3} + 4.3 \frac{q^{2/3}}{R^2} + 1.1 \frac{q^{1/3}}{R} \right), \text{ 千牛顿/米}^2 \quad (10)$$

裸露药包的形状同样影响空气冲击波的压力。例如在爆炸立方体的药包时所形成的空气冲击波在立方体棱边方向具有较高的参数，而在对角线方向较小。当爆炸细长柱形药包时压力主要沿柱形的侧面分布。如果将细长药包放置在地面上，那末空气冲击波波阵上的压力可以按下式计算

$$\Delta P = 10 \left[28 \frac{q}{lR^2} + 6.9 \left(\frac{q}{lR^2} \right)^{2/3} + \frac{1}{3} \left(\frac{q}{lR^2} \right)^{1/3} \right], \text{ 千牛顿/米}^2 \quad (11)$$

式中 l ——药包的长度，米。

① Q_T ——三硝基甲苯的比能，焦耳； Q ——其他炸药的比能，焦耳。——译者

② 原文为 $\Delta P = 10 \left[28 \frac{q}{lR^2} + 6.9 \left(\frac{q}{lR^2} \right)^{2/3} + \frac{1}{3} \left(\frac{q}{lR^2} \right)^{1/3} \right]$ 应改为

$\Delta P = 10g \left[28 \frac{q}{lR^2} + 6.9 \left(\frac{q}{lR^2} \right)^{2/3} + \frac{1}{3} \left(\frac{q}{lR^2} \right)^{1/3} \right]$ 。——译者

化学损失也影响空气冲击波的参数，对各种不同的炸药这种化学损失可以用临界直径 d_{kp} 的大小来确定。活性药包的直径可以按下式计算

$$d_a = d_s - 0.4d_{kp}, \text{ 毫米} \quad (12)$$

式中 d_s ——药包的直径，毫米。

爆炸有外壳的药包会严重改变空气冲击波的强度。根据 M. A. 萨多夫斯基研究炸弹外壳对空气冲击波参数的影响所获得的资料，当外壳质量与药包质量的比为1:1时，空气冲击波的能量减小了一半。外壳起两种相互竞争的作用：一是由于变形和碎片抛掷所消耗的能量而使波强减弱，一是由于减少了化学损失而使波强增强。

空气冲击波波阵面运动的速度 空气冲击波以超过未受扰动空气中的声速的速度传播。但是它的速度总是小于波中受压缩空气的声速。这样波阵面上的压力越大，它的速度也越大。根据流体动力学的理论计算得出下面计算空气冲击波波阵面运动速度的公式(根据P. A. 爱姆利奇的公式)：

$$D_y = c_0 \sqrt{1 + 0.83 \frac{\Delta P}{P_a}}, \text{ 米/秒} \quad (13)$$

在未受扰动空气中的声速取决于它的温度，可以按下式来计算：

$$c_0 = 331 \left(1 + \frac{T_a}{546} \right), \text{ 米/秒} \quad (14)$$

式中 T_a ——空气的温度，°C。

从引用的计算空气冲击波波速的公式中得出，当波传播时它的波阵面运动速度逐渐减小并且接近于声速。这是由于随着离爆源的距离增加，波阵面上的压力下降所引起的。

空气冲击波的作用时间 随着离爆源距离的增加，空气冲击波作用的时间被拉长了，由于波阵面上的压力最大，波阵面以比其他空气层更大的速度运动。空气冲击波与稀疏波相遇的界面以声速的速度运动，这是由于此处的压力等于大气的压力(参阅图

5)。

空气冲击波作用时间的拉长实际上就是在固定的空间中保持了它本身的长度，因为空气冲击波作用时间的增加总是与速度的下降同时产生的。

根据实验和计算，确定了空气冲击波正相作用时间与药包重量和距离之间的关系〔53〕

$$\tau_n = 0.0015 \sqrt{R} \sqrt[3]{q}, \text{ 秒} \quad (15)$$

空气冲击波的作用时间是最具有特征性的参数，因为它主要决定了空气冲击波的破坏力。空气冲击波整个作用时间是不大的，甚至在爆炸大药包的情况下也不会超过几十毫秒。

空气冲击波的冲量 当空气冲击波的作用时间比较不大时，由波产生的破坏作用可以用超压的单位冲量来确定。单位冲量等于用时间记录的压力曲线所包围的积分面积(参阅图 5)。对于一般威力的炸药(如三硝基甲苯)在空气中爆炸时，观测和计算得出了计算空气冲击波单位冲量的公式：

$$I = 40 \frac{q^{2/3}}{R} g, \text{ 牛顿} \cdot \text{秒} / \text{米}^2 \quad (16)$$

对于爆热与三硝基甲苯不同的炸药，空气冲击波的单位冲量可按下式计算：

$$I = 40 \frac{q^{2/3}}{R} g \sqrt{\frac{Q_1}{Q_r}}, \text{ 牛顿} \cdot \text{秒} / \text{米}^2 \quad (17)$$

式中 Q_1 ——被测炸药的比热，焦耳；

Q_r ——三硝基甲苯的比热，焦耳。

当将药包放置在地面上时，空气冲击波的单位冲量按下式计算

$$I = 63 \frac{\sqrt[3]{q^2}}{R} g, \text{ 牛顿} \cdot \text{秒} / \text{米}^2 \quad (18)$$

§ 2 空气冲击波从障碍物的反射

在空气冲击波后面运动的空气流，当波作用在任何障碍物时

都会受到阻碍。同时由速度头的作用引起的附加载荷作用在障碍物上，速度头的大小取决于气流的密度和速度。

$$P_{\text{ck}} = \frac{u^2}{2} \rho, \text{ 牛顿/米}^2 \quad (19)$$

根据研究的资料^[55] 对于在波阵面上具有超压大于 490 千牛顿/米²的空气冲击波，在离爆源同一距离上， P_{ck} 超过了空气冲击波的最大超压。例如，当最大超压为1400千牛顿/米²时速度头建立的附加载荷等于2310千牛顿/米²。

在从障碍物反射的瞬间，波压可以按 C. B. 伊兹马依洛夫的公式计算

$$P_{\text{отр}} = P \frac{8P - P_a}{P + 6P_a}, \text{ 牛顿/米}^2$$

或

$$\Delta P_{\text{отр}} = \Delta P \left(2 + \frac{6}{1 + 7 \frac{P_a}{\Delta P}} \right), \text{ 千牛顿/米}^2 \quad (20)$$

从公式中可以看出，当弱波反射时压力增加一倍，而当强波反射时可能增大八倍。当波的运动方向平行地垂直于反射面时或者当偏离角不大时，公式(20)都是正确的。如果反射波偏离上述条件超过45°时，那末反射的过程具有复杂的特征。要计算 $\Delta P_{\text{отр}}$ 是困难的，在本著作中这种情况没有考虑。

当二个或二个以上的空气冲击波撞碰时，在撞碰点的压力同样会增大。根据对两个强度一样的波的研究^[8]，当二者法线间的夹角等于180°时，两波相撞时的压力仍可按公式(20)来计算。

§ 3 空气冲击波对人和建筑物的作用

上面研究空气冲击波的参数是为了解决一个极其重要和现实的问题，就是确定空气冲击波对人和建筑物作用的破坏范围和安全范围。

结构物自然振动周期 T_0 和压缩波作用时间之比影响建筑物结

构强度计算方法的选择：如 $\tau_n/T_0 \leq 1$ ，那末强度计算可以根据空气冲击波的冲量来进行，如果 $\tau_n/T_0 > 1$ ，则根据最大压力计算，这是因为在邻近药包的距离上可以观察到空气冲击波的冲量的作用，而在更远的距离上则是静力的作用。

为了实用，重要的应当知道安全距离，即在这个距离上的任何建筑物都不会遭受空气冲击波的破坏作用。对于这种距离，采用空气冲击波的静力作用特性总是可行的，当 $\tau_n/T_0 \geq 10$ 时在计算中它会给出最小的误差。

表 2 中列出了在实际中最常用的建筑结构的自然振动周期和破坏性载荷的数据。

表 2

指 标	砖 墙		钢筋混 凝土墙	木 质	轻 便	镶装的
	2 块砖厚	1.5块砖厚	厚0.25米	天花板	间 墙	玻 璃
结构的自然振动周期	0.01	0.015	0.015	0.3	0.07	0.01~0.02
静载荷，千牛顿/米 ²	45	25	300	10~16	5	5~10
冲击载荷，牛顿·秒/米 ²	2200	1900	—	—	—	—

到防护建筑物或防护物的安全距离半径可以按下式计算：

$$r = k_6 \sqrt{q} \text{ , 米} \tag{21}$$

式中 k_6 ——取决于药包大小、药包布置条件以及破坏特征的比例系数。

人的器官对空气冲击波的作用是极稳定的。例如最易受伤的鼓膜，当超压为35~105千牛顿/米²时会受到破裂，这取决于头部位位置与空气冲击波波阵面的关系。当压力很大时人的血管、肌肉等等都会破裂。

显然在空气冲击波作用范围内的人的受伤的主要原因不是冲击波波阵面上的压力，而是在它后面运动的气流，当压力为30~40千牛顿/米²时气流的流速达60~80米/秒。除非气流的作用时间短，否则这样的流速人是经受不住的，他们会遭受到碰伤和跌伤。除此以外在空气冲击波后面还有被破坏物体的碎片在运动，这种碎片同样会使人遭受外伤。