

水力采煤理论基础

苏联 A.M.茹拉夫斯基教授等著
北京煤矿设计院专家工作室译

煤炭工业出版社

内 容 提 要

1957年10月，苏联斯大林格勒全苏水力采煤科学研究所召开了全苏第一次水力采煤科学技术会议，本书选录的就是会上所宣读的论文的一部分。这部分主要论述水采工作面高压水射流破碎煤体的基本理论，破碎岩石的试验室研究，露天水力采煤，水力落煤的合理参数，水采矿井辅助运输机械传动理论等问题。

本书可供有关研究人员和矿业院校教学人员参考。

А. М. Жерасов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ УГЛИ

Углетехиздат Москва 1959

根据苏联国立煤矿技术书籍出版社1959年版译

1435

水力采煤理论基础

北京煤矿设计院专家工作室译

*

煤炭工业出版社出版(社址：北京东长安街煤炭工业部)

北京市书刊出版业营业登记证出字第084号

煤炭工业出版社印刷厂排印 新华书店发行

*

开本787×1092 1/32 印张4 2/3 字数95,000

1960年8月北京第1版，1960年8月北京第1次印刷

统一书号：150.35/1114 印数：0,001—3,000册 定价：0.64元

水射流破碎煤体的基本理論問題

.....列宁格勒矿业学院A.M.茹拉夫斯基教授(3)

高压水射流及在射流下岩石破碎过程的試驗室研究

.....列宁格勒矿业学院教授、

技术科学博士B.M.盖朗特耶夫(18)

露天煤矿水力开采問題

.....莫斯科矿业学院技术科学博士Г.А.努洛克(34)

选择水力落煤合理参数的理論基础

.....全苏水力采煤科学研究設計院

科学技术碩士A.M.契普卡(73)

水采矿井工作面中水力落煤过程研究成果

全苏水力采煤科学研究設計院工程师H.Φ.查卜柯(98)

水力破碎脆性物体的研究

.....列宁格勒矿业学院副教授Л.И.謝雄林(120)

水采井輔助运输迴轉传动理論基础

.....西伯利亚冶金工业学院副教授、

技术科学副博士H.B.資拉托夫(133)



水射流破碎煤体的基本理論問題

列宁格勒矿业学院

A.M. 茹拉夫斯基教授

在应用水射流破碎煤的过程中，被破碎的物体是固体，而破碎固体的是液体射流。

现代关于固体的脆性破碎、液体射流的结构及能量学方面的概念，是极其肤浅的。

根据这种概念暂时还不能得出关于破碎现象稍微完整的理論概念。因此，只能局限于现象的近似特性。由于我们的知識不足，而所发生的现象又很复杂，因此，我們只能用簡化的办法来研究破碎过程，而侧重在这种现象的能量学方面的闡明。

在研究初期所必須探討的主要問題有：

- (1) 破碎岩石所需之压力值；
- (2) 脱离工作面矿体的岩石量，破碎所需的力；
- (3) 消耗于单位重量的岩石上的功；
- (4) 水射流在噴嘴出口处的能量与到达工作面时的能量两者的比值；
- (5) 按規定能力确定所需之水枪功率。

为了簡化所研究的現象，本文对上述問題的解答是以下列前提作为条件的：

- (a) 被破碎的岩石是均質的、各向同性的；
- (b) 工作面前壁是无限的平面；

- (B) 力的作用面是圓形的;
- (Г) 力均匀分布于圓面积上, 其作用是靜力的;
- (A) 液体射流看成是实体的(連續的);
- (D) 对于流向空气中的液体射流, 运用关于被淹沒射流的規律性;

(Ж) 岩石某点上的破碎, 发生于最大剪应力超过弹性极限的瞬间。

以上課題可分成两部分:

第一部分是关于被破碎岩石部分, 这里所要研究的, 是当負重加于岩石邊緣的某块地方时在岩石中所产生的紧张状态;

第二部分是关于射流, 射流的结构和在流动射流各个部位上速度的分布情况。

现在, 我們来順次地研究这两部分。

本文內容的試驗工作, 是在 A. M. 茹拉夫斯基教授的参与下由列宁格勒矿业学院副教授 B. Г. 拉斐諾依和 P. Θ. 苏洛威依契克两同志完成的。研究所需的計算部分, 是由助教 A. Г. 阿曼卓伏依和 A. E. 維諾格拉道娃两同志完成的。实验部分是由副教授 K. Г. 阿沙多尔和 A. И. 賽維利諾依两同志进行的。

I. 被破碎岩石的紧张状态及破碎功

在确定被破碎岩石紧张状态时, 要解决以下課題。

在一个限制着弹性半空間的平面上, 压力 P_0 均匀地作用于半径为 a 的圓面上(图 1)。現在要求出弹性半空間中

的紧张状态。解决这个课题的公式如下:

$$\sigma_r = P_0 \{ -(0.5 + \gamma) + (1 - 2\gamma)Y_1 + 2(1 + \gamma)Y_2 - Y_3 + 2(2 - \gamma)Y_4 - Y_5 \}; \quad (1)$$

$$\sigma_z = P_0(1 + 2Y_3); \quad (2)$$

$$\tau_{r,z} = -P_0Y_6; \quad (3)$$

式中 γ ——泊松比;

σ_r 和 σ_z ——分别为在与半径 r 相垂直和与垂线 z 相垂直的面上的 M 点 (r, θ, z) 的法向应力;

$\tau_{r,z}$ ——在其中一个面上而与另一个面成法向的剪应力分量。

在同样这两个面上, 又与两个面的交线平行的剪应力分量 $\tau_{r,\theta}$ 和 $\tau_{z,\theta}$, 由于对称的关系变为零:

$$\tau_{r,\theta} = 0$$

和

$$\tau_{z,\theta} = 0.$$

在第三个方向相垂直的面上的法向应力 σ_θ 的计算公式, 由于在以后各节中无需运用, 在这里, 就不再写出了。

$Y_k (k=1, 2, \dots, 6)$ 值以下列等式表示:

$$Y_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \ln(\sqrt{R^2 + Z_*^2} + Z_*) \cos 2\psi d\psi; \quad (4)$$

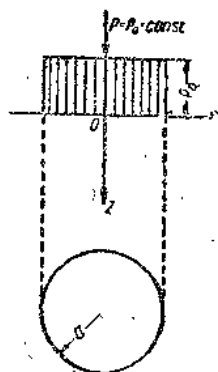


图1 应力图

$$Y_2 = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{Z_*}{\sqrt{R^2 + Z_*^2}} d\psi; \quad (5)$$

$$Y_3 = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{Z_*^3}{(R^2 + Z_*^2)^{3/2}} d\psi; \quad (6)$$

$$Y_4 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{Z_* \cos 2\psi}{\sqrt{R^2 + Z_*^2}} d\psi \quad (7)$$

$$Y_5 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{Z_*^3 \cos 2\psi}{(R^2 + Z_*^2)^{3/2}} d\psi; \quad (8)$$

$$Y_6 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{R^3 \cos \psi}{(R^2 + Z_*^2)^{3/2}} d\psi, \quad (9)$$

式中 $R = r_* \cos \psi + \sqrt{1 - r_*^2 \sin^2 \psi}; \quad (10)$

而 $r_* = \frac{r}{a}; \quad (11)$

$$Z_* = \frac{Z}{a}. \quad (12)$$

为了求出 $Y_k (k=1, 2, \dots, 6)$ 的积分值, 编制了自变量 Z_* 和 r_* 表。利用这些表, 可以毫无困难地按照公式(1)、(2)、(3)求出应力张量的分量。

最大剪应力按如下等式计算

$$\tau_{\max} = \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_z)^2 + \tau_{rz}^2}. \quad (13)$$

在OZ轴綫下的 $Y_k (k=1, 2, \dots, 6)$ 积分的公式非常簡

单:

$$r_* = 0$$

和 $R = 1.$

这里, $Y_1 = Y_4 = Y_5 = Y_6 = 0;$

$$Y_2 = \frac{Z_*}{2\sqrt{1+Z_*^2}};$$

$$Y_3 = \frac{Z_*}{2\sqrt{1+Z_*^2}},$$

在轴线上各点的最大剪应力按下列等式计算:

$$\tau_{\max} = \frac{|\sigma_r - \sigma_z|}{2} = \frac{P_0}{2} \left[0.5 - \gamma + \frac{(1+\gamma)Z_*}{\sqrt{1+Z_*^2}} - \frac{3Z_*^3}{2(1+Z_*^2)^{3/2}} \right], \quad (14)$$

在深度为 Z_{*0} 时, OZ 轴线各点上的 $\tau_{\max}$ 值为最大

$$Z_{*0} = \sqrt{\frac{1+\gamma}{3.5-\gamma}}. \quad (15)$$

在 OZ 轴线上的 $\tau_{\max}$ 的最大值, 按下列等式计算:

$$\tau = \frac{P_0}{2} [0.5 - \gamma + 0.1\pi(1+\gamma)^{3/2}]. \quad (16)$$

在与轴线相距 r_* 的各点上, $\tau_{\max}$ 最大值是产生在某深度 Z_{*r} 上的。

表 1 中的数字是表示在 $\gamma = 0.25$ 时的这种深度。

表 1

r_*	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Z_{*r}	0.62	0.60	0.57	0.44	0.37	0

图2表示相当于表1的曲线。

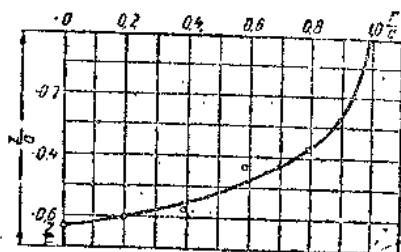


图2 最大切线应力的作用面

在深度 Z_{*r} 上的 τ_{max} 值并不小于按等式(16)所求出的 τ 值, 而是与它相接近的。根据上述深度 Z_{*r} 和 τ_{max} 值的关系, 按公式(16)就可解决前面所说的第一个课题。

压力 P_0 按下式计算

$$P_0 = \frac{2\tau_{\text{pas}}}{0.5 - \gamma + 0.1\pi(1 + \gamma)^{3/2}}, \quad (17)$$

按这个公式所求出的压力 P_0 就是开始破碎限界压力。

当 $\gamma = 0.25$ 时

$$P_0 = 2.9\tau_{\text{pas}} \approx 3\tau_{\text{pas}}.$$

解决所提出的第二个课题是与解决第一个课题相联系着的。根据深度 Z_{*r} 与 τ_* 的关系曲线, 不难得出如下关于破碎体积的近似概念:

$$V \approx \frac{\pi}{2} a^3 Z_{*0} = \frac{\pi}{2} a^3 \sqrt{\frac{1 + \gamma}{3.5 - \gamma}}, \quad (18)$$

式中 Z_{*0} ——按等式(15)求出。

第三个课题的解决是以求出由于加上负重而引起的弹性介质边界的移动为基础的。破碎负重所消耗的功按以下等式计算:

$$A = \frac{8a^2(1-\gamma^2)P_0^2}{3E}, \quad (19)$$

式中 E ——被破碎岩石的弹性模数。

按等式(19)所求出的能量消耗值,能使体积为 V 的岩石[按等式(18)求出的]破碎。根据以上各式,可以得出在岩石破碎初期破碎体积 V 所需的能量 A 的关系式。

这个关系式以下列等式表示:

$$A = \frac{k\tau_{pas}^2}{E}V, \quad (20)$$

式中

$$k = \frac{64(1-\gamma)\sqrt{(3.5-\gamma)(1+\gamma)}}{3\pi[0.5-\gamma+0.1\pi(1+\gamma)^{3/2}]^2}, \quad (21)$$

在每一单位重量的破碎岩石上,要消耗 A_1 个单位功;

$$A_1 = \frac{k\tau_{pas}^2}{E\gamma}, \quad (22)$$

式中 γ ——岩石比重。

泊松比 γ 相对的 k 值示于下:

γ	0.20	0.25
k	2.12	21.6

II. 射流的能量学

关于在从喷嘴流向空气的液体射流中的速度分布问题，关于射流的形状和结构，横断面尺寸问题，都是极其复杂的，因为，射流在流动过程中是不稳定的，同时它会分裂成单独的水点。

自由射流大致可看成是实体的射流，对于自由射流，可运用淹没射流的规律性（在运用时，在计算公式中应采用不同的系数值）。射流由圆锥形中心核和其余质体组成，中心核保持着不变速度 v_0 （等于喷嘴出口速度），其余质体则愈接近射流外表面，速度愈低。外表面为圆锥形。

图3示从直径为 d_0 的喷嘴中所射出的射流轴向断面。

射流开始段的长度 l_0 ，按下列等式计算：

$$l_0 = 0.335 \frac{d_0}{a}, \quad (23)$$

式中 a ——常数，表示由于紊流搅动而引起的内阻力。

射流外径，按以下等式确定：

$$d = d_0 + 6.8al, \quad (24)$$

式中 l ——射流横面离喷嘴的距离。

射流核的直径，按以下等式确定：

$$d' = d_0 - 3.0 \times al. \quad (25)$$

过渡横面（相当于开始段的末端）的直径按以下等式确定：

$$d_{\text{пер}} = 3.3d_0. \quad (26)$$

在平行于射流中心线方向上的射流速度 $\vec{V}$ 的轴向分量

$\vec{U}$, 在射流的中心綫上具有数值 U_* 。 U_* 按以下等式确定:

$$U_* = \frac{0.49v_0}{\frac{al}{d_0} + 0.145} \quad (27)$$

在横面积上速度 U 的分布, 按下列等式确定:

$$U = U_* \Phi\left(\frac{r}{al + 0.145d_0}\right), \quad (28)$$

式中 r ——从横面积上的一点到射流中心綫的距离。

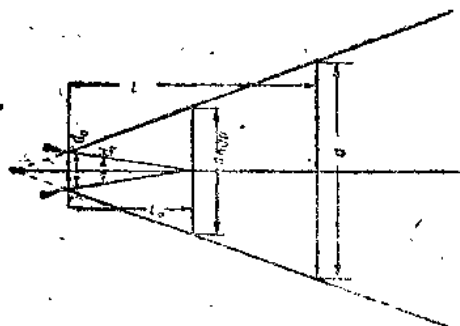


图 3 自由射流

函数 $\Phi(x)$ 以下列近似等式表示:

$$\Phi(x) = 1 - 0.27x(1 - 0.2x^{3/2} - 0.021x^3 + 0.00059x^{9/2} + 0.0001x^6 + 0.00001x^{5/2}). \quad (29)$$

为函数值 $\Phi(x)$ 編制了专门的表。函数图表示于图 4。

a 采用 0.005。

根据上述函数, 可以求出在射流横断面上的速度場。

根据上述比值，可以解决在射流中具有足能破碎障碍物的速度的部分究竟损失多少动能的问题。

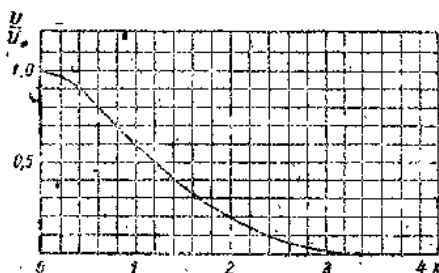


图 4 函数 ψ_r 图表

III. 射流在静力条件下的破碎作用

射流的破碎作用，可看成是对障碍物的静压作用。当射流遇到障碍物时，射流向四处喷散，同时起着静压作用。

射流的作用可看作是对障碍物的冲击作用。这种作用主要是产生于射流刚遇到障碍物的瞬间以及紧接着的一小段时间内。

在射流静压的条件下， S 面上的全压力 $P_{\text{нон}}$ 按下列等式计算：

$$\rho U_{\text{cp}}^2 S = P_{\text{нон}}, \quad (30)$$

式中 ρ ——液体密度；

U_{cp} ——平均的轴向分速；

要使射流能破碎 S 面，单位面积上的负重 P 应该超过

开始破碎压力 P_0 的范围, 因此,

$$\rho U_{\min}^2 \geq P_0. \quad (31)$$

在 S 面各点上的最低速度 $U_{\min}$ 满足下列不等式的条件时, 不等式(31)就能实现:

$$U_{\min} \geq \sqrt{\frac{P_0}{\rho}}. \quad (32)$$

在射流静压作用下, 我们得到了如下几条法则, 可以用来计算, 为了在相距喷嘴 l 距离的地方破碎岩石直径为 d_* 的圆面, 从直径为 d_0 的喷嘴射出的射流速度。

单位面积上的破碎压力值 P_0 , 按下列等式计算:

$$P_0 = \frac{2\tau_{p03}}{0.5 - \gamma + 0.1\pi(1 + \gamma)^{3/2}}. \quad (33)$$

在被破碎面上的射流的最低速度可按下式求出:

$$U_{\min} = \sqrt{\frac{P_0}{\rho}}. \quad (34)$$

在达到工作面时射流的轴心速度, 可按下列等式表示:

$$U_* = U_{\min} \cdot \Phi \left(\frac{d_*}{2al + 0.29d_0} \right). \quad (35)$$

喷嘴出口处的速度按下列等式计算:

$$v_0 = 0.49U_* \left(\frac{dl}{d_0} + 0.145 \right). \quad (36)$$

在求得射流的流速后, 就不难确定破碎初期设备所需之流量及工作压力。

IV. 射流的冲击作用

射流冲击作用的计算条件是：停止流动的液体动能全部转变为使障碍物变形的功。当此时所产生的应力刚超过容许界限时，破碎现象就会开始。

通过实验，我们提出以下计算破碎岩石所需要的在射流与障碍物接触面上的最低速度 U_{min} 的公式。

对于坚硬的岩石：

$$U_{min} = \frac{\sigma_s}{2} \sqrt{\frac{1}{K\rho} + \frac{2(1-\gamma)}{\rho E}}. \quad (37)$$

对于煤和软的岩石：

$$U_{min} = \frac{\sigma_s}{1+\gamma} \sqrt{\frac{1}{K\rho} + \frac{2(1+\gamma)}{\rho E}}. \quad (38)$$

在这些公式中， σ_s 是表示被破碎的障碍物的弹性极限， E ——弹性模数， γ ——泊松比， ρ ——液体的密度， K ——容积压缩系数。

V. 理论研究的实验审查

为了验证上述计算关系式，进行了实验。在实验时，用了各种压力射出的水流作用到被破碎的试样上。通过实验，确定了水泵的工作压力（样品开始破碎的压力）。

试验的对象选用了灰色大理石，它的抗压极限强度：

$$\sigma_{cm} = 450 - 650 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

灰色大理石的机械特性如下：

弹性模数 $E = 5.3 \times 10^5 \text{ 公斤/厘米}^2$ ；

切变模数 $G=2 \times 10^6$ 公斤/厘米²;

泊松比 $\gamma=0.22$ 。

它的抗张强度:

$$\sigma_{\text{паци}} = 235 - 285 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

作用到试样上的射流, 是从出口直径 $d_0=3.3$ 毫米的喷嘴中射出的。

喷嘴出口离试样的距离 $l=1.8$ 米。

当射流压力 $P_{\text{пиз}}=60-65$ 公斤/厘米² 时, 试样开始破碎。

大理石上的开始破碎面 $S=0.25$ 厘米²。

这个面积是直径 $d_*=0.564$ 厘米的圆面。

在理论计算中(已与实验作过比较), 水的压缩系数采用:

$$K=2.1 \times 10^4 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

水的密度:

$$\rho = 1.02 \times 10^6 \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{厘米}^4}.$$

在计算中, 灰色大理石的抗压强度采用 $\sigma_c=550$ 公斤/厘米²。

按照公式(37)计算, 得出:

$$U_{\text{ннн}} = 19.7 \text{ 米/秒}.$$

在 $d_*=0.564$ 厘米, $d=0.33$ 厘米, $l=180$ 厘米和 $a=0.005$ 的情况下, 按公式(35)所求出的速度 U_* 值等于:

$$U_* = 21.4 \text{ 米/秒}.$$

按公式(36)所求出的 v_0 值等于: