

346

地下工程 高压喷射技术

〔日〕八寻晖夫等著 徐殿祥译



93180

TU472
8165

地 下 工 程

高 压 喷 射 技 术

〔日〕八寻晖夫等著 徐殿祥译

水利电力出版社

内 容 提 要

高压水喷(射)流技术如今已广泛应用于采矿、医疗、宇宙等尖端技术方面发展极为迅速。本书首先介绍了高压水喷流的流体力学特性、高压发生装置、高压水喷流切削岩土的特性等基础知识;其次阐述了其在工程中的使用方法,并列举了6个方面的施工实例,最后指出了高压水喷射技术的发展方向。

本书可供科研人员,设计与施工人员以及高等院校师生参考。

八尋輝夫 吉田宏 西謙治

ウォーターージェットを利用した地下工法

鹿島出版会 1983

地下工程高压喷射技术

【日】八尋輝夫 等著 徐殿祥译

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 5.25印张 113千字

1988年5月第一版 1988年5月北京第一次印刷

印数0001—2750册 定价12.25元

ISBN 7-120-00328-3/TV·71

译 者 的 话

高压喷射注浆技术(Water jet grouting technology)在我国从70年代开始,发展到今天已获得很广泛的应用、遍及铁道、煤炭、采矿、冶金、化工、市政建设等部门。我国的实践说明,这项技术确有它独到之处,其技术设备小型易造、操作简单、易于推广;用作切削介质的水,用作一般造浆的水泥,价廉易得;尤其是它应用范围广,经济效益高,诸如应用于地基加固、截水、防渗、边坡稳固、锚杆固定等方面,都获得了良好的技术经济效果。目前国际上,这项技术已应用于医疗手术方面,切割拆除钢筋混凝土结构物方面以及应用于原子能发电站燃料棒的切割等工程中。

本书作者中八寻晖夫早年即从事这项技术的开发研究工作,所写的这本书,是该技术领域中的第一部著作。书中包括理论与试验的成果,所开发的方法介绍以及应用实例等,集中反映了这项技术发展迄今的全部成果。把它翻译过来,供广大建设技术工作者及有关方面的参考,促进该项技术在我国的发展,并在我国社会主义四化建设发挥作用。但由于译者水平和时间所限,错误之处,在所难免,希广大读者给予指正。

水电部东北电力设计院陈绍琳同志为本书做了仔细认真地审校,在此深表谢意。

徐殿祥

1986年1月

前 言

自古以来所谓的“滴水穿石”，就是以流体破坏固体，这是人所周知的。但是，最近令人瞩目并成为话题的所谓高速水射（喷）流，是由直径 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 喷嘴中，以等于或高于音速（ 340m/sec ）^①的速度喷射出来的细喷流击穿岩石。

像这样具有刚体性质的水喷流，可以高效能地切削地基。由于压力媒体是水，具有随处可取、价廉、操作简单等一系列优点，而且加于单位面积上的能量之大，仅次于激光，特别是它作用于破坏物的力，是没有横向的分力，因而适合于切割软土或厚纸板等。所以国内外积极开展具有上述优点的应用于地下工程的高压喷射技术工艺的实验研究。

特别是近年来，随着建筑工程的大型化和复杂化，基础工程的重要性日益增加，其中地下水处理和软基加固的好坏，成为决定工程成败的关键，从建筑物的安全性和耐久性方面来看，它也是极端重要的。

在这种情况下，本书拟就高速水喷流的流体力学性质和最近十年间所开发的壁板型射流注浆法（或称定向喷射法）、桩柱喷射法（或称旋转喷射法）、喷流助沉、助拔、打桩、拔桩法，以及当前研究的动态和对未来展望等等，进行论述。

在本书写作过程中，承各方指导与协助，深致谢意。

执笔者代表 八寻晖夫

① $1\text{ m/sec} = 1\text{ m/s}$ 。

目 录

译者的话

前 言

1. 高速水喷流的基础知识	1
1.1 高速水喷流的流体力学特性	3
(1) 高速水喷流的构造	3
(2) 高速水喷流周围再喷射空气喷流时的构造	5
(3) 高速水喷流的初速度及流量	8
(4) 高速水喷流的能量及反作用力	10
(5) 高速水喷流的动压(速度)分布	10
1.2 高速水喷流的发生装置与配套机器	23
(1) 涡轮泵	23
(2) 柱塞泵	24
(3) 静态增压机	29
(4) 其它高压发生装置	33
(5) 喷嘴	34
(6) 软管及配管	39
(7) 调压阀	44
(8) 旋转接头	44
1.3 利用高速水喷流切削岩、土的特性	44
(1) 早期关于切削的研究	45
(2) 高速水喷流的切削机理	51
(3) 影响高速水喷流切削特性的主要因素	56
参考文献	61
2. 高速水喷流在地下工程中的应用	63
2.1 高压喷射注浆法	63
2.2 桩柱喷射法	72

2.3 喷流助沉、助拔、打拔桩法	79
3. 施工实例	84
3.1 以防渗为目的的施工实例	84
(1) 应用的背景	84
(2) 采用本法原委	85
(3) 施工方法	85
(4) 施工结果与考察	87
3.2 防止砂土地基液化工程实例	90
(1) 应用的背景	90
(2) 采用本法原委	91
(3) 液化的鉴别及防止方法的选择	91
(4) 施工方法	94
(5) 施工效果的检查、试验	96
3.3 提高就地浇注桩的横向抵抗的工程实例	107
(1) 应用的背景	107
(2) 采用本法原委	107
(3) 地基概况	108
(4) 施工方法	108
(5) 钻孔桩基础横向阻抗力的验算	110
(6) 施工效果验证试验	116
3.4 增强已有建筑物承载力的工程实例	122
(1) 应用的背景	122
(2) 采用本法原委	123
(3) 地基概况	123
(4) 桩柱喷射法(旋喷法)设计、施工概述	123
(5) 施工结果与考察	126
3.5 砂砾石地基中打入钢板桩工程实例	132
(1) 应用的背景	132
(2) 高速水喷流的开挖特性	133
(3) 采用本法原委	135

(4) 施工方法及设备	136
(5) 施工结果与考察	136
3.6 利用喷流助拔H型钢桩	149
(1) 施工场所概况	149
(2) 施工设备	151
(3) 施工方法	151
(4) 施工结果	152
4. 地下工程中喷射技术的发展前景	153
(1) 有关机械设备的事项	153
(2) 有关工艺方法的事项	153
参考文献	159

1 高速水喷流的基础知识

高速水喷流是指从直径很小的孔（喷嘴）中喷射出来的水喷流。这和在日常生活中的喷水现象一样，例如从消防射流水枪所喷射出来的水喷流，洗净工程用车所用的水喷流等。对于水喷流，如所用的泵的压力高，则能量就增大，喷流速度增大，水喷流也就更加具有威力。一般，对密闭中的水加以压力 P ，使水从小孔喷出时，喷流速度（ v ）和 P 的关系可用

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad v = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (1.1)$$

表示，式中 ρ 为水的密度。

另外，设固体弹性波速度为 V ，使速度为 v 的水喷流冲击该固体时，冲击变形为 v/V ，所以 v 越大，该材料所受的冲击力也越大。欲使 v 大，必须给水加以高压。给水加以高压，就可观察到一种有趣的现象。我们日常所见的水是在 0°C 以上，1个大气压下的水。对处于这种情况下的水给它加压时，则水的状态图如图1.1所示，水即使比常温高，也会结为冰且比普通冰的密度大，变为接触时热得烫手而不能喝的固体。 0°C 的水约在 7000kg/cm^2 压力下成为固相[●]。处于此压力下的水喷流速度约为 1200m/s ，马赫数为 3.5。所以要使压力和速度比这再高，就需要使用加热的温水，或在水中掺入其它物质（例如甘油等）。用 3000kg/cm^2 压力

● $1\text{kg/cm}^2 = 10^4\text{Pa}$ ——译者注。

所喷射的水喷流，由于喷嘴摩擦而给水加热，可以达到日常洗澡用水的温度。

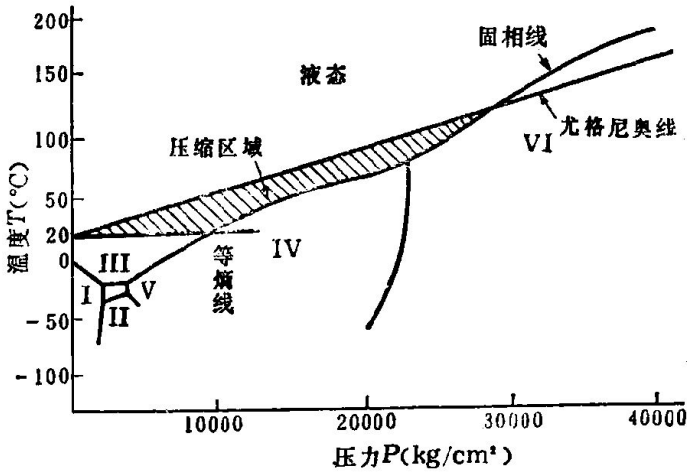
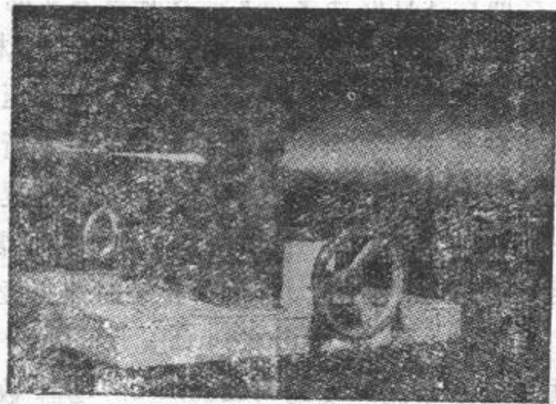


图 1.1 水的状态图

I—正常的冰；II~VI—冰格数



照片 1.1 排出压力为 400kg/cm^2 的水喷流

但是现在，工程中所使用的水喷流，其压力稍有降低，水，可以使用一般的水。用压力为 400kg/cm^2 所喷射的水喷流如照片1.1所示。有关水喷流的基础知识叙述如下。

1.1 高速水喷流的流体力学特性

(1) 高速水喷流的构造

水在静止的空气中喷射时，随着速度的增加，其流动呈水滴→层流→纵向摆动紊流→横向摆动紊流→喷雾流而变化着。

我们所使用的水喷流本质上属于喷雾流。不过虽然属于喷雾流，但并不是一开始水喷流就是喷雾化的。其构造如图1.2所示，大致可分为初期区、迁移区以及主要区等三个区域。

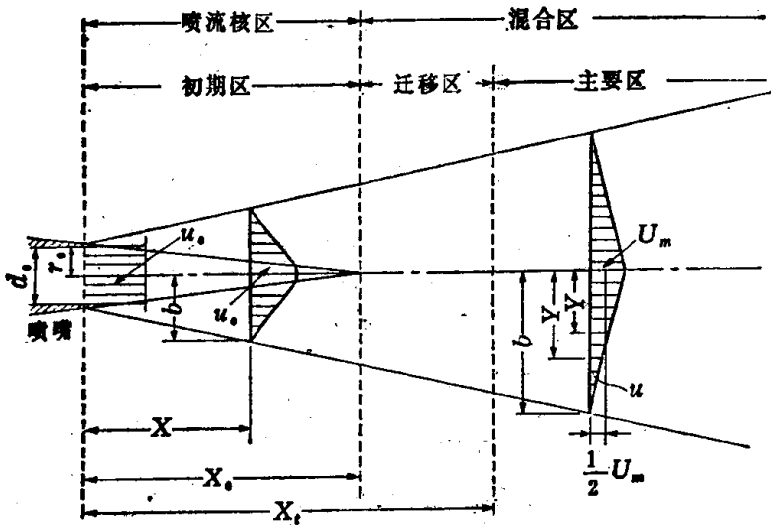


图 1.2 喷流构造示意图

初期区，具有仍能保持喷嘴出口动压的势能核，不含空气透明且致密的部分。迁移区，势能核消失，喷流外缘和周围空气（液体）的交界处产生大的速度坡降。与此速度坡降成比例的力，因为作用于喷流轴线直角的方向，所以水喷流

开始分离并从周围导入空气(液体),从而动压力下降。在主要区,水喷流和周围的空气液体进行混合,加快了速度分布的平均化。周围是空气时,则完全雾状化,成为水的微小粒子群喷流。利用压力变化观察水喷流构造时,可以看出,当喷嘴出口压力为 $5 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$, 则如图 1.3(a)所示,喷嘴口附近存在很长的不含空气的透明部分(初期区)是其特征。在此部分表面产生波动,但其振幅,随着离开喷嘴口的距离而增大,终于开始分离,进而成为水滴和空气的混合流。此压力大小,可以看做是与出自消防用软管的水喷流压力大小相近。

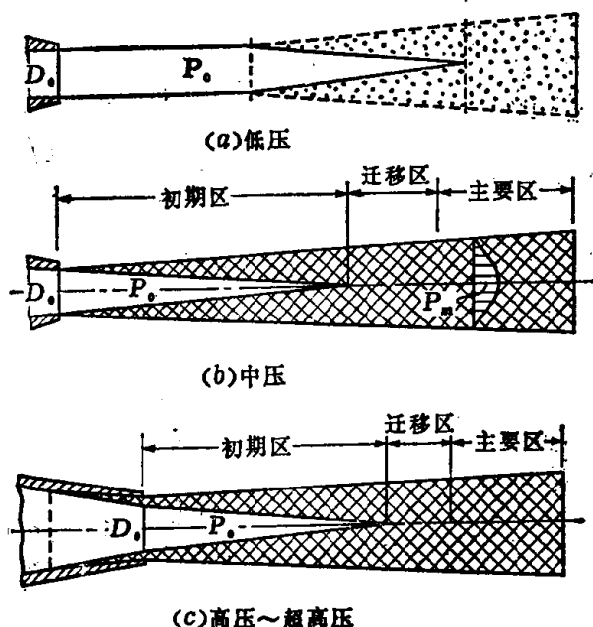


图 1.3 喷嘴出口压力不同时的结构变化

当压力为 $10 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ 时, 如图 1.3(b)所示, 可看到有中心核的初期区和主要区之间存在着一个迁移区。此区压

力大小，可与洗净工程用车的水喷流的压力大小相近。再加高压使其达到 70kg/cm^2 时，水喷流和喷嘴内表面的交界处变为涡流。当压力高达 100kg/cm^2 以上时，初期区的长度有一定的减小，但其结构本身如图 1.3(c) 所示，与上述 (b) 状态相同，没有变化。

(2) 高速水喷流周围再喷射空气喷流时的构造

水喷流在水中喷射时，喷流的动压（速度）与在空气中喷射相比，急剧地减少。这种现象和打开水笼头往浴池里放水时，可感到下部水势比上面水势有相当减弱的现象相同。这意味着，在地基中使用水喷流时，由于有地下水的存在，而不得不使用在水中威力已减弱了的水喷流。

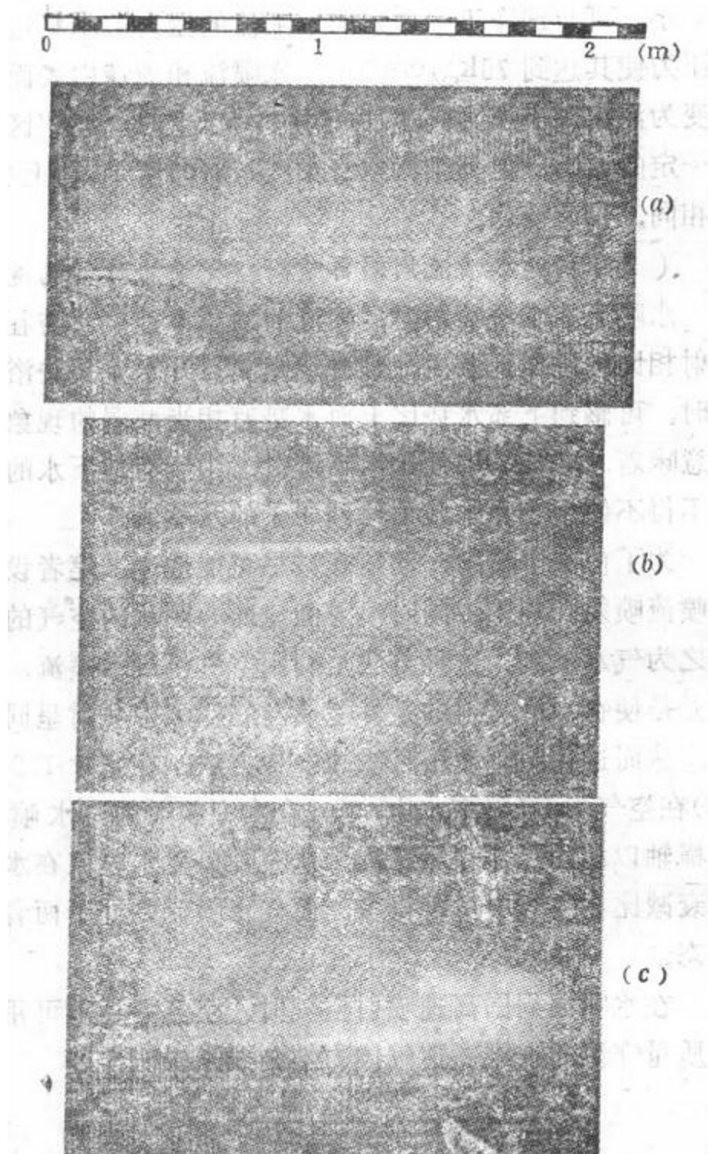
为了使水中喷射，动压衰减尽可能地小，笔者设想出自水喷流喷射孔周围，同时喷射高速同心圆状的空气的方法，名之为气水喷流。这种方法是利用空气包裹水喷流，这样的好处是使在水中喷射的条件造成与在空气中喷射呈同样的状态，从而达到防止动压衰减的一种方法。在照片 1.2 中分有 (a) 在空气中，(b) 在水中，(c) 在水中喷射的气水喷流，图上横轴以相同尺寸表示距离。从照片可见水喷流在水中的动压衰减比在空气中厉害得多，而气水喷流则处于两者的中间状态。

在水喷流周围高速喷射空气时，空气的运动可用满足绝热质量守恒的一维高速气体力学公式来说明。即

$$\frac{du}{u} = \frac{dA/A}{1-M^2} \quad (1.2)$$

式中 u ：空气的速度； A ：空气喷流的断面积； M ：马赫数。

上式中，若使空气的速度接近音速时 ($M \rightarrow 1$)，由于



照片 1.2 各种环境下高速水喷流的喷射状况

(a) 高压水喷流在空气中喷射。水喷流排出压力 200kg/cm^2 ; (b) 高速水喷流在清水中喷射, 水喷流排出压力 200kg/cm^2 , 清水压力 0.15kg/cm^2 ; (c) 高速气水喷流在清水中喷射, 水喷流排出压力 200kg/cm^2 , 清水压 0.15kg/cm^2 , 空气喷流排出压力 7kg/cm^2

du/u 的速度的不连续或连续是有限的，所以必须是 $dA/A \rightarrow 0$ 。从而，如空气喷流在喷嘴口能满足 $M \approx 1$ 时，空气的扩展则由于 $dA \approx 0$ ，而不能扩展，而且被周围的液体挟持着，不到速度十分降低，就不会急剧地扩展。因此，可以认为，空气喷流包裹着水喷流，以紧抱的状态而运动着。在此区域中，水喷流轴上速度（动压）可维持在喷嘴出口的速度（初期区）。再向前进，如图1.4气水喷流的结构模型所示，由于空气和水喷流的冲突以及供给系统和喷嘴内流体的紊乱，出自喷嘴的水喷流其初期紊流有所增大。此紊流由于空气和水的表面张力关系而不稳定，当双方压力达到相等时，则形成气泡，水喷流便成紊乱状态。其结果，水喷流和空气开始混合（迁移区）。再向前进，空气和水喷流与周围的液体相混合，与此同时它的速度急剧衰减（主要区）。在这些区中，空气和水与周围的液体相混合，可认为是作为一个非等向的流体而运动。

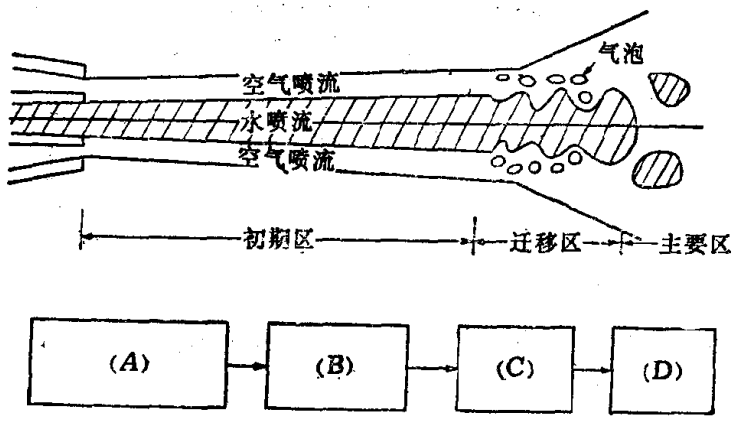


图 1.4 气水喷流的结构模型

(A)— V_0 (初速), A_0 (初期紊流, 连续不断的波谱); (B)—由不稳定波所引起的振幅增大; (C)—水喷流的破坏; (D)—主要区

(3) 高速水喷流的初速度及流量

从喷嘴喷射出的水喷流的初速度, 决定于所加的压力。即对圆形断面喷嘴来说, 设喷嘴出口压力为 P_0 , 流速为 v_1 , 喷射速度为 v , 则

$$v = C_v \sqrt{2g \frac{P_0}{r} + v_1^2} \quad (1.3)$$

式中 C_v 表示由于流体抵抗而引起的速度减小的比例, 若为圆形断面且具有良好加工表面的喷嘴时, 则 $C_v = 0.96 \sim 0.98$ 。

进而当喷嘴确一定时,

$$\begin{aligned} v &= \frac{C_v}{\sqrt{1 - C_v^2 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)}} \cdot \sqrt{\frac{2gP_0}{r}} \\ &= K \sqrt{\frac{2g \cdot P_0}{r}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中 k 被称为流量系数, 当喷嘴直径大(10mm以上), 低压时为0.98; 当喷嘴直径小(5mm以下), 排出压力较高时, 比以往所认为的值小, 约在0.92左右。如所使用的水喷流, 喷嘴直径为2mm左右, 压力为400kg/cm², 则可以认为 $k = 0.92$ 。从式(1.4), 则 $v = 0.92 \sqrt{2g \cdot P_0 / r_0}$ 。当使用清水时, 可得下式。

$$v = 12.9 \sqrt{P_0} \quad (1.5)$$

现设水喷流压力为400kg/cm², 初速度则为258m/s。喷射速度达到音速的水喷流, 约需700kg/cm²的压力。

自喷嘴喷出的流量, 设喷嘴直径为 d , 则

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \times 0.92 \sqrt{\frac{2g \cdot P_0}{r}} \quad (1.6)$$

使用清水时, 式(1.6)可用下式表示。

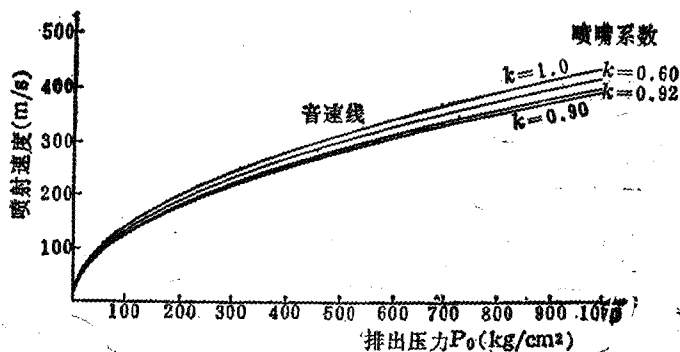


图 1.5 排出压力和喷射速度的关系

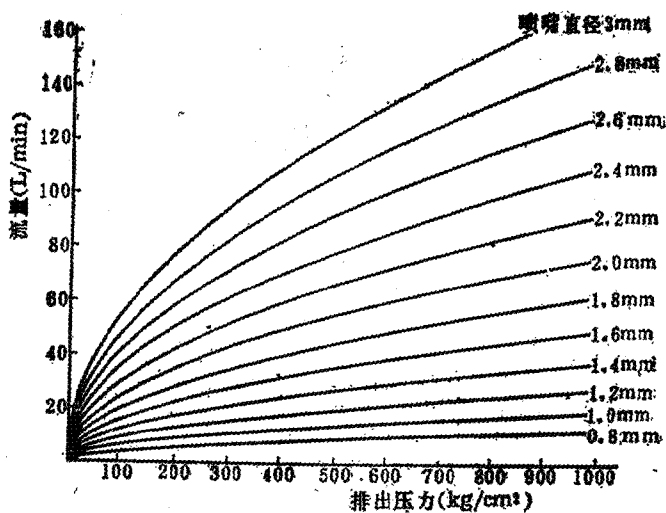


图 1.6 以喷嘴直径为参数的排出压力和流量的关系

$$Q = 60.7 \sqrt{P_0} \cdot d^2 \quad (1.7)$$

图1.5表示压力和速度的关系，图1.6是以喷嘴直径作为参数，表示喷嘴出口压力 P_0 与流量 Q 的关系。今设压力为