

# 采油工程

二

自噴井采油

玉門石油管理局老君廟采油廠編

中国工业出版社

# 采 油 工 程

## 二

### 自 噴 井 采 油

玉門石油管理局老君廟采油廠編

中 国 工 业 出 版 社

本书是一套“采油工程”书中的第二分册，专门介绍自喷采油方法。主要内容包油井自喷的理论基础、油管的选择、怎样控制油井的自喷量、自喷井的井口装置、地面设备合理管理以及试井资料的收集与运用等。为了提高采油技术工人的理论水平、丰富一般中等采油人员的实际生产知识，在编写上着重理论与实际的结合，文字力求通俗易于接受，适合采油工人、试井及试油技工等学习阅读。

## 采 油 工 程

### 二

#### 自喷井采油

玉门石油管理局老君庙采油厂编

\*

石油工业部编辑室编辑（北京北郊六铺炕石油工业部）

中国工业出版社出版（北京体麟里路10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

开本  $850 \times 1168 \frac{1}{32}$  · 印张  $5 \frac{1}{4}$  · 插页 1 · 字数 130,000

1962年3月北京第一版·1962年3月北京第一次印刷

印数 0001—1,550 · 定价 (10-6) 0.73 元

\*

统一书号：15165·54（石油-19）

## 前 言

1959年是我們伟大的祖国——中华人民共和国成立的十週年。十年来，在伟大的中国共产党和毛主席的领导和关怀下，我国的工农业有了飞跃的发展，特别是1958年的大跃进，使我国在工农业各个战线上取得了空前的丰硕成果。

我們石油工业也不例外，从1950年到1958年，原油产量就翻了5番，而1958年的原油产量又比1957年增加了55%。原油产量的不断增长，石油队伍的不断壮大，就要求有更多、更好、更切合实际需要的技术書籍，来满足石油战线上广大职工的迫切需要，以适应新的发展形势。

“采油工程”，就是在这种要求和願望下编写的。全書包括采油基础、自噴采油、抽油、油田注水、油井小修、油井大修和原油选集与处理等七个分册；是由我厂十多位同志集体编写出来的。由于時間短促、生产忙，虽然这些同志尽了最大努力，並且儘可能地征求了技师和老工人的意見，仍不免有不妥甚至錯誤的地方。希讀者提出宝贵的批評意見，以便再版时修正。

本分册（第二分册）系由何世孝等人编写。

玉門石油管理局老君庙采油厂

1959年8月

# 目 录

## 前 言

第一章 油井自喷的理论基础	1
第1节 依靠静水压头的自喷	1
第2节 依靠气体膨胀的自喷	3
第3节 一般情况下的自喷	5
第二章 自喷井油管的选择	9
第1节 喷油和喷油管	9
第2节 喷油管的选择	15
第3节 喷油管的一般选择法和规范	23
第4节 选择喷油管的范例	29
第三章 自喷油井的节流	32
第1节 自喷井节流的概 念	32
第2节 节流方法	34
第3节 油咀	35
第四章 自喷油井的井口与地面设备	41
第1节 井口装置	43
第2节 地面设备与管綫安装	54
第五章 试井资料的收集和运用	64
第1节 油气比的测试	65
第2节 井底压力的测定	80
第3节 探测井下砂面位置	100
第4节 采集油样确定石油性质的方法	101
第5节 试井	104
第六章 自喷井管理	114
第一节 油井间歇自喷原因和油井自喷图解	115

第2节	对油井中各项压力和油气比、含水等条件发生变化的判断	119
第3节	油井工作制度的检查与控制	125
第4节	油井采油规律的研究	129
第5节	间歇自喷井的管理	135
第七章	自喷井清蜡	137
第1节	蜡的一般概念	137
第2节	结蜡及其对油井的影响	138
第3节	机械清蜡法	140
第4节	热力清蜡法	153

## 第一章 油井自噴的理論基礎

自噴采油就是石油从井底上昇到地面的过程中，不需要外界供給任何能量，而完全依靠其油层本身所具有的“能”。这些“能”包括推动油层中石油移动的边水和底水的压头，油藏中自由气体和溶解在石油中的溶解气体的膨胀力，岩石本身的弹性，以及石油本身的重力作用等等。

很明显，地层中的石油所以能从地层和油井中自噴而出，是完全由于这种“能”轉变为“功”的結果。現在我們要研究油井自噴的原理，那么，首先就應該从这些“能”的作用开始。

### 第1节 依靠靜水压头的自噴

不难理解：如有高于油层的水源与油层相連通，那么当我们把这样的油层打穿后（也就是在油层上打井），由于这种水源的水头压力作用，便会推动水层上面的或者边缘的油、气移向井底，并从井筒中把它们昇举到井口地面上来。这种力，就叫做靜水压力或压头。当石油中不含气体及其它能量时，单靠这种力的作用把石油从井底昇举到地面上来，就称为依靠靜水压头噴油。其作用情况如图1所示。

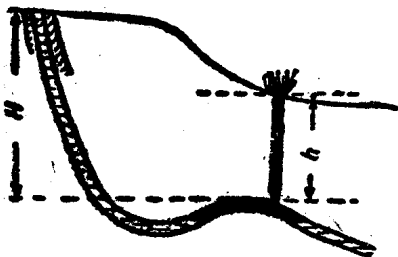


图1 依靠靜水压头的自噴

在这种力的作用下，当石油在井内稳定流动的时候，也就是说当从井中采出多少石油，地层便流出和供給多少石油的时候，地层中石油流出后所余下的孔隙将被边水或底水所佔据，油、水接触面逐漸向

油井的方向移动，並且只要地面水不断补充进去，地层中的压力

和油井的生产能力基本上是不变的。

在这种情况下，自噴井自噴的唯一条件是它的井底压力大于井内液柱压力。在实际噴油的情况下，自噴井的井底压力可用下列公式表示：

$$P_{3a6} = \frac{H\gamma}{10} + P_{\text{всг}} + P_{\text{тр}}, \quad (\text{I}-1)$$

也就是說，井底压力应等于井中油柱的压力  $\left(\frac{H\gamma}{10}\right)$ 、井口必須控制的回压  $(P_{\text{всг}})$  和克服石油从井底流到井口过程中与管壁所产生的摩擦力  $P_{\text{тр}}$  的总和。

式中  $H$ ——井深，米；  $\gamma$ ——石油的比重。

在上式中，右端的前兩項是很容易計算和掌握的，而第三項，即克服摩擦所消耗的压力  $P_{\text{тр}}$ ，要根据井中石油上昇的条件來計算。

如果我們以  $Q$  表示液体的日产量（吨），那么液体在油管中流动的速度  $C$ （米/秒），就可以从简单的公式  $C = \frac{Q}{A}$  的关系求出来。式中  $A$  是管子的橫截面积。將管子面积用直径表示並代入单位换算的数值后，得出下式：

$$C = \frac{4Q}{86400 \times \gamma \times \pi \times d^2} = \frac{Q}{21600 \times \gamma \times \pi \times d^2}, \quad (\text{I}-2)$$

式中  $\gamma$ ——液体比重，

$d$ ——管子直径，米。

按照流体力学的公式，克服摩擦所消耗的压力  $P_{\text{тр}}$  可用下式算出：

$$P_{\text{тр}} = \lambda \frac{HC^3}{d \cdot 2g} \times \frac{\gamma}{10},$$

式中  $\lambda$ ——摩擦阻力系数；



$g$ ——重力加速度，米/秒<sup>2</sup>；

其余同前。

將 (I-2) 式中的  $C$  值代入並整理后得：

$$P_{TP} = \lambda \frac{HQ^2}{9.32 \times 10^9 \times \pi^2 \times g \times d^5} \quad (I-3)$$

于是，可以得出油井在稳定条件下工作时，其井底压力的完整公式为：

$$P_{3a6} = \frac{H\gamma}{10} + P_{ycr} + \lambda \frac{HQ^2}{9.32 \times 10^9 \times \pi^2 \times g \times d^5} \quad (I-4)$$

显然，从上式可以看出，当井口沒有回压时，也就是說讓井口压力  $P_{ycr} = 0$  时，井底压力  $P_{3a6}$  为最小，这时井底产生的压力差为最大。因此，依靠靜水压头自噴的油井，在这时可以得到最大的产量。

从 (I-4) 算出的这个井底压力，当  $P_{ycr} = 0$  时，油井是依靠靜水压头作用尚能自噴的最小压力。从而我們得到油井依靠靜水压头自噴的条件公式为：

$$P_{3a6} \geq \frac{H\gamma}{10} + \lambda \frac{H \cdot Q^2}{9.32 \times 10^9 \times \pi^2 \times g \times d^5} \quad (I-5)$$

这就是說，在靜水压头作用下，只有当油井的井底压力大于或者最低限度等于井中油柱的压力，和为克服液体从井底流向井口时与管壁所产生的摩擦力的总和时，油井才能自噴。

这就是在純靜水压头作用下，决定油井能否自噴的条件。

## 第 2 节 依靠气体膨胀的自噴

我們都知道，像上一节所講的，石油中完全不含气体的情况是很少的。几乎所有的石油都含有气体，只是含气量的多少不同而已。在井底压力高于饱和压力的情况下，气体在井底全溶于油

中；井底压力低于饱和压力时，则一部份气体呈自由状态存在；当饱和压力小于井底压力而高于井口压力时，气体在井身某一高度处从油中分离出来，而且在上升的过程中膨胀，推动石油在油管中上升。

石油中的气体因膨胀而产生的这种向上推举的作用，被称为气体的昇举力。假若我们不考虑气体本身的重量的话，那么，这种昇举的力量就等于气体所昇举的石油的重量。在这种情况下，与气体相接触的油面就是昇举力的作用点。气体的昇举力作用于液体的方式有两种，即直接作用于液体和气体与液体摩擦。

油气混合物在管子中从井底向井口流动的状态，决定于混合物中气体和液体的体积比值，以及混合物运动的平均速度和管子的直径。在垂直管道中的实验过程中发现：

1. 混合物中的气体含量较少时，气体在液体中呈气泡存在；
2. 气体较多时，则混合物便会呈现相互交替的油、气柱，并且在油柱中夹有气泡，在气柱中夹有液点。

3. 当气体特别多时，液体沿着管壁四週，而气体在液体的中间同时上升，且气体中间有液点。

观察而得的混合物的这种流动情况，对我们来说，是相当重要的。不难想像：为了使油、气混合物能沿着垂直的油管上升，那么，就必须根据混合物的这种流动情况，在垂直油管的底部管鞋和上部管口之间，造成一定的压力差。根据长期观察和实验的结果发现：通常，这种压力差的大小，决定于驱使混合物上升的有效功和许多损失的大小。这些损失是：

1. 气体和液体在油管内与管壁产生摩擦而造成的摩擦损失  $h_{\text{TP}}$ ；

2. 气体和液体在油管内相互流动时，由于速度的不同而造成的“滑脱”损失  $h_{\text{CK}}$ 。这主要是因为气体的流速快，它可以穿过液体而向上滑动。所以通常我们也把这种损失称为滑动损

失、相对流动损失或者是漏失损失等；

3. 混合物流入管鞋时，由于速度发生变化而引起的损失；

4. 油、气混合物在油管内流动过程中，越接近井口压力越小，气体越加膨胀，这样，就使油、气混合物在油管中的流速随着上升的高度越来越大，因而引起了加速度的损失。

长期的实践证明，后两种损失比起前两种来，为数很微，可以略而不计。这样，我们在用液柱的米数来表示这种管鞋和管口之间的压力差时，便有如下的形式：

$$h = h_{\text{пол}} + h_{\text{ск}} + h_{\text{тр}}, \quad (\text{I}-6)$$

式中  $h_{\text{пол}}$ ——有效功的损失；

$h_{\text{ск}}$ ——滑脱损失；

$h_{\text{тр}}$ ——摩擦损失。

这就是依靠膨胀气体能量自喷的关系式。

这个关系式告诉我们，当井口压力控制到最小数值时，只有当从地层中出来的膨胀气体所产生的压力差（或压头）大于或者等于作有效功所需的压头  $h_{\text{пол}}$  和气体相对流动损失的压头  $h_{\text{ск}}$ ，以及克服摩擦力所需的压头  $h_{\text{тр}}$  三者的总和时，油井才能发生自喷。即：

$$h \geq h_{\text{пол}} + h_{\text{ск}} + h_{\text{тр}}. \quad (\text{I}-7)$$

这就是在完全依靠膨胀气体作用下，决定油井能否自喷的条件。

### 第3节 一般情况下的自喷

上面所述，都是依据石油受单一动力的作用而产生的自喷情况。在实际中，几乎99%以上的自喷油井都是依靠油藏中各种能量的综合作用而自喷的。例如我国老君庙油田，原属水压驱动，但石油中却含有大量的自由的和溶解的气体，这些气体在油井生产过程中同样起了举升石油的作用。其它如重力作用、岩石的弹性作用等，在油井生产中也都参与作功。因此，仅根据上述两

种情况来论述油井自喷的条件，是非常不足的。

大家都知道，地层中的油或多或少都含有溶解气。当油在地层中和油井中流动时，这些气体随着压力的降低不断从油中逸出，并在某种压力下具有一定的储能。除了溶解气外，和油一块进到井中的还可能有自由气，这些自由气来自油层，有时来自油层中的个别气夹层。处于一定压力下的这些自由气体，同样也具有一定的储能。

在某些情况下，气体的这种能量可能将石油从井中举到地面，亦即使油井自喷。

如果不考虑气体的溶解性，那么随同每吨液体从地层进到井底的能量可表示为：

$$W_{\text{заб}} = 10^4 \left( \frac{P_{\text{заб}} - 1}{\gamma} + G_0 \ln P_{\text{заб}} \right), \quad (\text{I}-8)$$

式中  $G_0$  —— 折算至标准状况下的油气比，米<sup>3</sup>/吨；

$P_{\text{заб}}$  —— 井底压力，绝对大气压。

与上相同，带到井口以外的能量为：

$$W_{\text{уст}} = 10^4 \left( \frac{P_{\text{уст}} - 1}{\gamma} + G_0 \ln P_{\text{уст}} \right), \quad (\text{I}-9)$$

式中  $P_{\text{уст}}$  —— 井口压力，绝对大气压。

这样，来自地层并在井中举液体的单位能量为：

$$\begin{aligned} W_{\text{ностр}} &= W_{\text{заб}} - W_{\text{уст}} \\ &= 10^4 \left( \frac{P_{\text{заб}} - P_{\text{уст}}}{\gamma} + G_0 \ln \frac{P_{\text{заб}}}{P_{\text{уст}}} \right), \quad (\text{I}-10) \end{aligned}$$

在某种情况下，油层中很可能完全没有气体进入井底，而又没有足够的静水压头举石油，此时，就必须利用从外界压入的气体，作为举石油的动力。如果说，在这种情况下，折算到大气压下的压力，气体的单位流量以  $R_0$ （米<sup>3</sup>/吨）表示，而压入气体时的气体压力以  $P_1$ （绝对大气压力）表示，那么在这种情况下

下，昇举每吨液体所消耗的能量，就可以表示成：

$$W_{\text{затр}} = 10^4 \left( \frac{P_{\text{заб}} - P_{\text{уст}}}{\gamma} + R_0 \ln \frac{P_1}{P_{\text{уст}}} \right). \quad (\text{I-11})$$

显然，只有在来自地层本身的能量 ( $W_{\text{пост}}$ ) 大于或者最低限度等于把气体压入井中来昇举液体所需要消耗的能量时 ( $W_{\text{зат}}$ )，即

$$W_{\text{пост}} \geq W_{\text{затр}}$$

或者代入有关数据，而写成的不等式

$$G_0 \ln \frac{P_{\text{заб}}}{P_{\text{уст}}} \geq R_0 \ln \frac{P_1}{P_{\text{уст}}} \quad (\text{I-12})$$

成立时，油井才能自喷。

然而在实际工作中，在单位时间内昇举一定量液体时，其单位气体流量  $R_0$  的大小决定于油管的尺寸——直径  $d$  和长度  $L$ ，以及油管管鞋  $P_{\text{заб}}$  和管口的压力  $P_{\text{уст}}$  的数值。为了明显地表示有关数据与油井自喷条件之间的关系，把上述不等式 (I-12) 改写成：

$$G_0 \ln \frac{P_{\text{заб}}}{P_{\text{уст}}} \geq R_0 (LdP_1 \cdot P_{\text{уст}}) \ln \frac{P_1}{P_{\text{уст}}}. \quad (\text{I-13})$$

这个不等式，就是我们要经常碰到和随时应用的在不考虑石油中气体的溶解性的情况下，决定一般油井能否自喷的条件不等式。

实际上，在一定的压力下，气体是能够溶解在石油中的。在实际的生产过程中，上面所谈到的、以游离状态自地层中流入井中的自由气体中，有一部分就是溶解在石油中的溶解气体。在较大的井底压力下，这部份气体只有在井筒的某一高度或者在井口附近才能从石油中分离出来。显然它们并没有全部地参加昇举液体的工作。这种情况，特别在那些油气比值比较小，或者是

含水的油井中（因为它还要异举比重较大的水），那是绝对不可忽视的。因此，用油气比数据求算井底压力或者有关的数值，显然是错误的，而必须减去其中不作功的气体数量，采用剩下的、参加作功的那部分油气比。这个油气比，通常被称为有效油气比，以 $G_{\text{эф}}$ 表示：

$$G_{\text{эф}} = \left[ G_0 - \frac{\alpha}{\gamma} \left( \frac{P_1 + P_{\text{вср}}}{2} - 1 \right) \right] \left( \frac{n_{\text{в}}}{100} \right), \quad (\text{I-14})$$

式中  $n_{\text{в}}$ ——液体中含水量的百分比。

如果油井在最合适的制度下工作时，在理论上油气比（单位气体流量） $R_0$ ，可表示为如下的形式：

$$R_0 = \frac{0.0077 \times L [\gamma L - 10 (P_1 - P_{\text{вср}})]}{d^{0.5} (P_1 - P_{\text{вср}}) \lg \frac{P_1}{P_{\text{вср}}}} \quad (\text{I-15})$$

这样，在一般情况下决定油井能否自喷的、最完善的条件不等式（I-13），应该表示为 $G_{\text{эф}} \geq R_0$ ，即：

$$\begin{aligned} & \left[ G_0 - \frac{\alpha}{\gamma} \left( \frac{P_1 + P_{\text{вср}}}{2} - 1 \right) \right] \times \left( 1 - \frac{n_{\text{в}}}{100} \right) \\ & \geq \frac{0.0077 \times L [\gamma \cdot L - 10 (P_1 - P_{\text{вср}})]}{d^{0.5} (P_1 - P_{\text{вср}}) \lg \frac{P_1}{P_{\text{вср}}}} \end{aligned} \quad (\text{I-16})$$

式中  $\alpha$ ——气体的溶解系数；  
 $\gamma$ ——原油的相对比重；  
 $n_{\text{в}}$ ——水对全部液体的百分比；  
 $L$ ——油管下入的深度，米；  
 其它符号与前边的相同。

这就是在一般情况下决定油井能否自喷的、最常用的和最

完善的条件不等式。

利用这个不等式，既可以根据压力的变化确定自喷时所可能允许的井口油咀的变化范围（最大多少，特别是最小不能小于多少），也可以根据公式推算出产水百分比升高到多少时，油井便会停喷。

## 第二章 自喷井油管的选择

### 第1节 喷油和喷油管

从决定油井能否自喷的条件不等式(I—13)和(I—16)中，很明显地可以看出：只有当油气比与井底压力、井口压力、以及喷油管的长度和直径等一系列因素之间为某一比例关系时，也就是说，只有当气体与液体从地层中流出的条件和喷油管工作的条件相一致时，油井才能自喷。

为了更好地说明喷油和喷油管之间的关系，建立起这方面的明确概念，在这里我们从如下几个方面叙述。

#### 依靠静水压头自喷时

前面我们谈到了依靠静水压头自喷的油井在工作条件是稳定状态时，其井底压力的求算公式〔见公式(I—14)〕，从这个公式中便可求得在这种情况下井底和井口之间的压力差：

$$P_{\text{заб}} - P_{\text{уст}} = \frac{H\gamma}{10} + \lambda \frac{Q^2 \cdot H}{9.32 \times 10^9 \times \pi^2 \times \gamma \times g \times d^5}.$$

(II—1)

而对于仅仅依靠静水压头的作用，昇举液体时所需的功，可表示为：

$$W_{\text{затр}} = 10^4 \left( \frac{P_{\text{заб}} - P_{\text{уст}}}{\gamma} \right), \quad (\text{II}-2)$$

將 (II-2) 代入 (II-1) 中, 便得:

$$W_{\text{затр}} = 1000H + \lambda \frac{HQ^2}{9.32 \times 10^5 \times \tau^2 \times \gamma^2 \times g \times d^5}. \quad (\text{II}-3)$$

通常我們把昇举单位液体所需的有效功  $W_{\text{пол}}$  表示为:

$$W_{\text{пол}} = 1000H. \quad (\text{II}-4)$$

于是我們从昇举液体的有效系数 (該有效系数就等于有效功与所需功的比值, 表示所需功的利用程度) 来估計依靠靜水压头的作用昇举液体的效果时, 其关系为:

$$\eta = \frac{W_{\text{пол}}(\text{有效功})}{W_{\text{затр}}(\text{所需功})}. \quad (\text{II}-5)$$

把公式 (II-3) 和 (II-4) 中的数值代入之后, 則得其有效系数 (也就是能量的利用程度)  $\eta$  的数值为:

$$\eta = \frac{1000}{1000 + \lambda \frac{Q^2}{9.32 \times 10^5 \tau^2 \gamma^2 d^5 g}},$$

(II-6)

从这个公式我們不难得出結論: 在这种作用力的驅动下, 昇举液体的有效系数不决定于井深, 而决定于流体的体积流量  $Q$  和噴油管的直径  $d$  的大小。很明显, 在这里, 噴油管的直径  $d$  愈大, 則有效的昇举系数就越大, 也就是說能量的利用程度也就越高。

依靠膨脹气体自噴时

前面已經談过, 从地层中出来的膨脹气体参与自噴作功时, 必需滿足于不等式——見第一章中的不等式 (I-6):

$$h = h_{\text{пол}} + h_{\text{ск}} + h_{\text{тр}}.$$



亦即它所产生的、用液柱米数表示的压力差，要大于或者最低限度等于作有效功所需的压头、气体相对运动所需的压头和克服摩擦力所需的压头的总和时，油井才能自喷。

但实际上，由于混合物的运动相当复杂，要从理论上去计算这些摩擦损失和相对运动的损失的数据，是相当困难的。因此，在这里，我们仅依据苏联国立石油研究所A.П.克雷洛夫的实验，把有关的这些损失和一些相应的因素，作如下的介绍。

图2所示，为用直径 $d=2\frac{1}{2}$ 吋的喷油管，流量 $q=2.4$ 升/秒，在一米管长上的 $h$ 以及 $h_{ck}+h_{пол}$ 和 $h_{TP}$ 等与气体体积流量 $V$ 之间的关系曲线。

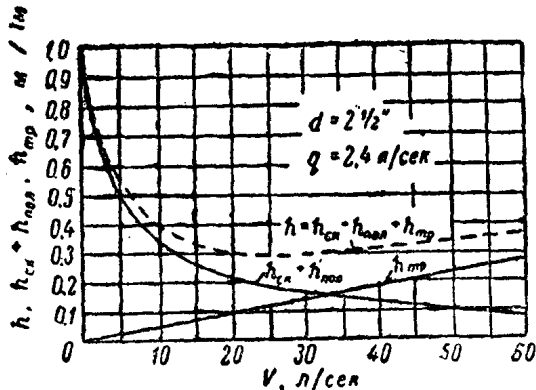


图2 管径和液体产量不变时， $V$ 和 $h_{пол}+h_{ck}+h_{TP}$ 、 $h$ 的关系曲线

不难看出，当 $V=0$ 时， $h_{пол}+h_{ck}=1$ ；而当 $V$ 等于无限大时，则 $h_{пол}+h_{ck}=0$ 。在这里的 $h_{пол}$ 为一不变的常值，图2中未示出。这也就是说，当 $d$ 和 $q$ 不变时，流过该管子的气体 $V$ 愈多，则 $h_{пол}+h_{ck}$ 的值就愈小；相反，摩擦损失却随着气量的增加，而直线的上升。当 $V=0$ 时，因为只存在着液体的流动，则摩擦损失便不存在了，即等于零。

同样的，使气体的流量 $V$ 和液体的流量 $q$ 保持不变，在不同直径的管内作实验，我们又发现了这些损失之间的关系如图3。图3是在1米长的管段上试验所得的 $h$ ， $h_{пол}+h_{ck}$ 和 $h_{TP}$ 与管径 $d$ 之