

第6章 孔口、管嘴出流与堰流

孔口 (**orifice**) 和管嘴 (**nozzle**) 出流属于有压流动，堰 (**weir**) 流则属于无压流动。

三者具有的共同点是水头损失中，与局部水头损失相比，沿程水头损失可以忽略不计。

6.1 孔口出流

容器壁上开孔，水经该孔流出的水力现象称孔口出流。

孔口出流又有大、小孔口之分。

小孔口指孔口形心位于水面之下十倍于孔径深度的孔口，即 $H > 10D$ ，或 $D \leq H/10$ ，如此可认为孔口断面上个点的水头相等。

当 $D > H/10$ ，孔口断面上个点的水头不相等，为大孔口。

(1) 小孔口自由出流

设一孔口出流，列伯努利方程

$$H + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = \frac{p_c}{\rho g} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + h_m$$

式中

$$p_0 = p_c \quad h_m = \zeta_0 \frac{v_c^2}{2g}$$

再令

$$H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = H_0 \quad \text{为作用水头,}$$

于是有

$$H_0 = (\alpha_c + \zeta_0) \frac{v_c^2}{2g}$$

或

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \zeta_0}} \sqrt{2gH_0} = \varphi \sqrt{2gH_0}$$

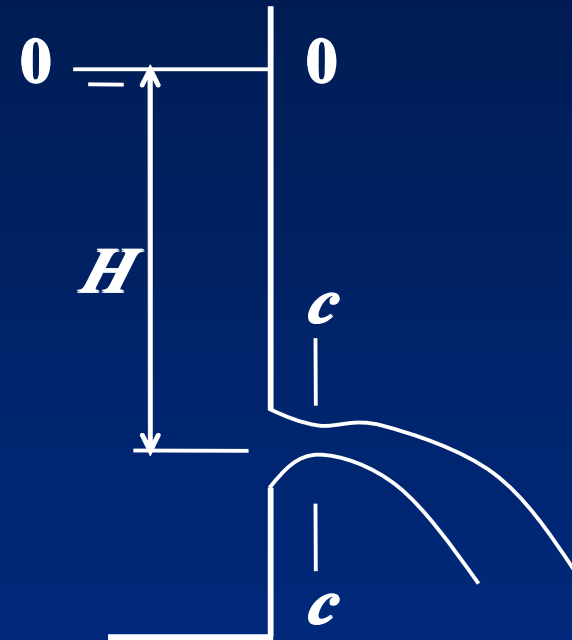
$$Q = v_c A_c = \varepsilon \varphi_0 A \sqrt{2gH_0} = \mu_0 A \sqrt{2gH_0}$$

式中

φ_0 — 孔口流速系数, $\varphi = 0.97$;

ε — 孔口收缩系数, $\varepsilon = 0.64$;

μ_0 — 孔口流量系数, $\mu = \varepsilon \varphi = 0.64 \times 0.97 = 0.62$ 。



(2) 小孔口淹没出流

列两水箱水面伯努利方程

$$H_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = H_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_m$$

式中

$$h_m = \zeta_0 \frac{v_c^2}{2g} + \zeta_{se} \frac{v_c^2}{2g}$$

再令

$$H_0 = \left(H_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(H_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right)$$

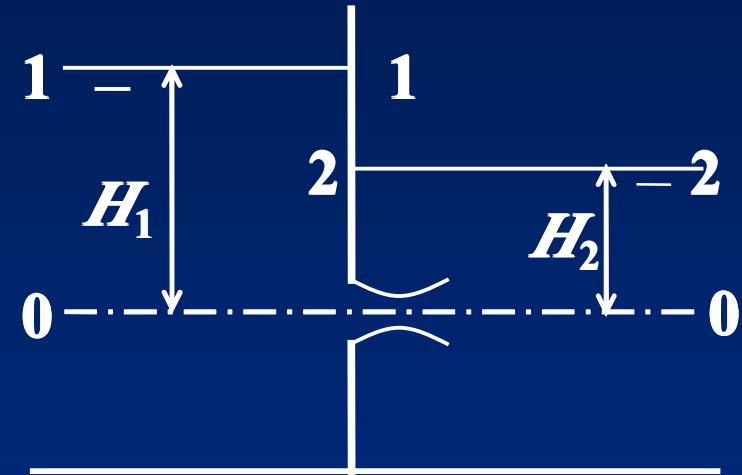
为作用水头，

则

$$Q = v_c A_c = \varepsilon \varphi_0 A \sqrt{2gH_0} = \mu_0 A \sqrt{2gH_0}$$

式中

ζ_{se} — 水流自收缩至扩大局部阻力系数；
其他符号同前。



(3) 大孔口出流

列两水箱水面伯努利方程

$$dQ = \mu b dh \sqrt{2gh}$$

$$Q = \int_{H_a}^{H_L} dq = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (H_L^{3/2} - H_a^{3/2})$$

6.1.2 孔口的变水头出流

水箱水位随时间变化的孔口出流称变水头出流。

设一水箱，水面随水从孔口流出而下降。当水面降至距孔口中心为 h 时， dt 时段内流出孔口的体积为

$$dV = Qdt = \mu A \sqrt{2gh} dt$$

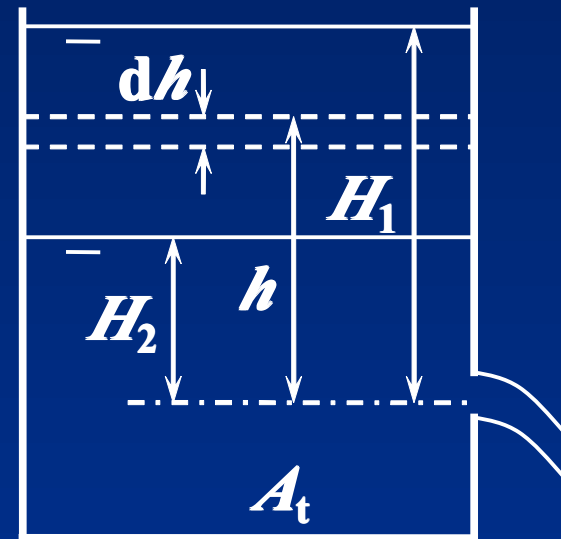
同时水面下降 dh ，截面积为 A_t 的容

器内体积减少为 $dV = -A_t dh$

于是

$$\mu A \sqrt{2gh} dt = -A_t dh$$

积分上式得水位由 H_1 降至 H_2 的时间



$$t = \int_{H_2}^{H_1} - \frac{A_t}{\mu A \sqrt{2g}} \frac{dh}{\sqrt{h}} = \frac{2A_t}{\mu A \sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} \right)$$

若令 $H_2=0$ ，即得容器放空时间为

$$t = \frac{2A_t \sqrt{H_1}}{\mu A \sqrt{2g}} = \frac{2A_t H_1}{\mu A \sqrt{2gH_1}} = \frac{2V}{Q_{\max}}$$

式中 V —容器放空的体积；

Q_{\max} —开始出流的最大流量。

6.2 管嘴出流

6.2.1 圆柱形外管嘴恒定出流

孔口上外接长度 $l = (3-4) D$ 的短管，即圆柱形外管嘴。

设一管嘴出流，列 **0-0** 和 **b-b** 断面伯努利方程

$$H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = \frac{\alpha v^2}{2g} + \zeta_n \frac{v^2}{2g}$$

令

$$H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = H_0$$

为作用水头，于是

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_n}} \sqrt{2gH_0} = \varphi_n \sqrt{2gH_0}$$

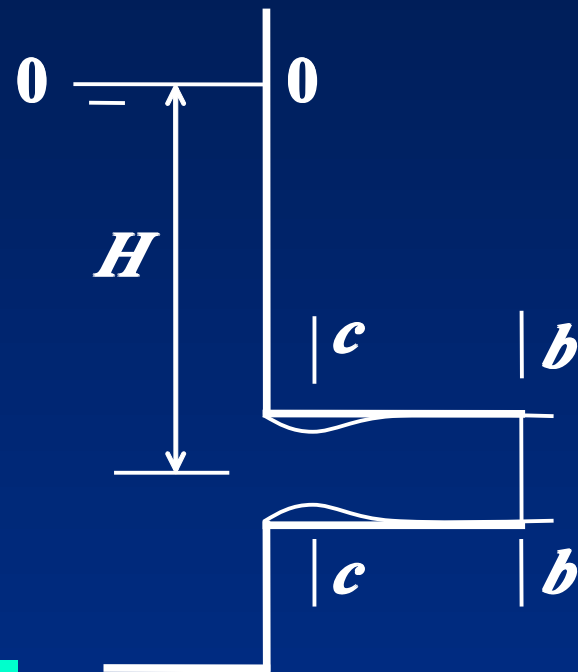
或

$$Q = vA = \varphi_n A \sqrt{2gH_0} = \mu_n A \sqrt{2gH_0}$$

式中 ζ_n —管嘴阻力系数， $\zeta_n = 0.5$ ；

φ_n —管嘴流速系数， $\varphi_n = 0.82$ ；

μ_n —管嘴流量系数， $\mu_n = \varphi_n = 0.82$ 。



孔口与管嘴计算公式具有相同的形式，作用水头相同时，管嘴的流量是孔口流量的**1.32**倍。

$$\frac{Q_n}{Q_o} = \frac{\mu_n A \sqrt{2gH_0}}{\mu_o A \sqrt{2gH_0}} = \frac{\mu_n}{\mu_o} = \frac{0.82}{0.62} = 1.32$$

6.2.2 收缩断面的真空

列 *c-c* 和 *b-b* 断面伯努利方程

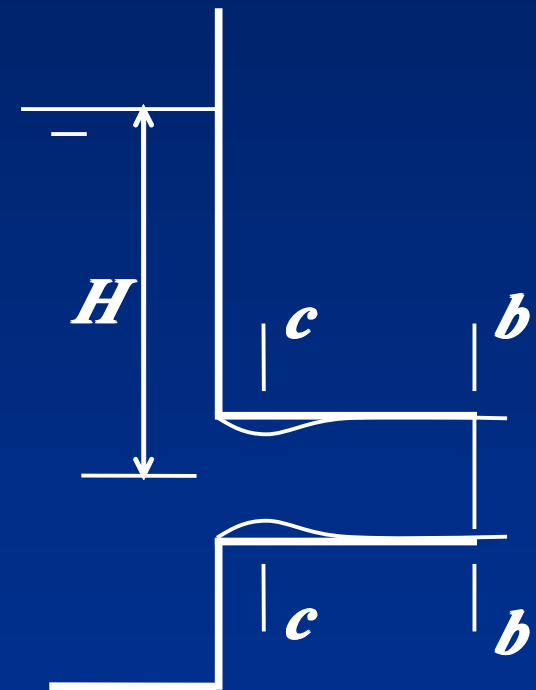
$$\frac{p_c}{\rho g} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + \zeta_{se} \frac{v^2}{2g}$$

根据连续性方程

$$v_c = \frac{A}{A_c} v = \frac{v}{\varepsilon}$$

与圆管扩大局部阻力系数

$$\zeta_{se} = \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2$$



整理伯努利方程式得

$$\frac{p_a - p_c}{\rho g} = \left[\frac{\alpha_c}{\varepsilon^2} - \alpha - \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \right] \frac{v^2}{2g}$$

考虑到 $p_a - p_c = p_v$ 与 $v = \varphi_n \sqrt{2gH_0}$

并将 $\alpha_c = \alpha = 1$, $\varepsilon = 0.64$ 及 $\varphi_n = 0.82$ 代入, 得 $\frac{p_v}{\rho g} = 0.75H_0$

6.2.3 圆柱形外管嘴的正常工作条件

考虑到收缩断面最大真空高度不能超过 7 m, 故最大作用水头不能超过 9 m。另外, 管嘴长度若过短, 无法形成管嘴出流的形式, 过长则要计及沿程水头损失。因此, 圆柱形外管嘴正常工作必须满足:

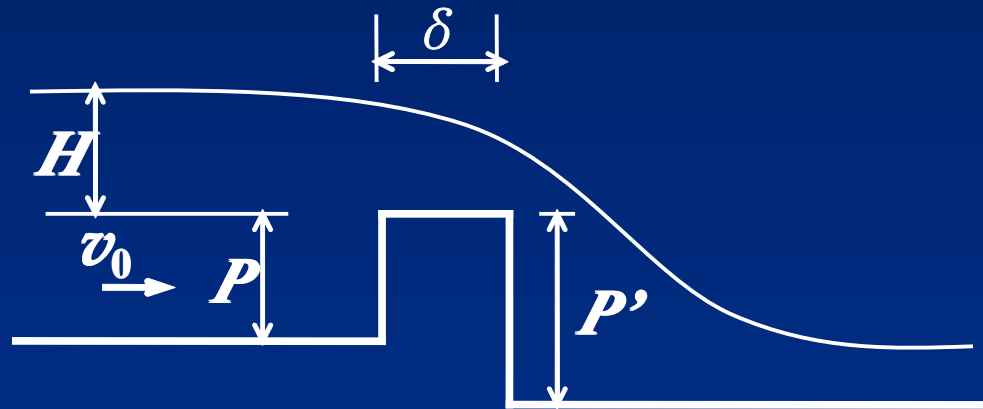
1. 作用水头 $H_0 \leq 9\text{m}$;
2. 管嘴长度 $l = (3 \sim 4)D$ 。

6.3 堰流

6.3.1 堰流及其特征

(1) 堰和堰流

无压缓流中所设置的由顶部溢流的障壁称为堰，水流堰顶溢流的局部水流现象为堰流。



H —堰上水头；

v_0 —行近流速。

δ —堰顶厚度；

P —上游坎高；

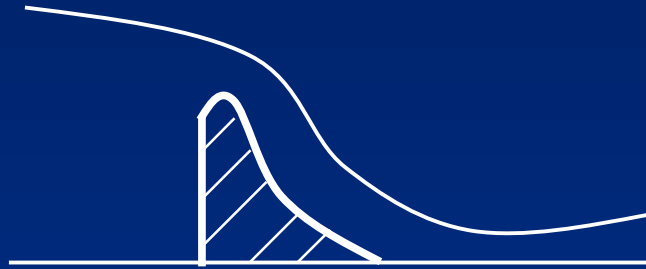
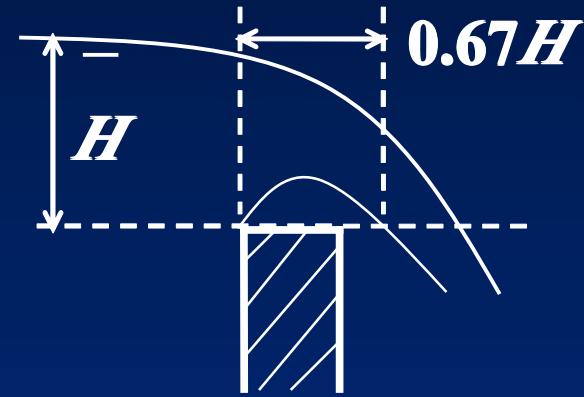
P' —下游坎高。

(1) 堰的分类

按照堰顶厚度与堰上水头的比值范围，堰可分为三类：薄壁堰、实用堰与宽顶堰。

1) 薄壁堰 $\delta/H < 0.67$

由于惯性，水流与堰顶仅一条边线接触，堰顶厚度对水流没有影响。故称薄壁堰。测流量。



2) 实用堰 $0.67 \leq \delta/H < 2.5$

堰顶厚度对水流有影响，水面呈现一次降落。此种类型的堰多见于水利工程。

3) 宽顶堰 $2.5 \leq \delta/H < 10$

堰顶厚度较大，水流过堰时，水流呈现两次跌落。宽顶堰流也代表了诸多水流现象。



若 $\delta/H > 10$ ，则需计及沿程水头损失，为明渠流。

6.3.2 宽顶堰溢流

(1) 基本公式

由于堰顶处过流断面小于上游，故流速大于上游，动能大于上游，势能则小于上游，水面则低于上游。

通常情况下，即下游水深不影响堰顶水流时，堰顶水流为急流状态。

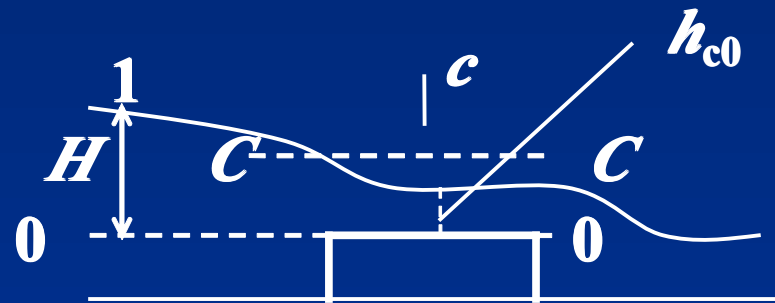
设一宽顶堰，以堰顶为基准面，列上游断面1-1和堰顶断面 $c-c$ 伯努利方程

$$H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = h_{c0} + \frac{\alpha v^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g}$$

式中 $H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = H_0$ 为作用水头。

再令 $h_{c0} = kH_0$ 代入上式得

$$H_0 = kH_0 + (\alpha + \zeta) \frac{v^2}{2g}$$



解出流速

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \sqrt{1 - k} \sqrt{2gH_0} = \varphi \sqrt{1 - k} \sqrt{2gH_0}$$

流量

$$Q = v h_{c_0} b = v k H_0 b = \varphi k \sqrt{1 - k} b \sqrt{2gH_0}^{3/2} = m b \sqrt{2gH_0}^{3/2}$$

式中 m 为流量系数，由经验公式确定。

(2) 淹没的影响

下游水位升高，顶托过堰水流，堰顶水流变为缓流，形成宽顶堰淹没溢流。

淹没形成的必要条件：

$$h_s = h - P > 0$$

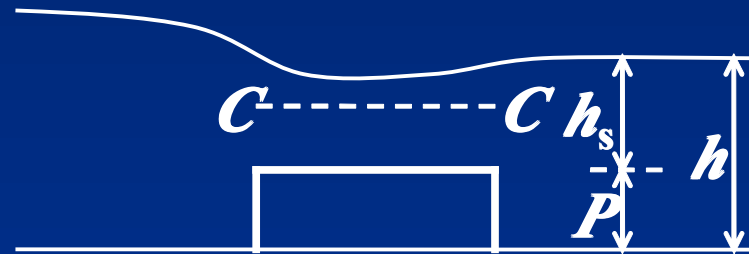
淹没形成的充分条件：

$$h_s = h - P > 0.8H_0$$

淹没时，流量需修正

$$Q = \sigma_s m b \sqrt{2gH_0}^{3/2}$$

式中 σ_s 为淹没系数，查表确定。



(3) 侧收缩影响

堰宽 b 小于渠道宽 B 时，为宽顶堰的侧收缩。侧收缩时，流量亦需修正

$$Q = \varepsilon m b \sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

式中 ε 为侧收缩系数，由经验公式确定。

6.3.3 薄壁堰

根据堰口形状，薄壁堰又分为矩形堰与三角堰。

(1) 矩形薄壁堰

$$Q = m b \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad \text{或} \quad Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2}$$

式中 m_0 为计入行近流速影响的流量系数。

(2) 三角形薄壁堰

$$Q = A H^B$$

式中 A 、 B 为实验确定的系数。

