90° 弯管中瞬变流特性的实验研究

刘　刚　　王树立　　马贵阳

(抚顺石油学院，113001)

提要　本文对水击波在 90° 弯管内部的传播特性进行了测试，得出了弯管中不同部位水击压力的数值及其随流速的变化规律.

关键词　弯管，水击现象，水击波

1. 前言

水击现象是有压管路中的非定常流动. 当管路工作状态突然改变时，流速亦随之改变，从而引起管内压强大幅度波动，产生水击. 严重时可能使管道强烈振动，甚至破裂. 对水击压力的正确预测在泵站和水电站中是一个很重要的实际问题.

水击波在弯曲的管道中传播，由于壁面的反射和管道与流体的干涉作用，将产生复杂的三维的水击波波动过程. 但是，迄今为止，对于管道系统水击问题的研究，通常是将实际的弯曲管道近似地用直管来代替，然后采用现有的一维理论进行计算分析. 尽管有的文献如[1]采用了二维理论进行了计算，但毕竟是在无粘性假设下进行的，不能完全反映真实情况. 而对实际流体进行三维计算，目前还存在着很大困难.

本文取一般等径 90° 弯管作为典型研究单元，对水击波在其内部的传播及流速对水击压力的影响作实验研究，并与用一、二维理论计算的结果[1]作了对比分析.

2. 实验设备及实验方法

图 1 为测试设备及测试流程框图，图 2 为实验所用弯管及测定部位示意图.

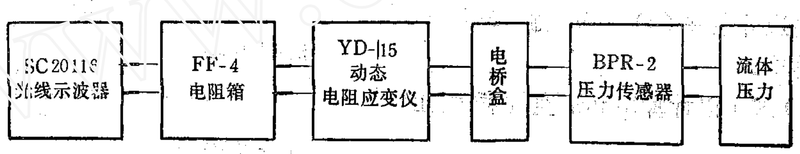


图 1　测试流程图

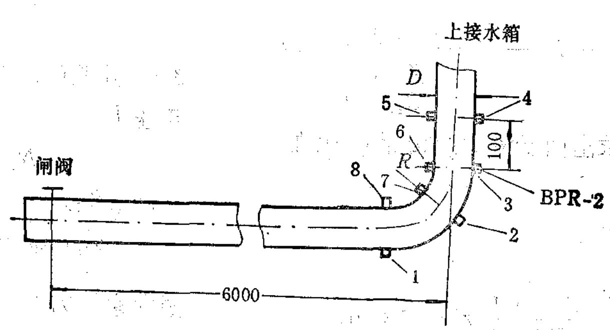


图 2　测定部位示意图

弯管几何尺寸为 $R/D=2.5$，$D=25.4$mm. 水击波波速为 $a=1314$m/s，水密度 $\rho=1000$ kg/m^3. 弯管上面接稳压水箱，距弯管垂直高度 15m. 下端出口处装有速动闸阀，由闸阀突然关闭来产生水击波，采用 SC20/16 型 16 线光线示波器记录水击波的瞬变过程.

3. 实验结果及分析

3.1　弯管内水击波传播特性

图 3 示出了水击波经过弯管时，各测试部位压力瞬变过渡过程.

当水击波经过弯曲流道时，由于壁面条件的干涉作用，在外侧会产生一系列压缩波，内侧会产生一系列膨胀波，因而出现了图2中2、3点压力明显大于其它各点，6、7点压力又明显减小的情况．弯管下游直管内压力沿同向分布比较均匀，但峰值却比上游有所减小．由于弯曲壁面的作用，使水击波的瞬变过程变得非常复杂，弯管的反射，干涉破坏了正常波面的形状和波动周期的规律性，并加速了水击压力的衰减．

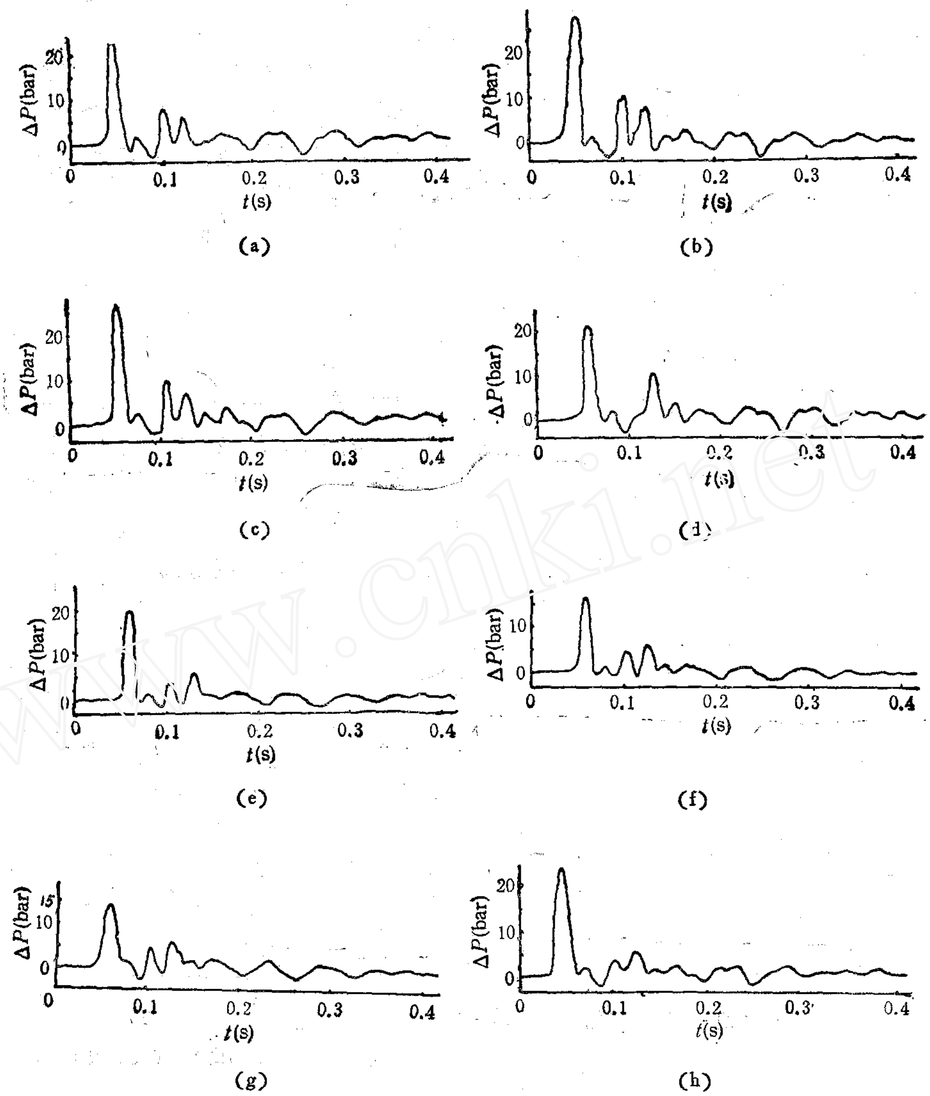


图3　水击波波形图

文献[1]对90°弯管作了二维假设(图4)，并认为流体非粘性，对水击波在其内部的传播过程进行了数值计算，其结果见图5．实验结果与文献[1]相比较，可以发现两者都是在弯管中间截面外侧出现最大水击压力．计算结果在弯管下游出现了高于上游的压力峰值，实验结果是下游压力比上游小．图5中虚线表示的是用一维理论计算的结果．显而易见，用一维理论对三维弯管进行计算与实际情况相差很大．

从实验结果和以上分析中可得出如下结论：

(1) 同样条件下，弯管中出现高于直管的水击压力(比上游大17%)．

(2) 弯管内侧与外侧压力相差较大(外侧

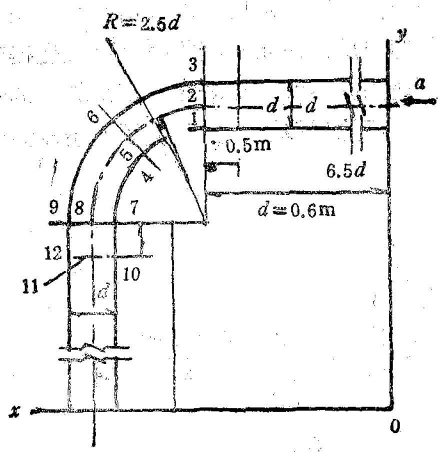
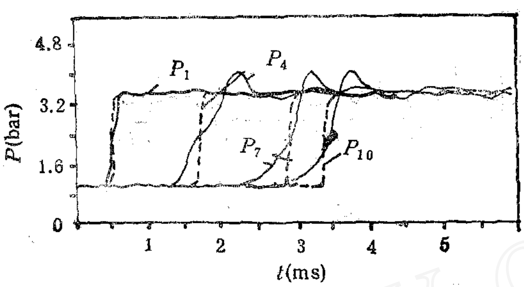
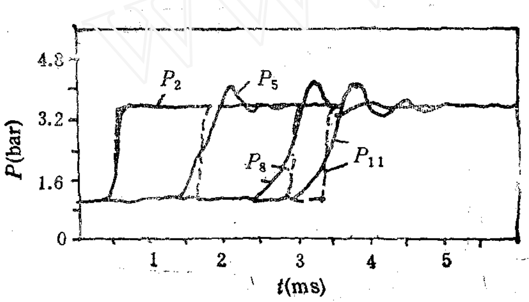


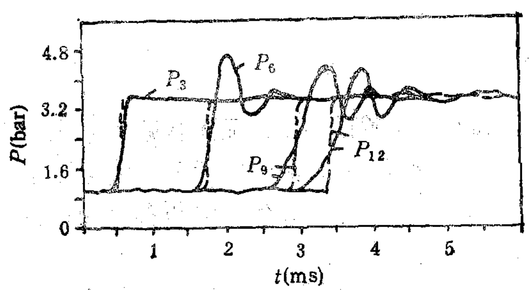
图 4 二维 90° 弯管



(a) 弯管内侧边壁



(b) 弯管中心线



(c) 弯管外侧边壁

图 5 压力波传播的瞬态压力过程

——二维理论计算结果 -----一维理论计算结果

比内侧大 49%)。

(3) 弯管下游较上游压力有所减小(减小 13%)。

(4) 水击压力衰减加快。

(5) 最大水击压力发生部位与二维理论计算结果一致。

3.2 各实验点最大压力与流速的关系

图 6 示出了各实验点压力随流速的变化关系。可以看出,各点压力都与流速呈线性关系,但斜率却不尽相同。

若 K 表示斜率,则

$$K_1 \doteq K_4 \doteq K_5 \doteq K_8 = 1.35$$

$$K_6 = K_7 = 0.84$$

$$K_2 = K_3 = 1.49$$

也就是说,在直管段区(1,8,4,5 点)斜率基本相等,为 1.35。在弯管区外侧(2、3 点)斜率为 1.49。而弯管区内侧(6,7 点)斜率最小为 0.84。这说明弯管外侧压力随流速的变化幅度较直管区大,内侧则相反。

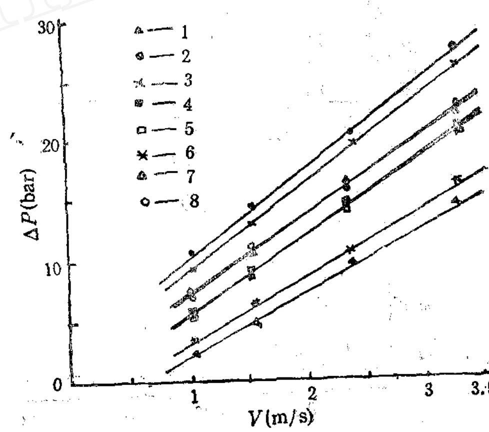


图 6 压力与流速的关系

4. 结束语

经过弯管的水击波将在弯管外侧产生高于直管的水击压力,在内侧将产生低于直管的水击压力。弯管下游的压力比上游小,外侧压力随流速的变化斜率大于直管,而内侧的则比直管的小。由于内外壁有压力差,因此,除了压力波在改变方向时对弯管产生的作用力外,还必然对弯管产生一个附加作用力,这个力在管路的设计时应予以考虑。

参 考 文 献

[1] 刘光临，压力波在二维弯管中的传播，力学学报，21,5 (1989).

[2] 王树人，水击理论与计算，清华大学出版社(1981).

(本文于1991年6月收到修改稿)

相对论性万有 D'Alembert 原理的统一形式

李元成　方建会

(甘肃张掖师专，734000)

提要　本文给出相对论性万有 D'Alembert 原理的统一形式，它包括了现有相对论的各种形式，非相对论的各种形式只是本文的特例.

关键词　相对论，万有 D'Alembert 原理

文献[1]给出了万有 D'Alembert 原理在非相对论情况的统一形式．本文把这种形式推广到相对论的情况，给出相对论性万有 D'Alembert 原理的统一形式，它具有更广泛的适用性，由此形式可导出各类高阶运动微分方程的相对论形式.

1. 相对论性万有 D'Alembert 原理的普遍形式

设力学系统由N个质点 $P_i(i=1,2,\cdots,N)$构成，P_i 的矢径为 $\boldsymbol{r}_i$，质量为 m_i，所受的合力为 $\boldsymbol{F}_i$，则万有 D'Alembert 原理可写成[2]

$$\left.\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{N}(-m_i\ddot{\boldsymbol{r}}_i+\boldsymbol{F}_i)\cdot\delta\overset{(m)}{\boldsymbol{r}_i}=0\\&\delta t=0,\delta\boldsymbol{r}_i=\delta\dot{\boldsymbol{r}}_i=\delta\ddot{\boldsymbol{r}}_i=\cdots\\&\quad=\delta\overset{(m-1)}{\boldsymbol{r}_i}=0,\delta\overset{(m)}{\boldsymbol{r}_i}\neq0\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

在相对论情况下(1)可改写成

$$\sum_{i=1}^{N}\left[-\frac{d}{dt}(m_i\dot{\boldsymbol{r}}_i)+\boldsymbol{F}_i\right]\cdot\delta\overset{(m)}{\boldsymbol{r}_i}=0\tag{2}$$

其中 $m_i=m_{0i}/\sqrt{1-\dot{\boldsymbol{r}}_i^2/c^2}$，$m_{0i}$ 为常量．称(2)为相对论性万有 D'Alembert 原理.

设该力学系统可用 n 个广义坐标 $q_s(s=1,2,\cdots n)$ 描述，即 $\boldsymbol{r}_i=\boldsymbol{r}_i(q_s,t)$

则

$$\delta\overset{(m)}{\boldsymbol{r}_i}=\sum_{s=1}^{n}\frac{\partial\overset{(m)}{\boldsymbol{r}_i}}{\partial\overset{(m)}{q_s}}\delta\overset{(m)}{q_s}=\sum_{s=1}^{n}\frac{\partial\boldsymbol{r}_i}{\partial q_s}\delta\overset{(m)}{q_s}\tag{3}$$

将(3)代入(2)得

$$\sum_{s=1}^{n}\left[-\sum_{i=1}^{N}\frac{d}{dt}(m_i\dot{\boldsymbol{r}}_i)\cdot\frac{\partial\boldsymbol{r}_i}{\partial q_s}+Q_s\right]\delta\overset{(m)}{q_s}=0\tag{4}$$

其中

$$Q_s=\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{F}_i\cdot\frac{\partial\boldsymbol{r}_i}{\partial q_s}\tag{5}$$

引入相对论性广义加速度能[3]

$$S^*=\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{2}m_i\left[\ddot{\boldsymbol{r}}_i^2+\frac{(\dot{\boldsymbol{r}}_i\cdot\ddot{\boldsymbol{r}}_i)^2}{c^2-\dot{\boldsymbol{r}}_i^2}\right]\tag{6}$$

和相对论性广义动能函数[4]

$$T^*=\sum_{i=1}^{N}m_{0i}c^2(1-\sqrt{1-\dot{\boldsymbol{r}}_i^2/c^2})\tag{7}$$

则 S^* 和 T^* 对时间 t 的m阶导数分别为

$$\overset{(m)}{S^*}=\sum_{i=1}^{N}m_i\ddot{\boldsymbol{r}}_i\cdot\overset{(m+2)}{\boldsymbol{r}_i}+\sum_{i=1}^{N}\dot{m}_i\dot{\boldsymbol{r}}_i\cdot\overset{(m+2)}{\boldsymbol{r}_i}+\cdots\tag{8}$$

$$\overset{(m)}{T^*}=\sum_{i=1}^{N}m_i\dot{\boldsymbol{r}}_i\cdot\overset{(m+1)}{\boldsymbol{r}_i}+m\sum_{i=1}^{N}m_i\ddot{\boldsymbol{r}}_i\cdot\overset{(m)}{\boldsymbol{r}_i}+m\sum_{i=1}^{N}\dot{m}_i\dot{\boldsymbol{r}}_i\cdot\overset{(m)}{\boldsymbol{r}_i}+\cdots\tag{9}$$

其中在(8)式中未写出之项不含 $\overset{(m+2)}{\boldsymbol{r}_i}$ 项，在(9)式中未写出之项不含 $\overset{(m)}{\boldsymbol{r}_i}$、$\overset{(m+1)}{\boldsymbol{r}_i}$ 项。