

# 排水箱涵气水两相流数值模拟

谢红, 孙潭, 李树平, 毛青

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为降低排水箱涵腐蚀速率, 预防特大排水箱涵因腐蚀造成的安全隐患, 亟需研究排水箱涵腐蚀机理及规律。结合流体动力学数值模拟技术, 利用流体体积模型模拟带有浅水波的气水两相流。设置气、液、箱涵壁面边界条件, 模拟排水箱涵气水两相流, 观察自由液面浅水波, 分析气相和液相流场特征及气相涡流分布。结果表明, 排水箱涵流体动力学数值模拟结果与实测数据、箱涵腐蚀理论一致。排水箱涵流体动力学数值模拟技术可为降低排水箱涵腐蚀速率提供数据支持。

**关键词:** 排水箱涵; 腐蚀机理; 计算流体动力学; 气水两相流

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0082-04

## Numerical Simulation of Open Channel Flow in Sewer Culvert

XIE Hong, SUN Tan, LI Shu-ping, MAO Qing

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To reduce the risks to the drainage system, it is urgent to study the corrosion mechanism of sewer culvert. In combination with computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation technology, the volume of fluid (VOF) method was used to simulate an open channel flow with shallow water waves. The experiment set the boundary conditions of gas, liquid, and box culvert walls, simulated the gas-water two-phase flow in the sewer culvert, observed the shallow water waves at the free liquid surface, and analyzed the characteristics of gas and liquid flow fields as well as the distribution of gas vortices. It showed that the CFD simulation results were in consistent with the experimental data and the corrosion mechanism of sewer culvert. Therefore, the CFD simulation of the sewer culvert could provide simulated data for reducing the corrosion rate of sewer culvert.

**Key words:** sewer culvert; corrosion mechanism; computational fluid dynamics; open channel flow

国内许多城市的特大排水箱涵(直径>1 500 mm)的管龄普遍已达10~30年,接近或进入设计年限中期,在多种因素作用下,箱涵内部逐渐出现了各种结构性缺陷和功能性缺陷,严重影响了箱涵的运营安全。研发腐蚀防控新技术,降低腐蚀成本,既能带来很大的经济效益,也能预防特大排水箱涵因腐蚀造成的安全隐患。

用计算流体动力学(CFD)模型替代排水系统构筑物的物理模型,获取模拟数据,并与实测数据作对比,验证数值模拟的可靠性,可用于指导工程实践。

### 1 排水箱涵气水两相流模拟

#### 1.1 排水箱涵模型构建

在笛卡尔坐标系下建立箱涵模型,箱涵宽为2.7 m、高为2.1 m、长为12.0 m;检查井井筒高为

2.0 m、直径为0.7 m。箱涵断面左下角为原点, $x$ 轴与箱涵断面底边平行, $y$ 轴与箱涵断面垂直边平行, $z$ 轴与箱涵长边平行。箱涵充满度为0.5,即液相入口高为1.05 m,液相入口上方为气相入口,高为1.05 m。箱涵模型坡度假设为零,但在后续计算中,通过设置 $z$ 轴重力分量,可等效地达到设置箱涵坡度的目的。为使到达箱涵中后部的紊流充分发展,检查井位于整个箱涵长度的后1/3处。

使用多块网格生成技术,将排水箱涵模型划分成多块结构。划分箱涵模型网格时,需对箱涵壁面、水气交界面等处加密网格。检查网格模型的网格质量,所有网格质量均在 $[0.65, 1.0]$ ,达到CFD仿真计算网格质量要求。通过无关性检验<sup>[1]</sup>,发现网格数量增大到一定程度后计算结果趋于稳定,综合考虑计算资源消耗和模拟误差,可选用网格数量为 $194 \times 10^4$ 进行气水两相流及沉积物运动模拟。

## 1.2 数值模拟模型的选择

排水箱涵模拟计算中,紊流模型选取标准 $k-\varepsilon$ 模型并激活能量方程,近壁面处理采用标准壁面函数。多相流模拟采用流体体积(VOF)模型,激活明渠流选项;设置空气为主相、水为次相,水与空气的表面张力系数取 $0.072 \text{ N/m}$ ,即 $25^\circ\text{C}$ 下水的表面张力系数。采用压力基求解器,先使用瞬态模拟初始化流场计算域,再使用稳态模拟直至残差达到收敛标准。求解采用SIMPLE压力-速度耦合算法。

## 1.3 边界条件和求解参数

气水两相流模拟边界条件设置如图1所示。

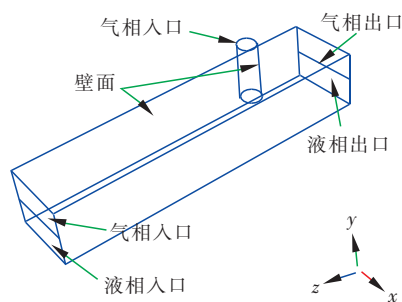


图1 气水两相流边界条件

Fig.1 Boundary conditions of open channel flow

① 液相入口采用速度入口方式,入口温度假设为 $298 \text{ K}$ ,即 $25^\circ\text{C}$ ,并设置液相的体积分数始终为100%,即该入口始终为液相,入口平均速度可根据曼宁公式估算。取水流入速度为 $1.5 \text{ m/s}$ ,速度方向为入口边界的法线方向;紊流条件选取紊流

强度 $I$ 和水力直径 $D$ ,水力直径 $D=2.36 \text{ m}$ ;紊流强度定义为速度脉动的均方根和平均速度的比值,计算约为2.4%。

② 空气入口采用压力入口方式,入口处表压设为零,即入口处压力为1个标准大气压,入口温度假设为 $288 \text{ K}$ ,即 $15^\circ\text{C}$ ,紊流条件选取紊流强度 $I=2.4\%$ 、水力直径 $D=2.36 \text{ m}$ 。

③ 人孔处采用空气压力入口方式,入口处表压设为零,入口温度假设为 $288 \text{ K}$ ,即 $15^\circ\text{C}$ ,紊流条件选取紊流强度 $I=3.0\%$ 、水力直径 $D=0.7 \text{ m}$ 。

④ 液相出口采用压力出口方式,出口温度假设为 $298 \text{ K}$ ,即 $25^\circ\text{C}$ ,激活多相流选项卡中的明渠流选项,设置渠底标高为零,自由表面标高为 $1.05 \text{ m}$ 。回流紊流条件选取紊流强度 $I=2.4\%$ 、水力直径 $D=2.36 \text{ m}$ 。

⑤ 空气出口采用压力出口方式,出口处表压设为零,即出口处压力为1个标准大气压,出口温度假设为 $288 \text{ K}$ ,即 $15^\circ\text{C}$ ,激活多相流选项卡中的明渠流选项。

⑥ 井筒、箱涵各处壁面设置为无滑移壁面边界条件,壁面绝对粗糙度参考文献[2]中的数值,设为 $0.0021 \text{ m}$ ,壁面温度假设为 $283 \text{ K}$ ,即 $10^\circ\text{C}$ 。

求解参数的设置如下:

① 操作工况参数。设模型的操作压力为1个标准大气压,即 $101325 \text{ Pa}$ ;  $y$ 方向的重力加速度设为 $-9.81 \text{ m/s}^2$ ,在箱涵坡度为0.001的情况下,沿箱涵纵向存在重力分量, $z$ 方向的重力加速度为 $-0.01 \text{ m/s}^2$ 。

② 时间步长。瞬态计算时,时间步长是一个重要概念,若设置过大可能导致计算不收敛,设置过小则会增加迭代次数,增大计算开销。时间步长 $\Delta t$ 的设置需满足CFL(Courant、Friedrichs、Levy)条件,估算得 $\Delta t=0.003 \text{ s}$ 。

③ 计算松弛因子。根据经验,设压力方程松弛因子为0.3,动量方程松弛因子为0.7,体积分数方程松弛因子为0.5,能量方程松弛因子为0.75,其余方程松弛因子采用软件默认值。

④ 求解初始化。计算前,应为计算域中的流场参数设定初始值,该过程称为“初始化”。初始化方法有以下两种:全局初始化,即对全部计算域上的流场变量设置初始值;对流场进行局部修补,即对局部网格上的流场变量进行修改。在箱涵模型中,采

用标准全局初始化,计算方式采用从液相入口推理到全局,并使用局部修补气相的体积分数,因此设置排水箱涵中只存在气相的区域(人孔和箱涵气相区域)体积分数为100%。

## 2 排水箱涵流场速度分析

### 2.1 明渠紊流速度分布理论

目前明渠紊流核心区流速分布主要有对数律、指数律和尾流律。在黏性底层,由于壁面的影响,流动与紊流核心区不同,速度分布有3个子层:黏性子层、过渡层和对数律层,各个子层的速度分布各有不同。其中黏性子层的速度符合牛顿内摩擦定律,流速呈线性分布,在壁面上流速为零。过渡层处于黏性子层到对数律层的过渡,在此层中,黏性力与紊流切应力的作用相当,流速情况较为复杂,很难用公式或定律表述。对数律层处于近壁区的最外层,黏性力的影响不明显,紊流切应力占主要地位,流动处于充分发展的紊流状态,流速分布接近于对数律。

明渠紊流核心区流速分布中常用的对数律理论为普朗特-卡门对数律。尼古拉兹曾对光滑圆管的紊流做了大量的研究,根据试验成果提出了用指数形式表示的光滑圆管中紊流流速分布半经验公式。20世纪70年代以来,随着激光测速技术的发展,发现在明渠紊流上部还存在尾流律区,因此紊流核心区流速对数律公式可用科尔斯尾流函数修正。

### 2.2 排水箱涵流场模拟结果

采用1.2节和1.3节所述的模型、边界条件及求解参数,采用瞬态模拟初始化流场计算域,再使用稳态模拟直至残差达到收敛标准且监视变量不再随时间变化。生成排水箱涵自由液面图,在排水箱涵中,水流流态呈紊流均匀流,但在水气交界面处,液相有轻微的上下起伏波纹,即浅水波。

重点分析 $x=2.25\text{ m}$ 平面所截箱涵断面流速等值线图,见图2。从液相入口进入的、设置平均速度为 $1.5\text{ m/s}$ 的水流,由于壁面区的存在,流经一段距离才会变成充分发展的紊流,箱涵模型中,对比近壁区的流速分布,可认为紊流发展段为 $6\text{ m}$ 左右。在气水交界面处,由于液面的流动,带动了液相上方的空气流动,进而由于空气的内摩擦力,带动整个液面上方的空气流动,导致整个箱涵内空气呈一定的速度梯度沿污水运动方向流动,根据伯努利方程,若流体的流动速度增大,那么它内部的压力就会减小,箱涵内部空气压力减小,周围空气会被吸引过来,因此

外部环境中的空气将从人孔流入箱涵内部。

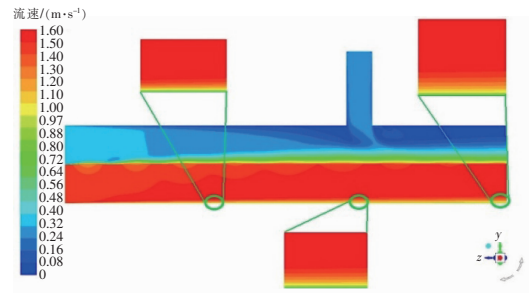


图2  $x=2.25\text{ m}$  箱涵断面流速分布云图

Fig. 2 Cloud chart of flow velocity in  $x=2.25\text{ m}$  sewer culvert section

分析平面 $z=-8\text{ m}$ 与平面 $x=2.25\text{ m}$ 交线(垂线A,见图3)的流速分布以及 $z=-9\text{ m}$ 和 $z=-10\text{ m}$ 箱涵断面中轴线(垂线B、C,见图3)的流速分布,并绘制沿轴线处流速散点图,见图4。

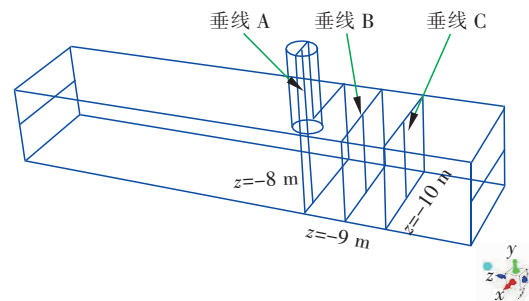


图3 垂线A、B、C位置示意

Fig. 3 Schematic diagram of vertical line A, B and C

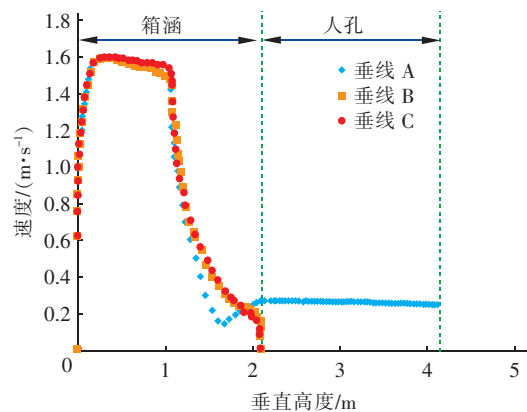


图4 垂线A、B、C沿线流速

Fig. 4 Velocity along the vertical line A, B and C

由各断面垂线流速分布可知,在明渠紊流中,箱涵不同垂线上的流速基本相似,在近壁面区,壁面上的流速为零,沿壁面法向上流速梯度较大,流速迅速发展发展到紊流核心区的流速大小;在紊流核心区流速



达到最大值,且在垂线方向基本保持不变,在水气交界面,水流流速略有下降。紊流核心区的流速分布与对数律理论较为符合。另一方面,由于液相流动的带动,空气也有一定的流速,但是远小于水流流速,空气在箱涵顶板处也有黏性底层,流速受壁面摩擦力的影响迅速下降到零。

观察垂线 A 的流速分布,发现因箱涵内空气流动导致压力降低,外部空气通过检查井以一定的流速进入箱涵内。垂线 A、B、C 的液相流速与文献[2]的试验数据较为相似,这也从侧面印证了 CFD 仿真计算的可靠性。

### 3 排水箱涵内空气涡流分布

利用 CFD 对流换热计算,在激活能量方程后,可在流动入口、出口和壁面定义热边界条件。计算收敛后,选取箱涵断面  $z = -9$ 、 $-10$  和  $-11$  m 作为分析断面。结果表明,在  $z = -9$ 、 $-10$  和  $-11$  m 处箱涵断面都存在空气涡流,温度色阶图表示了距离液面不同高度空气温度的变化(见图 5),其中,与液面接触的空气温度较高,远离液面而靠近箱涵壁面的空气温度较低,温差导致空气对流,进而形成空气涡流。由于空气涡流的存在,靠近箱涵顶板处的气体通量较大,即气相中存在的腐蚀性气体在箱涵顶板处通量较大,因此箱涵顶板更容易遭受腐蚀。

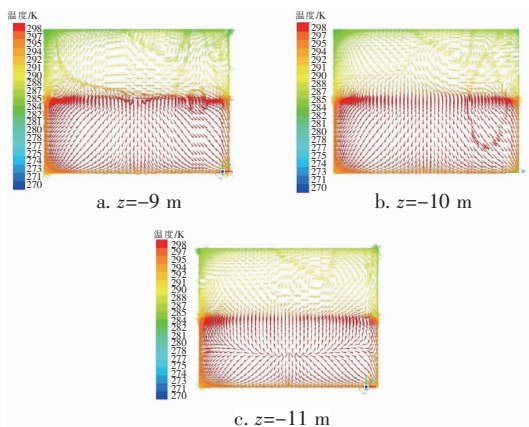


图5 箱涵断面流场速度矢量图

Fig.5 Velocity vector chart of sewer culvert section

### 4 结论

① 利用 CFD 数值模拟技术,以某箱涵断面为原型,建立排水箱涵 CFD 模型并划分结构网格,模拟了排水箱涵中气水两相流工况,研究了排水箱涵内气水两相流的流动特性,所得模拟结果能定性解释排水箱涵实测数据分析结果。

② 在明渠紊流中,箱涵不同垂线上的污水流速基本相似,在近壁面区,壁面上的流速为零,沿壁面法向流速梯度较大,流速迅速发展到紊流核心区的流速大小;在紊流核心区污水流速达到最大值,且在垂线方向基本保持不变,在水气交界面流速略有下降。紊流核心区的污水流速分布与对数律理论较为符合。在水气交界面处,由于液相的流动,带动了液相上方空气流动,根据伯努利方程,空气流速增大则箱涵内部压强减小,在大气压强的作用下,外部新鲜空气通过人孔进入箱涵内部。

③ 在排水箱涵中,空气、污水、壁面的温度不同,因此与污水液面接触的空气温度较高,与壁面接触的空气温度较低,温差导致空气对流,进而形成空气涡流。由于空气涡流的存在,腐蚀性气体在箱涵顶板处气体通量较高,因此箱涵顶板容易遭受腐蚀。

### 参考文献:

- [1] 冯静安,唐小琦,王卫兵,等. 基于网格无关性与时间独立性的数值模拟可靠性的验证方法[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2017,35(1):52-56.  
Feng Jing'an, Tang Xiaoqi, Wang Weibing, et al. Reliability verification method of numerical simulation based on grid independence and time independence[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2017, 35(1):52-56 (in Chinese).
- [2] Roussinova V, Biswas N, Balachandrar R. Revisiting turbulence in smooth uniform open channel flow[J]. J Hydr Res, 2008, 46(s1):36-48.



作者简介:谢红(1995-),女,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事给水排水管网优化控制研究。

E-mail: xiehong95@163.com

收稿日期:2018-12-13