

国内图书分类号：TU991_____

国际图书分类号：_____

硕士学位论文

基于不同漏口失效形式下的压力供水管道漏失规律研究

硕士研究生：杨嘉昕_____

导师姓名：吕 谋 教授_____

申请学位级别：工程硕士_____

学科、专业：环境工程_____

所在单位：环境与市政工程学院_____

答辩日期：2019年12月_____

学位授予单位：青岛理工大学_____

Classified Index: TU991

U.D.C: _____

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**Study on Leakage Law of Pressure
Water Supply Pipeline Based on Different
Leak failure Forms**

Candidate: Yang Jiaxin

Supervisor: Prof. Lv Mou

Academic Degree Applied for: Master of Engineering

Specialty: Environmental Engineering

Date of Oral Examination: December 2019

University: Qingdao University of Technology

硕士学位论文

基于不同漏口失效形式下的压力供水管道漏失规律研究

学位论文答辩日期:

2019.12.11

指导教师签字:

张东

答辩委员会成员签字:

张东

田利

刘玉昆

李

李

李

李

李

青岛理工大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得青岛理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：杨嘉昕 日期：2019.12.11

青岛理工大学学位论文使用授权声明

青岛理工大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、CDMD 和 DMD 有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内
容。论文的公布（包括刊登）授权青岛理工大学研究生处办理。

研究生签名：杨嘉昕 导师签名：吕博 日期：2019.12.11

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论	1
1.1 课题背景和研究意义.....	1
1.1.1 课题背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	3
1.2 国内外研究进展及现状.....	3
1.3 研究内容和研究目标.....	6
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 研究目标.....	7
1.4 技术路线图.....	7
1.5 论文创新点.....	8
第二章 基于 FLUENT 的数值模拟及模型分析	9
2.1 数值模拟基本方程.....	9
2.2 FLUENT 计算流体力学的求解步骤.....	11
2.3 漏失管段数值模拟.....	13
2.3.1 漏失管段几何建模.....	14
2.3.2 网格划分.....	15
2.3.3 FLUENT 数值模拟.....	16
2.3.4 漏失管段模拟结果分析.....	19
2.4 本章小结.....	26
第三章 漏失实验系统与实验方案	27
3.1 漏失实验装置.....	27
3.2 实验方案.....	29
3.3 测量方法.....	30
3.4 本章小结.....	31
第四章 不同漏失工况的稳态下压力与漏失量关系研究	33
4.1 实验数据优化模拟参数.....	33

4.2 不同漏失形式下压力与漏失量关系研究.....	35
4.2.1 不同压力流场结果图分析.....	35
4.2.2 流量与压力之间的指数关系模型.....	38
4.2.3 纵向漏口的 $Q=f(P^n)$ 模型.....	39
4.2.4 环向漏口的 $Q=f(P^n)$ 模型.....	40
4.2.5 圆形漏口的 $Q=f(P^n)$ 模型.....	41
4.3 不同漏失面积比时漏失量与压力的关系.....	43
4.3.1 纵向漏口.....	43
4.3.2 环向漏口.....	47
4.3.3 圆形漏口.....	51
4.4 本章小结.....	56
第五章 基于 BP 神经网络的漏失漏口形状判断与漏失量预测.....	57
5.1 神经网络.....	57
5.1.1 神经网络概念及学习机理.....	57
5.1.2 神经网络的发展历史及应用.....	59
5.1.3 神经网络诊断预测的特点.....	60
5.2 基于 BP 神经网络的供水管网漏失模型诊断及预测.....	60
5.2.1 训练样本的准备.....	62
5.2.2 网络结构确定及优化.....	63
5.2.3 BP 网络训练程序.....	70
5.3 漏失模型诊断及预测结果评价.....	71
5.4 本章小结.....	73
第六章 结论与展望.....	75
参考文献.....	77
攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	81
致谢.....	83

摘要

经研究发现，物理漏损是管网漏失中重要的组成部分。其不仅会对供水公司造成经济上的损失，还会浪费大量珍贵的淡水资源，如何精准的预测城市管网中的物理漏失量是一项重要的课题。但现如今的各种漏失模型和研究仍有不足之处，因此，本课题从点漏失理论出发，针对不同漏失形式的管道进行漏失实验研究，进而分析漏失形式对管道压力波动规律和漏失量的影响。

传统点漏失指数模型及其推导出的漏失公式只考虑到了漏失量与漏失面积、管道压力之间的对应关系，没有对漏口形状和漏失量的关系进行量化分析。本文以常见的纵向、环向和圆形三种漏失形式为研究对象，通过 FLUENT 计算机模拟其漏失情况，从理论角度分析了三种漏失形式下压力场、速度场和漏失量与漏口形状的关系，确定其可研究性。

后以物理实验与计算机数值模拟相结合的方式，进行大量的漏失实验，探究了在漏失达到稳态的情况下，漏口形状、漏失面积比、漏失水压对漏失量的影响。对传统漏失指数模型中的漏失系数 k 进行了细化，得出了指数模型在不同失效形式下，漏失系数 k 与漏失面积比 s 之间的具体表达式，进而优化了传统漏失指数模型，并且新的模型表达式具有良好的拟合优度。新的漏失指数模型的确立，不仅能更加精确的反映管道中的漏失情况，更为不同漏失形式下管道漏损量计算提供了依据。

以物理实验的漏失实验数据为基础，总结不同漏口形状的管段在不同管材、不同管径、不同管道压力下，漏失瞬态压力波动规律和漏失量之间的影响，建立 BP 神经网络，通过大量的输入输出训练，调试出该神经网络的最优结构组成，在漏口处压力波动数据与管道漏失形式、漏失量之间建立了一种非线性映射关系。通过测试验证，该 BP 神经网络可以对漏失实验做出精准的预测。本实验不仅对今后供水管网中漏失量预测提供了一种可行性的方法，还对漏口的失效形式与漏口周围压力波动之间建立联系，为将来从压力波动数据诊断漏失形式，进而从漏失形式方面分析漏失原因提供了一种新途径，可以有效的从根源上控制管网漏失率。

关键词：漏失指数模型；FLUENT；BP 神经网络；漏失诊断预测

Abstract

The study found that physical leakage is an important part of the loss of the pipeline network. It not only causes economic losses to the water supply company, but also wastes mounting precious fresh water resources. How to accurately predict physical leakage in the urban pipe network is an important issue. However, there are still some shortcomings in the present existing various leakage models and researches. Therefore, starting from the point-leak theory, this thesis conducts leakage test experiments on different leakage forms of pipelines, and then analyzes the impact of leakage forms to the pipeline pressure fluctuations and leakage volume.

The traditional point-leak index model and the derived leakage formula only consider the correspondence between the leak loss and the leak area, the pipeline pressure. There is no quantitative analysis of the relationship between the leak loss and the leak shape. In this paper, the three types of leakage, namely the lengthwise, the circumference and radial, are studied. The software FLUENT on computer is used to simulate the leakage. The relationship between the leak shape and its pressure field, and velocity field, and the leakage volume are analyzed theoretically. Determine its necessary to research.

Then through a combination of physical experiments and computer numerical simulation, a large number of leak experiments were carried out to investigate the effects of the leak shape, the leak area ratio and the leak-water pressure on leakage loss volume when the leakage reached to a steady state. The leakage variation coefficient k in the traditional leakage index model is refined, and the specific expression formula between the leakage coefficient k and the leak area ratio s of the exponential model under different failure forms is obtained, and the traditional leakage index model is therefore optimized. Then the new model formula expression has a highly goodness of fit. The establishment of the new leak index model not only can more accurately reflect the leakage situation in the pipeline, but also provide a basis for the calculation of pipeline leakage loss volume under different leak forms.

Based on the leak experimental data completed in the physical experiment, the effects of different leak shapes on the transient pressure fluctuation volatility and leakage loss of various pipes, different pipe diameters and different pipeline pressures are summarized. BP neural network is established. The network, through a large number of input and output training, debugs the optimal structural composition of the neural network, and establishes a nonlinear mapping relationship between the pressure fluctuation data at the leak and the leak forms and the leakage volume of the pipeline. Through testing and verification, the BP neural network can make accurate predictions for the leak experiments. This experiment not only provides a feasible method for predicting the leakage loss in the water supply network in the future, but also establishes a connection between the forms of the leakage point and the pressure fluctuation around the leak point, and diagnoses the leak forms from the pressure fluctuation data in the future. From the aspect of the leak forms, it could possibly analyzes the cause of leakage and provides a new way to effectively control the leakage loss of the pipe network from the roots.

Key words:leak index model, FLUENT, BP neural network, leakage diagnosis and prediction

第一章 绪论

1.1 课题背景和研究意义

1.1.1 课题背景

从广义上讲，地球上的水资源指的是水圈内的总水量。但冰山以及海水由于其水质特征而难以利用，所以通常所说的水资源主要指的是陆地上的淡水资源。这些淡水资源仅占地球总水量的 2.53%。人类可利用的淡水资源包括湖泊、河流及浅层地下水，这些水量又仅占淡水储量的 0.26%^[1]。这些触目惊心的数据，都直观的表明了水资源匮乏之严重。随着科技的进步和社会的发展，水资源缺乏和水污染严重成为了全球人民需要攻克的难题。

面对水资源匮乏问题，研究水污染治理方案固然重要，但从源头抓起，最重要的还是要减少水资源的浪费，水虽然是可再生资源，但在不合理的开采和使用下，人均淡水量依然在持续下降。要解决水资源紧缺问题，除了在废水处理方面取得进展之外，还需从节水方面入手。但管网的水量漏失已经成为供水行业普遍存在且较难解决的问题。根据《城市供水管网漏失控制及评定标准》的相关规定，城市供水企业管网基本漏失率不应大于 12%^[2]。但我国各城市的管网漏失率依然居高不下，有数据显示，我国大约有 500 座城市的管网漏损率达到 16%，江西、辽宁和吉林省的管网漏损率甚至高达 30%以上^[3]。而我国农村由于对管网漏失危害的意识薄弱和检漏设施的不完善，致使其管网漏失率远高于城镇，多数乡镇的管网漏失率超过 40%^[4]。这些还只是报道出来的数据，而实际情况可能比这些数据更加严峻。

供水漏失分为账面漏失和物理漏失两种。账面漏失又称“纸上漏水量”，指的是水表故障、收费或财务上的错误以及非法授权使用水导致给供水公司造成的经济损失。而物理漏失则是指通过系统输配水管网和储水水箱渗漏或溢流到系统之外的部分水量，这种漏失增加了不必要的供水设施建设，加大了运行操作成本，更是对水资源的一种严重浪费。本课题要讨论解决的便是这一种漏失方式。

致使物理漏失的原因有很多，大致可分为四类。

(1) 管道本身属性。管道自身的属性主要包括管材和管径。我国的供水管网常用的管材有灰口铸铁管、镀锌钢管、钢管、球墨铸铁管、塑料管和混凝土管等。铸铁管的漏失主要是由于接口漏水和质脆引起管道爆裂；钢管则是多因腐蚀穿孔或焊缝爆裂而引起大水量外泄；塑料管容易老化，不抗压而产生裂缝或者爆管；同时，伸缩节、阀门等管网设备也会因生锈磨损而产生漏失。南方某市 2000 年的管网漏失调查结果显示，灰口铸铁管漏失占漏失总数的 32%，镀锌钢管占总数的 33%，阀门伸缩件等配件的漏失占总数的 21%^[5]。陈能^[6]收集到的 ZZ 市 2001-2016 年的 275 条爆管记录中，分析发现，灰口铸铁管爆管次数占的比例最高，球墨铸铁管紧随其后。在市政管网中，设计单位通过水量、水压等水力条件对管径进行设计，所以管径的大小直接影响着管道中受力情况的分布。罗海玲^[7]分析了 2003 年天津市供水管网漏失频率与管径的关系，DN50 以下、DN75-DN200、DN300-400、DN500-600、DN700 以上的漏失频率分别为 3.37、1.15、1.11、0.38、0.32，可以看出小管径管道发生漏失的可能性更大。

(2) 管道施工问题。施工期间由于没有处理好埋设管道的地基，对软或密度不均的地基没有进行夯实处理，后期容易发生不均匀沉降，导致管道受力不均；敷设管道时周围不能有硬物，以免对管壁造成集中负载；在管道刚性连接处的石棉水泥捻打不实，承接处的橡胶圈没有准确定位或转角不对，接口处的法兰使用不规范，都会引起连接处的受力不均，进而损坏配件造成漏失；在回填时，回填土未分层夯实，导致两侧土质密度不同，也会使管道不均匀受力而发生形变破损；在施工时还需要保证管道埋深，有许多城市做规划时考虑不够长远，使得后期改造后，许多管道被“挪”到了快车道或大型建筑物下，管道长期受到较大荷载而产生漏水和爆裂^[8]。

(3) 管内工况突变。这种情况主要指的是管内水力要素突变而引发的管道破裂。其中包括由于突然停泵或关阀而引起管道中压力和流量的突变，进而引起水锤，对管道造成伤害。阀门布置位置不妥，多次数的开关阀也会使管道压力不稳而引发漏损。

(4) 管道环境影响。许多管材会受到温度的影响，在温差大的季节，由于热胀冷缩现象，管道上会产生轴应力使管壁受力过大而破损；管道长时间埋设在地下，周边土壤对管道的电腐蚀作用和管道内的余氯对管壁的侵蚀，容易引发腐蚀穿孔。

1.1.2 研究意义

我国市政供水管网漏失严重，研究和解决漏失问题十分紧迫。从 2015 到 2016 年间，“水十条”和《中国环境保护税法》的相继发布，显示着我国对水资源的保护与利用越来越重视。而供水管网漏失不仅会使大量宝贵的淡水资源白白浪费，同时会对供水企业造成一定的经济损失；在管道破损处，管道内部的水直接接触管道周边环境，空气或土壤中的污染物质通过漏口直接进入饮水系统会造成饮水安全隐患；管道破损漏口较大时，会直接引起管网中压力的剧变，影响供水管网的正常工作；埋在地下的管道发生漏失时，漏失水量冲刷周围土体，容易引起地面下沉，造成塌陷，影响交通；在发生漏失后，需要整个区域停水检修，给日常生活带来不便。所以研究管网漏失模型对漏失量进行精准预测，以及分析不同漏失形式与压力波动规律之间的关系以便预防和控制漏失有着重要意义。

1.2 国内外研究进展及现状

近年来，国内外对供水管网漏失问题的研究十分重视。这些研究大多集中在漏失检测和漏失量估算两个方面。

从上世纪 80 年代起，国内外就开始了对供水管道漏失检测和相关设备仪器的研究。通过收集各种资料文献，总结供水管网的检漏方法可大致分为：被动检漏法、振动声学检漏法、地质雷达检漏法、分区检漏法、示踪剂检漏法、负压力波检漏法和水力模型法等^[9-18]。下面对各种检漏方法做简要介绍。

(1) 被动检漏法。当地下管网发生漏失一段时间后，漏失水量会在地面形成积水，通过观察地面积水情况来排查和检测供水管道是否漏失的方法，称为被动检漏法。这种方法需要定期安排人员对供水区域进行巡视检查或经由他人反映来发现漏点。被动检漏法的优点是无前期资金投入，无经验技术要求，但是对漏损事故上报不及时，当发现地面有积水时已经造成了大量水资源的浪费。

(2) 振动声学检漏法。此法是根据声音振动信号的不同规律来进行管网检漏，振动声学检漏法按照选取的振动声信号的不同可分为听音检漏法和相关检漏法。听音检漏法是采用听音仪器分析管道沿线的漏水声来判断漏点的位置。该方法采用的工具简单，方便携带，投资和管理费用均比较低，但检漏效果的好坏取

决于工作人员的技术经验和检测设备的质量，并且听音检漏法在白天会受到周边环境噪声的干扰，因此此法常在夜间进行。相关检漏法是依据噪声声波向管道两个方向同时传播的机理，在管道上不同的位置安装两个声传感器接受信号，通过测出由漏口传播到两边声传感器之间的时间差，计算出漏点的具体位置。相关检漏法相比于听音检漏法对技术人员的要求更高，而且对于设备的投资大，但该方法不会碍于环境中的噪音干扰、管道埋设深度的影响，应用较为广泛。

(3) 地质雷达检漏法。地质雷达是利用无线电磁波对管道中的情况进行检测，并通过图像显示漏点周围的断面信息，可以通过该技术检测漏失管道周边由于漏失水量侵蚀而引起的地质不均匀沉降，从而进行漏点定位。但这种方法不适用于管道周围有其他金属干扰和环境温度过低的情况。地质雷达检漏法对操作人员的经验技术要求比较高，后期所呈现的图像必须经由训练过的专业人士解读分析。

(4) 分区检漏法。分区检漏法是将独立计量分区(DMA)的思想运用于漏损定位上。把管网按照一定规律划分为一个个小规模的供水分区，根据进入分区的总水表流量和该区域用户水表的总流量之差，即可确定该区域的漏失量。若两者之间的差值过大、超过了误差允许范围，就说明该分区存在漏点，接下来需要使用听音检漏法或其他方法进行更精确的漏点定位。分区检漏法可以快速的在大范围内锁定漏点所在的小范围区域，为之后的精确定位漏点节约了大量的时间，但在运行初期的投资过大，结果会受到水表误差的影响，而且在实施过程中会对居民用水造成影响。

(5) 示踪剂检漏法。示踪剂检漏法是在管道中加入一定浓度无毒的容易被检测到的化学物质，沿管道监测示踪剂浓度，若管道发生漏失，示踪剂会随着漏失水量一同流出，使其浓度发生改变，通过监测沿程示踪剂的浓度变化来定位漏失点位置。此方法比一般的检漏方法更加准确灵敏，对于长管道小漏口的检测有着很好的效果，但在饮用水中加入外来物质对于人们来说有些难以接受，并且对环境或许有着潜在的危害也未可知。

(6) 负压力波检漏法。负压波法是通过监测管道发生漏失时，漏口处的压力波动规律来对漏点进行定位的一种方法。当管道某处突然发生漏失时，漏点处的压力骤降，大量水流通过漏口涌向管外，该压降会从漏点处向管道两端传播，离漏口近的地方压力波动大，离漏口越远的地方压力波动逐渐变弱，通过对漏点周

围的压力检测值的变化规律来进行漏点定位。负压波法对管网漏失点的定位速度快、精度好，但若管网拓扑结构复杂，突然开关阀门或有大用户大用水量发生时，也会引起管网中的压力波动，致使该系统发生误报现象，而且只有在发生大规模漏失时，系统才能检测到漏失，小漏失或已经发生漏失管网处于稳定漏失状态时不能有很好的检测定位效果。

(7) 水力模型检漏法。水力模型法是利用城市管网的实测压力流量数据和实际管网拓扑关系对城市管网进行数学建模，并优化其参数，使得数学模型预测值与实际管网实测值之间的差值最小，最后利用建立好的数学模型来判断和预测漏失位置的方法。该方法使用的前提是必须建立准确的数学模型系统，若建模和实际管网不符，则无法做到精确的检测，而制作准确的数学模型对于一些数据不全的老旧管网来说十分困难。

在漏失量预测方面，国内外学者多用数学模型方法，通过研究管网中压力与漏失流量之间的关系，在各种模型里估算实际管网漏失量。

高金良^[19]基于盲源分离理论，利用快速独立分量分析算法（FastICA）成功将管网中用户用水量和漏失量分开，为以后快速预估渗漏量和降漏工作提供了有力的数据支持。Gianfredi^[20]等人受阿普利亚地区的一些服务于城市地区的配水管网记录的进水数据的启发，提出了一种从细节到总体的配水管网漏失量评估办法，该方法基于物理一致性公式，在数据同化方法中加入管网的流入流量数据，即可估算出不同水力条件下的漏失量。简彩^[21]将常用于信息控制领域的 Kalman 滤波算法构建了供水管网数学模型，基于该算法的实时递推性，提高了模型对漏失量预测的精度，最低误差可以降到 0.12%，说明滤波算法可以精确的预测出实际管网漏失量。

对于供水管网漏失定位和漏失量预测的宏观研究成果颇多^[22-27]，但在管道漏失时漏口形状和压力以及漏失量之间的关系的研究较少。只有少数研究者会对不同形状漏口的漏损现象进行研究^[28-29]。

1.3 研究内容和研究目标

1.3.1 研究内容

本课题源于国家自然科学基金项目“基于不确定性分析的给水管网压力-漏损响应机制及组合建模技术（51778307）”。

Lawrence A. Smith^[30]等人将配水管道的漏失形式分为四种：纵向裂口、环向裂口、承插口破裂和管壁穿孔。其中承插口破裂不作为本次课题研究的考虑范围。对剩下的三种常见漏口形式通过供水管网中水流的基本方程建立单管段水力仿真模型和实验平台水力模拟模型，在不同压力条件下对漏口漏失时压力和漏失流量关系进行分析，并研究如何将 BP 神经网络运用于不同工况下的漏失诊断和预测问题。

（1）基于流体动力学基本方程建模分析确定实验漏口形状

通过在 FLUENT 中对不同形状漏口的管段进行建模，模拟管道漏失情况，分析其漏口处的压力、速度以及漏口流量是否与漏口破损的形式有关，确定本课题漏失实验的漏口具体形状。

（2）在实验室搭建仿真模拟实验平台进行实测研究

在实验室搭建三层供水管网模型，使用其中一小段作为本次实验主要研究管段，更换不同管径、管材、漏口形状的试件进行漏失实验。并记录漏失稳态和漏失瞬态的压力与流量数据。

（3）基于实验数据调整 FLUENT 建模参数模拟漏失情况

将实验室物理实验数据导入 FLUENT 建模中，通过调整 FLUENT 中各种运行参数，使得到模拟值和理论值相一致，使用优化后的参数进行大量的管段漏失实验模拟，得出数据，分析在不同漏口形状下，漏口漏失量与压力的关系，细化传统流量与压力之间的指数模型中漏失系数 k 。

（4）建立 BP 神经网络对漏失实验中的漏口形状和漏失量进行预测

将实验室测得的漏失瞬态压力波动数据做为 BP 神经网络的输入值，漏口形状和漏失量做为输出值，建立 BP 神经网络，通过对神经网络中的隐含层、激励函数、学习算法等参数的优化，最终在压力波动规律与漏口形状、漏失量之间建立了良好的映射关系，经过测试证明该 BP 神经网络可以对漏口形状和漏失量做出精准的

预测。

1.3.2 研究目标

(1) 通过流体计算软件模拟不同漏口形式的漏失状况，分析其压力流量变化关系，确定后续实验管段漏口形式的可行性方案。

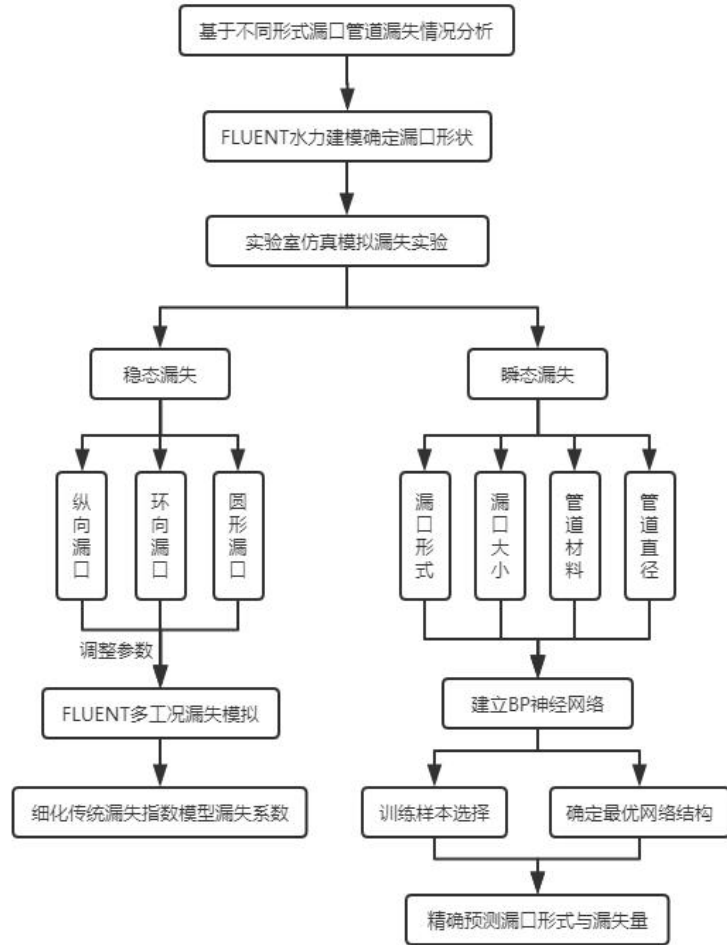
(2) 进行不同形式漏口仿真漏失模拟实验，分析实验记录的压力数据，分析漏失时压力波动规律，以及不同漏口形式下压力与漏失流量之间的关系。

(3) 通过实测数据调整水力建模的参数，得到一个精确的模型进行模拟不同工况下管道漏失情况，归纳压力与漏失量之间的变化规律。

(4) 对漏失时瞬态压力变化规律和漏口形状、流量之间进行 BP 神经网络训练，看是否可通过神经网络对漏口形式和漏失量做出准确的预测。

1.4 技术路线图

根据研究内容，本课题的技术路线图如下：



1.5 论文创新点

(1) 针对供水管网中单管漏失特征，分别针对不同管径、不同漏口形状、不同漏口大小等工况展开研究，归纳分析其压力-流量变化规律。

(2) 采用实验分析和计算机模拟相结合的方法，依托 FLUENT 流体计算软件模拟了对应不同漏口漏失时的水力工况特征，探讨了压力-漏失量特征及空间变化规律。

(3) 应用 BP 神经网络对漏口形状和漏失量进行预测，在管道压力波动规律和漏口形状、漏失量之间建立一种非线性映射关系。给统计管网中管道破损形式和漏失量估算提出了一种可行的方案，对以后预防和改进管段检漏工作有着深远意义。

第二章 基于 FLUENT 的数值模拟及模型分析

数值模拟指的是计算流体动力学数值模拟, 计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 是通过计算机数值计算和图像显示, 对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析^[31]。CFD 的基本思想可以归纳成为: 把原来在时间域及空间域上的连续物理量的场 (如速度、压力场) 用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替, 通过一定的原则和方程建立起关于这些离散点上变量场之间关系的代数方程组, 然后求解代数方程组获得场变量的近似值。

FLUENT 是由美国 FLUENT 公司于 1983 年推出的 CFD 软件。它是继 PHOENICS 软件之后的第二个投放市场的基于有限体积法的软件, 目前在美国的市场占有率可达 60%, 广泛用于模拟各种流体流动、传热等问题。在流动方面, E.Medina-Lopez^[32]基于 FLUENT 研究了干湿空气相融过程, 分析了湿度变化规律及其特性; 王世政^[33]应用 FLUENT 在渗透理论模型的基础上分析了平板降膜溶液的除湿过程; 肖瑶^[34]将 FLUENT 应用于对风式烘干机干燥筒内的气力流场研究。在热传递方面, Changnian Chen^[35]研究了板式相变储能单元的蓄热和放热过程; Khalil 模拟核燃料的传热过程、孙安娜模拟铸件中的温降速率, 都在 FLUENT 中取得了理想的研究效果^[36-37]。现如今, FLUENT 已经被 ANSYS 公司收购, 成为 ANSYS 产品下流体计算模块。

FLUENT 提供了非常灵活的网格特性, 让用户可以使用非结构化网格, 包括三角形、四面体、六面体、金字塔形网格来解决复杂外形的流动问题, 甚至可以用混合型非结构化网格、动变形网格以及滑动网格等解决问题。允许用户根据解的具体情况来对网格进行细化粗化等修改。FLUENT 可以使用多种前处理器 (GAMBIT、ICEM CFD、Gridpro、hypermesh 等) 进行建模和网格划分。它含有丰富的湍流模型 ($k-\varepsilon$ 模型、Reynolds 应力模型、LES 模型、标准壁面函数、双层近壁模型等), 可以使用户精准的模拟无黏流、层流和紊流运动。通过调整各种参数, 可以使其的数值算法在运行速度和精度都达到较高的水平。

2.1 数值模拟基本方程

流体流动要遵守物理守恒定律, 基本的守恒定律包括: 质量守恒定律、动量守

恒定律、能量守恒定律。

FLUENT 的构成主要框架有如下三大方程：

(1) 质量守恒方程。该定律表示单位时间内流体微元体中质量的增加等于同一时间内流入微元体的净质量：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

式中， ρ 是密度； t 是时间； \mathbf{u} 是速度矢量； u 、 v 、 w 分别是速度矢量 \mathbf{u} 在 x 、 y 、 z 方向的分量。

式 (2-1) 给出的是瞬态三维可压流体的质量守恒方程，若流体不可压，则 ρ 为常数，式 (2-1) 可变为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-2)$$

若流动处于稳态，则密度 ρ 不随时间的变化而变化，式 (2-1) 可化为：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-3)$$

(2) 动量守恒方程。该定律表示流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的合力：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2-4a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (2-4b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (2-4c)$$

式中， p 是流体微元体上的压力； μ 是动力粘度； S_u 、 S_v 和 S_w 是动量守恒方程的广义源项， $S_u = F_x + s_x$ ， $S_v = F_y + s_y$ ， $S_w = F_z + s_z$ ； F_x 、 F_y 和 F_z 是微元体上的力；一般来说， s_x 、 s_y 和 s_z 是小量，对于粘性为常数的不可压流体， $s_x = s_y = s_z = 0$ 。

(3) 能量守恒方程。该定律表示微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体力与面力对微元体所做的功。流体的能量 E 通常指的是内能、动能

和势能三项之和，但这样的能量方程并不是很好用，如果扣除动能的变化，可以得到以温度为变量的能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (2-5)$$

式中， c_p 是比热容； T 是温度； k 是流体的传热系数； S_T 是流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分。

本课题用到的是根据能量守恒方程推出的机械能守恒方程（伯努利方程）：

$$z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g} = z_j + \frac{p_j}{\rho g} + \frac{\alpha_j v_j^2}{2g} + h_w \quad (2-6)$$

式中， i 、 j 指的是任一两处总流过流断面序号； z 为该处的位置水头； h_w 为两过流断面之间的平均水头损失； α 为动能修正系数。

2.2 FLUENT 计算流体力学的求解步骤

本节给出 FLUENT 的计算基本思路，所有的流动问题或是传热问题，还是污染物扩散问题，都可以按照本求解步骤进行求解：

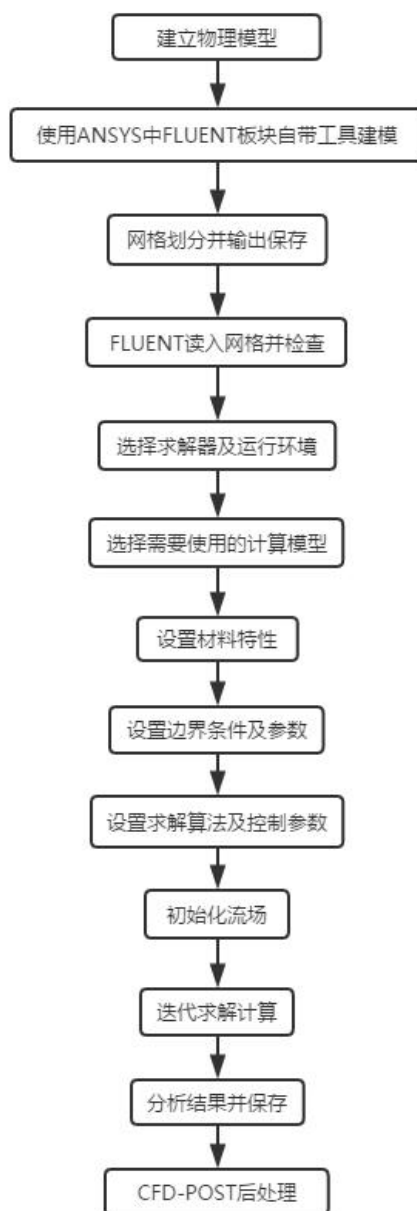


图 2-1 FLUENT 求解步骤流程图

Fig.2-1 Flow chart of FLUENT solution steps

(1) 几何建模。在有限元分析之前，最重要的工作就是几何建模，建模的好坏直接影响到了后期计算结果的准确性。使用 ANSYS 软件中的 FLUENT 自带建模工具进行建模，也可以使用其他软件。

(2) 划分网格。网格划分的精细好坏程度关乎后期求解过程和结果的好坏。常用的网格有四面体、六面体、三棱体等形式，网格可以手动划分，也可以自行编程生成网格。

(3) 求解器的选择。在求解器选项下指定求解的问题是稳态还是非稳态；速度是绝对速度还是相对速度；求解器类型是基于压力还是基于密度的。

(4) 计算模型选择。在这里根据实际情况选择无粘、层流、k-epsilon、Spalar-Allmaras、k-omega 等模型。

(5) 定义材料。流体和固体的物理属性都要用材料这个名称一并定义。用户可以从 FLUENT 材料库里选择已提供的常用材料 (air 或 water 等)，也可以创建新的材料。

(6) 设置边界条件。FLUENT 提供了数十种边界条件，可分为四大类：进出口边界；壁面、重复、轴类边界；内部单元区域；内部表面边界。用户根据实际情况进行边界条件设定。

(7) 设置算法及求解控制参数。FLUENT 默认算法是压力耦合方程组的半隐式方法 (SIMPLE 算法)，还可以选择 SIMPLEC、PISO、Coupled 算法。根据需要调整离散格式和欠松弛因子等，会对后期求解速度和收敛情况产生影响。

(8) 流场迭代计算。用户在初始化流场后，可设置迭代次数，每隔多少次迭代输出监视信息以及每隔多少次迭代更新用户自定义函数。迭代完成后即可查看计算结果。

2.3 漏失管段数值模拟

经过前期资料收集可知，供水管网发生漏失时，管段上的漏口形状可大致分为三种：纵向漏口、环向漏口、穿孔漏口。

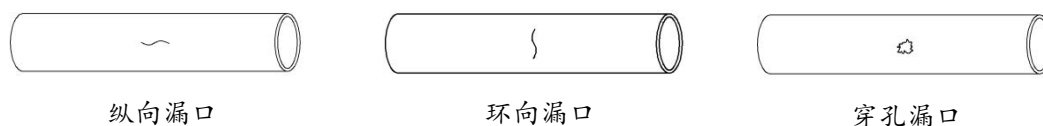


图 2-2 三种漏口形式示意图

Fig.2-2 Schematic drawings of three types of leaks

在实验室做漏失实验之前，要先对不同漏口形状的管段漏失情况有个预估，从理论角度确定该实验的意义后再投入资金进行物理实验研究。数值模拟建模可以做到这点，在计算机上进行仿真建模模拟漏失情况，分析该研究的可行性，后再进行实验，以防在搭建实验设施后发现实验效果不好，需要重新拟定实验方案，造成资金和精力的浪费。

为了简化物理模型且不失其代表性，用长方形代替纵向、环向漏口形状，用

圆形代替穿孔漏口形状。实际建模示意图如下：

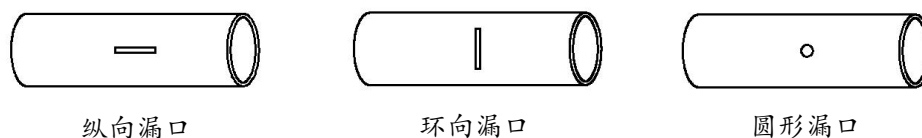


图 2-3 三种漏口简化形式示意图

Fig.2-3 Schematic diagram of three simplified forms of leakage

2.3.1 漏失管段几何建模

本次建模使用 ANSYS15.0 中的 FLUENT 模块中自带的建模工具进行模型建立。ANSYS15.0 的工作界面如下所示：

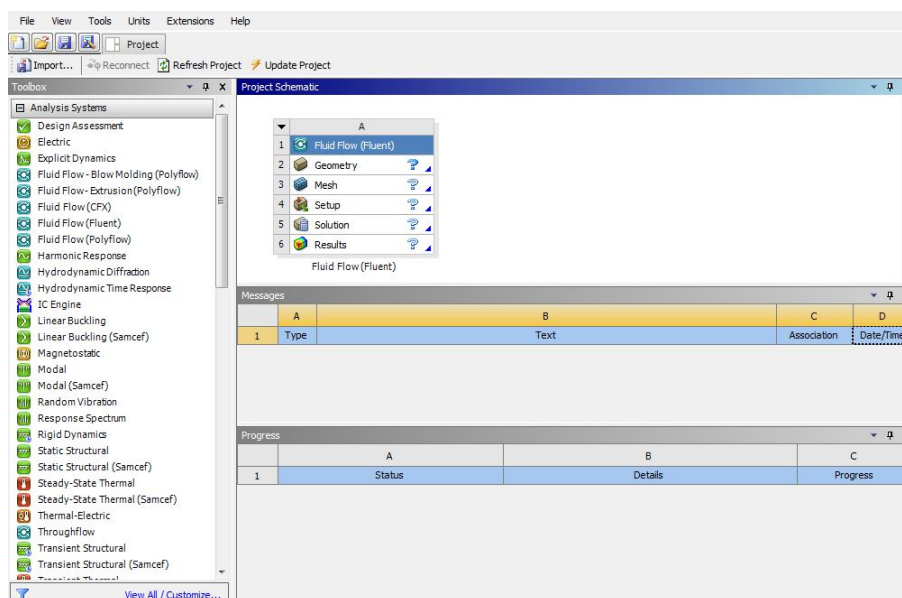


图 2-4 ANSYS15.0 工作界面

Fig.2-4 ANSYS 15.0 Work Interface

双击 **Geometry** 进入建模界面。根据上一节的简化物理模型，取管道长度为 1200mm，管道内直径为 100mm，管壁厚 4mm，漏口开在管段的正中间，圆形漏口为直径 20mm 的正圆形，为了以后分析管道漏口形状对管道其他水力条件的影响，根据控制变量法，保持漏口面积大小不变，改变漏口形状。因此纵向和环向漏口我们分别采用和圆形漏口面积相同的长方形（44.8mm*7mm）。各管段三维建模结果如下：

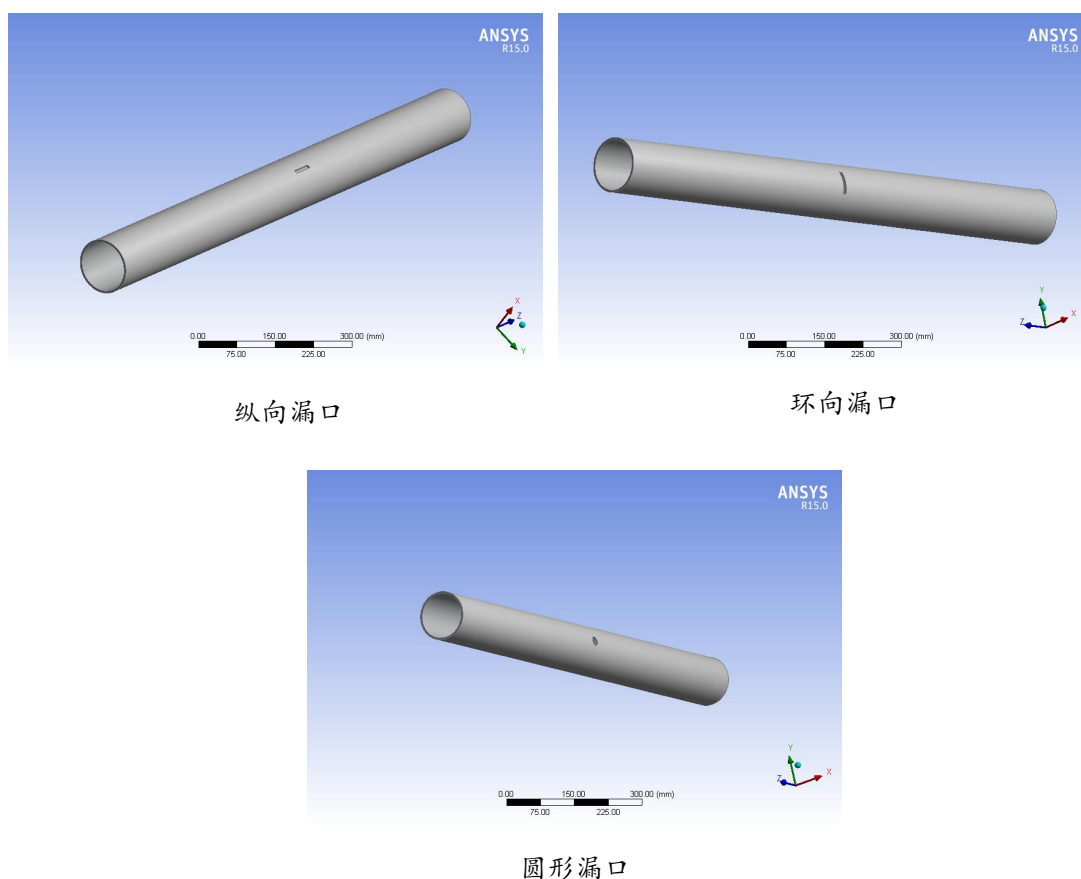


图 2-5 三种漏口形式建模示意图

Fig.2-5 Modeling sketches of three types of leaks

2.3.2 网格划分

计算流体力学的实质就是基于有限体积法的控制方程的离散，然后在离散的小区域内建立方程组，最后用线性代数的方法迭代求解。离散，即需要在计算之前先将计算区域进行划分，成为多个子区域，而网格就是离散的基础。网格的形式和密度都对数值计算结果有着重要的影响。

本次建模网格划分选用 Tetrahedrons（四面体网格），主要是因为四面体网格划分速度快，可自动生成网格，在网格密度相似的情况下，四面体网格生成后的节点数和单元数均高于六面体网格。其中 Patch Comforming 四面体考虑了几何体所有的面和边界，包含膨胀因子、控制四面体边界尺寸的内部增长率等内容，较为全面，所以本次建模选用 Patch Comforming 四面体网格。以圆形漏口管段为例，网格划分如图所示：

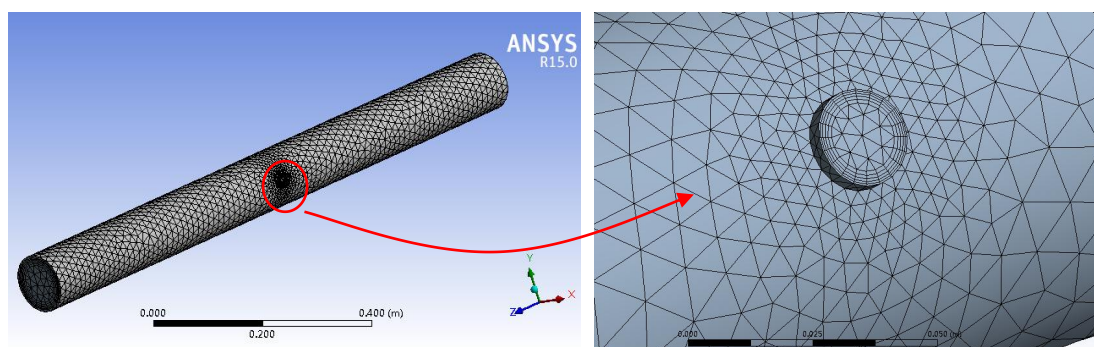


图 2-6 圆形漏口管段网格划分示意图

Fig.2-6 Schematic diagram of mesh generation for circular leakage pipe section

纵向漏口管段网格数量为 41535，节点数为 15857；环向漏口管段网格数量为 41616，节点数为 15893；圆形漏口管段网格数量为 49436，节点数为 18349。网格划分完以后就可以将 Mesh 文件输出保存。

2.3.3 FLUENT 数值模拟

将上一节中画好的网格文件导入 FLUENT 模块中的 Setup 里进行求解计算。在 FLUENT 中的求解器的选择，材料、边界条件、运行环境的设置，更是对求解结果有着决定性作用。

2.3.3.1 求解器设置

FLUENT15.0 提供了两种求解器选项：Pressure-Based（基于压力的求解器）和 Density-Based（基于密度的求解器）。基于压力的求解器也就是以前所说的分离式求解器，是顺序地、逐一地求解各方程，主要用于不可压流动和微可压流动。基于密度的求解器即耦合式求解器，这种求解器耦合了流动和能量方程，收敛速度快，但所需的内存是分离式求解器的两倍，多用于求解高速可压流动。本次研究的对象是供水管网中的流动现象，属于低流速的不压缩流动，故选择 Pressure-Base 求解器。除了选择求解器类型外，还需要对 FLUENT 的计算模式进行设置。Velocity Formulation 选项选择 Absolute，时间选项(Time)选择稳态(Steady)。

2.3.3.2 FLUENT 计算模型选择及材料设置

FLUENT 界面中给用户提供了多种类型的模型设置，多相流、能量、粘性、

辐射等。根据本课题的研究内容，只需进行粘性模型设置。

FLUENT15.0 提供了 11 种粘性模型：Inviscid、Laminar、Spalart-Allmaras(1 eqn)、k-epsilon(2 eqn)、k-omega(2 eqn)、Transition k-kl-omega(3 eqn)、Transition SST(4 eqn)、Reynolds Stress(7 eqn)、Scale-Adaptive Simulation(SAS)、Detached Eddy Simulation(DES)、Large Eddy Simulation(LES)。供水管网中的水流流动属于湍流，因此本次研究采用湍流模型中运用最广泛的 k-epsilon 模型（ $k-\varepsilon$ 双方程模型）。此模型又分为标准 $k-\varepsilon$ 模型、DNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。本章选用标准 $k-\varepsilon$ 模型。

在 FLUENT 中，流体和固体的物理属性都要用 material 选项定义。要求为每个参与计算的区域都指定一种材料。FLUENT 其材料库里已有多种常见的固体流体材料，用户可直接复制过来使用，若没有合适的材料，用户也可自定义创建新的材料。根据实际供水管情况，本次研究选择 steel 作为固体材料（即管壁材质），选择 water-liquid（水）作为流体材料。

2.3.3.3 边界条件设置

所谓边界条件，指的是在求解域边界上所求解的变量或其一阶导数随地点和时间的变化规律。只有给定了合理的边界条件，才能计算出流场的解。边界条件是流体力学计算问题有解的必要条件。

基本的边界条件包括：流动进口边界、流动出口边界、给定压力边界、壁面边界、对称边界、循环边界。对于管道内部流动问题主要需要设定的是进出口边界条件。对于进出口边界，FLUENT15.0 给出了六种流体适用边界条件。具体类型及适用范围见下表。

表 2-1 FLUENT 提供的边界条件类型

Table 2-1 Types of boundary conditions provided by FLUENT

边界条件名称	类型	物理意义及适用范围
velocity-inlet	进口边界	速度进口,用于定义流动进口边界处的速度和流动的其他标量型变量,适用于速度已知的不可压流动
pressure-inlet	进口边界	压力进口,用于定义流动进口边界总压和其他标量型变量,适用于压力已知的不可压流动
mass-flow-inlet	进口边界	质量进口,用来规定进口的质量流量,一般用于压力流速都无法确定的可压流动
outflow	出口边界	出流,用于求解前流速和压力均未知的出口边界,指的出口处的流动是完全发展的情况。该条件不可用于可压流动,不能和压力进口联用
pressure-outlet	出口边界	压力出口,用于定义流动出口的静压
pressure-far-field	出口边界	压力远场,用来描述无穷远处的自由可压流动。该条件只适用于可压流动

由于管网中的水的流动属于不可压流,所以本章选用速度进口边界,设置进口流速 0.5m/s,压力设置为 15000Pa。其中 Turbulence Specification Method 项目意为指定哪种模型来输入湍流参数,本章研究选择 K and Epsilon 模型,其中湍动能 k 和湍动耗散率 ε 保持默认值。出口选择压力出口边界,出口压力设置为 15000Pa。漏口选择压力出口边界,压力设置为 0。

2.3.3.4 运行环境设置及求解

为了更准确的计算,还需对运行环境进行设置,根据研究内容,本课题需要设置计算参考压力和重力两个选项。

在 FLUENT 中的边界条件里输入的压力都是相对于运行参考压力的相对压力,在 Operating Conditions 里将标准大气压 101325Pa 作为参考压力,压力点坐标设为原点坐标 (0,0,0)。重力参考系里,设置 x 轴方向为 -9.8m/s^2 。环境密度选择默认空气的密度: 1.225kg/m^3 。

计算算法选择常用的 SIMPLE 算法,欠松弛因子选用默认值。设置好全部参数条件后,在对流场进行求解前,需对 FLUENT 提供的流场的解的初始猜测值,即对流场进行初始化。初始化可以是对整个流场进行,也可以单独对某个面进行

初始化。本章选择对进口面进行初始化。

完成以上全部设置后，就可以选择步长进行计算，本次纵向漏口管段迭代 178 次后收敛；环向漏口管段迭代 538 次后收敛；圆形漏口管段迭代 219 次后收敛。

2.3.4 漏失管段模拟结果分析

FLUENT 可以用多种方式来显示和输出计算结果。本节主要对上节所做的 FLUENT 流场模拟结果分析，确定在不同的进口压力下，不同漏口形状的管段发生漏失时的漏失量是否相等。

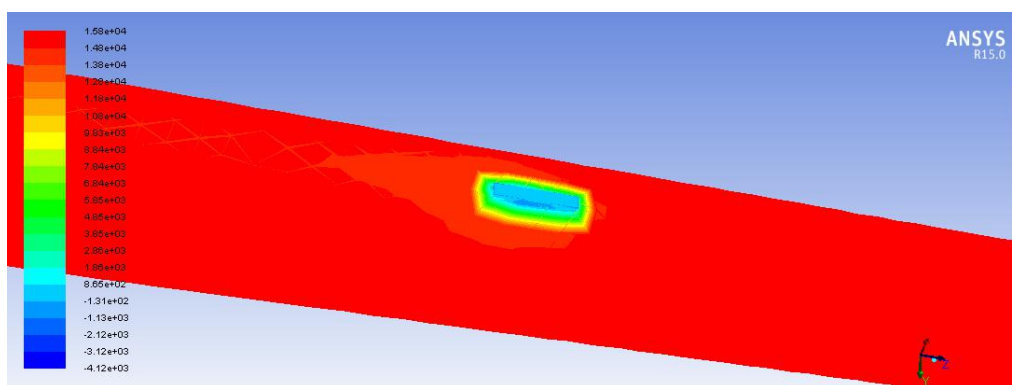


图 2-7 纵向漏口管段压力分布云图

Fig.2-7 Pressure distribution nephogram of longitudinal leak section

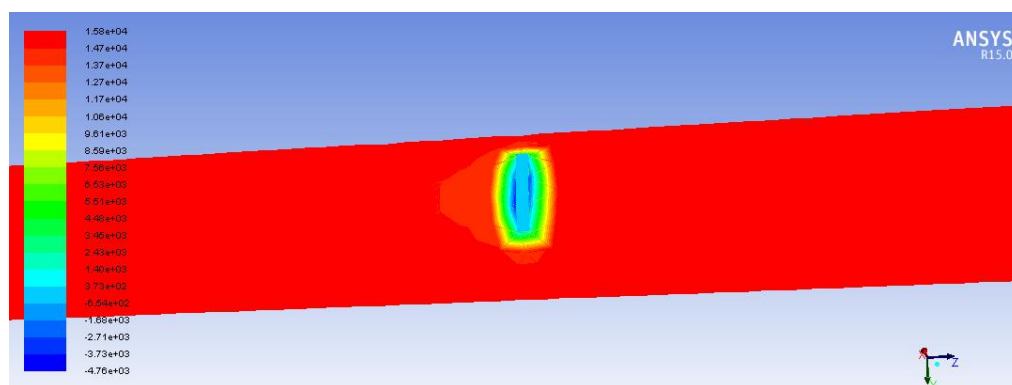


图 2-8 环向漏口管段压力分布云图

Fig.2-8 Pressure distribution nephogram of circumferential leak section

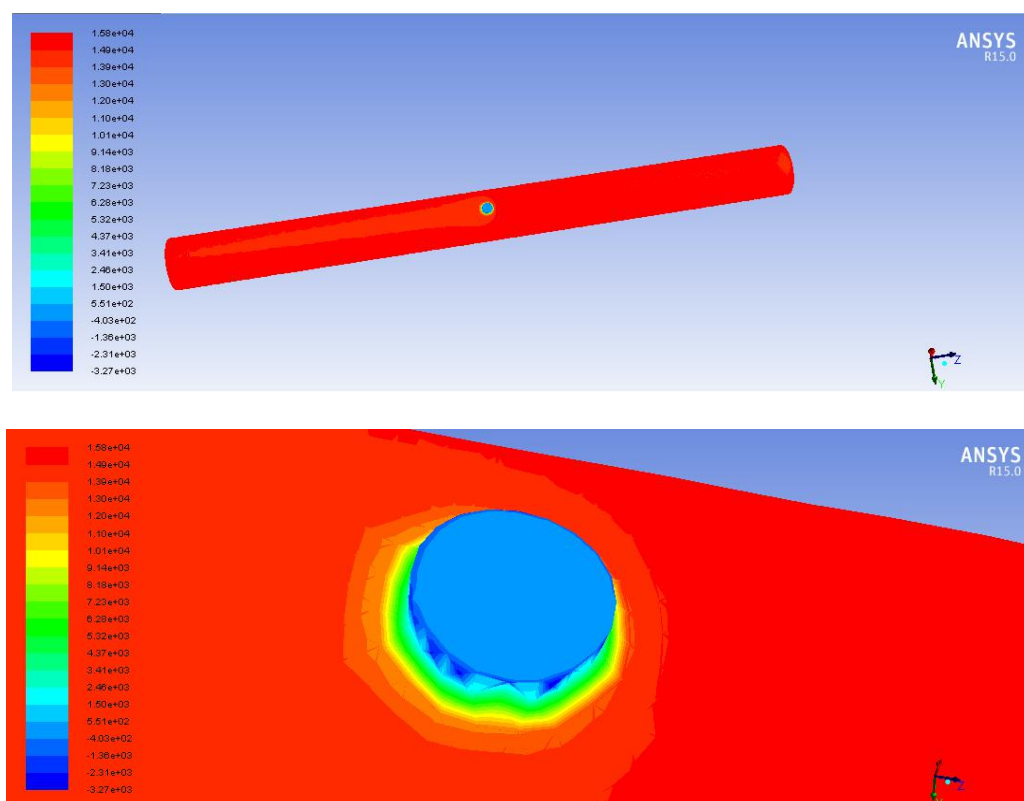


图 2-9 圆形漏口管段压力分布云图

Fig.2-9 Pressure distribution nephogram of circular leak section

通过观察模拟结果可以看出，三种管段的压力分布情况有着共性也有着不同。相同的是整个管段内部的压力基本保持不变，进口压力和出口压力大体相同，造成这样的原因可能有两方面，第一是漏口面积对于整个管段横断面积来说不够大，漏失效果对这个管段的影响不大，第二方面是钢制管段的沿程损失较小，致使在管段前端和后端的压力变化不大。三种不同形式的漏口的压力分布图不尽相同。就漏口前的压力变化梯度来说，圆形漏口的压力变化是最平缓的，从管段起始端不远就开始有下降的趋势，纵向漏口的压力变化梯度居中，环向漏口的压力变化梯度最陡，在临近漏口处才发生了变化。为了更好的分析压力和漏口之间的关系，分别采用 15000、20000、25000pa 的进口压力进行漏失模拟，得出管内压力分布如下表所示：

表 2-2 入口压力为 15000pa 时管内压力

Table 2-2 Pressure in pipe when inlet pressure is 15000pa

漏口形状	管内最大压力值 (pa)	管内最小压力值 (pa)
纵向漏口	15810.45	-4116.979
环向漏口	15775.17	-4760.892
圆形漏口	15815.44	-3265.157

表 2-3 入口压力为 20000pa 时管内压力

Table 2-3 Pressure in pipe when inlet pressure is 20000pa

漏口形状	管内最大压力值 (pa)	管内最小压力值 (pa)
纵向漏口	20802.32	-5578.928
环向漏口	20767.31	-6141.33
圆形漏口	20813.55	-4419.923

表 2-4 入口压力为 25000pa 时管内压力

Table 2-4 Pressure in pipe when inlet pressure is 25000pa

漏口形状	管内最大压力值 (pa)	管内最小压力值 (pa)
纵向漏口	25800.91	-6863.181
环向漏口	25763.54	-7433.802
圆形漏口	25808.27	-5549.913

漏失管段在漏点处取得最低压力值，由这些数据可以看出，在管道压力一定的情况下，不同漏口形状所引起的漏失时漏口处的最低压力并不相同。环向漏口处的压力值最低，在入口压力 25000pa 时可达-7433.802pa，纵向漏口的最低压力值居中，圆形漏口处的最低压力在这三种漏失形式下最高。在不同的漏失工况下，管道入口压力和管内最低压力的关系如图 2-10 所示：

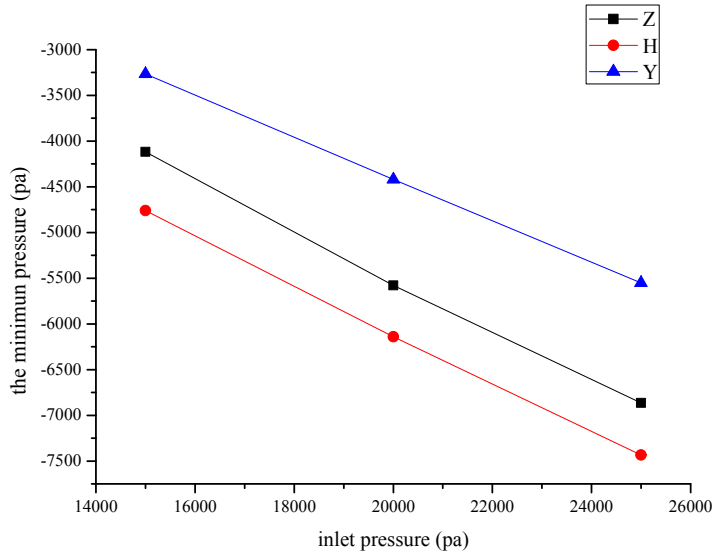


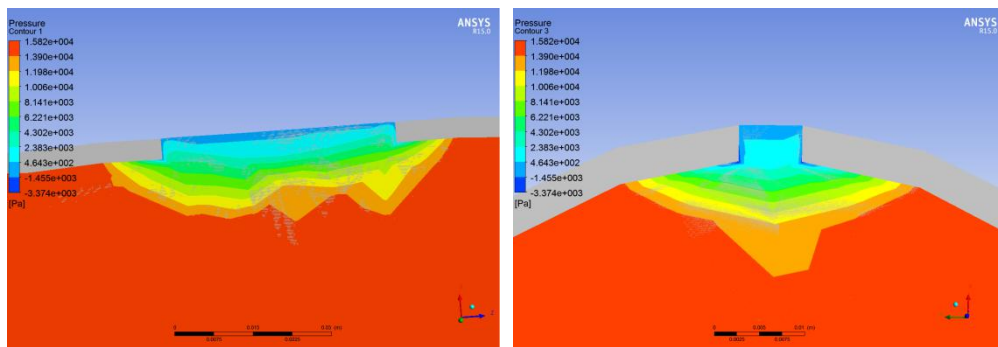
图 2-10 进口压力与管内最低压力关系图

Fig.2-10 Relation diagram of inlet pressure and minimum pressure in pipe

可以看出，随着入口压力的增加，三种漏失形式的漏口处产生的最低负压不断降低。由曲线的走向趋势趋于平缓可以看出，随着压力的增加，管内最低压虽然在不断下降，但下降的幅度越来越小，圆形漏口相较于纵向、环向漏口的管段这种趋势较为明显。

通过 FLUENT 后处理器 CFD-POST 处理计算结果，可以得出更加详细的压力流速分布图。

对于入口压力为 15000pa 时漏口处的压力分布云图整理如下：



(a) xz 平面

(b) xy 平面

图 2-11 纵向漏口压力分布云图

Fig.2-11 Pressure distribution nephogram of longitudinal leak

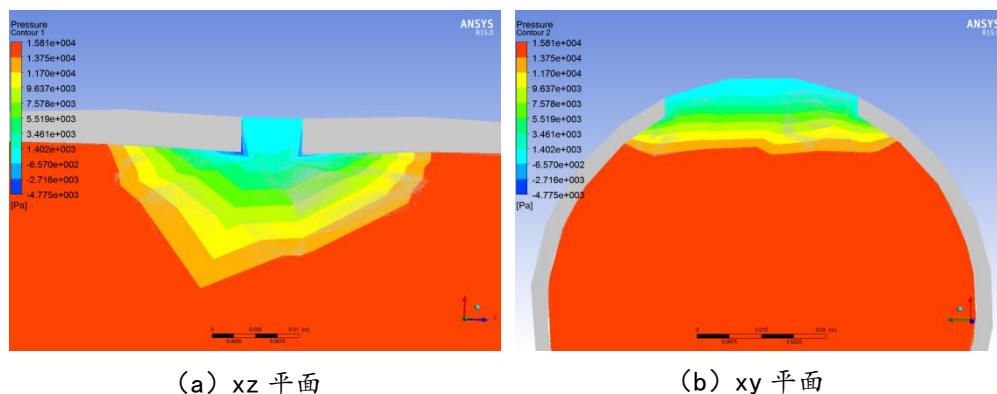


图 2-12 环向漏口压力分布云图

Fig.2-12 Pressure distribution nephogram of circumferential leak

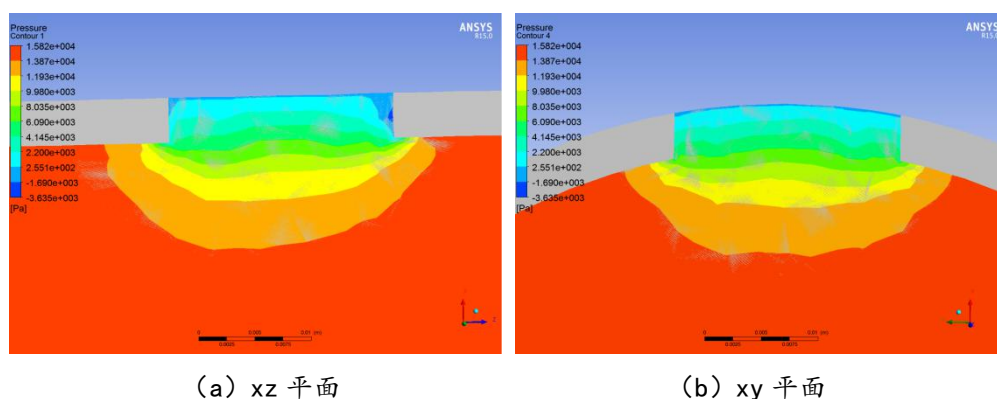


图 2-13 圆形漏口压力分布云图

Fig.2-13 Pressure distribution nephogram of circular leak

由三种形式的漏口局部压力云图可以看出，在纵向漏口管段发生漏失时，压力在接近漏口时开始逐渐变小，相比于漏口前段，漏口中后段压力波动更为剧烈，主要是因为漏口与大气相连，流体在达到漏口时由于管内外巨大的压力差而快速流出管道，造成漏口处压力的骤降，但由于漏口沿管道流动方向的长度较长，可以给漏口前半段的流体一些缓冲，而在漏口后半段，由于漏口的长度到了尽头，流体不能继续向外流动，压力必须在很短的距离内提升至管压，没有相应的缓冲区间，所以后半段的压力波动要比前半段的剧烈。在纵向漏口的两条直角边处由于流速过快，会造成小范围的负压，引起倒流现象。

在环向漏口管段发生漏失时，沿流动方向的漏口压力波动剧烈，主要是因为漏口沿管道流向方向的长度较短，压力要在短时间内从高压降到最低压再升高到高压，所以压力波动剧烈，在与流向垂直的方向上的漏口压力波动较为稳定，原

因同上，因为在垂直方向上的漏口长度较长，所以压力变化梯度较为缓慢，在环向漏口的两条长直角边处也会形成负压，尤其是靠近进水端的直角边处的负压面积更大。

圆形漏口管道发生漏失时，压力波动相比于其他两种漏口形状的管段要平缓很多，是因为圆形漏口在各个方向的距离分布是均匀的，漏口处的水流在各个方向上的受力和速度都较为均匀，所以压力分布梯度呈现出稳定的层状分布。与前两种漏口形式不同的是圆形漏口处的负压分布在漏口上层，即与大气相接的地方，而其他两种则是分布在漏口底部，即和管道内部相接的地方。

对于漏口处的流速分布云图整理如下：

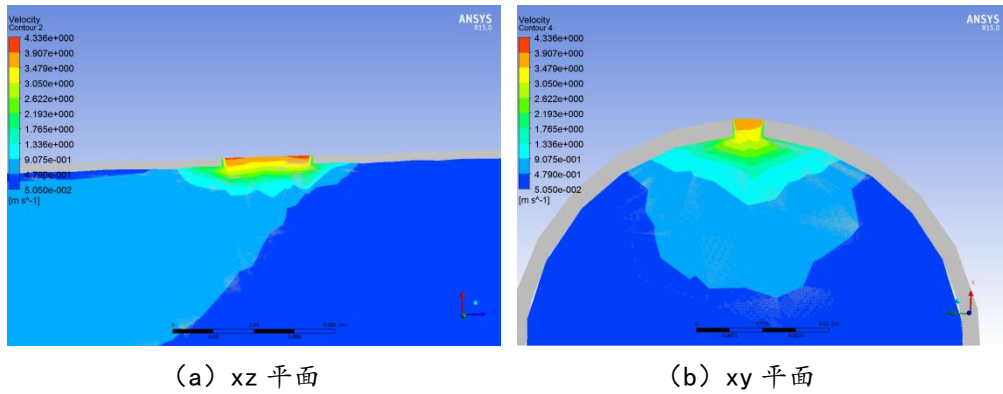


图 2-14 纵向漏口流速分布云图

Fig.2-14 Velocity distribution nephogram of longitudinal leak

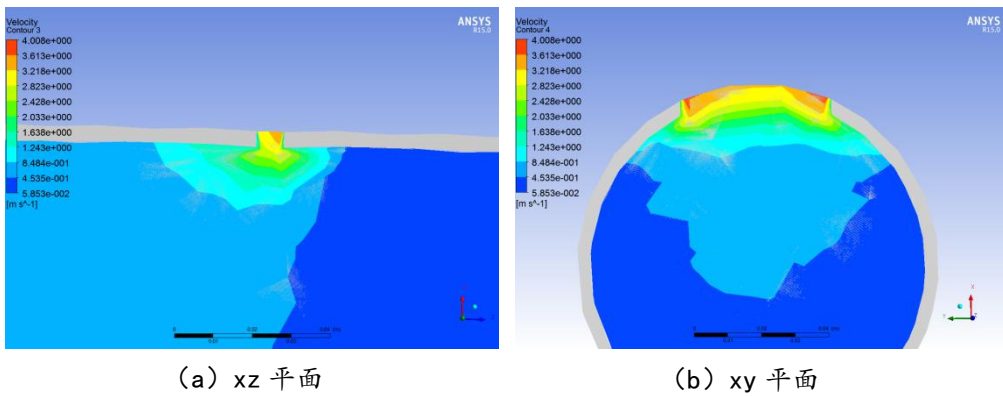


图 2-15 环向漏口流速分布云图

Fig.2-15 Velocity distribution nephogram of circumferential leak

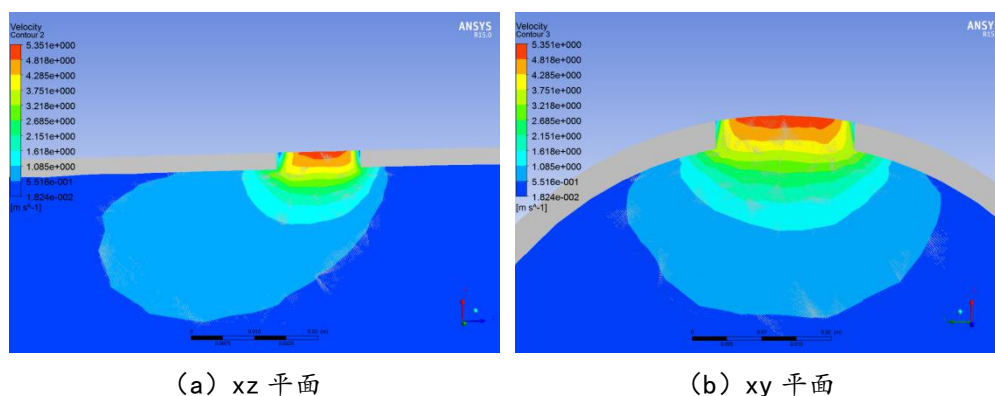


图 2-16 圆形漏口流速分布云图

Fig.2-16 Velocity distribution nephogram of circular leak

通过三种漏口形式的流速云图可以看出，管内流速相对较低，漏口处流速骤然增大，这是由于漏口处与大气相接，管内外压力差过大，流体会从压力大的地方流入压力小的地方，所以漏口处的流速变化剧烈。当管道发生漏失时，漏口上游管段的流速受漏口的影响较大，可以从图中看出，淡蓝色的部分的流速大于深蓝色部分的流速，圆形漏口上游管段流速受漏口影响最小，纵向漏口影响居中，环向漏口对上游流速影响最大。圆形漏口处的流速波动较为平缓，由图 2-16 可以看出漏口处流速曲线圆滑平缓，而纵向和环向漏口处的流速波动剧烈，水流状态不稳定，从图 2-15、2-16 可以看出流速云图曲线边缘不平整。

对不同漏口形状管段漏失时漏口流量整理结果如下表。

表 2-5 FLUENT 计算结果

Table 2-5 FLUENT calculation results

入口压力 (pa)	漏口形状	进口流量 (kg/s)	出口流量 (kg/s)	漏口流量 (kg/s)	流量净差值 Net
15000	纵向漏口	3.8556981	-2.6023364	-1.2535051	-0.00014341
	环向漏口	3.8556988	-2.6828701	-1.1727546	7.40290e-05
	圆形漏口	3.8556991	-2.6688724	-1.1869545	-0.00012779
20000	纵向漏口	3.8556981	-2.4013784	-1.4539675	0.000352263
	环向漏口	3.8556988	-2.4896843	-1.3659245	9.0003e-05
	圆形漏口	3.8556991	-2.4813232	-1.3745009	-0.00012505
25000	纵向漏口	3.8556981	-2.2298398	-1.6262496	-0.00039124
	环向漏口	3.8556988	-2.3196144	-1.5358934	0.00019097
	圆形漏口	3.8556991	-2.3156886	-1.5399753	3.5167e-05

根据 FLUENT 模拟结果可以看出，在压力和漏口面积相同的情况下，三种漏口的管段进口流量相等，但漏失量却不相同。纵向漏口的漏失流量最大，环向漏

口的漏失流量最小。这就说明了在管道发生漏失时，漏失量的大小不仅和管道压力流速和漏口面积有关，漏口形状也对它有着不可忽略的影响。

综上所述，供水管网漏失时漏口形状对管道中的流态有着一定的影响，所有漏口形式都可以归纳为纵向、环向和圆形漏口，本课题接下来的研究就以这三种漏口形状为基准，进行漏失实验模拟和分析。

2.4 本章小结

本章基于 FLUENT 流体计算软件对纵向、环向和圆形三种不同形状漏口的管段进行建模，设置常用合理的求解器、边界条件、运行环境等参数，对管段进行漏失实验模拟。根据模拟结果，可以得出以下结论：

(1) 不同形状的漏口在漏失时，漏口周围的压力场并不相同，圆形漏口相比于纵向和环向漏口压力波动最为平缓，可以看出不同漏失形式的管段发生漏失时，漏口处的压力波动规律也会不同。

(2) 漏口形状对漏口周围管道内的流速影响较大。其中环向漏口对管道上游流速影响最大，纵向漏口居中，圆形漏口对管道上游速度影响最小。漏口处的压力流速都和漏口形状有着不小的关系，致使不同形状漏口的漏失量也不相同，通过模拟发现，纵向漏口的漏失量在三种漏口中最高。

(3) 综上所述，通过在 FLUENT 上对不同漏失形式管段的漏失实验数值模拟，证明了漏口形状对管网漏失压力波动规律和流失量的影响，下一章将在实验室中搭建实体管网进行漏失实验。

第三章 漏失实验系统与实验方案

3.1 漏失实验装置

为了更好地模拟实际供水管网工况，依据相似原理，在实验室搭建三层管网仿真模型，并对其中一条管路进行改造，使其适合进行点漏失实验。

如图 3-1 所示，为三层大型仿真供水管网模型的 CAD 示意图。图 3-2 为在管网中挑出一条管路进行改造，进行点漏失实验的实验装置。本实验主要由供水系统、漏失实验系统和回水系统组成。

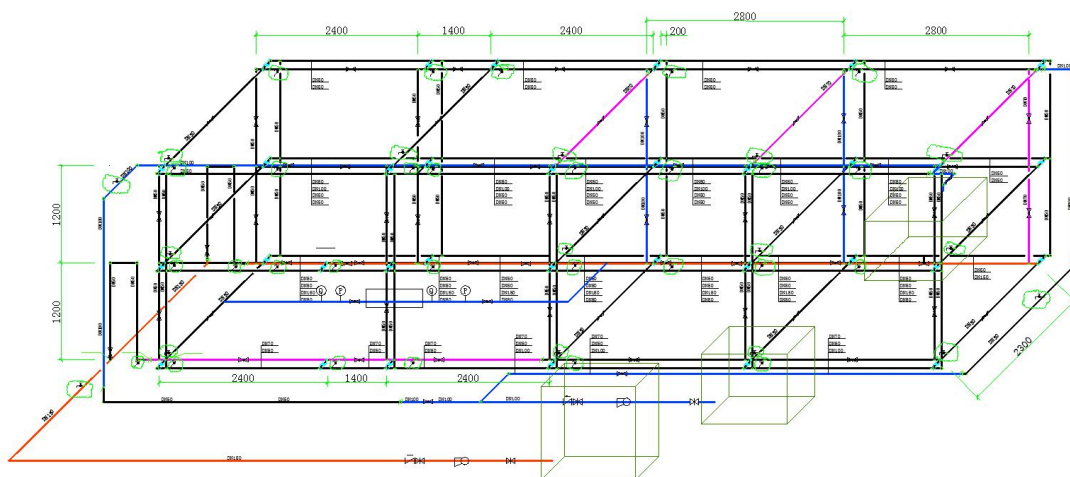


图 3-1 实验平台管网系统 CAD 图

Fig.3-1 Experimental platform pipe network system CAD drawing

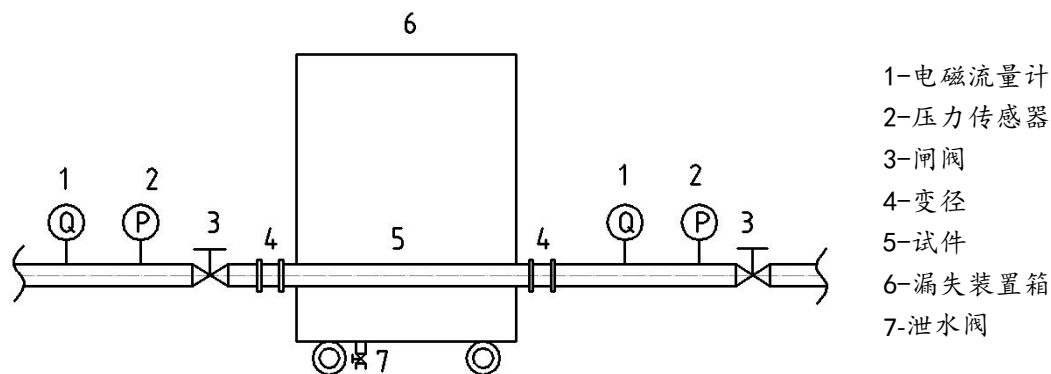


图 3-2 点漏失实验装备示意图

Fig.3-2 Schematic diagram of point-leak experimental equipment

供水系统:

供水系统主要由水箱、提升泵以及管道附属物组成。本实验由两个供水水箱向管网连续供水,通过水箱后面的两个提升泵来控制整个管网中的水压水流情况。

漏失实验系统:

漏失实验系统主要由两个电磁流量计、两个压力传感器、两个闸阀、八个变径、若干漏失管段试件和一个装置箱组成。系统通过调节提升泵的变频器来调节管网压力,由试件前后的电磁流量计和压力传感器来监测管段发生漏失时前后流量压力变化,关闭闸阀可进行试件的更换,装置箱用来收集漏失水量,通过底部的泄水装置将漏失水量经自吸泵输送回供水水箱中。

回水系统:

回水系统主要由自吸泵和管网系统组成。本次回水系统由两部分组成,其中一大部分指的是流经管网中的水量通过水泵提升,管网运输最终通过管道排入管网末端的高位水箱。通过调节止回阀的大小再将高位水箱里的水接入管网系统中的两个供水水箱,使整个管网的实验水体得以循环利用。还有一小部分的水量回流指的是漏失水量回水系统,上面已经说到装置箱可以用来收集漏失水量,通过铁箱底部的泄水阀将漏失水量收集到一个足够大的容器内,再通过小型提升泵将漏失水量打回供水水箱中,不造成水资源浪费。

点漏失实验系统的装置主要由 DN100 的不锈钢管热熔焊接合成。为了更好的更换漏失试件,试件前后的一段管段由软连接组成,为试件管段的长度增添了一定的容错性。整个漏失实验装置主要设备如下表所列:

表 3-1 漏失实验设备一览表

Table 3-1 List of missing experimental equipment

编号	设备名称	参数
1	水箱	2 个, 铁制, 容量分别为 0.85m ³ 、0.5m ³
2	水泵	2 台立式多级离心泵, 配备三相异步电动机, 型号 YE2 132S1-2,YE2-802-2
3	电磁流量计	2 台, 型号: OPTIFLUX2300C, 准确度等级: 0.3 级, 量程: 14-140m ³ /h
4	压力传感器	2 台 KELLER 压力传感器, 型号: LEX1, 精度 0.01, 量程: -1-18bar
5	试件	若干, 分为不同管材、不同管径、不同形状漏口的长为 1.2 米的管段
6	变频器	两台
7	变径	8 个, 不锈钢材质
8	闸阀	2 个, 型号 Z45T/W-16, DN100
9	蝶阀	3 个, 型号: D7A1X ₅ -10/16ZB ₁ ,DN150
10	数据采集系统	一套
11	电脑	一台

3.2 实验方案

在漏失实验中, 上一章已经证明了漏口形状对管道漏失实验的影响。除却管道的失效形式, 漏口的大小、管道的材料也对漏失模型有着较大的影响。因此, 在管道漏失形式方面, 选取纵向、环向、圆形漏口三种形式作为实验研究对象。在管材方面, 现市政供水管网多用的管材有球墨铸铁管、灰口铸铁管、钢管、混凝土管、塑料管等, 大体可分为有机塑料和金属制管两种。由于部分管材材料难以找到合适的制作厂家, 所以本次课题的物理实验部分选用不锈钢和 PVC 两个具有代表性的管材进行漏失实验, 分别选用 DN50、DN100、DN150、DN200 的管径, 每一个管段试件的长度为 1.2 米, 其具体参数如下表所示:

表 3-2 漏失管段具体参数

Table 3-2 Specific parameters of leakage pipe section

编号	管材	公称直径	漏口形式	漏口尺寸 (mm)
1	不锈钢	DN50	纵向	55*3.5
2	PVC	DN50	纵向	55*3.5
3	不锈钢	DN50	环向	5*35
4	PVC	DN50	环向	5*35
5	不锈钢	DN50	圆形	15
6	PVC	DN50	圆形	15
7	不锈钢	DN100	纵向	45*7
8	PVC	DN100	纵向	45*7
9	不锈钢	DN100	环向	7*45
10	PVC	DN100	环向	7*45
11	不锈钢	DN100	圆形	20
12	PVC	DN100	圆形	20
13	不锈钢	DN150	纵向	26*3
14	PVC	DN150	纵向	26*3
15	不锈钢	DN150	环向	3*26
16	PVC	DN150	环向	3*26
17	不锈钢	DN150	圆形	10
18	PVC	DN150	圆形	10
19	不锈钢	DN200	纵向	45.5*5
20	PVC	DN200	纵向	45.5*5
21	不锈钢	DN200	环向	5*45.5
22	PVC	DN200	环向	5*45.5
23	不锈钢	DN200	圆形	17
24	PVC	DN200	圆形	17

3.3 测量方法

本次研究主要分为两个方向。其一，研究不同失效形式的管道在不同压力下漏失稳态时漏失流量的变化规律；其二，研究不同失效形式的管道在不同压力下突然发生漏失时漏口处瞬态压力波动规律。

(1) 稳态研究：

在漏失发生后，管网水力状态已经稳定的情况下，利用漏失管段前后流量计读数之差计算漏口漏失流量。为了取得更为准确的数据，可在实验中，每隔 2s 取一次流量计读数，取 10 次数据后相加取平均数，来作为该压力下漏口流量值，这样计算出来的漏口流量更加准确。

(2) 瞬态研究:

用不同的压力冲开试件管段的漏口,记录漏口打开瞬间至管段水流趋于稳定状态后之间的压力数据。采用 KELLER-LEX1 压力传感器监测压力,并通过信息采集系统 Control Center Serie30 每隔 0.25s 记录一次压力读数,直至压力读数不再发生变化为止。由于设备问题,虽然设置了 0.25s 取一次读数值,但系统有时会发生数据缺失的错误,导致数据记录不全,为了实验的准确性,需要进行三次重复试验,多记录几组数据,为以后数据处理提供可靠的数据库。

3.4 本章小结

本章在实验室搭建三层仿真供水管网模型,主要利用其中的一条管道进行点漏失实验。针对使用不同漏口形状、不同管材、不同管径的试件进行漏失模拟,通过试件前后的压力、流量传感器的监测,记录其压力和流量数据。

(1) 稳态实验:在管道发生漏失后,管内流动达到稳定状态,漏口周围的压力和流量数据不再发生波动时,记录此时的压力与流量数据。为下一章的计算机模拟漏失稳态压力-流量关系研究提供数据基础。

(2) 瞬态实验:在管道发生漏失的一瞬间,管道中大量的水从漏口流出,会引起管道内压力波动,记录从漏失的那刻开始到管道漏失进入稳定状态之间的压力波动数据。为第五章基于 BP 神经网络建立漏口形状、漏失量与压力波动规律之间映射关系提供数据基础。

第四章 不同漏失工况的稳态下压力与漏失量关系研究

通过实验室仿真管网模拟漏失实验得到的数据结果真实可信，它是理论分析和数值方法的基础，其重要性不可忽视。但实验测量方法也有很多不足之处，比如实验会受到模型尺寸、场地大小、人身安全和测量误差等多种因素限制，而且实际实验测量需要投入大量的人力物力和财力，有些模型还很难通过实验方法得到结果，运行周期长。计算机仿真模拟在这方面就可以很好的克服以上困难，在计算机上实现一个特定的计算，就相当于进行了一次物理实验，如果通过调整各种参数，使在此种计算环境下，计算机模拟结果与物理实验结果相一致，就可以用计算机模拟代替部分难以操作的物理实验，节省大量的时间和金钱，在计算机上进行物理实验模拟，分析数据，总结规律。

4.1 实验数据优化模拟参数

将上一章实验室仿真模拟管网中漏口漏失实验稳态的实验数据代入 FLUENT 中的初始边界条件进行迭代，对于 $k-\varepsilon$ 模型来说，常用 K and Epsilon 和 Intensity and Viscosity Ratio 选项来进行湍流参数输入，经过模拟结果发现，本次模拟用 Intensity and Viscosity Ratio（湍流强度 I 和湍动粘度比 μ_t / μ ）模型来输入参数得到的模拟结果更加接近于真实值。

湍流强度 I（turbulence intensity）按下式计算：

$$I = u' / \bar{u} = 0.16(\text{Re}_{D_H})^{-1/8} \quad (4-1)$$

其中， u' 和 \bar{u} 分别为湍流脉动速度和平均速度， Re_{D_H} 为按水力直径 D_H 计算得到的雷诺数。对于满流圆管，水力直径就等于圆管直径。

湍动粘度比 μ_t / μ （Turbulent Viscosity Ratio）正比于湍动雷诺数，一般可取 1-10 之间。本次建模取湍动粘度比为 10。

由于在实验室进行的实验漏口朝向向左，所以将环境条件中 x 轴方向的加速度改为 0，y 轴加速度设为 -9.8。其他参数保持不变。

对不同管径、不同漏口在不同压力下的漏失量进行模拟分析，部分模拟结果与实测结果比较如下表。

表 4-1 DN50 纵向漏口管道模拟结果分析

Table 4-1 Analysis of DN50 longitudinal leaky pipe simulation results

进口压力 (pa)	233530			324150			399540		
流量监测点	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口
模拟值 (m ³ /h)	4.13134	0.81151	-4.94245	5.56994	0.66397	-6.23449	6.28923	1.80746	-8.09708
实测值 (m ³ /h)	4.20560	0.82610	-5.03170	5.67005	0.67590	-6.34595	6.40228	1.83995	-8.24223
相对误差	0.01766	0.01766	0.01774	0.01766	0.01765	0.01756	0.01766	0.01766	0.01761

表 4-2 DN50 环向漏口管道模拟结果分析

Table 4-2 Analysis of DN50 circumferential leaky pipe simulation results

进口压力 (pa)	227160			306180			393170		
流量监测点	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口
模拟值 (m ³ /h)	4.85064	0.94062	-5.79143	6.38145	1.23571	-7.61727	6.38145	2.19510	-8.57653
实测值 (m ³ /h)	4.93783	0.95753	-5.89535	6.49615	1.25793	-7.75408	6.49615	2.23423	-8.73038
相对误差	0.01766	0.01766	0.01763	0.01766	0.01766	0.01764	0.01766	0.01751	0.01762

表 4-3 DN50 圆形漏口管道模拟结果分析

Table 4-3 Analysis of DN50 circular leaky pipe simulation results

进口压力 (pa)	221240			300830			379320		
流量监测点	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口
模拟值 (m ³ /h)	5.27484	0.84840	-6.12273	6.62122	1.32793	-7.94865	7.61716	1.71525	-9.33222
实测值 (m ³ /h)	5.36965	0.86365	-6.23330	6.74023	1.35180	-8.09203	7.75408	1.74608	-9.50015
相对误差	0.01766	0.01766	0.01774	0.01766	0.01766	0.01772	0.01766	0.01766	0.01768

表 4-4 DN100 纵向漏口管道模拟结果分析

Table 4-4 Analysis of DN100 longitudinal leaky pipe simulation results

进口压力 (pa)	159280			214860			243510		
流量监测点	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口
模拟值 (m ³ /h)	3.46735	3.13539	-6.60410	7.00855	2.47143	-9.48311	9.18487	1.42015	-10.60926
实测值 (m ³ /h)	3.52970	3.19175	-6.72145	7.13450	2.51585	-9.65035	9.34995	1.44568	-10.79563
相对误差	0.01766	0.01766	0.01746	0.01765	0.01766	0.01733	0.01766	0.01766	0.01726

表 4-5 DN100 环向漏口管道模拟结果分析

Table 4-5 Analysis of DN100 circumferential leaky pipe simulation results

进口压力 (pa)	151540			198860			247310		
流量监测点	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口
模拟值 (m ³ /h)	6.04947	1.18038	-7.23020	7.58028	2.56365	-10.14518	8.09670	4.18667	-12.28440
实测值 (m ³ /h)	6.15820	1.20160	-7.35980	7.71653	2.60973	-10.32625	8.24223	4.26183	-12.50415
相对误差	0.01766	0.01766	0.01761	0.01766	0.01766	0.01753	0.01766	0.01764	0.01757

表 4-6 DN100 圆形漏口管道模拟结果分析

Table 4-6 Analysis of DN100 circular leaky pipe simulation results

进口压力 (pa)	153340			212780			258340		
流量监测点	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口	进口	出口	漏口
模拟值 (m ³ /h)	7.11598	1.02161	-8.13764	9.92081	0.84838	-10.76641	12.37947	1.07348	-13.44837
实测值 (m ³ /h)	7.24387	1.03988	-8.28375	10.09912	0.86363	-10.96275	12.60188	1.09275	-13.69463
相对误差	0.01765	0.01757	0.01764	0.01766	0.01766	0.01791	0.01765	0.01763	0.01798

其中进出口流量正值表示流进管道流量，负值表示流出管道流量。

由上表可知，模拟值和实测值的相对误差控制在 1.746%-1.774%之间，因为实测值是通过试件前后端的流量计读数得到的，在实验中，管中的流量在一定范围内的上下浮动属于正常现象，本次模拟的相对误差较小，证明通过 FLUENT 模拟管网漏失情况的可行性，为了减少实验投资和实验时间，本课题可通过 FLUENT 模拟不同管径不同漏口的漏失实验进行流量与压力之间关系的分析。

4.2 不同漏失形式下压力与漏失量关系研究

4.2.1 不同压力流场结果图分析

对三种漏失形式的管段针对不同管道压力进行漏失实验建模，将计算模拟后的数据导入 FLUENT 后处理器 CFD-POST 中，输出结果图并进行分析，三种漏口的结果图规律大致相同，以纵向漏口为例，进行流场结果分析。

对管长 1200mm，管径 DN100，壁厚 4mm，纵向漏口尺寸为 45mm*7mm 的漏失管道进行 FLUENT 建模，在边界条件中设置不同的管道压力分别进行漏口模拟计算，计算结果汇总如下。

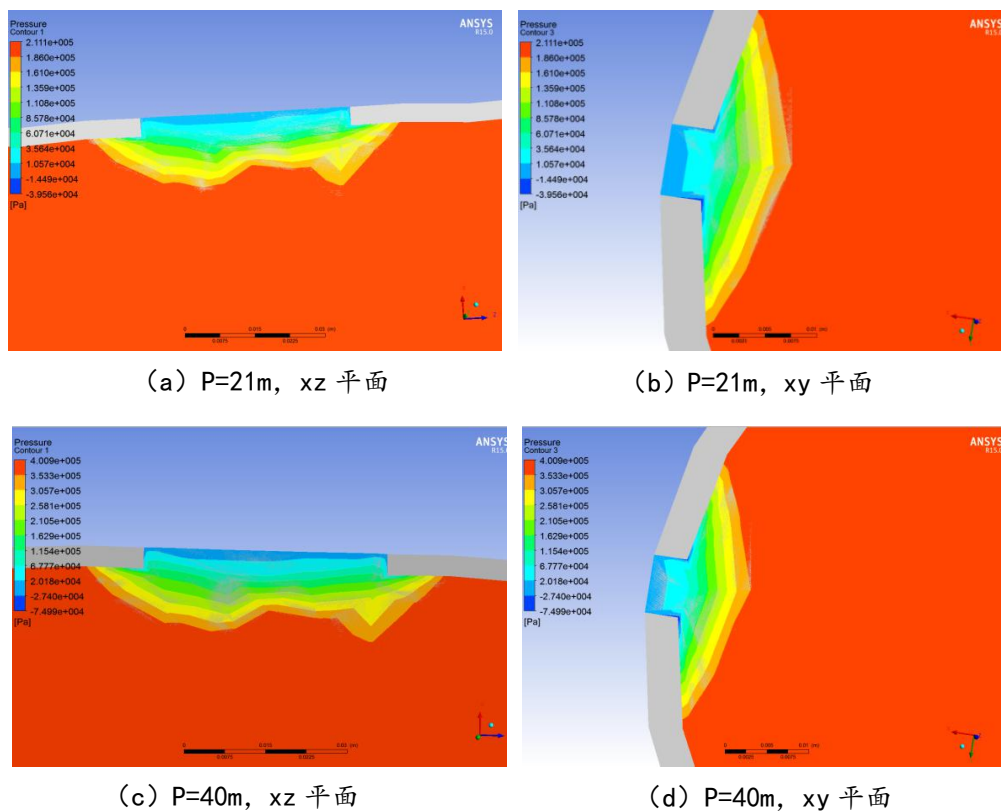


图 4-1 进口压力不同时漏口压力分布图

Fig.4-1 Distribution diagram of leakage pressure with different inlet pressure

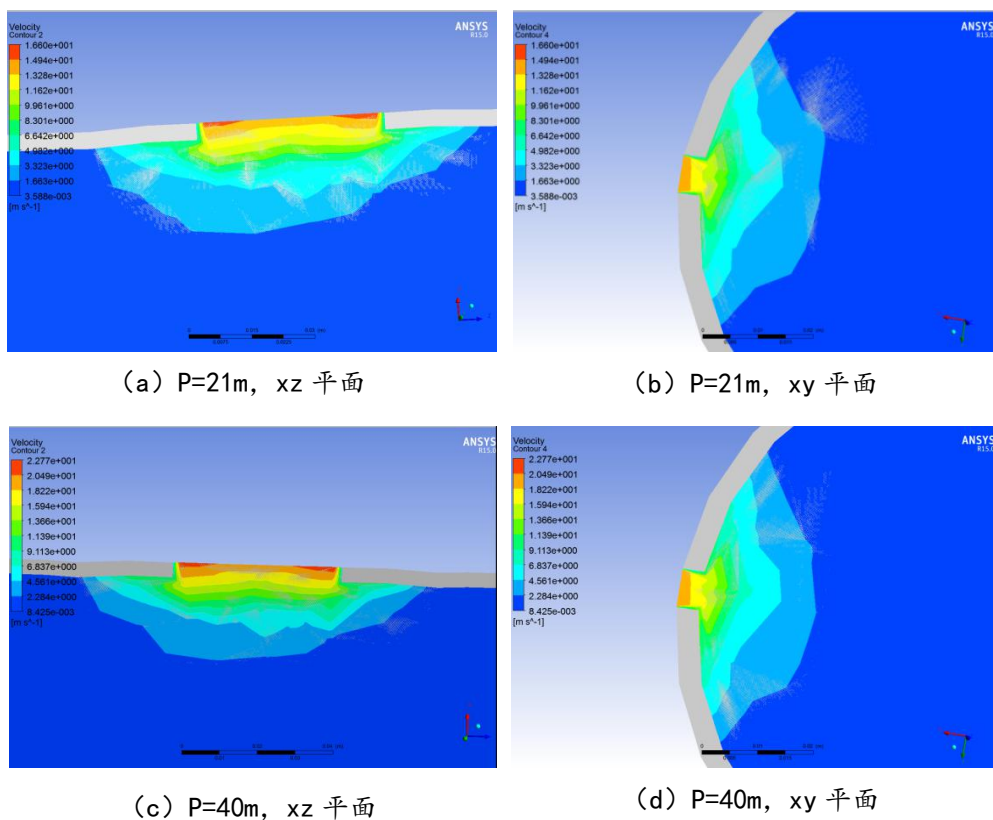


图 4-2 进口压力不同时漏口速度分布云图

Fig.4-2 Distribution diagram of leakage velocity with different inlet pressure

在漏口形状不变的情况下，管道压力从 21 米水柱增加到 40 米水柱，管内压力分布梯度基本不变，通过图 4-1 可以看出，两种进口压力下漏口附近的压力分布云图的形状和颜色基本一致，只是各种颜色代表的数值不同，当管段发生漏失时，漏口处水高速流动，导致在漏口边缘地带形成了低压区，如图 4-1b 深蓝色部分所示，随着管内压力的增大，这里所产生的的负压也就会越大，在入口压力为 21m 时，漏口边缘的最小压力为-39560pa，当进口压力增加到 40m 时，漏口边缘的最小压力增大到-74990pa。这里的负压远低于外界的大气压，为了平衡压力，管外的物质会从压力高的地方流入管内压力低的地方，所以在管网漏失时，漏口周围的污染物会因此进入管网，为我们饮水问题带来安全隐患。管网压力越高，漏口边缘处产生的负压就越大，发生漏失时的危害就越大。

纵向漏口处的流速分布在不同的管道压力下都是漏口两端速度大，漏口中部速度小。第二章已经分析过，漏口对管道上游的流速影响较大，根据图 4-2 可以看出，随着管内压力的升高，管道整体流速变快，分别对比图 4-2a 与 c，图 4-2b 与 d，可以看出当管道压力升高后，图中天蓝色的区域缩小，说明随着压力的升高，漏口对管内上游速度的影响范围变小，但速度变化梯度变陡，漏口流速越大，所造成的漏失量和对外界环境的影响也就越大。

综上所述，发现在其他条件不变的情况下，管道压力越大，发生漏失时的危害就越大。第一，因为高压管段漏口处负压变大，管道外的污染物质更容易也更迅速的流入管道，混入到生活用水中，影响居民用水质量；第二，随着管道压力的增加，漏口处的平均流速变大，漏失量增大，同样的漏失时间，高压管道的漏失水量远远大于低压管道，浪费宝贵的淡水资源的同时还为供水公司造成了巨大的经济损失；第三，漏口处的流速越大，漏失水流对管道周围环境的冲刷力就越大，对于埋设在地下的供水管道来说，水流长时间的冲刷管道周围土体，会造成周边土体的密度分布不均，形成不均匀沉降，最终导致地面塌陷等危险事故。所以应在保证供水需求的前提下，降低整个管网的水压，不仅节约能源，还降低了管网发生漏失时社会的危害程度。

对于管网漏失的危害中，水资源的浪费是最主要也是最直观可以量化的危害。接下来主要针对漏失量方面进行细化的研究，分析在不同形状的漏口情况下，漏失流量与压力之间的关系。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/766031211051010101>