

闸门射流防冰的数值模拟研究

关 靖

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450011

摘 要:本文结合国内外结冰过程数值模拟研究情况,构建闸前水体的三维有限元模型,并基于SST κ-ω 湍流模型、VOF多 相流模型、焓—孔隙率技术的凝固与融化模型,使用Fluent软件对闸前水体在不同外界环境及射流工况下的紊流情况及结冰 情况进行数值模拟,在此基础上,采用多元非线性回归分析的方法归纳射流参数与外界环境之间的关系式。 关键词:湍流模型;VOF模型;凝固与融化模型;结冰;回归分析

Numerical simulation study on sluice gate jet anti-icing

Guan Jing

Huanghe Survey, Planning, Design and Research Institute Co., LTD. Zhengzhou 450011, Henan, China

Abstract: In this paper, a three-dimensional finite element model of the water body in front of the sluice is constructed based on the numerical simulation of the icing process at home and abroad. Based on the SST κ - ω turbulence model, the VOF multiphase flow model, and the solidification and melting model of the enthalpy-porosity technique, The Fluent software is used to simulate the turbulence and icing conditions of the water body in front of the sluice under different external environments and jet conditions. On this basis, the relationship equation between the jet parameters and the external environment is summarized by the method of multivariate nonlinear regression analysis.

Keywords: Turbulence model; VOF model; Solidification and melting model; Icing; Regression analysis

随着我国水生态文明建设的日益加强,景观闸门在城市 水体景观工程上的应用越来越广泛,但冬季高纬度地区气温 低下,水体经常发生结冰现象,冰体会对闸门施加冰压力甚 至造成闸门破坏,景观闸门上必须采取行之有效的防冰冻措 施。本文结合具体工程项目的实地调研情况,系统研究和总 结了目前常用的几种防冰冻措施,针对大跨度无中墩景观闸 门提出了射流防冰方案,为验证方案的合理性,进行了数值 模拟。

1 数值模拟研究现状

二十世纪八十年代起,国外就逐渐开始采用数值模拟 的方法对结冰过程进行研究,并把液相的对流纳入求解过 程中,将计算结果与所开展的大量实验进行对比来检验其 可靠性。

ANSYS Fluent、STAR-CCM+和OpenFOAM使用焓一孔隙 率技术来模拟水体结冰。王军^[1]曾利用Fluent软件对已知河段 在各种水文、气象环境下的河面结冰情况进行了模拟。樊玲 ^[2]使用了Fluent数值模拟方法研究了容器内水的结冰过程。鄢 新等^[3]基于Fluent对水体相变传热过程进行了数值模拟计算。 冯博等^[4]使用STAR-CCM+软件对曲轴通风管进行结冰数值模 拟,并且通过设计低温试验,对相关数值模拟的准确性进行 了检验。本研究采用Fluent进行数值模拟。

2 流体力学模型

2.1 湍流模型

由于射流的存在,模型内部的流动及水体自由表面的流 动为紊流,Fluent软件提供了多种模型来对紊流进行模拟, 包括标准、RNG和可实现的κ-ω模型,标准、BSL和SST κ-ω 模型,RSM模型,DES模型,LES模型等等,各模型具有其 不同的特点和适用条件,其中κ-ω模型目前在湍流流体的数 值模拟中应用最为广泛。综合考虑本次模拟的精度和速度, 选择SSTκ-ω模型来模拟湍流。

2.2 热传递方程

在本次模拟过程中,由于水深的变化,水体内部不同深 度处的水温有所不同,且水温与射流温度也存在着差异,在 湍流发生的过程中,会出现温度不同的流体内,由于各个微 团发生相对位置的改变而引起的能量传递过程,即热对流现 象。与此同时,为了更好地实现对各参数的模拟,在水体上 部设置空气层,而空气层也会与水体产生导热现象,导热现 象的本质是物体温度不同且相互接触从而产生的传热现象, 这个过程是自发的。

综上所述,在本次模拟计算中的热传递现象是不可忽视的,利用Fluent来对传热相关问题求解时需要将能量方程选项开启,以使得能量方程参与至迭代运算中。



2.3 多相流模型

计算域内的流体材料包含空气及液态水,因此涉及多相 流的计算。Fluent中提供了诸多数学模型来模拟现实中的多 相流,主要有VOF多相流模型、混合多相流模型、欧拉多相 流模型。

VOF模型使用固定的欧拉网格来跟踪表面,该方法 通过独立求解动量方程和处理穿过计算域的每一流体的体 积分数来模拟不能融和的流体。当计算结果中需要关注多 种流体之间的交界面时,采用这种模型是合适的。模拟两 相的交界面是其最为适宜的应用场景之一。本次计算目的 是较好的模拟自由表面的流动,因此采用计算精度较高的 VOF多相流模型。

2.4 凝固与融化模型

本次计算对结冰情况的模拟主要基于Fluent中的凝固与 融化模型,该模型主要采用了焓—孔隙率技术来模拟水体结 冰,在该模型中,液固糊状区被视为孔隙率等于液体分数的 多孔区,糊状区被定义为"伪"多孔介质,随着相变过程 的不断进行,孔隙率也不断降低。最终,当相变过程结束之 后,孔隙率降至零,速度也被限制为零,并在动量方程中添 加了适当的动量汇项,以表征固体材料的存在引起的压降。

2.5 模型可靠性分析

关于该技术的可靠性在诸多研究中已予以证实:冷梦尧 等⁶⁵在采用数值模拟的方法来研究水滴碰撞至不同的冷表面 上的结冰情况时,使用了VOF多相流模型与焓一孔隙率技术 相结合,计算了冷水滴碰撞不同特征的低温表面之后的结冰 过程,计算的结果与实际情况相吻合;彭尊等⁶⁶利用Fluent中 的凝固与融化模型来数值模拟小方坯结晶器水温水速对传热 过程影响,并分析坯壳生长及其对传热的影响。通过与实验 进行对比,证明了模型精度较高。

3 数值模拟及分析

3.1 模型建立

选取闸门前部水体为研究对象,对其进行数值模拟分析。选取的水体为尺寸为1m×3m×0.5m。水体上部另设一块 计算域,在模拟过程中以空气填充,目的是为了更好的模拟 自然界中水体与空气产生的热交换现象,从而更好地模拟水 体的温降。同时,空气层的设置还能很好的模拟水体自由表 面,水体与空气层之间可以产生物质交换,以便模拟水体自 由表面的紊动现象,设置的空气层尺寸为1m×3m×0.25m。

为了确定在此次模拟中采用的网格类型,分别采用两种 划分方式进行试算,发现即便四面体网格的网格数量多于六 面体网格,模拟出的结果仍不如六面体网格清晰,而本次研 究对结冰边界的清晰度要求较高,故四面体网格计算效果不 好,且模拟速度也会较慢。因此,此次模拟的网格划分采用 六面体网格。

3.2 边界条件的确定

边界条件的设定对求解结果有较大的影响,是Fluent数

值模拟的关键问题之一,为了保证模拟结果的准确性,选取 合理的边界条件是重要前提。首先,除空气与水体交界面 外,水体的其余五个面都设置为压力出口,以此来模拟结冰 过程中空气的运动,并加快收敛速度,提高收敛精度,空气 相的回流体积分数设置为1。交界面设为内部面,来模拟水 的自由表面,并且可以与空气产生热量交换,两个计算域也 可产生物质交换。射流孔口处设置为速度进口,速度方向可 调,射入温度可调,速度方向可通过设置速度沿各坐标轴方 向的分量大小来确定,以上各参数均可在模拟时根据工况设 置的需要来确定。

3.3 计算工况

为准确了解射流参数与外界气温及水温的关系,本次模 拟共进行了140余个算例,79个工况的计算,其中,外界气 温的变化区间为-5℃至-35℃,每次变化5℃;入射水温变化 区间为0.1℃至1.2℃,每次变化为0.1℃;入射流速变化区间 为0m/s至3.5m/s,入射流速根据计算结果进行调整。

3.4 回归分析

在回归分析中,本研究将入射速度定义为因变量,将外 界气温、入射温度看作自变量,分析入射速度随外界气温、 入射温度变化而变化的关系。

当外界气温一定时,入射速度随着入射温度的增加而减 小,如图1所示



图 1 外界气温t_w一定时,入射速度v随入射温度t_s变化的关系 当入射气温一定时,入射速度随着外界温度的降低而增 大,如图2所示





 $v = 0.257e^{0.118t_w \cdot t_s} + 0.03t_w + 0.077t_s + 0.07t_w \cdot t_s - 0.147$



式中,v → 入射速度(m/s); t_w → 外界气温(\mathbb{C}); t_s → 入射温度(\mathbb{C})。

拟合的R²为0.964,拟合结果良好。如图3所示



图 3 多元回归分析的拟合曲面

4 结论

从模拟结果看,外界气温、入射温度和入射速度有很好的相关性。

从计算结果看,当外界气温确定的情况下,入射速度随 入射温度的升高而减小,这是因为入射温度的升高可以使射 入的水流携带更多热量,从而为闸前水体的自由表面提供更 多的热补给,提升表面水体的自由能。当水体自由表面通过 入射水流获得的热补给增多时,自由表面保持不结冰状态所 需要的、由水流紊动所提供的能量就会相应降低,从而使入 射速度随入射温度的升高而降低。

从计算结果看,当入射温度确定的情况下,入射速度 随着外界温度的降低而增大,这是因为在外界气温较低时, 闸前水体需要更大的射流速度来保证自由表面不发生结冰现 象,而更大的入射速度会产生更强的水流紊动,使水分子之 间的掺混更剧烈,能量传递更加充分,从而扩大了入射水流 所携带的热量对结冰情况的影响,使入射速度在外界气温较 低时对入射温度的变化敏感。

两个计算结果与结冰原理和实际情况相吻合,模拟结果 可信。

参考文献

[1] 王军, 石磊. 基于Fluent的冰塞融化模拟[J]. 山西建筑, 2009, 35(15): 362-363.

[2] 樊玲. 结冰融冰过程的数值模拟[D]. 南京航空航天大学, 2005.

[3] 鄢新. 基于Fluent冰水固流转化过程的仿真模拟与实验研究[D]. 青岛科技大学, 2013.

[4] 冯博, 朱箴箴, 曾志新, 等. 曲轴通风管结冰数值模拟 与试验研究[J]. 汽车零部件, 2021, 4(6): 36-40.

[5] 冷梦尧,常士楠,丁亮.不同浸润性冷表面上水滴碰撞 结冰的数值模拟[J]. 化工学报, 2016, 67(7): 2784–2792.

[6] 彭尊, 包燕平, 梅宁, 等.小方坯结晶器水温水速对传 热过程影响[J]. 工程科学学报, 2015, 37(7): 889-895.