

## 风雨对于建筑外墙面层脱落影响的研究

刘晨 杨彤 孙王虎\*

扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127

**[摘要]**针对外墙面层脱落时常发生, 不仅影响了建筑物美观, 更严重影响了人们生命财产安全的问题, 文中调查了外墙面层脱落的主要影响因素并进行了归纳统计, 再采用模拟仿真的方法对外墙面层脱落的原因进行深入研究, 着重研究气候中的风和雨对建筑外墙面层的影响, 通过 space claim 软件建立裂缝模型, 使用 icem 软件对裂缝模型进行网格划分再结合 fluent 软件的多相流设置进行模拟仿真, 研究雨水在风荷载的作用下渗透到外墙面层的流速、压力。通过分析得到在风荷载 2.5m/s 的速度水平吹动下, 裂缝中的雨水最大会以 35.2pa 的力对裂缝内的壁面进行冲击, 最终外墙面层会在风荷载和重力的作用下使得外墙面层脱落。

**[关键词]**外墙面层; 脱落; 风雨; fluent

DOI: 10.33142/aem.v4i12.7536 中图分类号: TU974 文献标识码: A

### Study on the Influence of Wind and Rain on the Falling Off of Exterior Wall Surface

LIU Chen, YANG Tong, SUN Wanghu\*

College of Architecture Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, 225127, China

**Abstract:** In view of the frequent occurrence of the fall off of the exterior wall surface, which not only affects the beauty of the building, but also seriously affects the safety of people's lives and property, this paper investigates the main factors affecting the fall off of the exterior wall surface, summarizes and counts them, and then uses the simulation method to conduct in-depth research on the causes of the fall off of the exterior wall surface, focusing on the impact of wind and rain in the climate on the exterior wall surface of the building. The crack model is established by space claim software, the crack model is meshed by icem software, and the multiphase flow setting of fluent software is used for simulation to study the velocity and pressure of rainwater penetrating into the exterior wall surface under the action of wind load. According to the analysis, under the horizontal wind load of 2.5m/s, the rainwater in the crack will impact the wall in the crack with a maximum force of 35.2 pa, and finally the external wall surface will fall off under the wind load and gravity.

**Keywords:** exterior wall surface; fall off; wind and rain; fluent

### 引言

外墙面层脱落造成的安全事故在全国各地时有发生, 仅“2018 年度, 公开报道外墙脱落事故累计 305 起, 其中伤亡人员达 70 人”<sup>[1]</sup>。外墙面层的破坏力在于其加速度产生的冲击力<sup>[2]</sup>。例如 2kg 的外墙面层从 5 层楼坠落, 取高度  $h=14\text{m}$ , 撞击时间  $t=0.02\text{s}$ , 忽略空气阻力, 利用  $v^2=2gh$ 、 $p=mv$ 、 $Ft=mv$ , 可计算得: 其落地速度为  $v=7.5\text{m/s}$ , 动量  $p=15\text{kg}\cdot\text{m/s}$ , 对地面物体的冲击力  $F=76.5\text{kgf}$ 。由此可见, 外墙面层脱落造成的冲击力非常大。

引起外墙面层脱落的原因有很多种, 国内外学者对此进行了大量研究, 归纳起来主要有设计、施工、材料、外力等方面。

在设计方面, 李楹, 董峙良, 熊伟<sup>[3]</sup>的研究表明导致外墙防水设计不够规范是外墙面层脱落的原因之一。Bateman, R<sup>[4]</sup>提出了在对外墙设计时要注重对外墙的风雨防漏的细部设计, 用来防范外墙因风雨产生的外墙破坏。陈敏<sup>[5]</sup>的研究指出在设计中没有考虑到建筑物饰面层的重量、保温层的自重和变形缝, 造成后期外墙保温层自

重过大及经过多次的受热膨胀, 也会致使外墙面层产生裂缝, 空鼓, 甚至脱落。梁淑红, 王能文, 王斌<sup>[6]</sup>发现, 在外保温的设计中, 设计人员常常忽视对结构挑出部位的保温, 使其产生冷桥现象, 这样不但降低了保温效果, 还会在相关部位产生冷凝结露、返霜现象, 从而破坏建筑物的结构, 进一步造成建筑物保温层的开裂及脱落。

在材料方面, 陈大鸿<sup>[7]</sup>的研究统计表明, 由最初的聚苯乙烯泡沫板, 再到挤塑聚苯板、酚醛树脂板, 再到无机类的泡沫混凝土板、岩棉板等, 目前外墙脱落工程采用保温材料多为苯乙烯泡沫板; Bishara, Ayman<sup>[8]</sup>等人研究了外墙材料对于外墙面层的影响, 选用强烈色调的外墙材料, 容易使得外墙表面温度极具升高, 对外墙面层系统破坏, 使得外墙面层发生损坏。袁丽景, 赵江涛, 李智, 陈保印, 高华光<sup>[9]</sup>的研究发现挤塑聚苯板在自然条件下需经 42 天方可到达收缩稳定的状态, 但是在实际过程中这一条件基本很难达到, 未达到自然条件下的保温板板面已然出现粉化现象, 未勒令退场处理反而正常使用, 即使保温板表面施加抗裂砂浆保护层, 后期在自重及风荷载的作用

下,很快就会出现面层开裂及坠落现象。

在施工方面,李展,吴玉杰,王湘珍<sup>[10]</sup>发现“在外墙外保温系统中,保温板一般要求进行界面处理。挤塑聚苯板表面未进行界面处理,导致粘结砂浆的粘结力不足”,在长时间的使用下外墙面层会因为粘结力不足而发生坠落。张善国<sup>[9]</sup>指出“基层的平整度是关键因素。墙面平整度大于 10 mm 时,必须对墙面基层进行处理;否则,会影响挤塑板与基层的粘接面积,内部空腔过小或过大,保温板会在负风压作用下脱落”。张自国,魏德新,刘丽莘<sup>[11]</sup>研究发现保温板采用点粘施工方法在基层墙体与保温板之间形成空气间层,在大风天气空气间层与外侧空气之间的压力差导致保温板脱落。姜平,张学建,张进军<sup>[12]</sup>研究表明在施工过程中由于胶浆粘贴面积不够,聚苯板四周根本没有胶浆,这样势必造成粘接面积不足,粘接能力不够,同时由于四周没有胶浆封边,造成聚苯板封闭不严,如遇表面有裂缝,就容易从此处透风,当风负压大于胶的粘接强度时聚苯板将脱落。周心连,丁志军<sup>[13]</sup>指出施工人员没能按设计砂浆配比要求拌制砂浆,人为减少了水泥用量,误认为减少水泥用量可减少抹灰的开裂,以致于造成砂浆强度低粘结力不足。

在外力方面,宋允伟<sup>[14]</sup>发现长时间的使用过程中,一些外力的因素也会导致面层的空鼓,脱落,比如由于地基的不均匀沉降会使建筑物发生结构物墙体的变形,错位,造成墙体的严重开裂,面层脱落。Casolo, Siro<sup>[15]</sup>阐述了地震冲击有时以一个序列的形式发生,在空间和时间上接近,具有相当强度的破坏性事件。在这种情况下,建筑物外墙损坏的很大一部分可能与逐渐变得更加脆弱的结构的累积损坏有关。既有建筑由于地震的作用,结构发生损坏,外墙面层也会随之发生位移,继而发生损坏,最后会导致外墙面层出现空鼓,脱落。

在气候方面,史建军<sup>[16]</sup>指出在外墙粘结处或多或少会出现微小的裂缝,这样水汽必然会侵入到外墙面层,这种微小裂纹在冰融解除后不能复原,然后孔隙率增大,孔隙变大,经过反复的冻融循环导致裂缝不断扩大,粘结材料的粘接力下降,最终形成外墙面层的空鼓,脱落。Lahdensivu, Jukka<sup>[17]</sup>研究了霜冻对外墙面层的破坏产生的很大的影响,现有外墙的保护孔隙率很少满足要求,湿气行为和环境应力条件对混凝土的霜冻损伤有很大影响。

在监管方面,李大伟<sup>[18]</sup>指出严格抽查施工材料是否满足设计要求,执行专项施工方案的情况,施工工序与样板工程是否达到一致,严禁在不符合施工气候条件下进行施工,严禁在温度较低或大风天气进行施工。

综上所述,国内外学者对外墙面层脱落的原因已做了大量研究,包括设计、施工、外力、监管等方面,但对于气候因素,尤其是风、水对外墙面层产生的影响鲜有深入研究,因此本文将对实际现象建立微小模型,进行网格设置,并结

合 fluent 流体力学软件对这些问题进行深入研究。

## 1 仿真模拟建立

### 1.1 模型的建立和流体域的设置

本文利用 space claim 软件,建立了一段简化的外墙裂缝模型,其中部矩形为流体域,矩形四周为空气域,如图 1 所示。

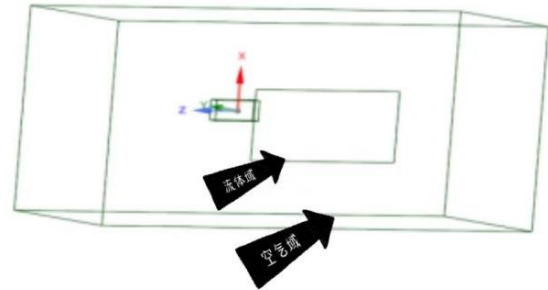


图 1 裂缝模型

### 1.2 网格的设置

CFD 计算中采用的网格大致分为结构化网格和非结构化网格两大类,结构化网格具有网格生成速度快,网格生成质量好,数据结构简单的优点,适合于流体计算。本文中因为要使用多相流模型,需要高质量的网格,利用 icem 软件建立结构化网格。如图 2 所示。

### 1.3 flent 设置

流体运动的规律都是以质量、动量和能量三大守恒定律等基本物理定律为基础的。而这些基本定律可由数学方程组描述,采用数值计算方法和图像显示对包含有流体流动和热传导等相关物理现象进行分析,该方法即是计算流体力学(CFD)。该法的优点在于数值模拟可以形象地再现流动情景,没有具体实验带来的经费投入、人力和物力的巨大消耗及周期长等许多困难。因此,要研究水流在墙体内流体运动规律可以采用该方法<sup>[20]</sup>。近年来,CFD 发展很快,有许多比较成熟的商业软件包,而 Fluent 是目前功能最全面、适用性最广、国内使用最广泛的 CFD 软件之一,Fluent 的多相流设置可以很好的展现风荷载对于雨水的影响。

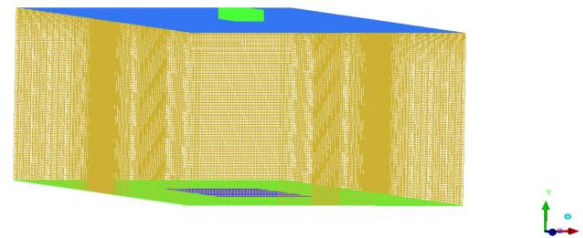


图 2 结构化网格

动量守恒方程:微元体内中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各种力之和。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (1)$$

能量守恒方程: 微元体中能量的增加率等于微元体的净热流量加上体积力与表面力对微元体所做的功。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (2)$$

Fluent 提供了两种求解器用来适应各种情况下的计算, 包括: 基于压力的求解器、基于密度的求解器。基于压力的求解器适用于不可压缩流体, 基于密度的求解器适用于可压缩流体。针对本文的流体情况, 选择基于压力的求解器。

根据流体力学的控制方程在 fluent 中的时间类型分为了稳态和瞬态两种情况。稳态表示流体不会随着时间的变化而变化, 瞬态表示流体会随着时间的变化而变化。渗透到建筑外墙中的流体会随着时间的变化而不断运动。因此选择瞬态类型。

层流与湍流的确切关键在于雷诺数 (Re) 的确定。Re ≥ 4000 时为湍流, Re ≤ 2300 为层流。计算公式如下:

$$Re = \rho v d / \mu$$

ρ - 流体的密度

v - 流体的流速

d - 物体的特征长度

μ - 流体的黏性系数

水的正常粘度为  $2.98 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 入口速度为 2.5m/s, 水的密度为  $10^3 \text{ kg/m}^3$ , 外面面的矩形裂缝的长度为 230mm。

$Re = \rho v d / \mu = 1000 \times 2.5 \times 0.23 / 2.98 \times 10^{-3} = 192953 > 4000$  因此在层流与湍流中选择湍流。

Fluent 在模型的选择设置中提供了很多选择, 包括: 多相流模型、能量方程、湍流模型、辐射模型、组分输送和反应模型、离散型模型、凝固和融化模型、气动噪声模型等, 在本文渗透到外墙内部的雨水经过风荷载的作用下, 持续的向外墙内部流动, 属于多相流中的气-液两相流, 设定空气为主项, 水流为次项。考虑到水和空气的相互作用力, 将表面张力系数设为 0.072。

多相流中的 vof 模型在不同的的流体组分公用一套能量方程, 计算时在全流场的每个计算单元内都记录下各流体组分所占有的体积率, 适用于本文中流体现象。

据国家气象中心数据, 扬州市 2021 年全年的平均风速为 2.5m/s, 将入口边界设置为速度入口, 速度值为 2.5m/s。将出口边界设置为 wall。使得雨水在流到出口边界后会不再向外流动。

墙体内的雨水会随着时间的变化而流动, 为不定常计算, 选为 PISO 求解方法。PISO 的另一个优势是可以处理畸形较大的问题, 使用邻近修正修复网格。

针对本文的模型, 在入口处开始设置初始化, 利用 patch 功能在矩形砖缝上添加水流。

通过对残差曲线的判断, 认定模拟仿真实验收敛 (如图 3)。

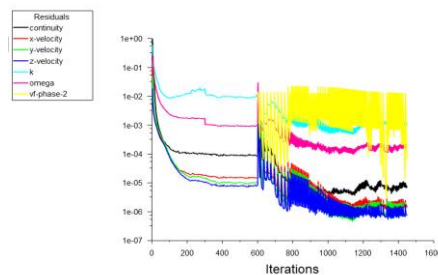


图 3 残差曲线

选取了裂缝壁面从 0.1s 到 1s 的受力过程图 (如图 4-图 13)。

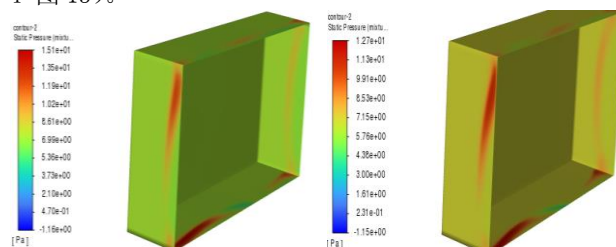


图 4 0.1s 压力云图

图 5 0.2s 压力云图

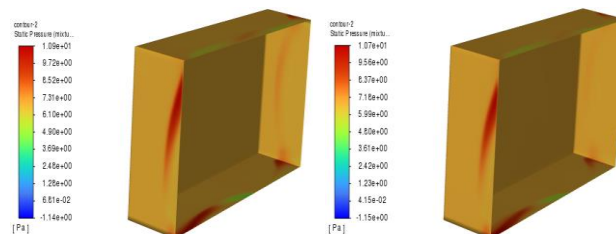


图 6 0.3s 压力云图

图 7 0.4s 压力云图

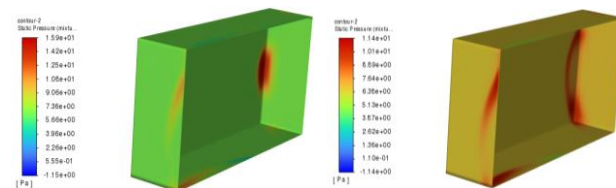


图 8 0.5s 压力云图

图 9 0.6s 压力云图

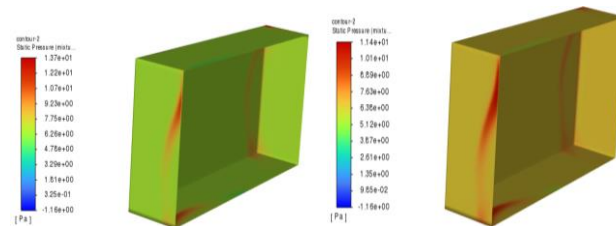


图 10 0.7s 压力云图

图 11 0.8s 压力云图

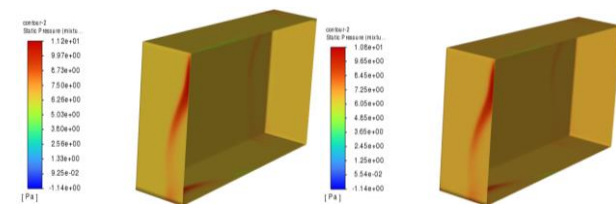


图 12 0.9s 压力云图

图 13 1s 压力云图

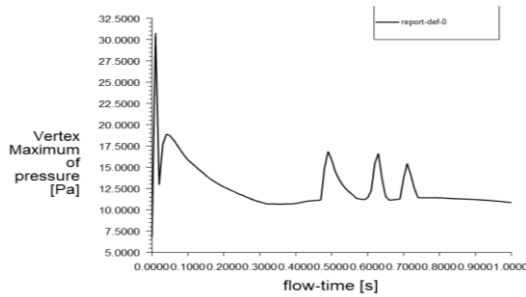


图 14 壁面最大压强

从图 4-图 14 分析, 裂缝内的雨水经过风荷载的作用不断的冲击壁面, 壁面压强由大变小, 再由小变大, 产生很大的压力, 最大值达到了 32.5pa。

#### 速度矢量图分析

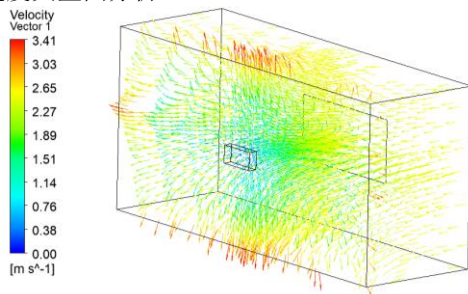


图 15 速度矢量图

如图 15 分析, 经过风荷载的作用下, 裂缝处的雨水会以一定的速度向裂缝里的壁面冲击, 最大速度达到了 3.41m/s, 会对裂缝里的壁面产生很大冲击波。

## 2 分析与结论

通过压强图分析雨水通过风荷载的吹动下在 1 秒的时间内, 壁面的压强从最初的压力值直线上升到 35.2pa, 压力值不断的下落, 在 0.5 秒到 0.7 秒内压力值反复上升下降, 之后又继续下降。通过速度矢量图分析雨水向裂缝冲击的速度会随着时间越来越小, 他们和压强呈现出相互关系。因此, 在气候方面, 雨水在风荷载的作用下不断向裂缝内冲击, 裂缝内四周壁面会形成松动, 最终造成了外墙的脱落。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 长三角地区既有建筑外墙的装配化改造模式研究, 51878588。

#### [参考文献]

- [1]周丹, 吴斌, 郭锋. T/CECS 574-2019《既有建筑外墙外保温改造技术规程》解读[J]. 工程质量, 2019, 37(10): 1-5.
- [2]张莉莉, 郎松军, 张敢. 浅析既有建筑外墙材料坠落的风险及应对建议[J]. 散装水泥, 2020(2): 73-74.
- [3]李楹, 董峙良, 熊伟. 外墙饰面砖空鼓及脱落原因分析与控制方法[J]. 工程质量, 2021, 39(2): 92-94.
- [4]Bateman R. A detailing method for improving

leakage prevention of exterior wall weatherproofing[J]. PERFORMANCE OF EXTERIOR BUILDING WALLS, 2013(1422): 84-99.

- [5]陈敏. 某市外墙外保温脱落现象调查研究[J]. 安徽建筑, 2021, 28(4): 165-166.
  - [6]梁淑红, 王能文, 王斌. 外墙外保温质量问题分析及防治措施[J]. 中国建材科技, 2012, 21(3): 19-22.
  - [7]陈大鸿. 某工程外保温饰面层脱落问题浅析[J]. 工程质量, 2017, 35(8): 20-22.
  - [8]Bishara, Ayman, Kramberger-Kaplan, Helge, Ptatschek, Volker. Influence of different pigments on the facade surface temperatures[J]. 11TH NORDIC SYMPOSIUM ON BUILDING PHYSICS (NSB2017), 2017(132): 447-453.
  - [9]袁丽景, 赵江涛, 李智, 等. 建筑外墙外保温抗裂防脱落施工技术[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(1): 316-318.
  - [10]李展, 吴玉杰, 王湘珍. 外墙外保温系统脱落原因分析及预防措施[J]. 河南科技, 2021, 40(25): 116-119.
  - [11]张自国, 魏德新, 刘丽莘. 外墙外保温系统保温板脱落的研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2017, 18(2): 62-64.
  - [12]姜平, 张学建, 张进军. 聚苯板薄抹灰外墙外保温系统的质量通病及防治[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2010, 27(1): 15-18.
  - [13]周心连, 丁志军. 由一起外墙面砖施工质量问题引发的思考[J]. 浙江建筑, 2008(10): 134-135.
  - [14]宋允伟. 房屋建筑墙体裂缝形成原因及施工防治和技术处理[J]. 住宅与房地产, 2020(21): 186.
  - [15]Casolo, Siro. A numerical study on the cumulative out-of-plane damage to church masonry facades due to a sequence of strong ground motions[J]. EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS, 2017, 46(15): 2717-2737.
  - [16]史建军. 冻融环境对外墙外保温系统中聚合物水泥砂浆性能的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
  - [17]Lahdensivu, Jukka. Repair Possibilities of Concrete Facades Made Insufficient Frost Resistant Concrete. [J]. NORDIC CONCRETE RESEARCH, 2011, 43(1): 453-456.
  - [18]李大伟. 住宅工程外墙外保温系统 EPS 板脱落原因和监管要点[J]. 工程质量, 2021, 39(1): 205-207.
  - [19]汪强, 徐建平. 可渗透反应墙墙体内部流速及流态数值模拟[J]. 安徽工程大学学报, 2014, 29(3): 12-16.
- 作者简介: 孙王虎(1967-), 男, 博士研究生, 正高级建造师, 研究方向为绿色建筑技术。