

# 通过多相流仿真 指导污水处理厂设计

荷兰 TAUW 公司的工程师和多梅尔河水务委员会借助计算流体动力学仿真, 在提升多梅尔河水质的同时, 最大限度地降低了埃因霍温污水处理厂的建造成本。

作者 **SARAH FIELDS**

多梅尔河 (Dommel) 发源于比利时南部边境, 途经荷兰埃因霍温市 (Eindhoven), 一路向北汇入宽阔的马斯河。流域中的污水处理厂以及十多个城市的 200 多道合流式污水溢流 (combined sewer overflows, 简称 CSO) 都会向多梅尔河排放污水, 日均污水排放量接近 17 万立方米。

多梅尔河水务委员会负责监测河流的水质状况, 并致力于实现人类生活、环境保护和经济发展之间的最佳平衡。水务委员会为达成这一目标启动了 KALLISTO 项目, 这个综合研究项目旨在通过制定一套最具经济效益的措施, 尽可能地减少由污水处理厂生物水处理与合流式污水溢流共同造成的河水氧含量下降和氨含量上升等问题。通过实现上述目标, 水务委员会不仅能有效实施《欧盟水框架指令》(Water -

Framework Directive), 更有利于维持多梅尔河生态系统的稳定。

多梅尔河水务委员会的水处理技术高级顾问 Tony Flameling 表示: “我们一直严格控制着多梅尔河水中的磷酸盐、氮和悬浮物含量。为改善河流的水质状况、拥有更健康的河流, 此类物质含量的标准将会更加严格。”为了实现目标, 水务委员会引进了一套曝气系统 (将空气中的氧强制加入水中), 希望在将生物处理废水排入河流前, 提高水中的氧气含量。“引进曝气系统的目的是为了避免多梅尔河的生态系统因水中氧含量过低而遭到破坏。”Flameling 解释道。

在进行曝气处理之前, 需要先对污水进行预沉淀、污泥活化和澄清处理, 用于去除营养物质和固体物质。为了尽量降低处理过程中的能耗, 需要使水位维持在一



图 1. 埃因霍温污水处理厂鸟瞰图。

定的高度, 以确保水能够流经整个处理厂 (图 1)。

为了研究引入曝气系统对水体的影响, Flameling 与荷兰 TAUW 公司的水处理技术和水资源管理顾问 Ronnie Berg 进行了深入的交流。

Berg 解释道: “如果污水管道中的水位过低, 氧气将无法有效传递; 但如果水位过高, 脏水又可能会从曝气池中溢出, 流入

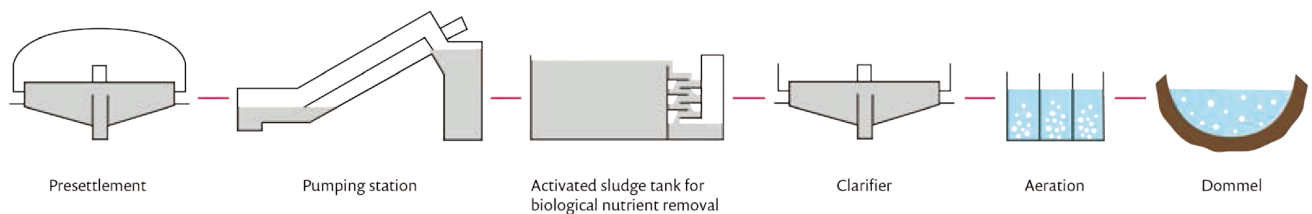


图 2. 埃因霍温污水处理厂的水处理流程图。在将处理后的污水重新注入多梅尔河之前, 对污水进行曝气处理。图注: Presettlement - 预沉淀; Pumping station - 污水泵站; Activated sludge tank for biological nutrient removal - 用于去除营养物质的活性污泥池; Clarifier - 澄清池; Aeration - 曝气; Dommel - 多梅尔河



图 3. 曝气通道出口处的可调出水堰。

沉淀池, 污染出水。”(图 2)。

另一个潜在问题是, 水位过低会导致污水处理流程无法正常进行。通过分析污水通道及与之相连的外流通道中的流体形态, 水务委员会可以确定系统的最佳设计方案, 最大限度地提升曝气效果。

### ⇒ 气泡: 鱼类的朋友, 水流的敌人?

为了充分认识曝气系统和出水堰(图 3)对水流和水位的影响, Berg 使用 COMSOL Multiphysics® 软件建立了多相流仿真。

引入曝气池后, 需要对现有通道进行改造, 为此, Berg 为出水通道创建了一个几何模型(图 4), 其中包含通道壁、已有的导流板以及曝气元件的计划安装位置。

Berg 详细设定了曝气单元的布局、可调出水堰不同闸门的高度以及多梅尔河的水位。通过对系统进行分析, Berg 能够判断导流板的位置是否合理, 以及流体形态如何随曝气、季节和多梅尔河的水位而变化。

Berg 建立了一个含有强湍流和分散气泡的流体流动模型。借助软件中内置的“气泡流,  $k-\epsilon$ ”接口, Berg 能够捕捉曝气过程对流体形态的影响。此外, 通过模拟气泡引起的湍流以及追踪有效气体密度, 他还分析了气泡产生的附加阻力和通道内的螺

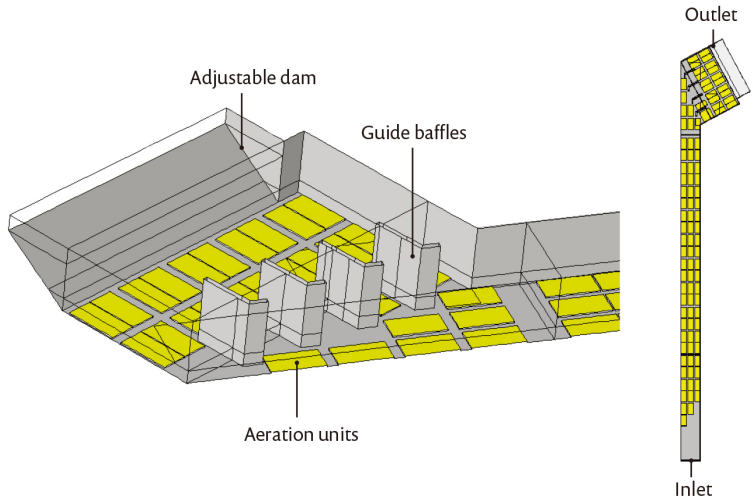


图 4. 曝气通道的几何布局。曝气单元以黄色表示。图注: Adjustable dam - 可调出水堰; Guide baffles - 导流板; Aeration units - 曝气单元; Inlet - 入口; Outlet - 出口

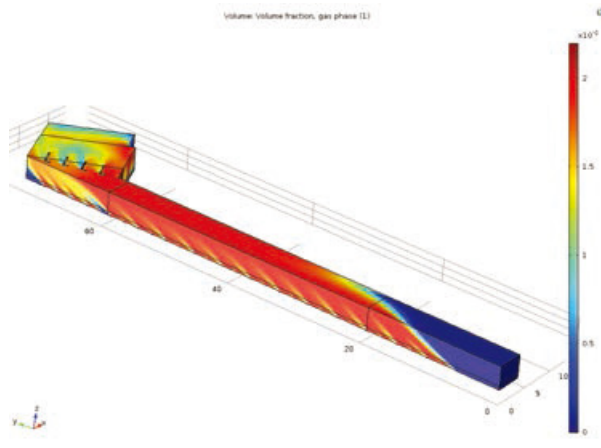


图 5. CFD 仿真分析结果显示了多梅尔河处于高水位时的气相体积分数(即气体在水中的体积占比)。

旋流。

Berg 利用一组 CFD 仿真结果研究了多梅尔河的水位对流体形态的影响。他能清楚地了解通道内任意位置的气体体积占比, 用于判断曝气系统的有效性(图 5)。

除此之外, Berg 还评估了曝气单元在旱季多梅尔河的水位较低时的表现。当河水流量较小时, 在调节出水堰的所有坝段高度后, 河水在坝下会产生部分回流(图 6)。

Berg 通过分析水位、出水堰高度和曝气变量对流体形态的影响得出了多项

结论。他了解到, 如果出水流量较大, 曝气对水体基本没有影响。而在干旱时节, 河水流量减少, 曝气则会影响流体形态。然而, 由于曝气产生的阻力相对较小, 所以水流因阻力流回澄清池并污染出水的风险

“仿真软件让我们能够以一种可控的方式来调整参数, 帮助我们灵活地找到了最佳施工设计方案。”

—— RONNIE BERG, TAUW 公司顾问

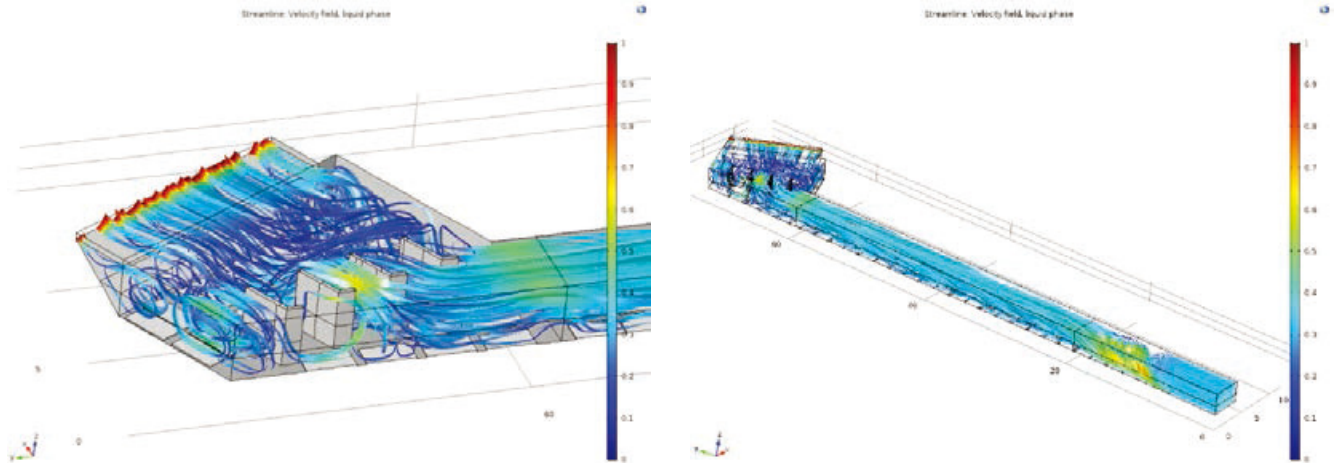


图 6. CFD 仿真结果显示了在气候干燥河水流量较小时, 处理后的污水在曝气系统中的速度场。



图 7. 工作状态下的埃因霍温污水处理厂的曝气通道, 它有效增加了注入多梅尔河水中的含氧量。左: 曝气通道出口处的可调出水堰。右: 从曝气通道的入口观察曝气通道。

比较低。

Berg 还研究了只打开两个出水闸门时的情况。此时, 外侧弯道的水流量明显更高, 这将导致内弯附近形成积水, 从而降低曝气过程的效率。总体而言, 在三个闸门全部打开通水时, 才能得到最佳的水流形态。

### ⇒ 仿真指引设计之路

Berg 根据详细的 CFD 分析结果, 向多梅尔河水务委员会提议不要拆除导流板。他还建议将上游的曝气组件按照线性布局进行排列, 因为这种布局不仅有利于改善

水质, 还能将施工成本降到最低。

“仿真软件让我们能够以一种可控的方式来调整参数, 帮助我们灵活地找到了最佳施工设计方案。”Berg 表示, “我们成功地以低成本、高收益的方式提高了埃因霍温污水处理厂出水的水质。”图 7 为运行中的曝气系统。Flameling 补充说: “为了保护河流的生态系统, 我们目前正在观察曝气系统是否能达到预期效果。”在未来的许多年里, 这个性能优异的曝气装置将为多梅尔河的生态系统和周边居民提供长期可靠的保障。❖



Ronnie Berg,  
TAUW 公司。



Tony Flameling,  
埃因霍温水务  
委员会。