

Discovery AIM 与 Ansys Fluent 联合设计优化蒸发冷却过程

[刘倩文]

[斯普瑞喷雾系统（上海）有限公司，201612]

[摘 要] 在喷雾蒸发冷却应用中，喷雾设备的选型及布置形式是解决该工业问题的关键因素，而喷雾设备的布置方案取决于蒸发塔内的烟气流动，因而正确了解和合理组织塔内的气体流场成为解决喷雾蒸发冷却相关问题的先决条件。使用 **Ansys Fluent** 可以进行从单相流到多相流完整的流场分析，并获得可靠的计算结果，但是详细数值分析所需的时间成本相对较高。本研究的目的在于对塔内烟气流分析环节通过联合使用 **Discovery AIM** 来加速整个设计过程。在一些喷雾冷却应用中，进口烟气中含有大量的粉尘或者酸性气体，不合理的喷枪布置会造成粉尘粘壁而造成蒸发塔的堵塞，或者引发塔壁处酸露凝结导致塔壁腐蚀。这类应用的一般设计思路是采用 **CFD** 来可视化内部的气流场，识别回流区的位置，气流组织时应尽可能减小回流区，布置喷雾设备时需尽可能避开回流区。本研究针对一个真实的工程项目，采用 **Discovery AIM** 设计了塔内的导流板布置方案，再采用 **Ansys Fluent** 优化了喷枪布置形式。通过 **Discovery AIM** 与 **Ansys Fluent** 联合的模式可以完成喷雾蒸发冷却项目的数值分析，且有效降低仿真所需的时间。

[关键词] **Discovery AIM**; **Ansys Fluent**; 喷雾蒸发冷却; 回流区; 喷嘴

Optimization of Evaporative Cooling Process by Joint Design of Discovery AIM and Ansys Fluent

[Qian Wen Liu]

[Spraying Systems (China) Co., Ltd, 201612]

[Abstract] In the application of spray evaporative cooling, how to select and position spray nozzle(s) are the key factors. Layout of spray nozzle(s) depends on the flow of flue gas in the cooling tower. Therefore, understanding and organizing the flow field in the cooling tower is the prerequisite to solve the problems related to spray evaporative cooling. Comprehensive and reliable results can be obtained by using **Ansys Fluent**, which conduct a set of simulation from single gas flow to multiphase injection flow. The simulation process needs a good

computational resource, and it is also time consuming. The purpose of this research is to accelerate the design cycle by introducing Discovery AIM into the traditional Ansys Fluent analysis process. In some spray cooling applications, the inlet flue gas contains dust particles or acid species, improper nozzle layout will cause dust particles to stick onto side walls leading to dust lumping, or acid dew condensation resulting tower wall corrosion. For such applications, CFD can be used to visualize the internal gas flow to identify the location of swirling zone and minimum recirculation zone volume to expectation. Spray nozzle(s) need to be carefully arrayed to avoid the whole spray plume entering the swirling zone. This research aimed at a real engineering project, is to design the layout of perforated bars by Discovery AIM to organize the gas flow, and then use Ansys Fluent to optimize the spray nozzle positioning. Introducing Discovery AIM into Ansys Fluent numerical analysis process can give out meaningful results meanwhile reduce simulation time effectively.

[Keyword] Discovery AIM; Ansys Fluent; Spray Evaporative Cooling; Recirculation Zone; Spray Nozzle

1 前言

喷雾蒸发冷却技术是一种通过介质发生相变来带走多余热量的降温方法，基本原理是将冷却液雾化成细小液滴，喷入待冷却的气体中进行传质传热的过程^[1]。由于该技术具有高效环保节能的特点，目前在众多工业领域中应用广泛^[2-6]；在炼钢除尘领域中，利用喷雾蒸发冷却技术对转炉干法或半干法除尘系统或电炉烟气除尘系统中的高温烟气进行除尘前的降温处理；在火力发电、金属冶炼、玻璃熔炉等工艺中，高温烟气在排放前均需进行除尘与降温处理，向回收了一部分热能的烟气中喷入水，一方面可以将烟气降温至布袋能承受的温度，另一方面可以降低烟气的流速来提高除尘效率；当采用电除尘工艺时，喷雾降低烟气温度提高停留时间的同时，还可以提高入口烟气的湿度，从而提高颗粒物的比电阻，为实现高效的除尘效率做好了准备。在一些垃圾焚烧处理、化工危废焚烧处理、医疗废弃物的焚烧处理中，喷雾蒸发冷却由于冷却速率迅速，能有效的减少二噁英的生成，是一种高效、安全环保的冷却方式^[7-9]。

对流量大、组分复杂、温度高的气体进行喷雾蒸发冷却的应用中，需在具有一定空间的蒸发冷却塔内完成降温过程，喷雾的降温效果取决于蒸发冷却塔的本体结构以及喷雾系统的布置，蒸发塔自身的内部结构将直接决定塔内烟气流动，喷雾系统需根据塔内的烟气流场结果来进行相应的选型及布置。在部分工程应用中，蒸发冷却塔的进口烟气中带有一定量的粉尘或者酸性气体，冷却含尘气体时不合理的喷嘴布置形式易造成塔壁积灰结渣，严重时会造成塔内整体阻塞，影响正常的生产活动，而冷却酸性气体时不合理的喷雾布置也容易造成塔壁腐蚀，严重时会造成塔壁塌方，引发安全生产事故，因此塔内烟气流场的合理组织显得尤为重要。通过采用 CFD^[10]的手段可以获得塔内初期基本流场的可视化结果，通过分析塔内的实际流动来设计喷雾系统的布置方案，并通过调整喷枪的位置、角度和伸入深度等手段让喷雾集中在气流密集区，实现局部的气液比均衡，从而降低塔壁上的湿壁风险或塔壁腐蚀情况。蒸发塔由于工艺布局等自身结构原因，其内部流场中几乎不可避免的会存在一部分回流区，原则上喷雾系统的部署应尽可能的避开回流区，在一定条件下可以通过改进塔的结构来减少回流区从而改善喷雾降温效果。蒸发冷却塔的喷雾降温过程涉及到传质传热问题，是一个复杂的多相流运动，可使用 Ansys Fluent 完成从单相流到

多相流完整的流场分析，进行多次的流场优化迭代，最终获得一个可靠的喷雾降温方案，但是详细数值分析所需的时间成本相对较高。

在蒸发冷却塔初期的基础流场（未喷雾）分析中，该过程为单一的烟气流动，该过程的仿真目的在于识别回流区的位置和大小，是一个定性分析，可作为喷雾系统布置前的指导。Discovery AIM^[11-12]作为一款快速分析软件，可以快速完成单相流的数值分析工作，在保证结果可靠性的前提下，可以降低整体的项目时间成本。本文拟采用 Discovery AIM 对某蒸发冷却塔喷雾前的基础流场进行分析，并根据流场分布情况设计了两组导流板布置方案，通过比较优化后的塔内流场结果，来确定合适的导流板布置方案。优化后的蒸发冷却塔将利用 Ansys Fluent 进行喷枪布置方案的优化工作。通过 Discovery AIM 与 Ansys Fluent 联合仿真的方式完成了喷雾蒸发冷却项目的数值分析，并且降低了仿真所需的项目时间。

2 蒸发冷却塔的数值分析

本文以某蒸发冷却塔为研究对象，对该蒸发塔内部的气体流场以及喷雾蒸发冷却过程进行数值分析。蒸发冷却塔的现场图如图 1 所示。该蒸发冷却塔的结构主要包括烟气进口管道、扩张段部分（喷雾系统安装位置）、蒸发冷却器（进行喷雾蒸发冷却过程的位置）、锥形收缩段部分以及方形出口，塔底部安装有卸灰板，用于出灰。



图 1 某蒸发冷却塔的现场图

采用 Discovery AIM，对该塔喷雾前的单相烟气流动情况进行数值模拟以识别塔内回流情况。首先利用 Discovery SpaceClaim 对该蒸发塔建立 CFD 分析所需的 1:1 的 3D 几何，蒸发冷却塔的具体尺寸如图 2 所示，烟气进口处的塔内径为 3.55 米，蒸发冷却器的垂直高度为 31.45 米，塔内径为 7.976 米，扩张段塔高为 11.2 米。

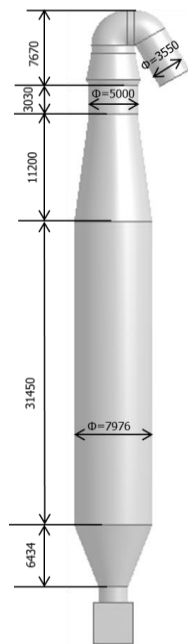
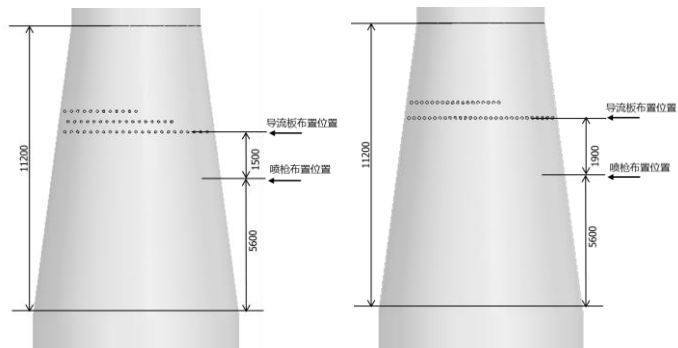


图2 蒸发冷却塔几何结构



(a) 导流板布置方案 1

(b) 导流板布置方案 2

图3 蒸发冷却塔扩张段

工况流量为 $867,00 \text{ Am}^3/\text{h}$ 的混合烟气，在蒸发塔前温度为 360°C ，进入该蒸发冷却塔进行喷雾降温，要求实现出口的烟气温度降温至 150°C ，由于进口烟气含有一定的灰尘含量 ($>100\text{mg}/\text{Nm}^3$)，不适宜的喷雾方式会造成雾滴撞击到壁面，而后灰尘粘附到沾湿的壁面上引起塔壁的积灰问题。为了保证蒸发塔能长期稳定运行，需要对喷枪的布置方式进行仔细的设计，喷雾应尽可能在整个蒸发冷却过程中都不撞击蒸发塔壁面。为实现该降温要求，根据物质平衡和能量平衡，即可计算获得需要蒸发的水量。计算结果显示，要实现烟气从 360°C 到 150°C 的降温目的，需使用温度为 24°C 、流量为 $734.4 \text{ L}/\text{min}$ 的冷却用水。本项目选用斯普瑞喷雾系统（上海）有限公司生产的 7 支 Flo Max[®] 10A 和 5 支 Flo Max[®] 25A 组合喷枪的形式进行喷雾降温。边界条件汇总见表 1。

采用 Discovery AIM 对未安装导流板蒸发塔内的气体流场进行快速分析，并基于此结果设计了两种导流板布置来优化塔内流场，考虑到塔内的烟气含尘量较高，不合适的导流板也会引发后续导流板上积灰的问题，综合考虑现场条件，在不改变原塔基本尺寸的前提下，在蒸发塔现有的施工平台位置插入一定数量的圆管导流板，采用这种形式导流板的优势是积灰风险小，圆管材料方便获得，利用现有平台也便于现场的改造施工。考虑到扩张段的中下段为预留的喷枪布置位置，导流板布置应同时考虑对喷枪影响，需以最小影响结果为前提。导流板布置方案 1 如图 3(a)所示，以预留的喷枪位置向上 1.5 m 高度为导流板第一层布置高度，在水平方向上，中心圆管位于扩张段轴心，依次向左向右各插入 11 根圆管导流板。第二层导流板位置位于第一层上方 0.4 m 高度，水平方向上以轴心向左偏离 125 mm 位置的圆管为参考，向左布置 10 根圆管，向右布置 6 根圆管。第三层导流板安装在第二层导流板的上方 0.4 m 高度，轴心以左在水平方向依次等距插入 12 根圆管。三层导流板总计布置 51 根，圆管管径为 90 mm ，圆管间距均为 25 mm ，插入方式为垂直于图 3(a)视图插入。布置方案 2 如图 3(b)所示，导流板改用管径为 101.6 mm 的圆管，第一层导流板位置在预留喷枪位置上方 1.9 m 高度，扩张段轴心处为中心圆管位置， 200 mm 等距均布 29 根圆管。

第二层导流板安装于第一层上方 0.6 m 处,以轴心向左偏移 100 mm 位置插入的圆管为参照,向左水平方向上间距 200 mm 依次插入 13 根圆管,向右水平方向上插入等距的 4 根圆管,布置方案 2 所有圆管间距均为 200 mm,布置圆管总计 47 根,插入方式为垂直于图 3(b)视图插入。

在 Discovery SpaceClaim 中对蒸发塔增加不同导流板形式的几何模型重建。为保证计算结果的一致性与可比性,使用 Discovery AIM 处理网格时,对三组蒸发塔进行同样的网格划分方法,对规则塔体部分使用六面体网格,不规则塔体部分使用四面体网格,求解器网格控制默认为多面体转换功能,边界层层数为 3 层,由于塔内布置的圆管数量不同,生成的网格数量上会有一定差异,最终原塔的网格生成数量约为 10 万,方案 1 的网格数量约为 700 万,方案 2 的网格数量约为 600 万。Discovery AIM 仅用于分析塔内单相流场,为简化模拟过程,不考虑组分扩散的影响,流动介质选择单一空气,湍流模型选择 Realize k-e 模型以充分捕捉塔内的回流效应,三组数值分析的相关设置参数保持一致,在后处理提取速度云图、速度矢量、以及等值面等结果来识别回流区的位置和大小。最终根据 Discovery AIM 模拟的结果,选择最佳的气体流场优化方案,并进一步利用 Ansys Fluent 的多相流模块对塔内的喷雾蒸发冷却过程进行分析,以实现蒸发塔内喷雾系统的布置优化。

表 1 蒸发冷却塔的边界条件

烟气入口边界条件	喷嘴性能参数	出口要求
烟气流量: 876,000 Am ³ /h	喷雾总流量: 734.4 L/min	烟气温度: 150℃
烟气温度: 360℃	FM10 喷枪颗粒度: D _v 10=71.5 μm	
烟气组分: O ₂ =4%vol	D _v 50=113 μm	
CO ₂ =29%vol	D _{max} =208.1 μm	
N ₂ =63%vol	FM25 喷枪颗粒度: D _v 10=82 μm	
H ₂ O =4%vol	D _v 50=130.7 μm	
	D _{max} =233 μm	

2.1 原塔基础流场分析

图 4(a)为 Discovery AIM 输出的未安装导流板时蒸发塔内的气体速度矢量图,计算结果显示塔内气流在某些区域存在垂直向上的分速度,表明塔内存在一定量的回流区,后续进行喷雾操作时,喷出的液滴来不及蒸发进入该区域时,会受到气流的裹挟而撞击壁面从而引起湿壁,容易导致壁面结渣,如何有效减少回流区将是导流板布置方案的重点。

图 4(d)显示,回流区集中分布在原塔靠近烟气进口一侧壁面位置,原塔内的回流区体积占整个塔内部空间比例较高,其中扩张段部分为预留喷枪布置区域,在该位置的回流区约占 1/2,且该区域有明显强回流效应,该结果表明,该塔的喷枪布置空间较小,考虑到需要喷入的水量以及总量为 12 支的喷枪数量,存在喷枪安装空间不足的问题。

图 4(c)的塔内流线图同时也表明,蒸发塔内有明显的强回流效应,回流区的气体是从蒸发塔底部经过冷却后的气体返回回来的,这部分气体存在温度低、湿度大的问题,导致与进入该区域的液滴之间进行的传热-传质效率低,因此回流区体积过大将降低整塔的冷却

效果。通过 Discovery AIM 评估的回流区体积数值结果如图 7 所示，未安装导流板时塔内的回流区体积约为 655 m^3 。

为降低该塔内的湿壁风险，提高整体的蒸发效率，需对塔内的气流进行合理的组织，在无法改变原塔结构的情况下，考虑在塔内增加导流板来改进塔内的气流分布。

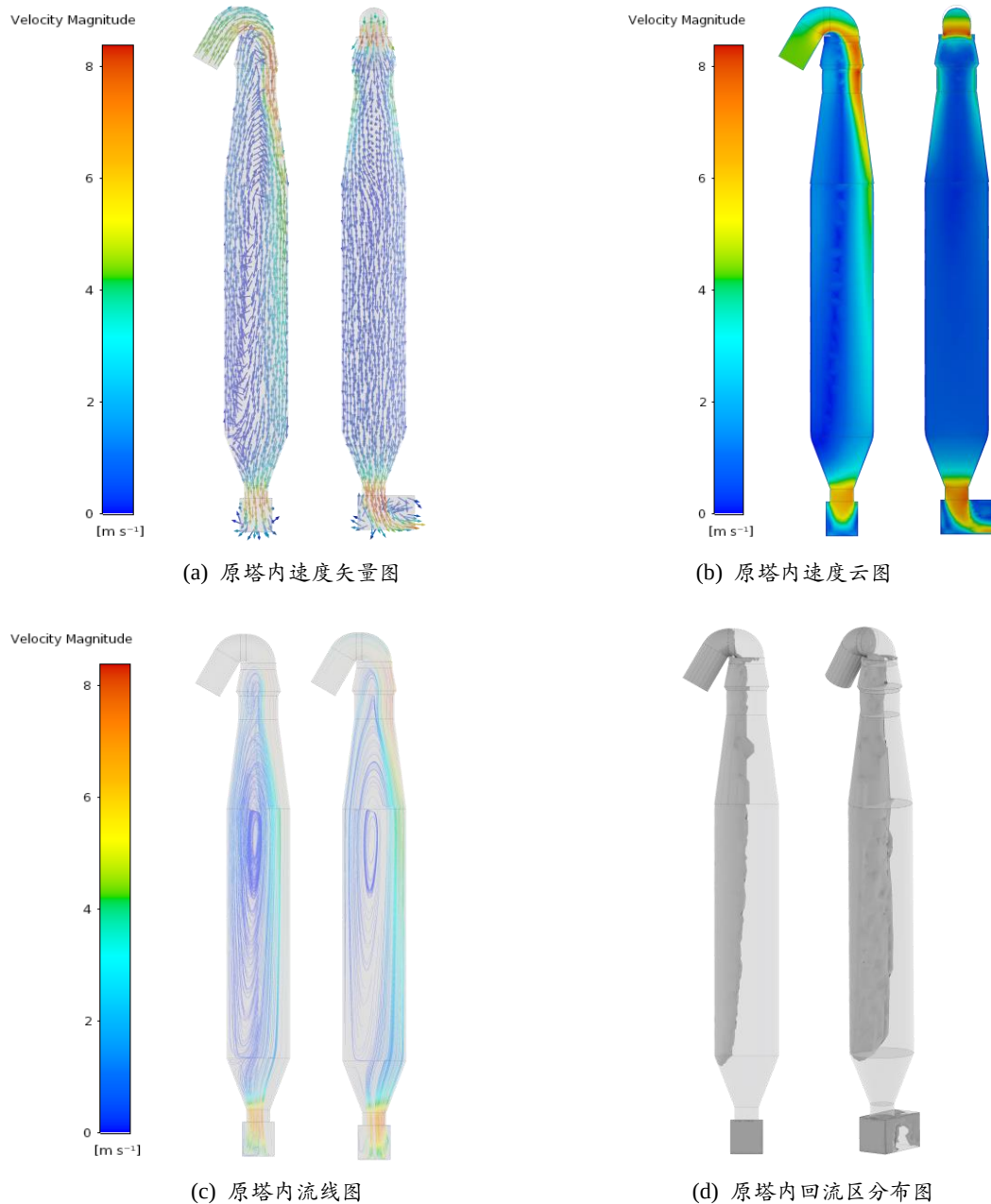
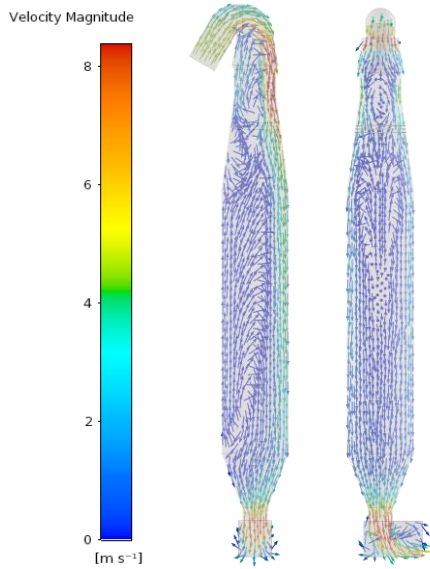


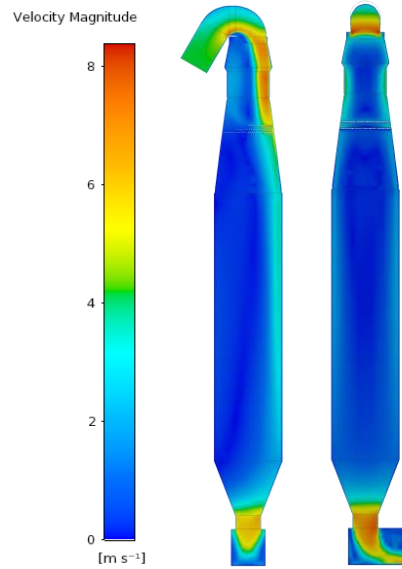
图 4 原塔内基础流场

2.2 增加导流板后塔内基础流场分析

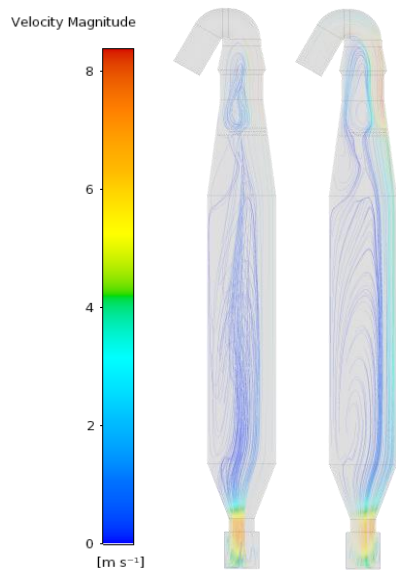
针对原塔内有明显回流区的问题，在塔内扩张段中的现场已有施工平台高度位置增加导流板布置，目的在于优化塔内的基础流场分布，降低回流效应。Discovery AIM 捕捉方案 1 的塔内速度场结果如图 5 所示，方案 2 塔内速度场结果如图 6 所示。



(a) 方案 1 塔内速度矢量图



(b) 方案 1 塔内速度云图

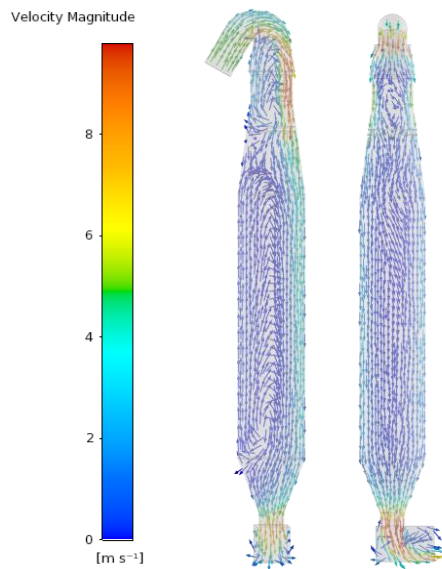


(c) 方案 1 塔内流线图

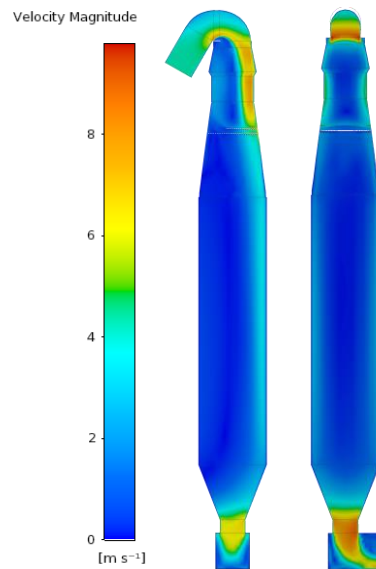


(d) 方案 1 塔内回流区分布图

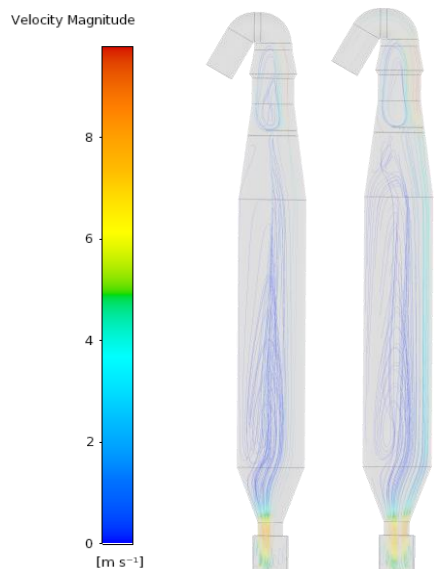
图 5 方案 1 塔内基础流场



(a) 方案 2 塔内速度矢量图



(b) 方案 2 塔内速度云图



(c) 方案 2 塔内流线图



(d) 方案 2 塔内回流区分布图

图 6 方案 2 塔内基础流场

2.2.1 方案 1 的基础流场分析

根据图 5 方案 1 塔内的基础流场结果显示，在该导流板布置方案下，塔内仍存在一定数量的回流，其中塔直段的偏左下位置有比较强烈的回流效应。塔内扩张段的回流区有减小的趋势，这一结果有利于增大喷枪布置空间。整体塔内烟气流动情况与原塔的流场基本保持一致，利用 Discovery AIM 对塔内回流区体积进行计算，该方案下的塔内回流量相比原塔有明显降低，回流量约为 536 m^3 ，见图 7。

2.2.2 方案 2 的基础流场分析

根据图 6 方案 2 塔内的基础流场结果显示，增加该导流板布置后，塔内存在部分烟气有回流情况，整体塔内烟气流动情况与原塔的流场基本保持一致。根据图 6(c)的流线图显示，在该塔内的回流效应相比于前两组塔的流场结果有明显减少，计算该方案下的塔内回流体积约为 487 m^3 ，相对于原塔以及方案 1 都有所下降。

方案 2 的导流板布置可以在一定程度上降低塔内回流情况。塔内有一定的空间可用于喷雾系统的布置。

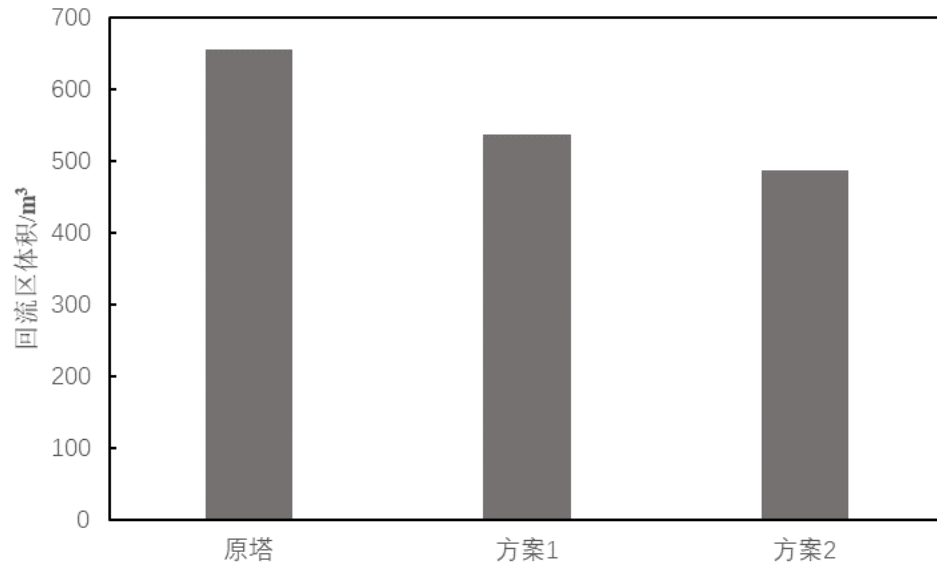


图 7 三组塔内回流区体积

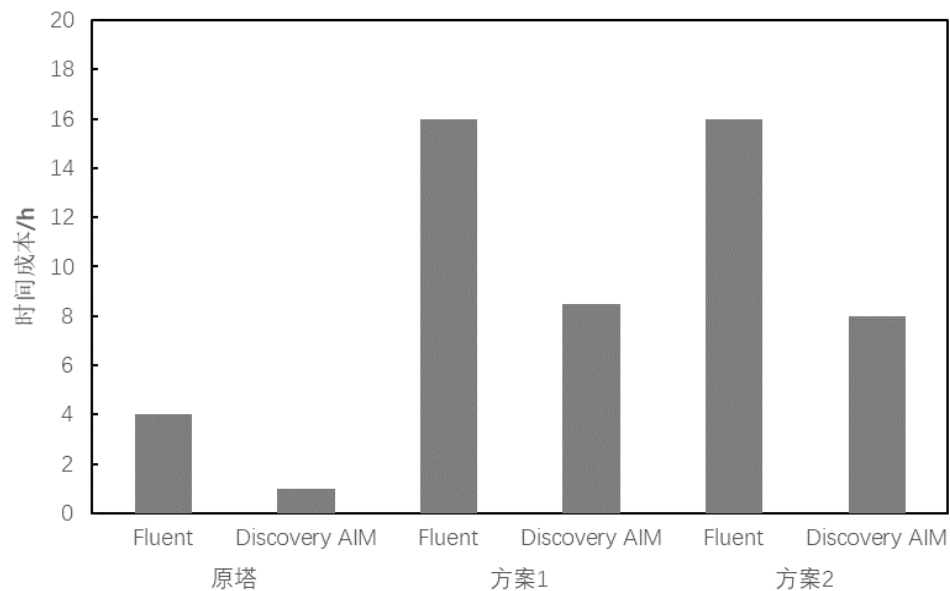


图 8 Discovery AIM 与 Ansys Fluent 仿真时间对比

2.2.3 Discovery AIM 和 Fluent 分析基础流场时间成本对比

本文评估了利用 Discovery AIM 和 Ansys Fluent 两种仿真手段分析三组蒸发冷却塔的基础流场的时间成本，由于 Discovery AIM 是集成型仿真环境，可以在单窗口中完成所有的仿真部署，Ansys Fluent 进行完整的基础流场分析则需要在几何、网格、求解器、后处理四种工具链中分别部署，相应的时间成本会有所提高，且 Ansys Fluent 求解精度更高，所需的计算资源更高，对于研究趋势性规律的项目，Discovery AIM 在时间成本有一定优势，图 8 所示的时间成本为两种仿真工具分析三组方案的基础流场所需的时间，Discovery AIM 在本项目中可以节约大概 50%以上的仿真时间。

2.3 Ansys Fluent 两相流分析

根据 Discovery AIM 模拟的三组蒸发塔内气体流场的结果，选择方案 2 的导流板布置的蒸发冷却塔为研究对象作进一步的喷枪布置工作，根据工程的实际降温需求利用 Ansys Fluent 进行气-液两相流分析^[13]来进行下一步的喷雾系统的优化布置工作，为降低整个蒸发塔的湿壁情况，喷枪的喷雾粒径、喷雾角以及安装的角度等将作为设计重点考虑因素^[14]。

选用斯普瑞喷雾系统（上海）有限公司 Flo Max[®]系列中的 FM10A 和 FM25A 喷枪，该喷枪配备的 Flo Max[®]空气雾化喷嘴，生成的液滴颗粒小，停留时间短，有利于加速蒸发过程，该喷枪能提供较高的流量，用较少数量的喷枪即可满足降温所需的喷雾流量要求，可在较低的操作压力环境下工作，减少了对泵的要求，Flo Max[®]喷嘴拥有三级雾化的专利工艺，具有极高的空气利用效率，因而在喷雾冷却应用中被广泛推荐使用^[15]。

喷雾蒸发冷却是一个多相流过程。在 Ansys Fluent 中，采用拉格朗日离散相模型(DPM)对该过程进行数值求解。喷嘴产生的液滴分布直接决定气液相间传热传质过程的相际面积，对获得蒸发塔内可靠的温度场、液滴运动轨迹以及湿壁风险的预测至关重要^[16]。在斯普瑞喷雾系统（上海）有限公司的喷雾分析研究与服务实验室中，以该项目中选用的 Flo Max[®] 10A 和 Flo Max[®] 25A 喷嘴为实验对象，洁净水为喷雾介质，在项目现场实际要求的操作水压、气压下，在标准实验室的条件下进行喷雾实验，并用集成了 AIMS 软件的 Artium PDI-HD 系统测得该喷嘴颗粒数据。

该蒸发塔经 Ansys Fluent 设计优化喷雾系统布置后，最终可以完成喷雾降温要求。模拟的塔壁湿壁风险见图 9，以喷雾颗粒落在塔壁上的质量浓度来表征湿壁风险，该结果显示该喷枪布置方案造成的最大湿壁风险控制在 0.01 数量级，该结果根据工程经验可评估为较低积灰风险。图 10 为液滴运动轨迹图，该计算结果显示液滴主要集中在塔中央。

图 11 为现场施工安装喷雾系统后塔底的出干灰情况，实际运行结果显示底部灰斗排出的烟灰为干灰，该现场情况表明该喷雾系统布置为合理且可靠的方案，现场运行结果与仿真结果一致。

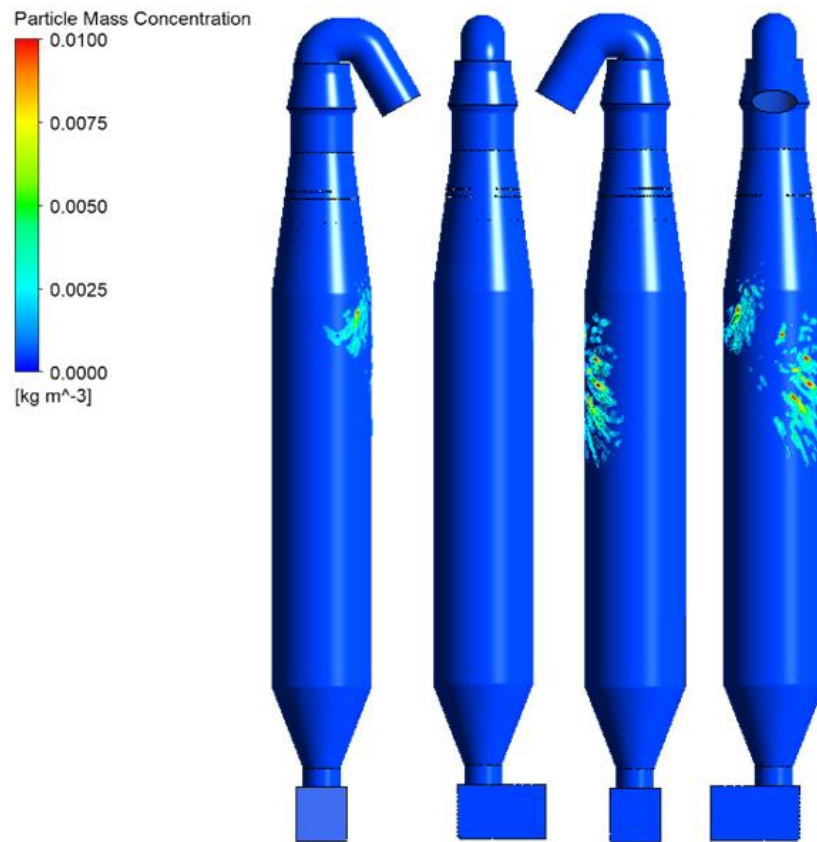


图 9 优化喷枪布置下蒸发塔内湿壁风险图

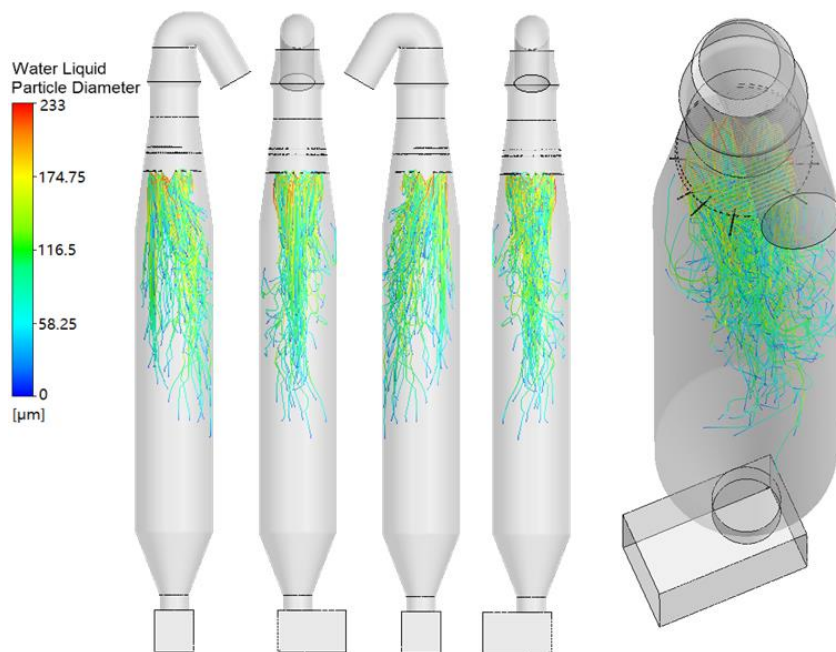


图 10 优化喷枪布置下蒸发塔内液滴运动轨迹



图 11 现场实际运行后蒸发冷却塔底出灰图

3 结论

通过 Discovery AIM 可以完成蒸发冷却塔内基础流场的模拟工作，包括建模、网格划分、求解计算、后处理在内的完整数值分析流程。根据计算结果调节导流板布置来优化塔内的烟气流动，实现减少回流和涡流产生的目的。输出的分析结果对后续的喷雾系统布置有一定的参考及指导作用。

通过 Discovery AIM 与 Ansys Fluent 联合的模式可以完成一个完整的喷雾蒸发冷却项目的数值分析工作，在一定程度上可以缩短项目的设计周期。

[参考文献]

- [1] 刘然, 张磊, 张显. 喷雾冷却技术在航天领域应用[J]. 真空与低温, 2018, 24(05):69-73.
- [2] 朱亚同. 高炉煤气喷雾蒸发冷却系统设计应用[J]. 冶金动力, 2014, 000(005):13-15.
- [3] 李海英, 刘东, 张春奇, 等. 转炉蒸发冷却器换热效率数值模拟[J]. 过程工程学报, 2019(3).
- [4] 汪胜利, 肖方锦, 毛永华. 喷雾蒸发冷却塔首次在国内电炉除尘中的应用[J]. 冶金环境保护, 2003(4):40-42.
- [5] 张培. 某电厂冷却塔加装导流板的 CFD 研究及现场应用[D]. 2015.
- [6] 胡建亮, 盖东兴. 热态上料高炉煤气蒸发冷却塔的设计及应用分析[J]. 冶金动力, 2014, 000(007):13-15,18.

- [7] 纪辛, 黄碧纯, 黄昕,等. 垃圾焚烧烟气喷雾干燥脱酸塔流场数值模拟[J]. 化学工业与工程, 2010, 027(004):340-345.
- [8] 郭慧媛. 医疗垃圾焚烧烟气急冷塔喷雾流场优化及工程应用[D]. 2017.
- [9] 盛锴. 危险废物焚烧系统烟气急冷塔的数值模拟研究[D]. 浙江大学机械与能源学院, 2008.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004(9):121-122
- [11] Steve Scampoli. Digital Exploration with Ansys AIM[J]. Ansys ADVANTAGE, 2017, 019(002):39-42.
- [12] Steve Scampoli. Introducing Ansys AIM: Simulation for Every Engineer [J]. Ansys ADVANTAGE, 2015, 009(003):46-49.
- [13] 詹仕巍, 虞斌. 急冷塔内喷雾蒸发过程的数值模拟[J]. 轻工机械, 2017, 035(006):87-91,96.
- [14] 汤先岗, 章敬泉, 魏传岱等. 蒸发冷却器积灰、湿灰问题影响因素研究[J]. 环境工程, 2017(2).
- [15] Flo Max[®] Air Atomizing Nozzles: Unique Atomization Process Provides Unmatched Efficiency in Gas Conditioning Operations, Spraying Systems Co. Bulletin 487D
- [16] J. SHEN, B. XIONG, K.J. Brown, R.J. Schick, “Nozzle Layout Optimization in a BOF Evaporation Tower via CFD Simulation”, ICLASS 2018