气流床气化多单元装备CPFD仿真机理解析与工业验证 （多/单喷嘴、粉煤喷嘴、激冷室、文丘里）

- **闫洪明（博士/总工）**
- **王晓伟 （鑫立公司创始人/总经理）**
- **陕西鑫立研制开发有限公司/西安市院士专家工作站**

- **2026-10-15**

目录

01

自2023年院士专家站建站以来工作总结：仿真机理研究、工业落地验证及相关工作业绩

02

鑫立发明专利多喷嘴结构改进效果总结：工业实际应用案例与改造后的性能优势

03

关键装备仿真技术及其工业应用简介（含视频）

- 单喷嘴
- 粉煤喷嘴
- 文丘立洗涤器
- 激冷室

Part 1
陕西鑫立公司西安市院士专家工作站2023年建站以来工作总结

（2026年西安市科协主持的院士专家站绩效考核已顺利通过）

工程痛点破局 • 仿真机理解码 • 工业落地验证

精度筑牢根基 • 数据库沉淀积累 • 成效凸显价值

水煤浆气化工艺喷嘴：三位一体闭环范式：从现象观察跨越到机理认知

工程痛点驱动 → 仿真机理解析 → 工业落地验证

依托陕西鑫立西安市院士专家工作站，系统揭示喷嘴几何结构缺陷所引发的流场交变冲击机制及其对雾化性能劣化的内在路径。

30 年

喷嘴设计制造与工程运维经验

近 70 家

煤化工企业故障统计数据库

1:1

全尺寸、全工况工业级CPFD模拟53家

CPFD

Barracuda 稠密多相流平台

机理突破：建立以喷嘴流场等值面和出口压力波动幅值为核心的评价体系

几何结构缺陷 → 流场交变冲击 → 雾化性能劣化

首次系统揭示上述作用路径，实现从「现象观察」到「机理认知」的跨越。

核心评价指标

喷嘴流场等值面和出口压力波动幅值

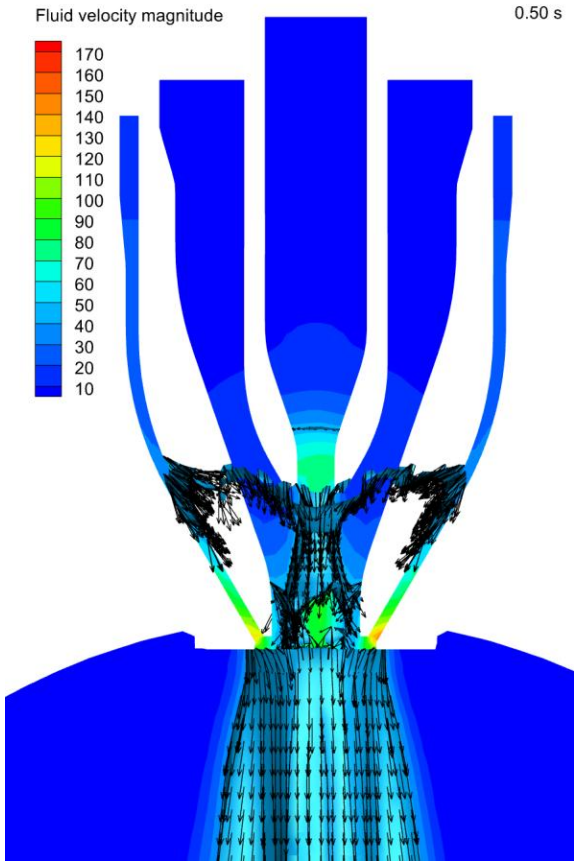
对比与校验维度

- 速度场，温度场，压力场分布
- 颗粒弥散特性
- 原始喷嘴 vs 流场优化型，
- 新喷嘴出口压力波动幅值 < 0.01 MPa

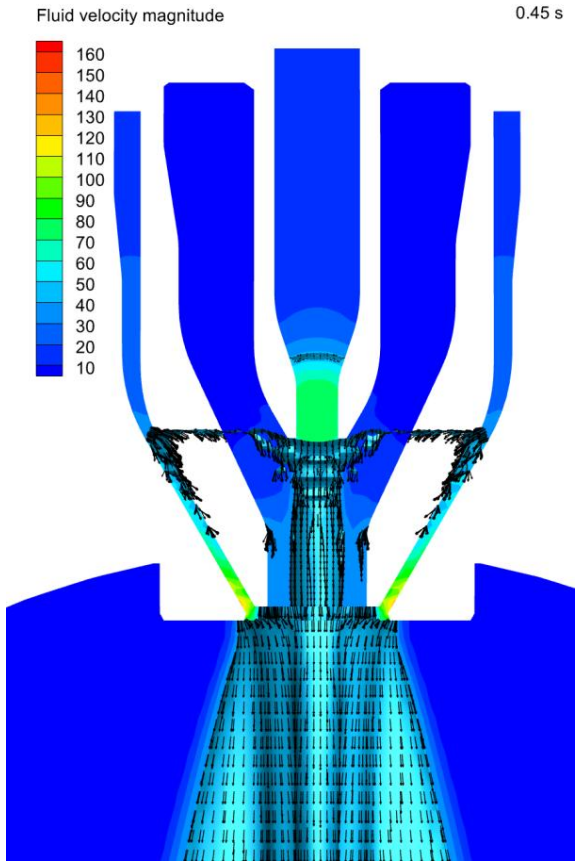
融合多源工业实测数据完成模型校验与长周期运行考核，确保仿真结论可在真实装置复现。

案例：相同工况下原喷嘴与优化喷嘴出口**等值面**速度云图对比

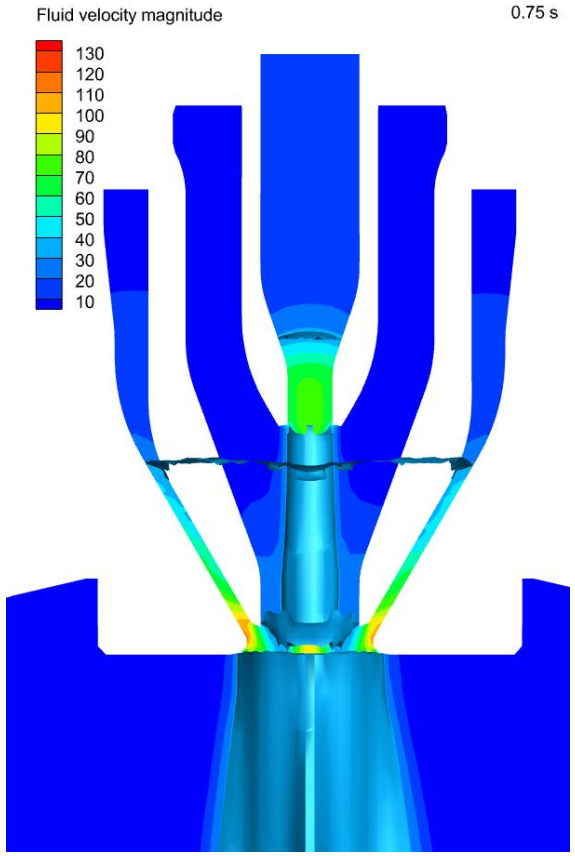
工业在用原喷嘴



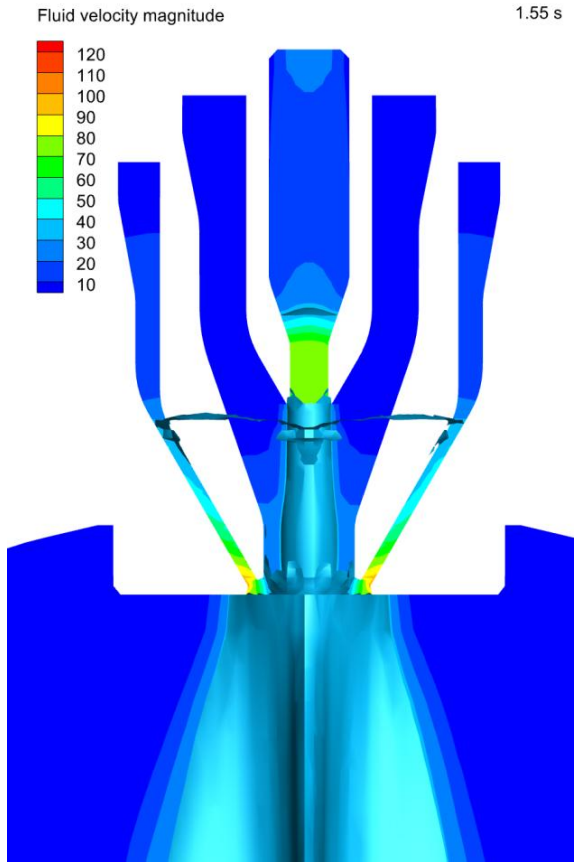
CPFD 仿真优化后喷嘴



工业在用原喷嘴



CPFD 仿真优化后喷嘴



工程验证：53 家CPFD仿真、21 家工业应用，仿真成功率 95%

CPFD 仿真建模 → 流场缺陷诊断 → 结构迭代优化 → 工业化落地验证 → 经济效益分析

53 家

完成喷嘴仿真（含 5 家四喷嘴）

21 家

工业应用验证（含 1 家四喷嘴）

7 家

重点企业创历史最长运行记录

95%

仿真成功率（20 / 21）

其中 1 家通过连续运行 120 天技术鉴定会，4 家出具喷嘴运行良好证明信函；1 家运行未达预期，和原喷嘴运行结果类似。

模型精度：关键参数预测相对误差整体小于 9%（依据多喷嘴工业数据）

< 8.6%

关键流动参数整体相对误差

覆盖压力波动、速度分布、颗粒浓度场等关键参数，仿真预测值与实测值整体相对误差。

< 2.5%

气相主流速预测误差

气相主流速作为流场组织的核心指标，预测精度显著优于整体水平。

精度结论：模型具备高保真度与强泛化能力，可跨企业、跨煤质条件推广使用。

应用成效：长周期运行与碳转化效率同步提升

连续运行周期

↑20–60%

平均连续运行周期延长幅度

粗渣残炭

↓3–10%

气化粗渣残炭含量下降

细灰残炭

↓2–8%

洗涤细灰残炭含量下降

有效气 $CO+H_2$

↑0.3–2.0%

有效气成分提升

机理对应：优化后喷嘴显著抑制内部压力交变扰动，降低高速颗粒对壁面的冲击载荷，提升气-固两相混合均匀性与雾化质量，在多家典型煤化工企业实现规模化应用。

工程数据库：
仿真和设计80 余种喷嘴构型支撑宽负荷、不同原料的定制化设计

80+

不同构型喷嘴大规模仿真

3.3–178

煤浆负荷区间（m^3/h）

适配原料体系

烟煤 · 石油焦 · 石油焦油 · 有机废液 · 调和沥青

定制化输出

可根据企业气化压力、炉型、煤浆负荷与煤质条件，匹配合适的喷嘴结构、操作氧比及负荷工作区间，打破传统设计过度依赖单一工况的局限。

Part 1 小结： 搭建了从“CPFD仿真建模→流场缺陷诊断→结构迭代优化→工业化落地验证→经济效益分析”的完整闭环研究体系

1 机理认知

首次揭示几何结构缺陷 → 流场交变冲击 → 雾化性能劣化的完整作用路径。

2 高保真模型

关键参数整体相对误差 < 9%，气相主流速误差 < 2.5%，具备跨企业、跨煤质的泛化能力。

3 工程价值

21 家工业应用、95% 仿真成功率；运行周期延长 20%–60%，残炭下降、有效气提升。

从流动本质出发推动喷嘴结构迭代与长效可靠运行，为煤化工关键装备自主升级提供理论支撑与工程范式。

《煤化工》核心期刊

上述汇报的详细内容很快分为两篇文章发表

一．闫洪明，王晓伟，惠磊，等，水煤浆气化炉工艺喷嘴 CPFD 仿真模拟研究（上）—— 建模与流场机理分析，煤化工（J），2027年第5期（10月底）

二．闫洪明，王晓伟，惠磊，等，水煤浆气化炉工艺喷嘴 CPFD 仿真模拟和工业应用（下）—— 工业验证及工程效益，煤化工（J），2027年第6期（12月底）

Part 2
多喷嘴对置式水煤浆气化炉喷嘴结构改进效果总结

鑫立发明专利改进方案 vs 国内当前工业运行工况



证书号 第8503529号

专利公告信息

发明专利证书

发 明 名 称：一种带螺旋机构的工艺喷嘴

专 利 权 人：陕西鑫立喷嘴研制开发有限公司

地　　址：710043 陕西省西安市灞桥区洪朗路83号

发 明 人：王晓伟;闫洪明;崔史伟;惠磊;相博;任永;陈嘉兴;王鹏伟 刘会;谢磊;严新超;海煜飞

专 利 号：ZL 2023 1 1340456.8　　授权公告号：CN 117384680 B

专利申请日：2023年10月17日　　授权公告日：2025年11月21日

申请日时申请人：陕西鑫立喷嘴研制开发有限公司

申请日时发明人：王晓伟;闫洪明;崔史伟;惠磊;相博;任永;陈嘉兴;王鹏伟 刘会;谢磊;严新超;海煜飞

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。

专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

国家知识产权局

2025年11月21日

第1页(共1页)

鑫立专利改进机理：从源头解决沉积分层，消除偏喷

原结构问题链条

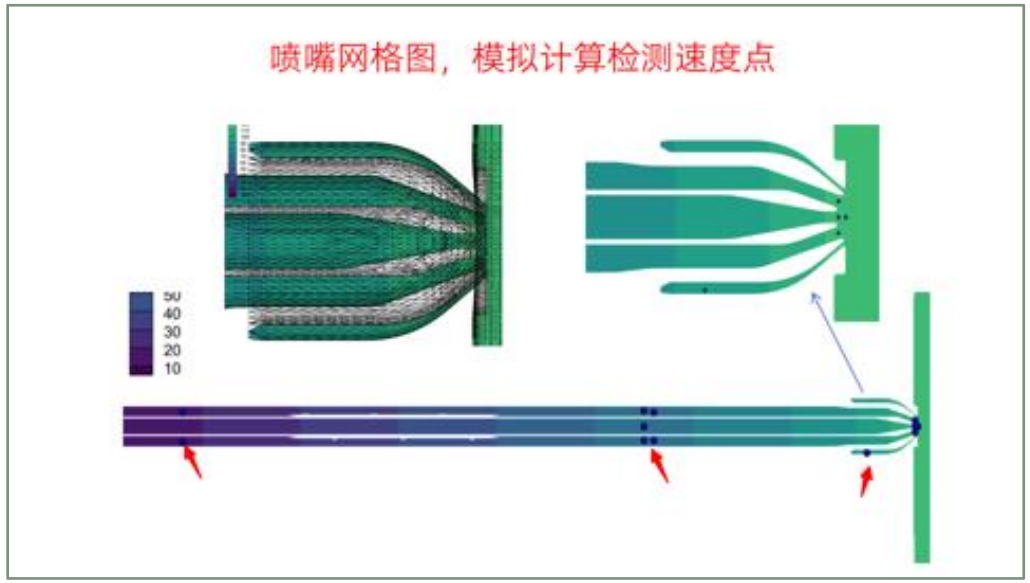
- 管路沉积分层 → 喷嘴出口气固分布不均，喷嘴偏喷
- 射流偏斜 → 部分颗粒未经撞击直接下行
- 流场失衡 → 上部富氧、下部富颗粒
- 拱顶超温 → 端面热疲劳龟裂 → 寿命缩短

改进后效果

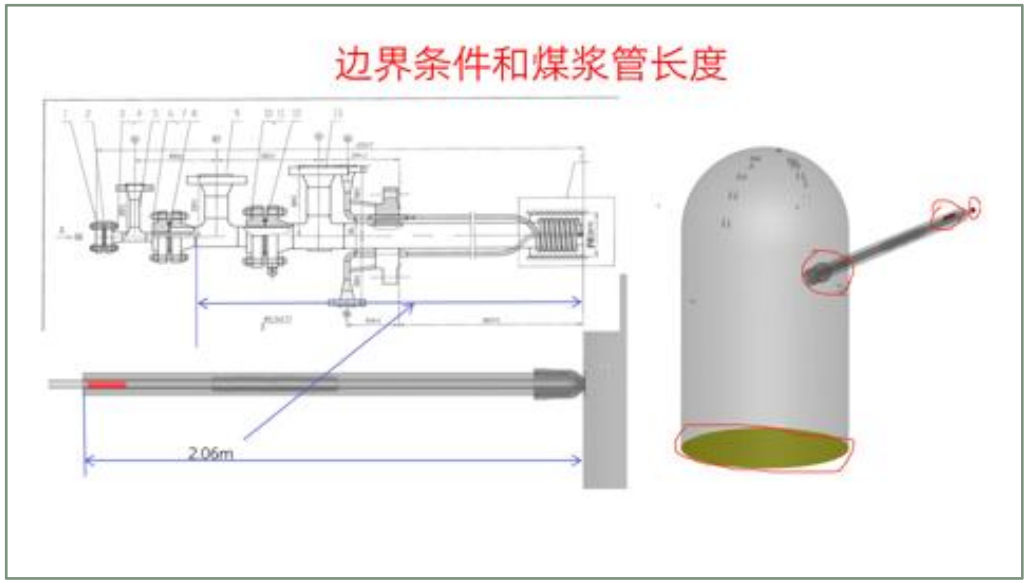
- 抑制沉降 → 喷嘴出口气固均匀分配，避免喷嘴偏喷
- 射流对称 → 中心有效撞击，雾化充分
- 流场均衡 → 颗粒停留时间延长
- 拱顶温度正常 → 热应力降低 → 寿命延长

核心改进：从管路沉积分层这一根源问题入手，通过优化喷嘴结构实现气固两相均匀分配，打断"沉降→偏喷→流场失衡→热损伤"的恶性循环链条。

CPFD仿真模型：几何边界、网格与监测点



（a） 几何模型与边界条件（煤浆管路 2.06 m）



（b） 喷嘴计算网格与速度监测点布置

① 几何建模
完整复现现场 2.06 m 煤浆输送管路及喷嘴内部流道，与工业装置几何保持一致

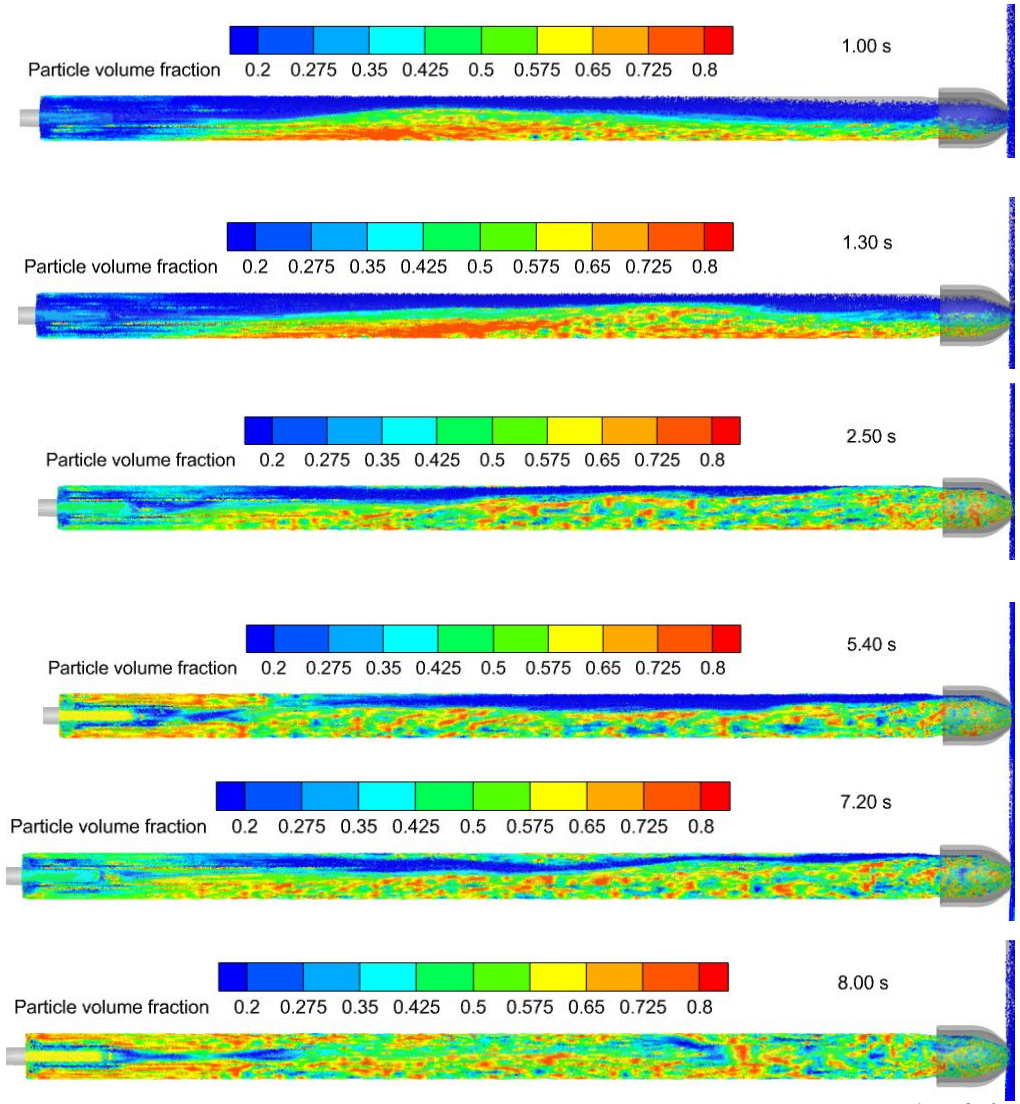
② 网格加密
喷嘴出口、撞击区局部加密，完成网格无关性验证

③ 监测点
在输送管路、喷嘴出口布设速度监测点，采集气- 固两相流动特征参数

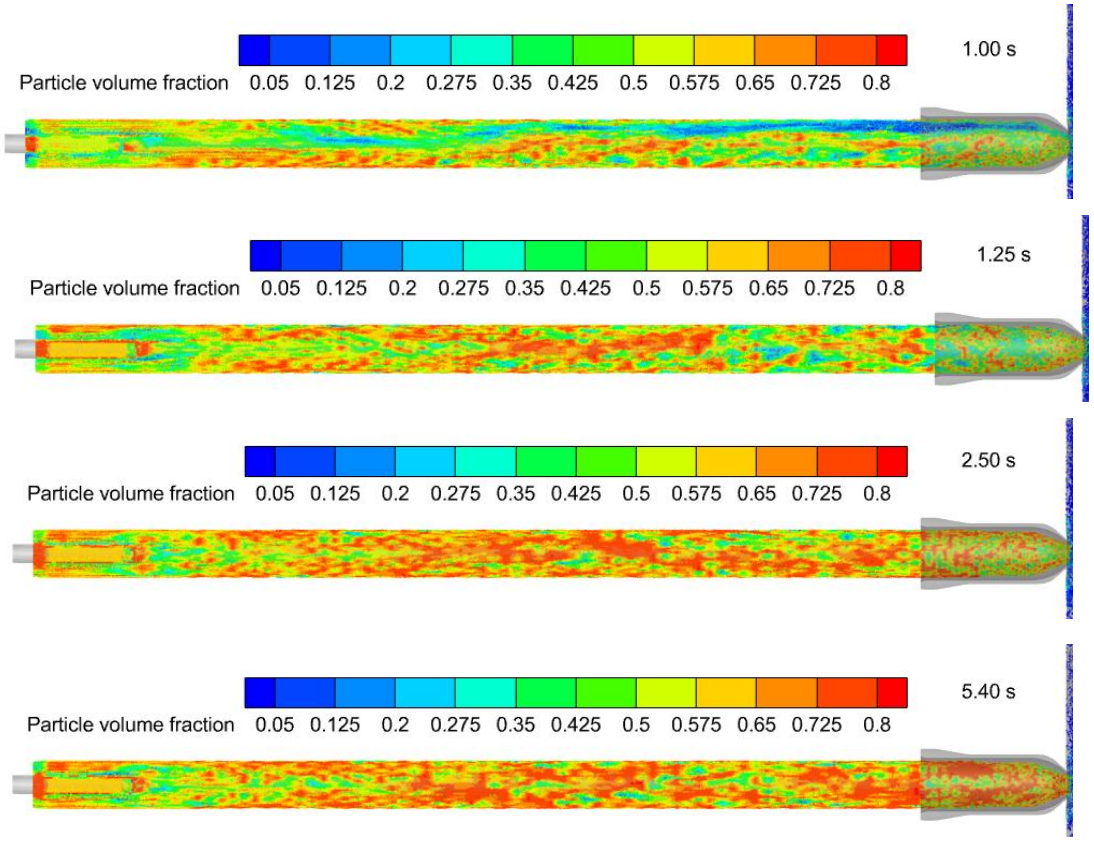
④ 边界条件
边界条件匹配实际工业工况，用于预测管路固相沉降行为与喷嘴射流偏喷问题

不同时间点CPFD仿真体积分数云图，改进前后对比展示

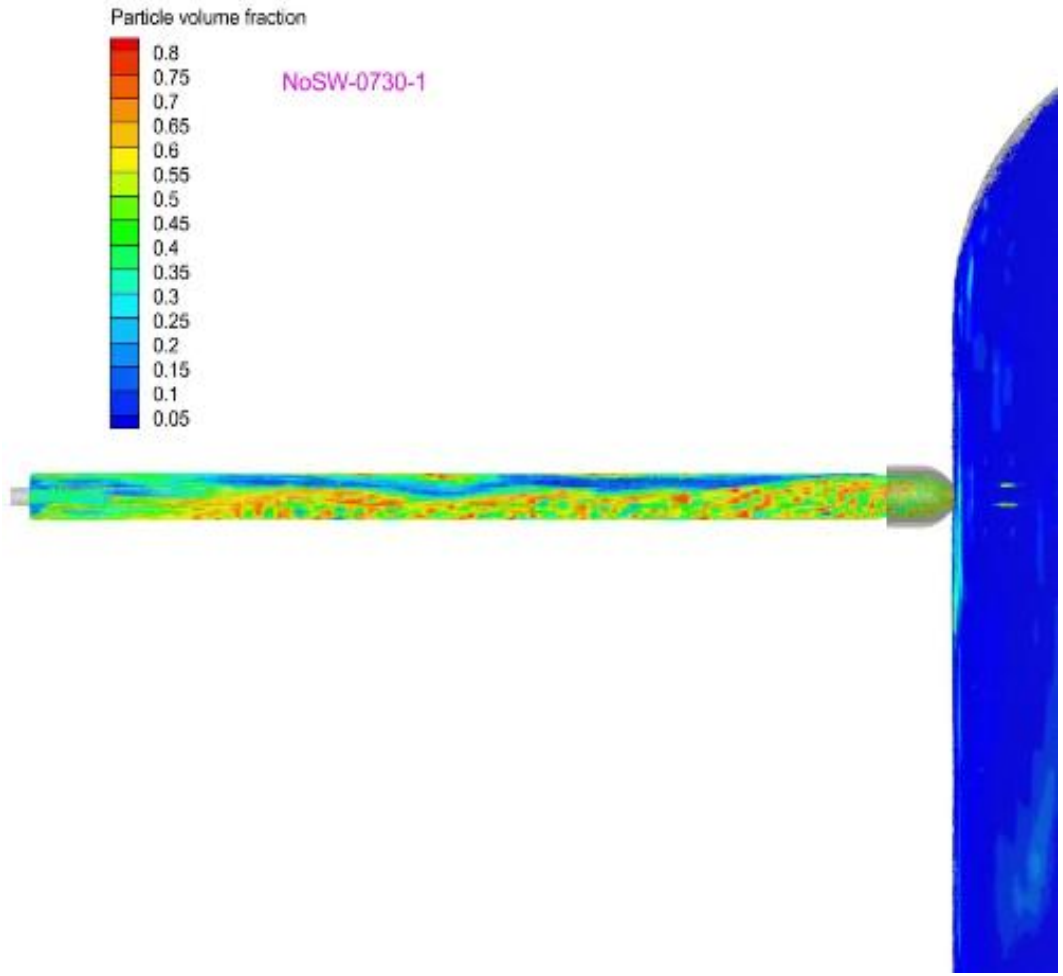
（a）计算时间90个小时



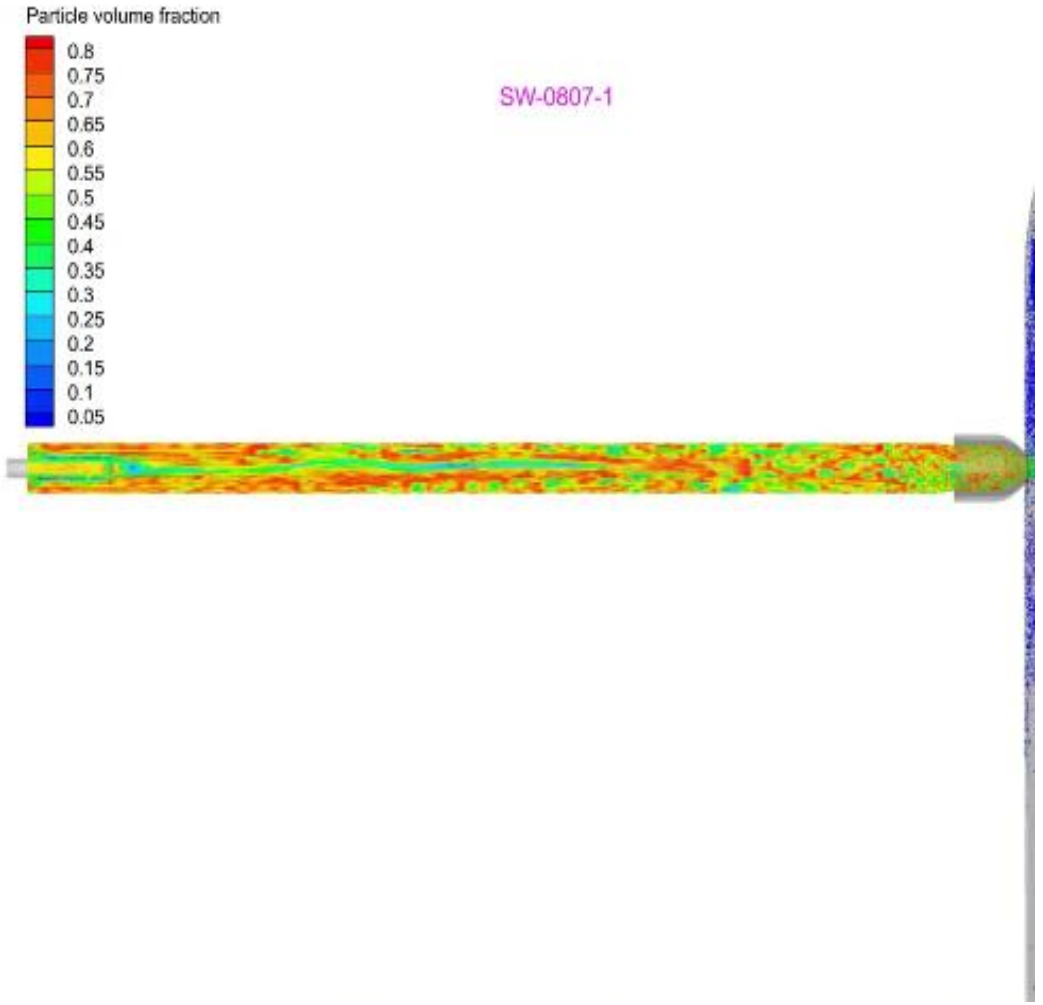
b）计算时间50个小时



颗粒体积分数云图视频：2.06m喷嘴管路内颗粒沉积与分层现象对比



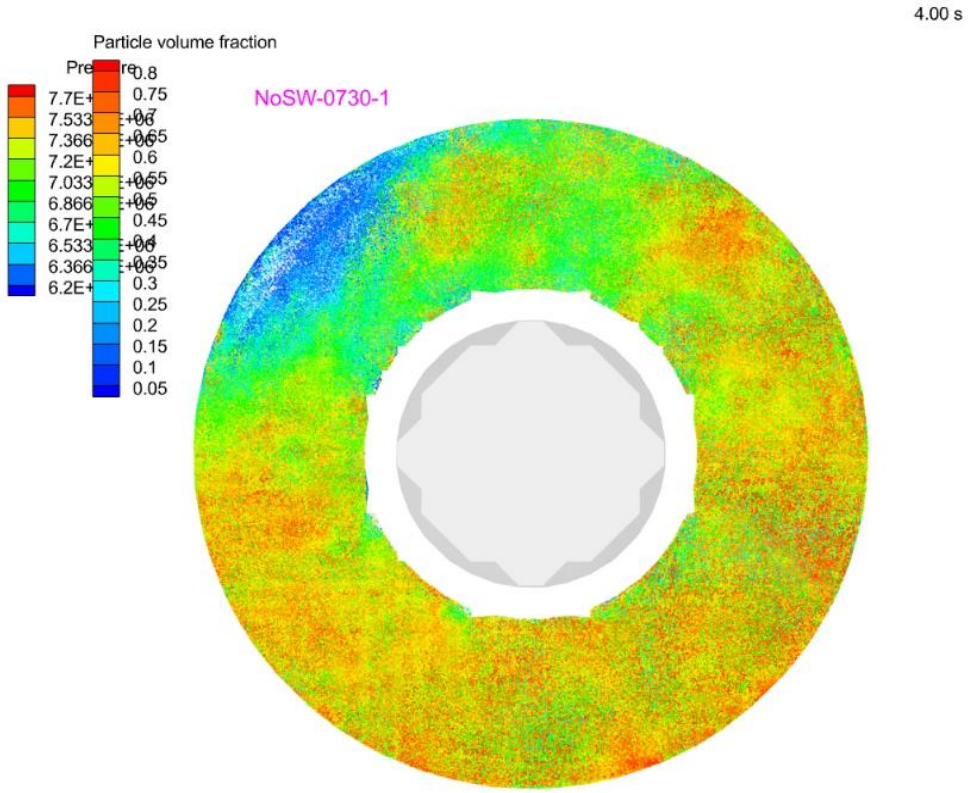
（a） 基准工况



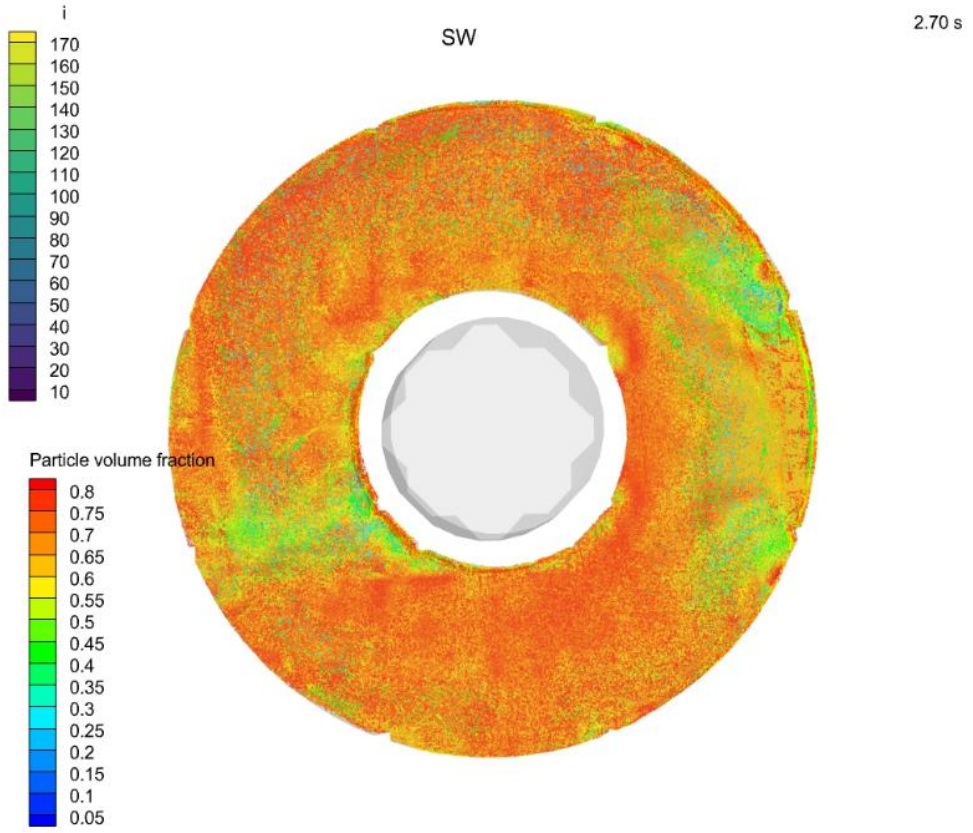
（b） 改进方案

喷嘴本体管路距离喷嘴入口0.2m处横截面流动状态
- 颗粒体积分数云图视频

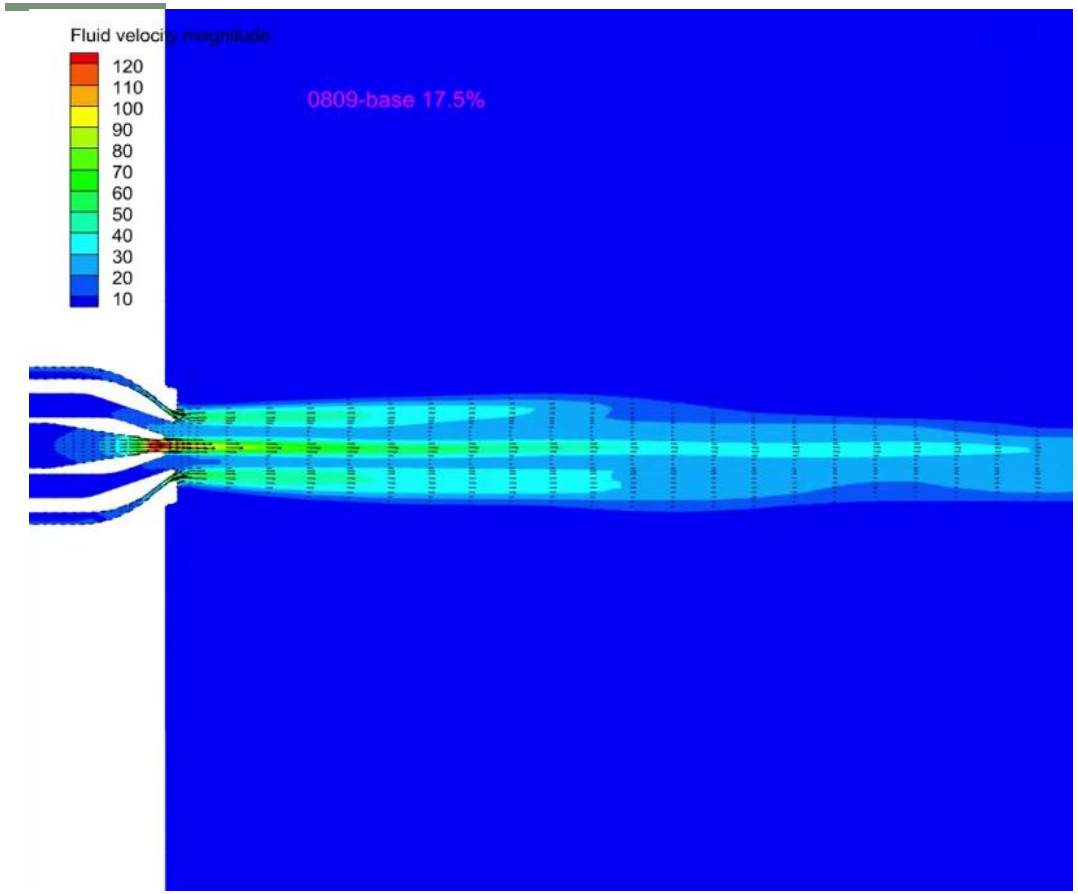
原喷嘴无螺旋，计算90个小时



加螺旋计算54小时

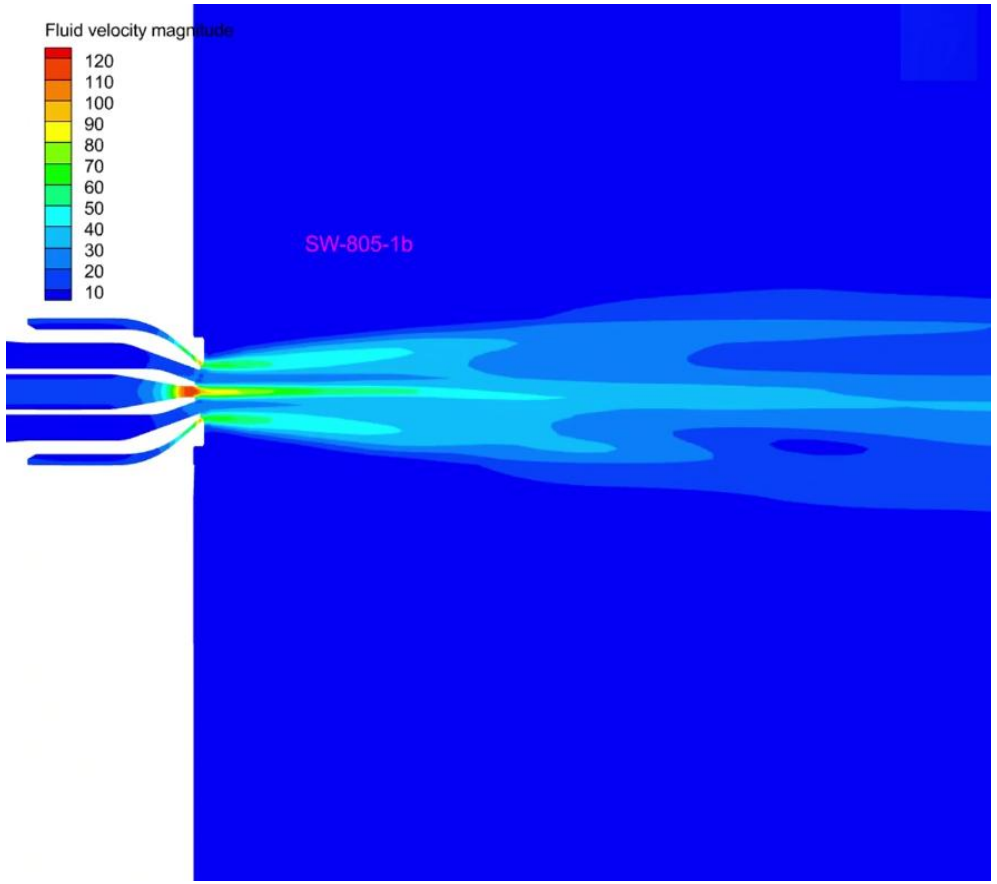


CPFD仿真②：喷嘴出口流体速度幅值云图对比



（a） 基准工况

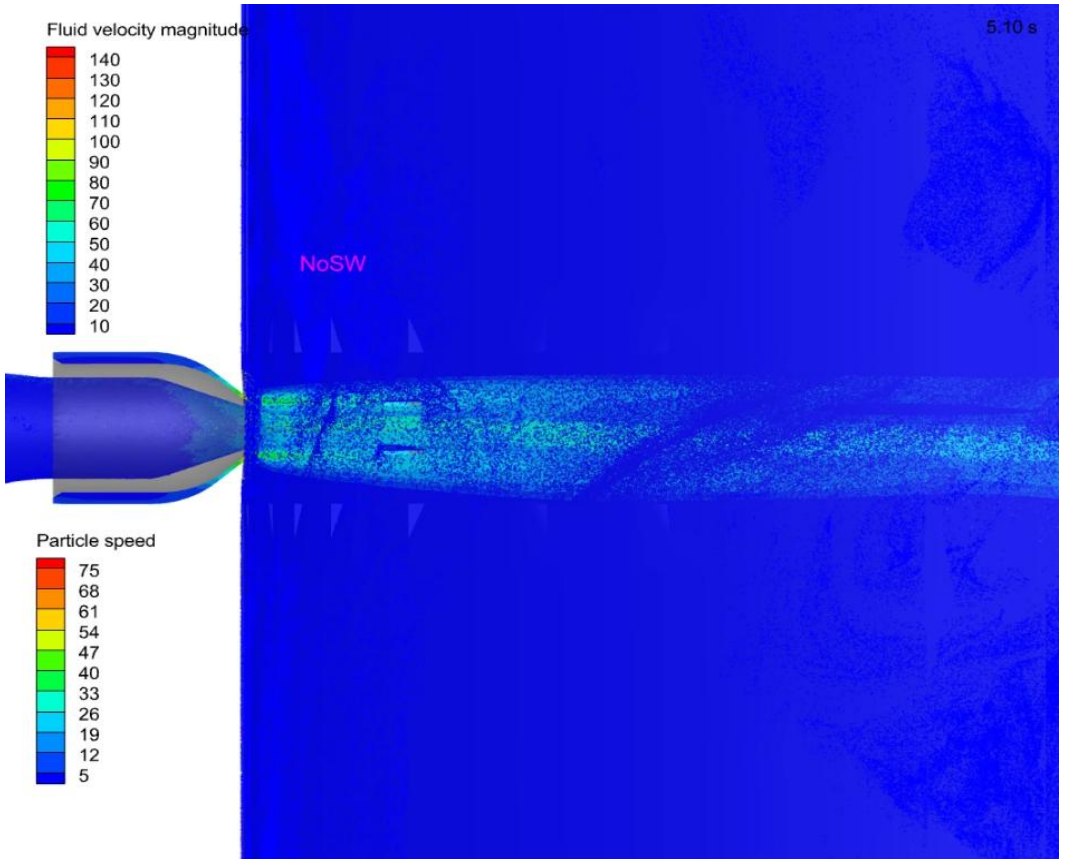
射流偏斜向下偏离轴线，出口分散度差



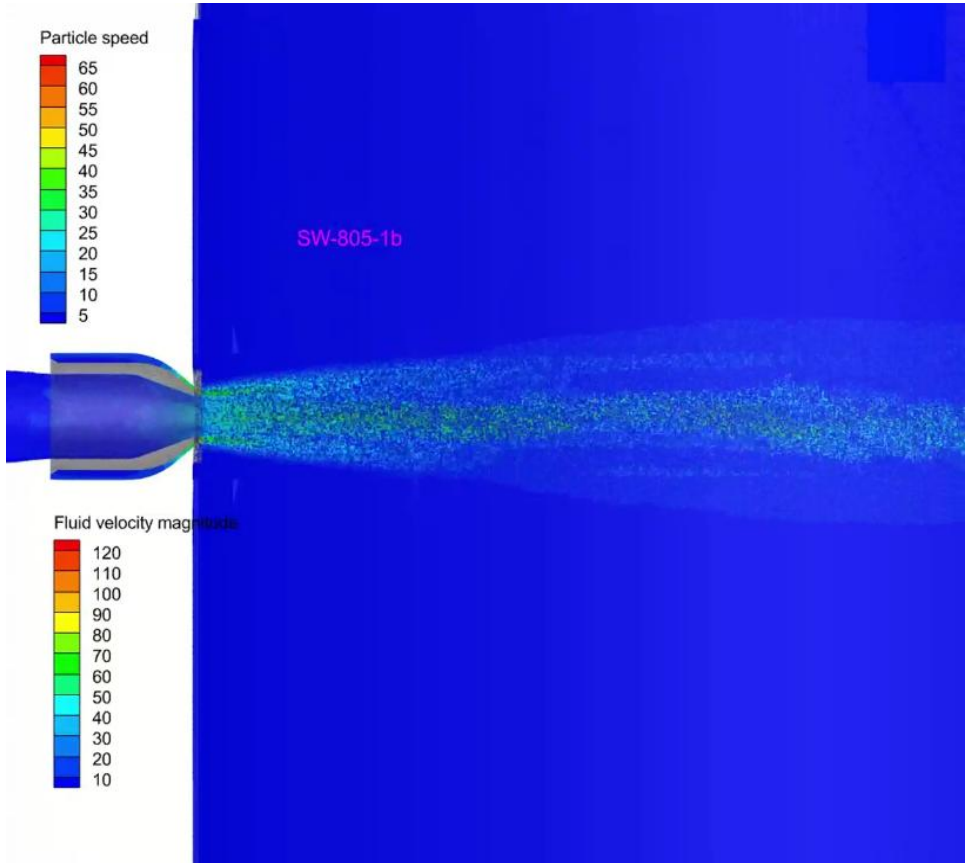
（b） 改进方案

射流水平对称，出口分散度好

CPFD仿真③：喷嘴出口颗粒速度场云图对比（t = 2.30 s）



（a） 原结构 NoSW



（b） 改进结构 SW-805-1b

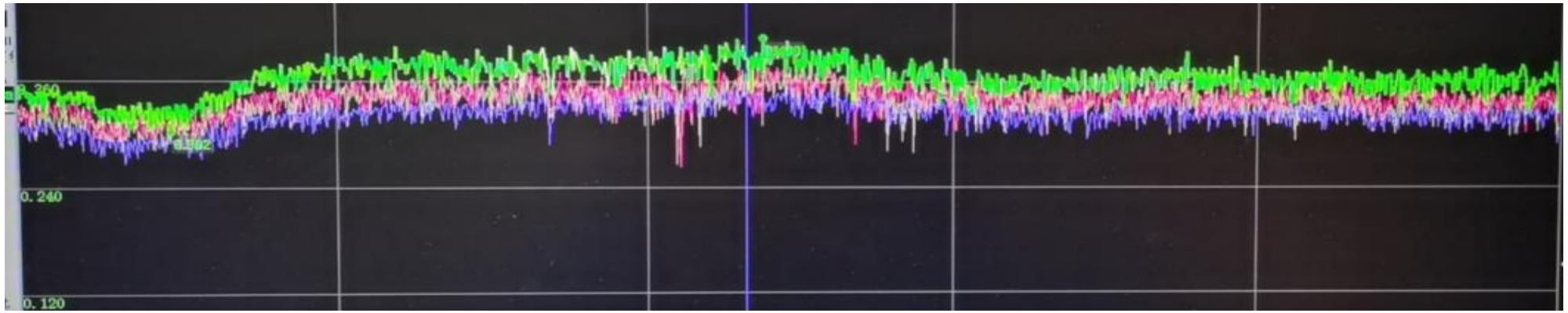
颗粒速度径向差异大，向下偏斜，出口分散度分布差，减低碰撞概率

颗粒速度均匀，运动轨迹一致，出口分散度更好

改造前烧嘴使用一个周期内烧嘴压差曲线数据 = 73天 0.02-0.24MPa



应用实例：优化后喷嘴实际值和模型预测类似 0.02-0.05 MPa。四喷运行70天压力波动数值在<0.05 MPa



主要仿真结果和实际工业运行参数的对比

煤浆和氧气通道压差仿真相对误差分别为8.57和3.95%；中心氧与外环氧出口流速仿真相对误差小于预测误差低于 2.5%。喷嘴投运初期，仿真预测的压力波动规律与现场实测完全吻合；长周期末期仿真压力波动上限 < 0.06 MPa，与现场实测 0.05 MPa 基本匹配，满足喷嘴稳定运行工艺条件。

参数	单位	喷嘴A	喷嘴B	喷嘴C	喷嘴D	模型预测	相对误差/%
煤浆进喷嘴	气化炉压差/MPa	0.36	0.33	0.36	0.36	0.32	8.57
氧气进喷嘴		0.76	0.65	0.82	0.8	0.73	3.95
运行开始	喷嘴出口压力波动/MPa	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0
运行结束	第70天	0.03	0.03	0.03	0.03	<0.05	满足要求
喷嘴中心氧	出口速度/(m · s^{-1})	112	107	108	**124**	110	2.44
喷嘴外环氧		138	133	137	134	133	1.85

工业运行稳定性显著提升

喷嘴出口压力波动

0.02~0.3

MPa（改进前）

0.01~0.05

MPa（改进后）

喷嘴端面龟裂

严重

改进前

大大减轻

改进后

喷嘴平均使用寿命

60~90

天（改进前）

80~120

天（改进后）

停车检查炉砖，状态良好，表面光滑，磨损轻微，炉内喷嘴室挂渣基本消失。过去需用撬杠撬开的炉顶预热口盖，如今可手动打开。

工业应用实测：有效气组分显著提升

有效气平均体积分数（$CO+H_2$）

81.94%

改造前

84.05%

改造后（+2.09 个百分点）

工业实测

有效气最高值

82.53%

改造前峰值

85.18%

改造后峰值

达到国内同类型炉较高水平

粗渣残碳含量

7.3%—9.0%

粗渣残碳降低
碳转化效率提升

工业试验背景：装置 2024 年 6 月 23 日投运；改进喷嘴连续稳定运行 73 天；实测运行参数与 CPFD 仿真模型预测结果吻合度高。
对标：常规四喷嘴气化炉有效气（$CO+H_2$）文献区间约 82%～84%；改造后峰值 85.18%，达到国内同类型气化炉较高水平。

经济性与煤种适应性得到提升

干基灰分适应性上限

⩽8%

国内普遍的控制指标

< 13%

改进后（稳定运行）

平均有效气（$CO+H_2$ ）

81.94%

改进前

84.05%

改进后（+2.09 pt，工业实测）

颗粒停留时间

偏喷流失

改进前

显著延长

改进后（碳转化更充分）

灰分适应性提升约37%，有效气平均提升2.09个百分点（工业实测），降低原料煤采购成本

Part 2 小结：工业改进效果综合评价：实现三大提升，并成功破解国内多喷嘴气化炉需依赖低灰煤才能长周期运行的困境

① 运行稳定性提升

- 出口压力波动：0.02~0.3 MPa → 0.01~0.05MPa
- 喷嘴端面热疲劳龟裂：严重 → 大大减轻
- 喷嘴平均寿命：60~90 天 → 80~120 天
- 拱顶温度回归正常区间

② 煤种适应性拓宽

- 煤灰分（干基）适应性：从普遍 ≤ 8% → 13% 仍稳定
- 均匀气-固分布降低局部磨蚀与偏流风险
- 高灰煤种利用价值提高，原料成本下降
- 喷嘴寿命随灰含量在 80~120 天内变化

③ 气化效率提升工业实测）

- 有效气平均：81.94% → 84.05%（+2.09 pt）
- 有效气峰值：82.53% → 85.18%
- （粗渣残碳降至 7.3%，碳转化率进一步提升
- 气-固混合更均匀

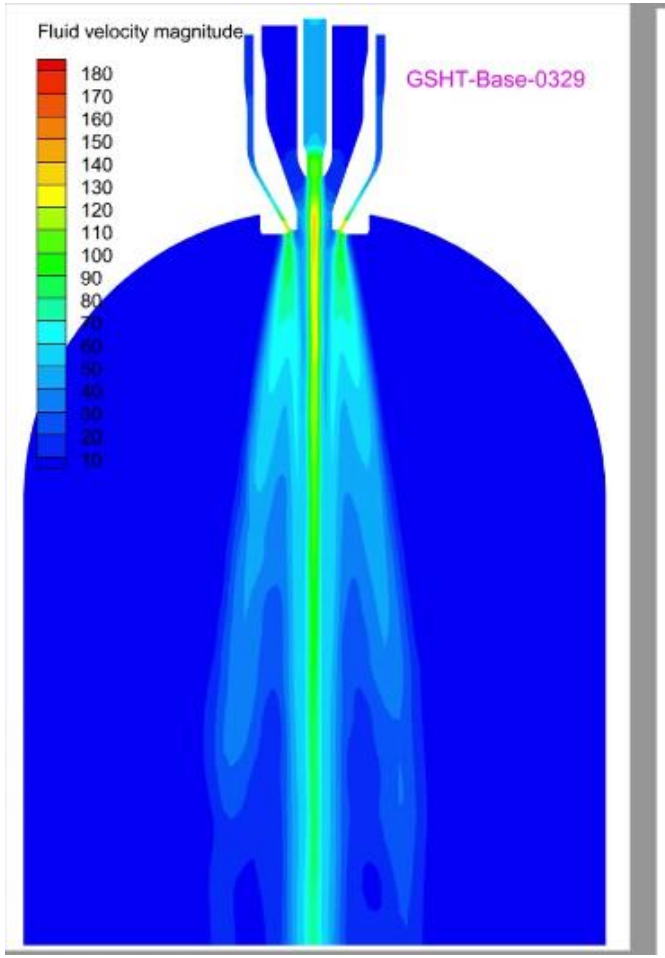
Part 3：关键装备改进前后的效果简介

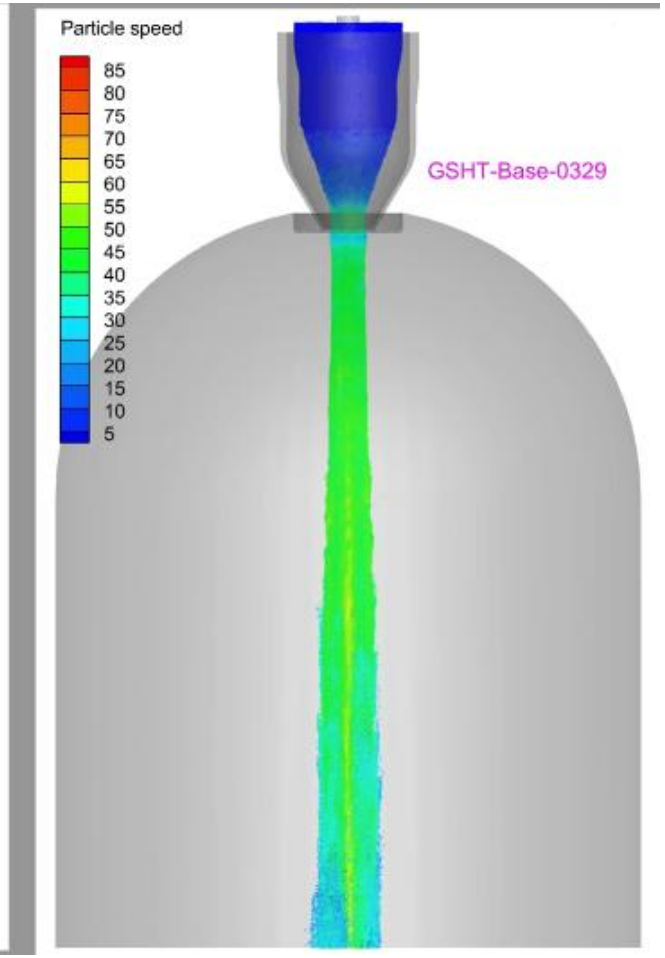
单喷嘴、粉煤喷嘴、文丘立洗涤器、激冷室

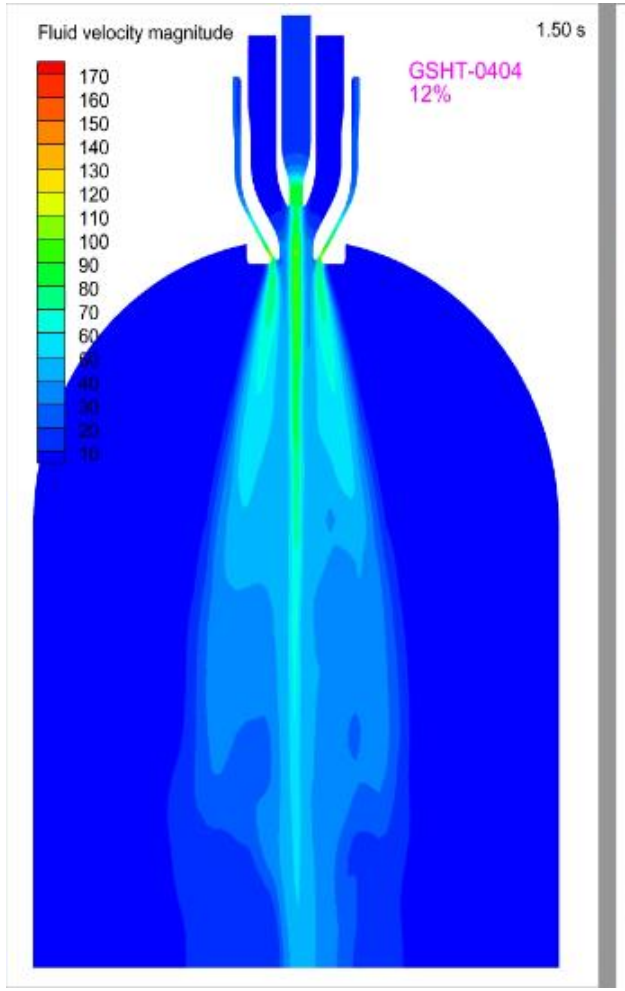
视频：单喷嘴优化前后雾化状态云图对比

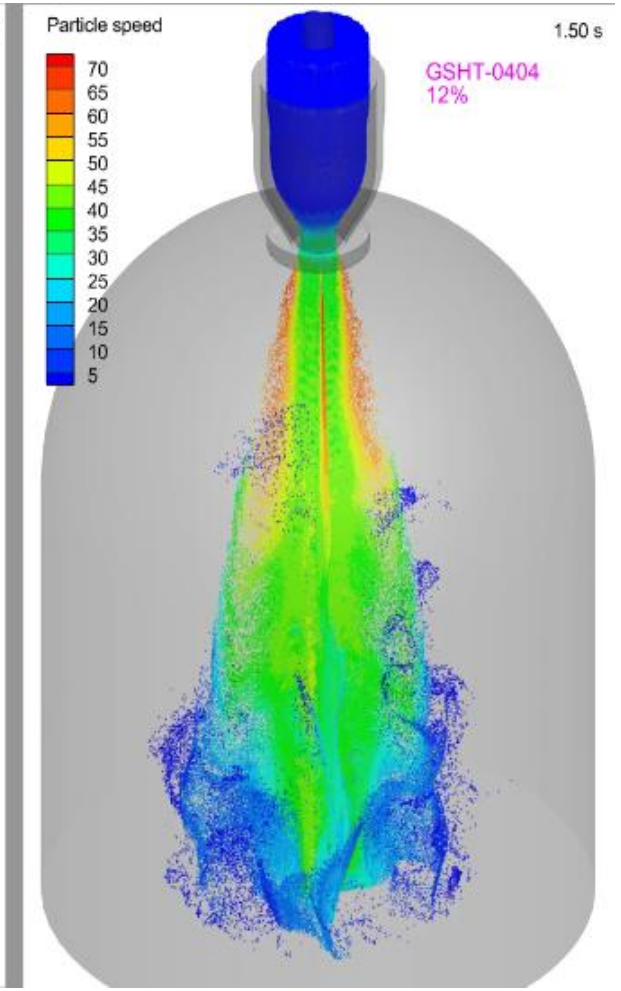
工业在用原喷嘴；

CPFD 仿真优化后喷嘴

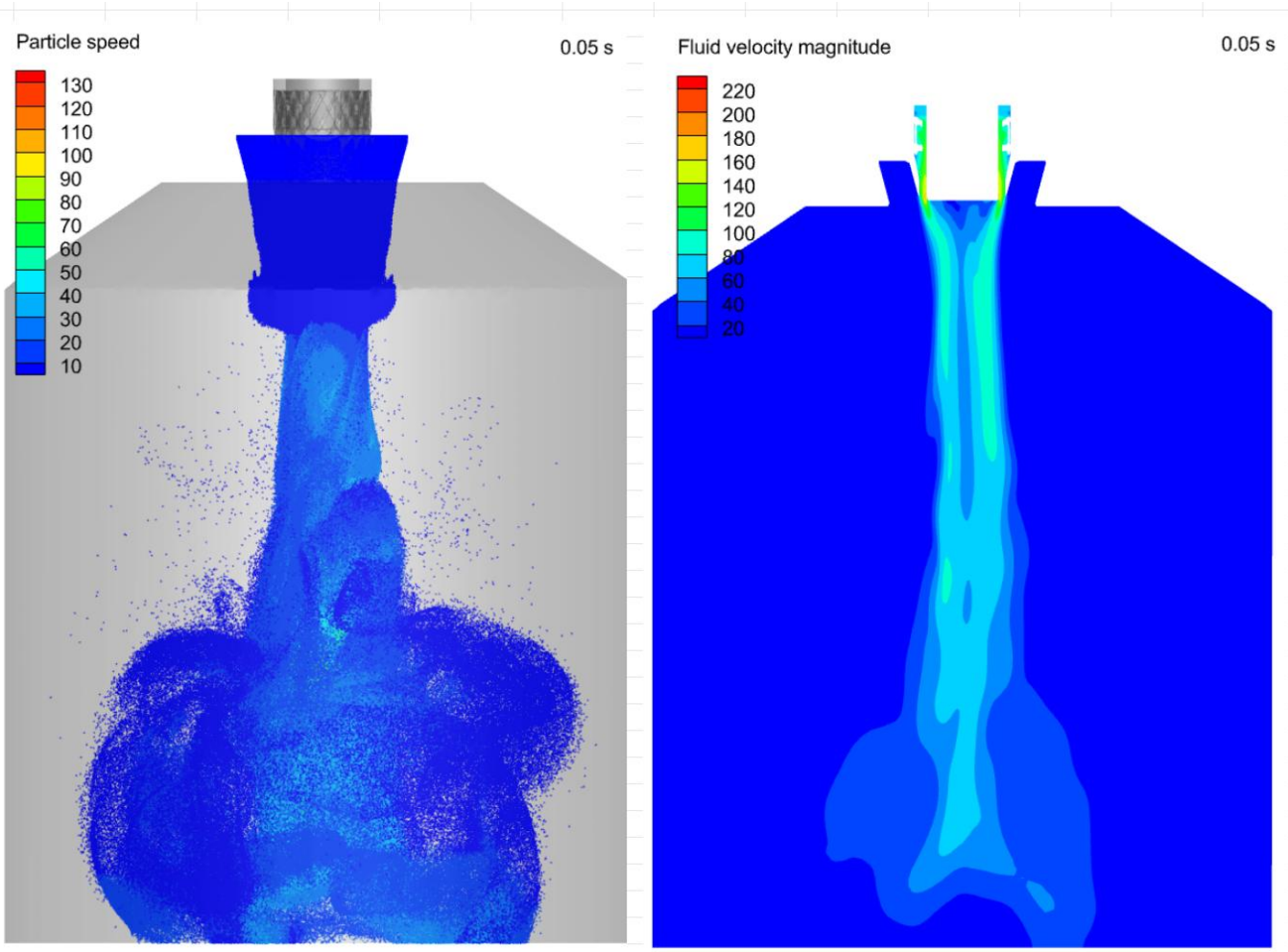


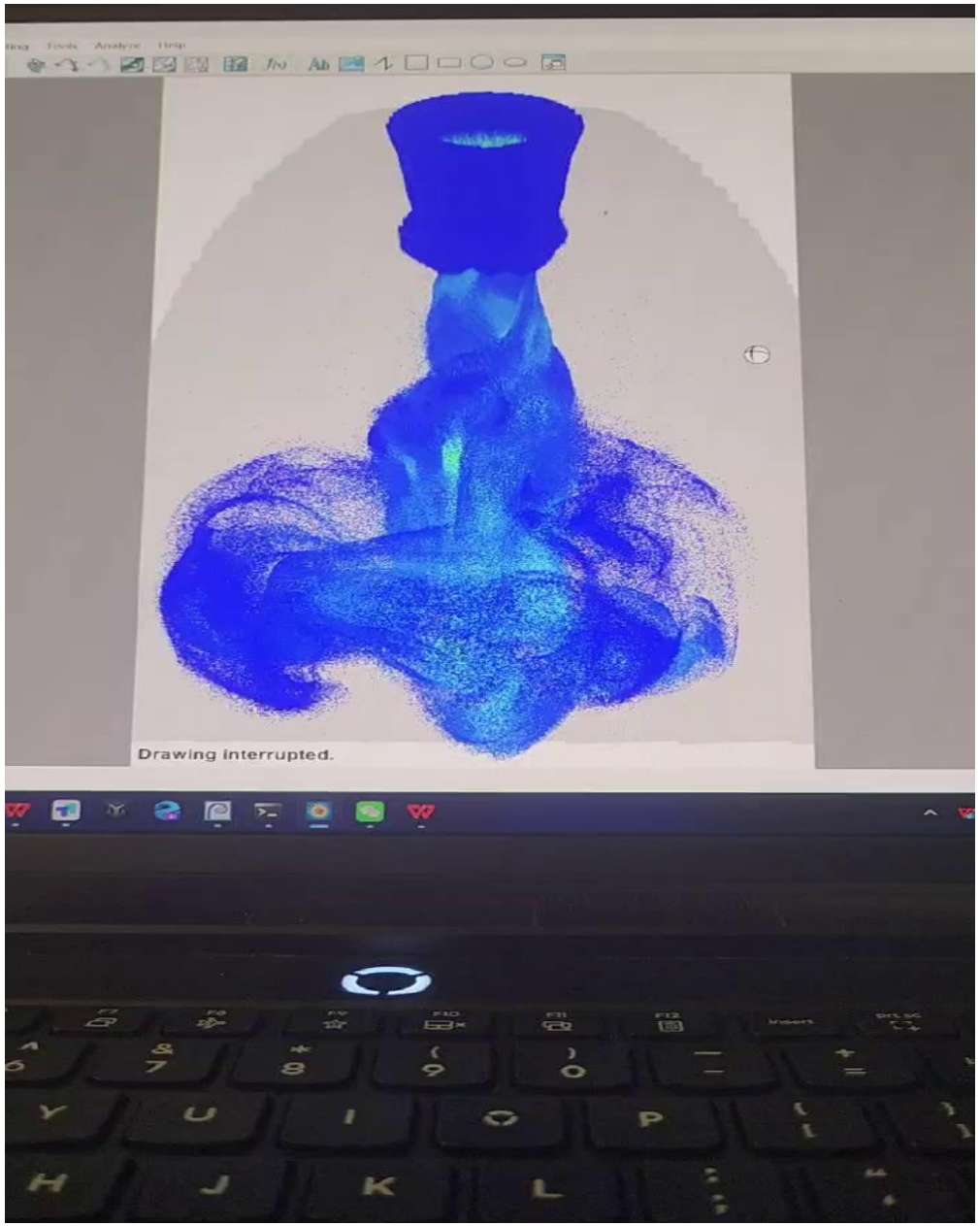






粉煤喷嘴雾化状况和视频



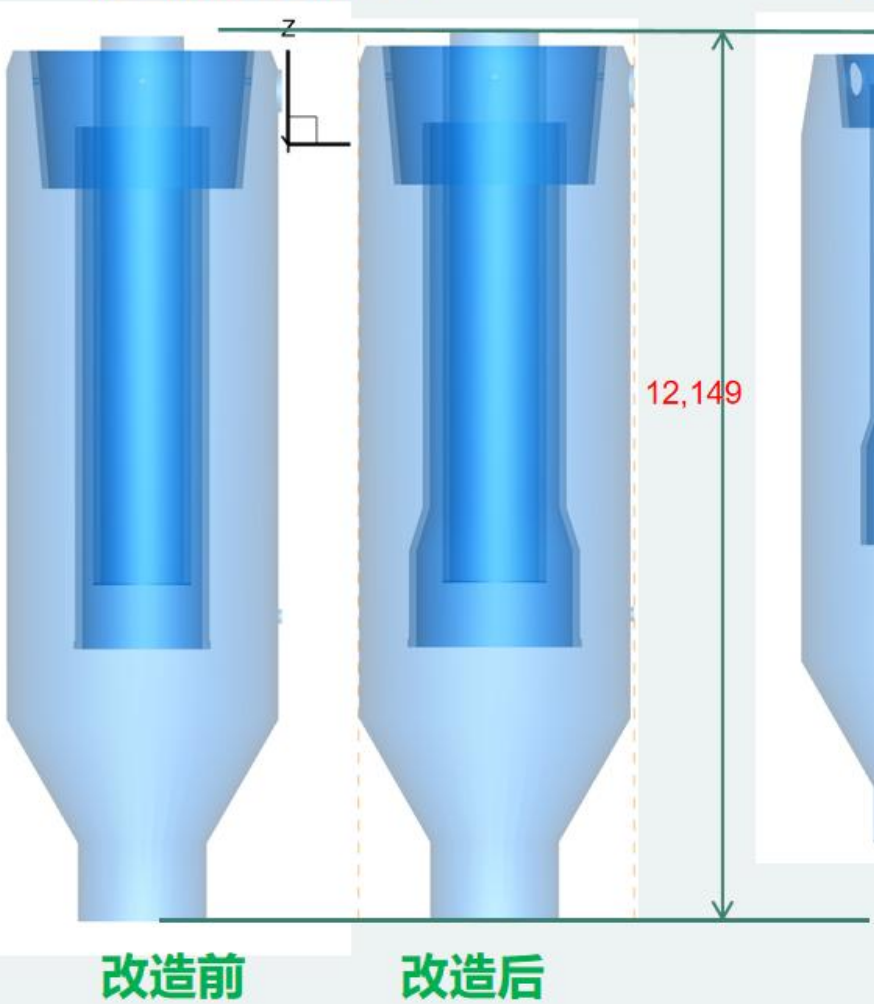


粉煤喷嘴

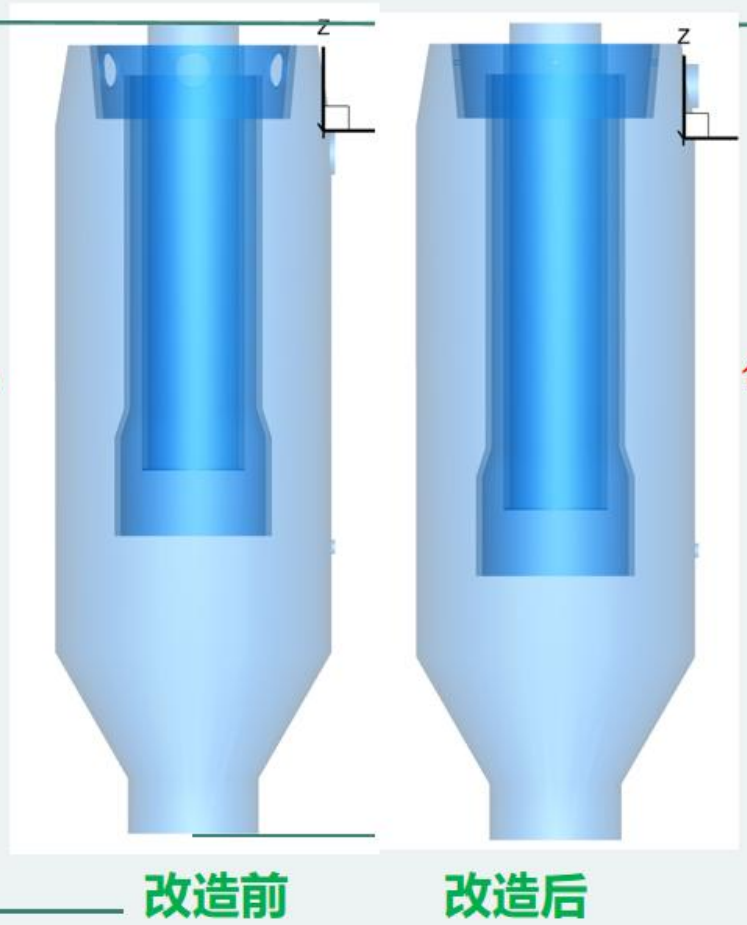
- 客户粉煤炉的问题：“从运行参数判断烧嘴燃烧火焰细长，碳转化率相对较低”。模拟结果发现：对喷嘴出口间隙尺寸及旋流角度进行优化，以减少喷嘴出口气体和颗粒速度，即可增加颗粒停留时间。
- 收到闫教授，这确实也是一个办法。该项目气化炉负荷稍微有点高，但是主要出口截面积和其他项目一样，这样一来氧气流速确实大
- 粉煤喷嘴的操作弹性很大。我用低一倍负荷计算，雾化状态也很好。喷嘴出口颗粒速度分布良好。
- 闫教授您好，我给老板汇报了您用CPFD做的我们烧嘴的仿真，这个确实比FLUENT做的颗粒仿真更直观，我们用FLUENT只能取部分煤粉颗粒看看速度矢量分布，看不出来整体的，CPFD可以直观的看出煤粉烧嘴的混合均匀性，这点挺好的…。

现象：类似的煤浆负荷91-92方，但不同激冷室大小尺寸和不同结构（膨胀节和折流板）

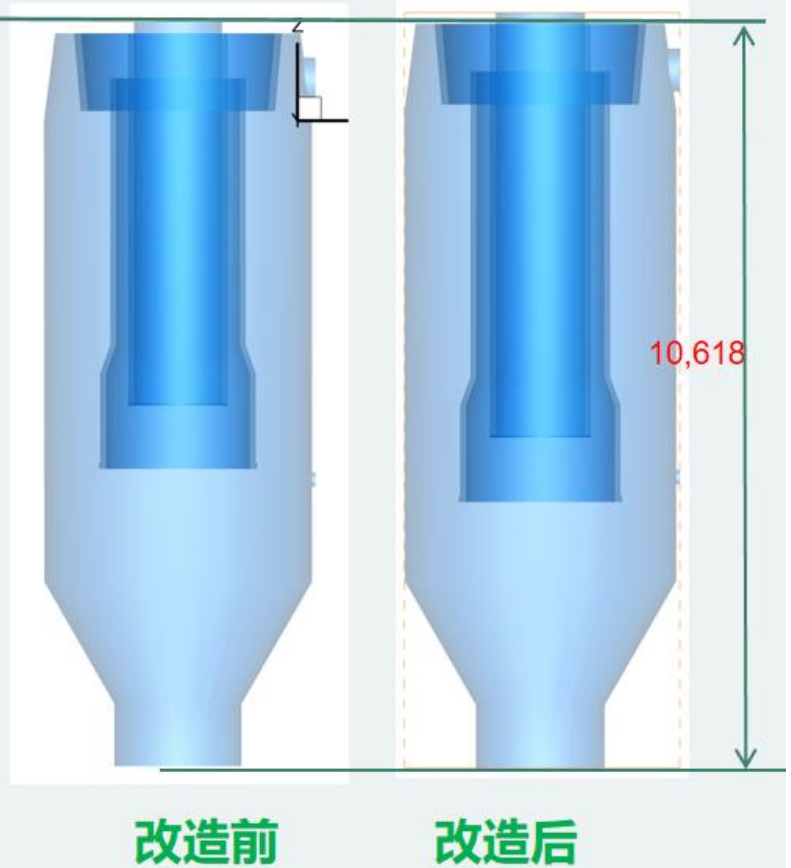
客户1：增加上升/下降管直径加膨胀节，间隙尺寸



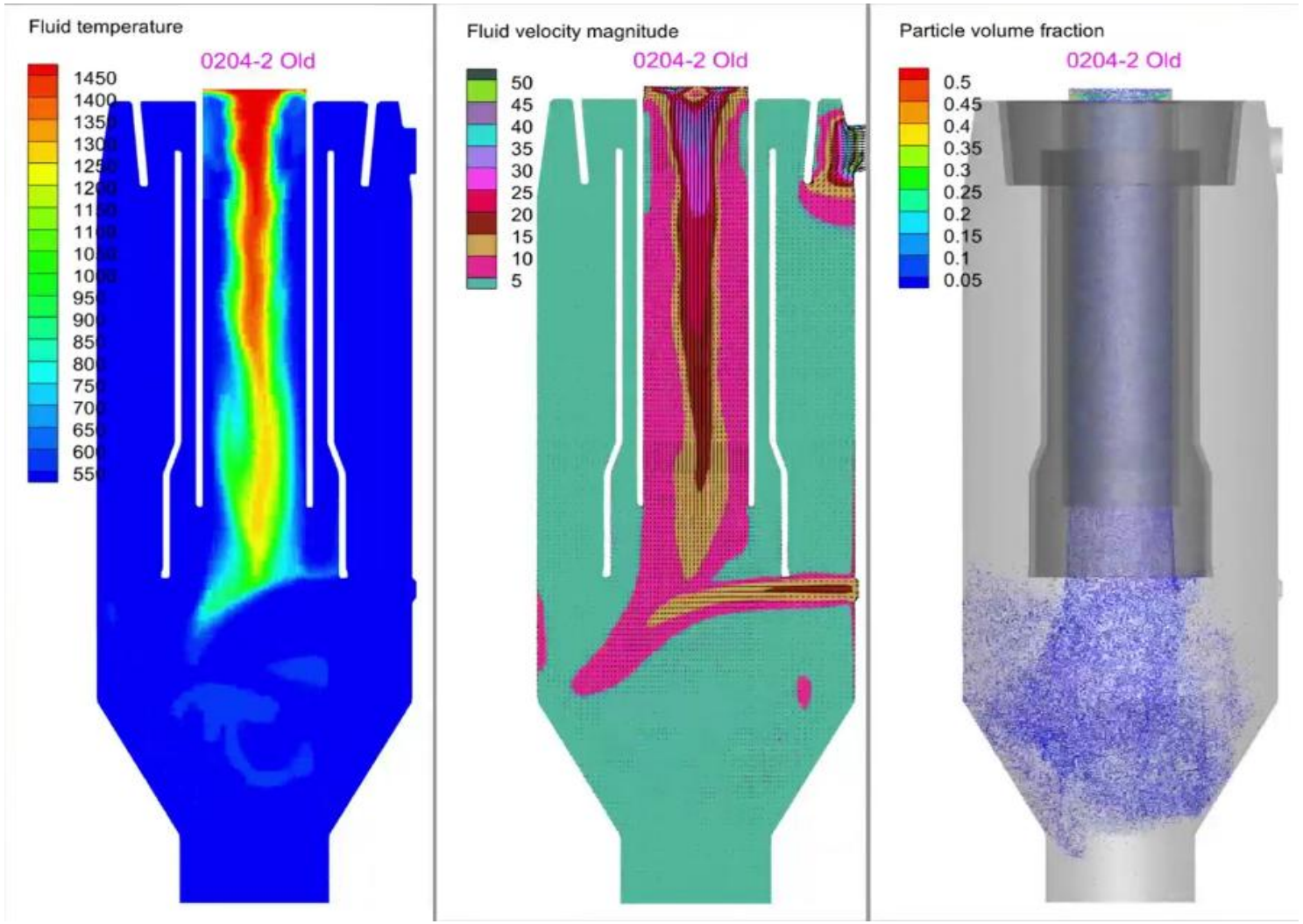
客户2：增加上升管直径/下降管长度，间隙尺寸

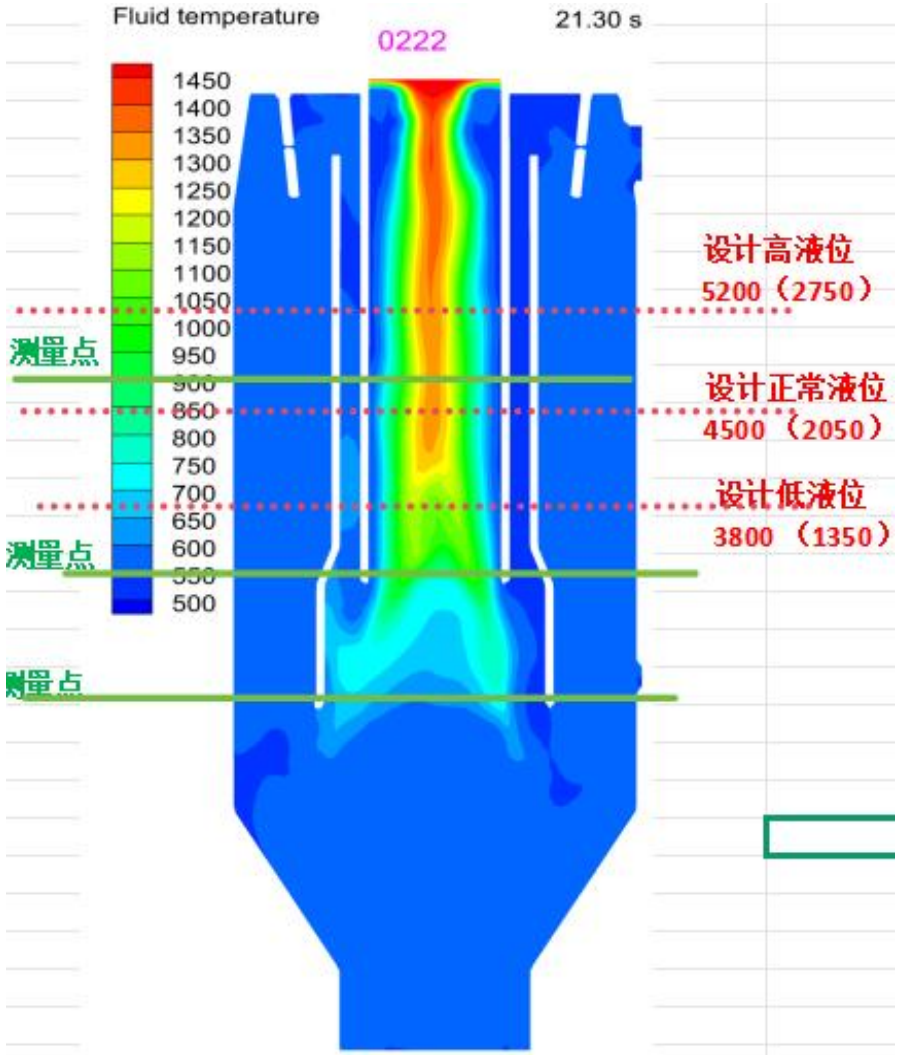


客户3：增加上升管直径/下降管长度，间隙尺寸



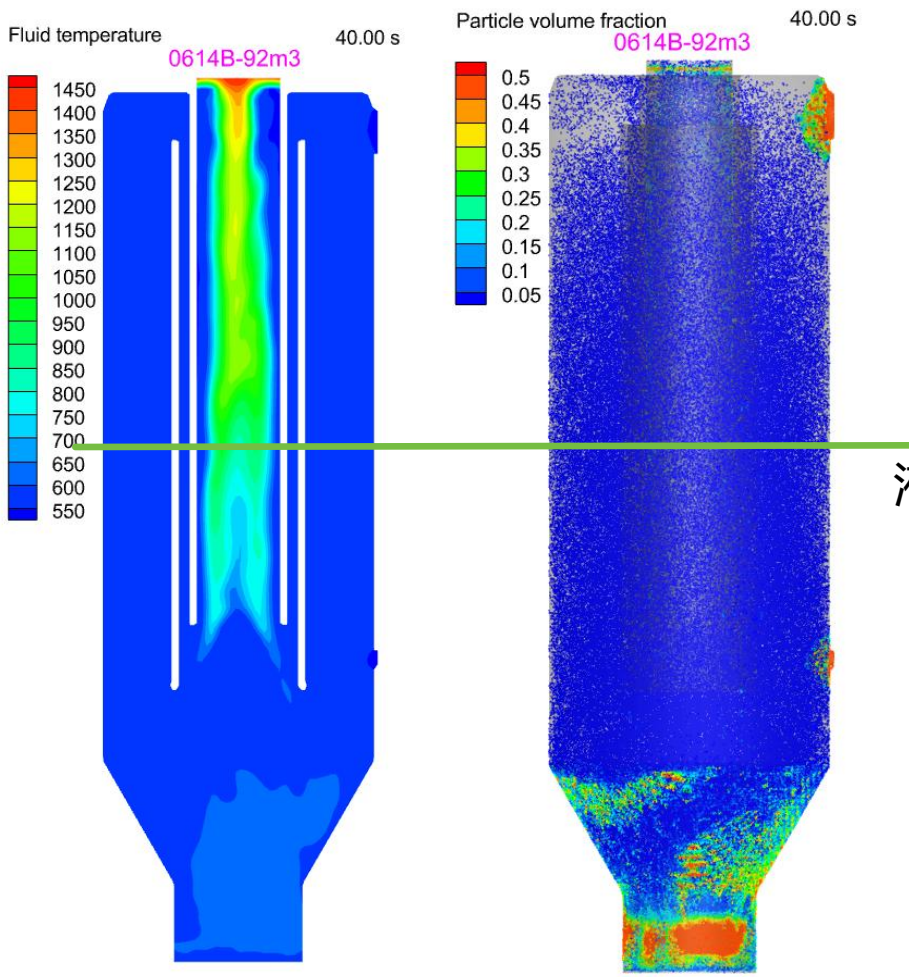
改造前激冷室视频 – 慢速度稳定态，计算60小时





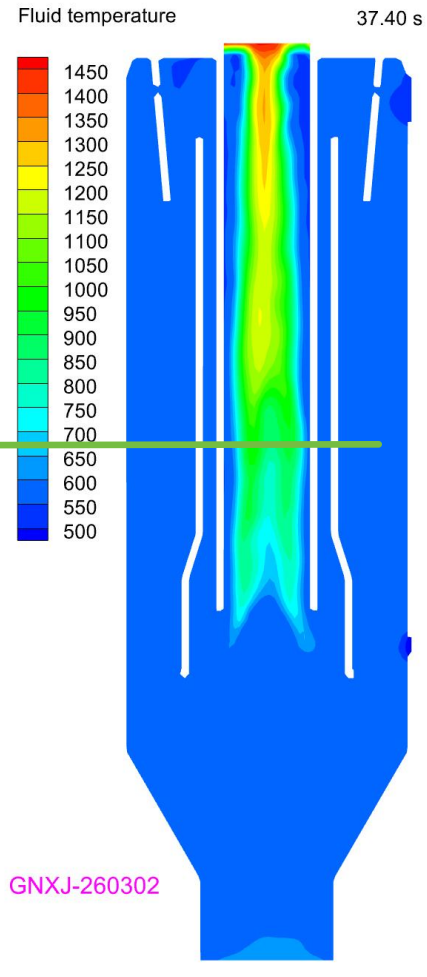
客户1：改造前后的CPFD模拟结果对比

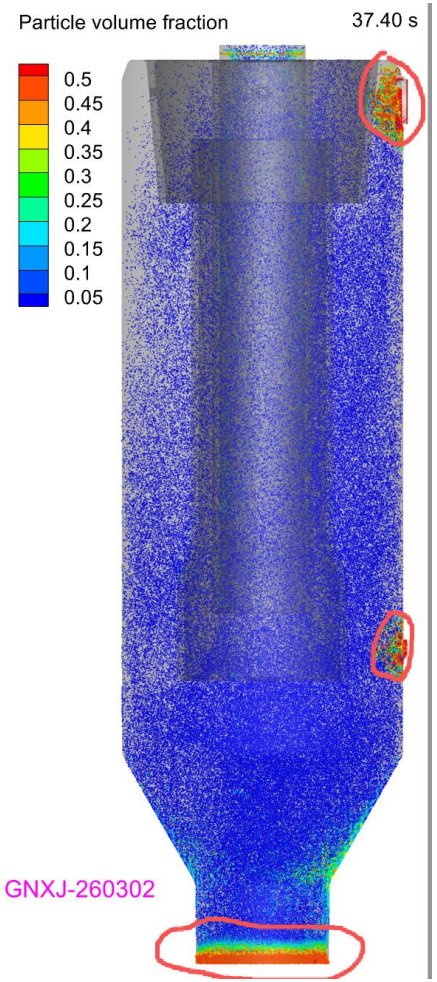
原激冷设计：92.7m3煤浆负荷，计算97小时，



液位

新激冷设计：92.7m3煤浆负荷，计算96小时





分离效果差

分离效果好

激冷室模拟和工业效果

一．目前，在几家出现煤浆提浓问题的客户装置中，激冷室下降管进口最大空速普遍偏高，进而引发了下降管鼓包、激冷室下部液位失控、气固分离效果变差、工艺水耗量上升等一系列问题。

二．经改造后，粗煤气出口温度可降低5-20℃，气固分离效果得到显著提升，能够缓解带水带灰问题，降低黑水循环量；

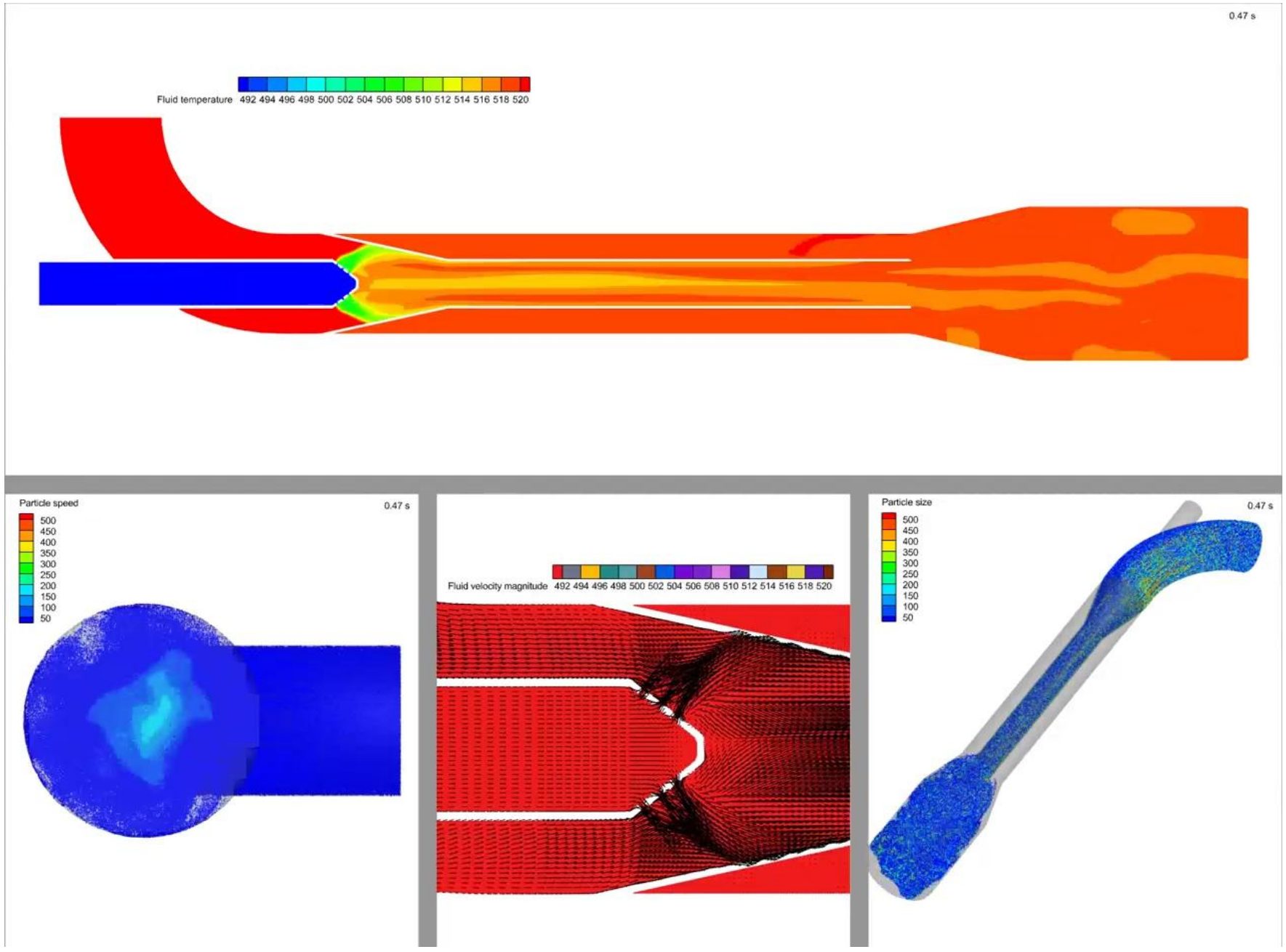
三．激冷室下降管进口最大空速需要控制在相对较低的水平；

四．下降管与上升管的环隙流速需控制在合理区间，避免颗粒偏流，导致气固分离效果恶化。

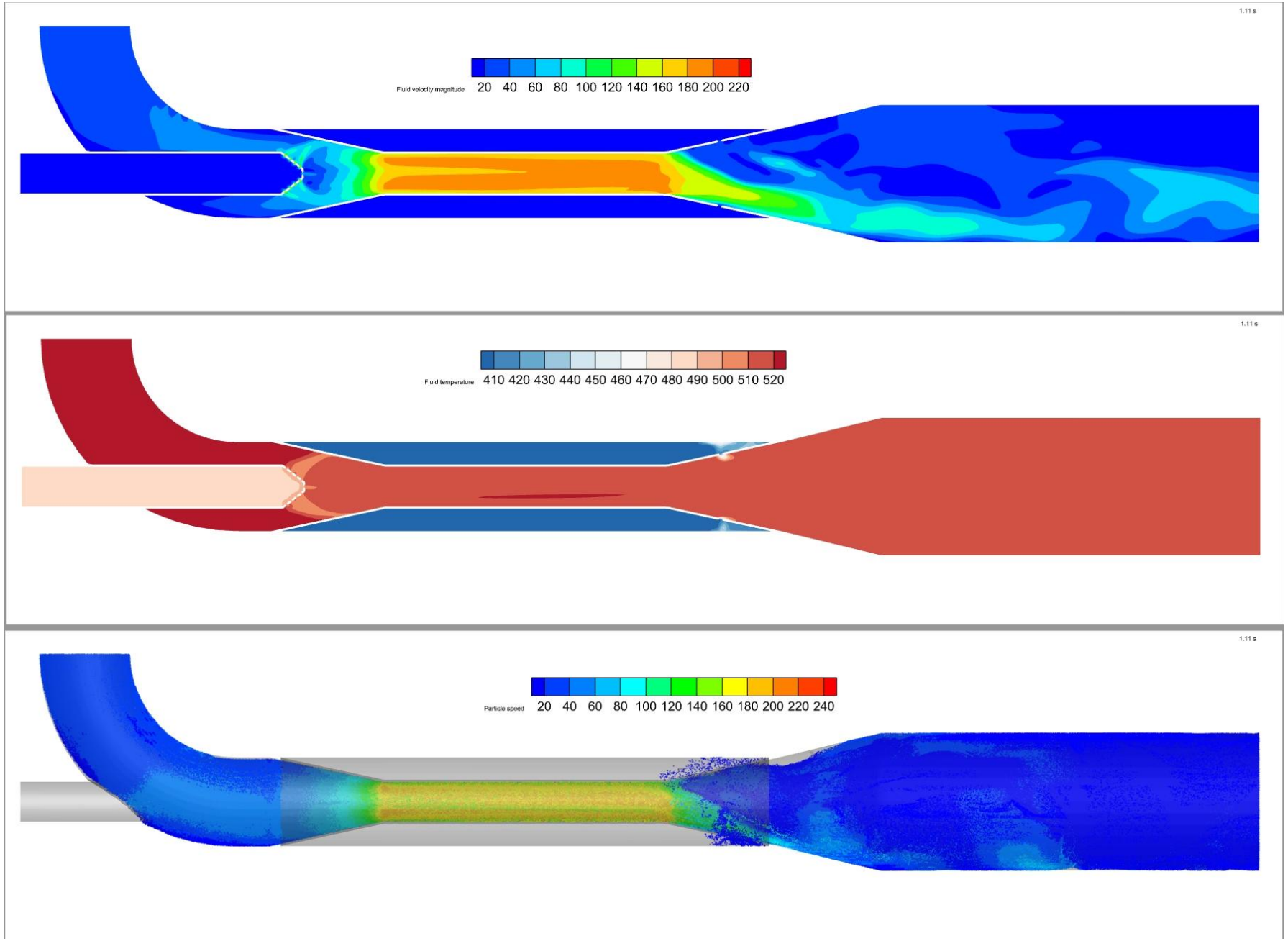
五．模型预测的粗煤气出口温度与实际生产数据吻合度良好，目前该改造方案已在一家企业完成部分实施，应用效果优良。

改造前视频

温度分布
颗粒分布
颗粒速度
喷头流体速度



改造后视频


1.11 s
Fluid velocity magnitude
20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220
1.11 s
Fluid temperature
410 420 430 440 450 460 470 480 490 500 510 520
1.11 s
Particle speed
20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240

文丘里洗涤器

一．优化后消除了文丘里洗涤器流体出口速度与温度分布不均的问题。

二．优化后消除了文丘里喷头进水前端与喷头出口前的两处死区，优化前该区域内矢量速度为零。

三．优化后解决了文丘里洗涤器喉管与文丘里管壁之间的夹层易积存大量灰尘，且难以清理的问题。

四．优化后降低了文丘里出口的压差波动幅值。

五．优化前后文丘里洗涤器的磨损侵蚀指数最大值分别为6.5e9与4.5e9，优化后该指标降低了30.7%。

结论

- 本研究构建了“CPFD仿真建模—流场缺陷诊断—结构迭代优化—直接工业化落地验证—经济效益分析”的完整闭环研究体系，从流动本质出发推动喷嘴结构迭代升级，为装备长效可靠运行提供保障，也为煤化工关键装备的自主化升级提供理论支撑与工程范式；
- 经CPFD仿真优化的单喷嘴，目前已实现大规模工业应用，应用效果表现优异；
- 鑫立依托自主发明专利开发的改进型多喷嘴，可助力行业实现三大提升：提升运行稳定性、拓宽煤种适应性、提高气化效率，破解了国内多喷嘴气化炉仅能依赖低灰煤实现长周期运行的行业困境；
- 经CPFD仿真优化的粉煤喷嘴、文丘里洗涤器与激冷室，模拟结果与工业数据吻合度良好，目前已逐步投入工业应用。

- 闫洪明（博士/总工）
- 陕西鑫立西安市院士专家工作站
- 电话: 19929955798

联系人：白利芳

陕西鑫立公司销售部经理：

15202908851



白利

陕西 西安

扫二维码，添加我为朋友。

感谢聆听！

2026-10-23