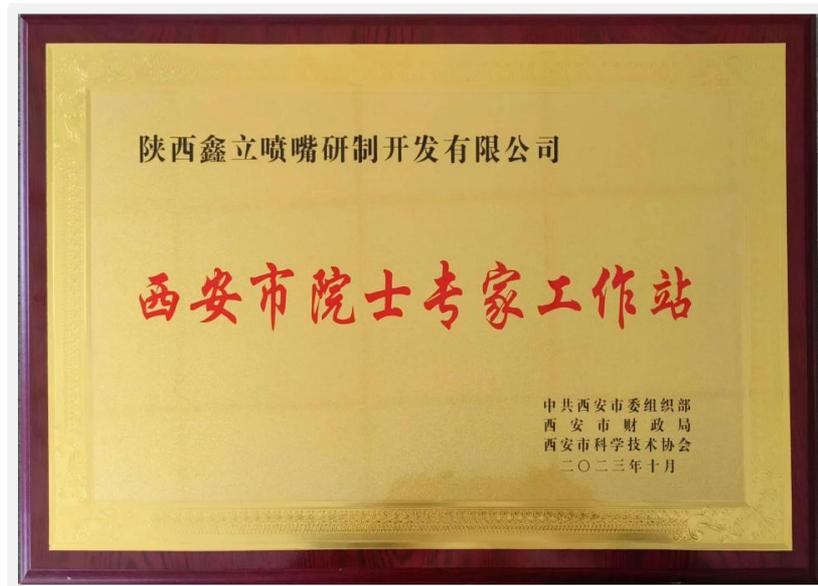


横置式喷嘴CPFD颗粒流体动力学 模拟优化, 发明专利和工业应用效果

闫洪明 (博士/总工)

王晓伟 (鑫立公司创始人)

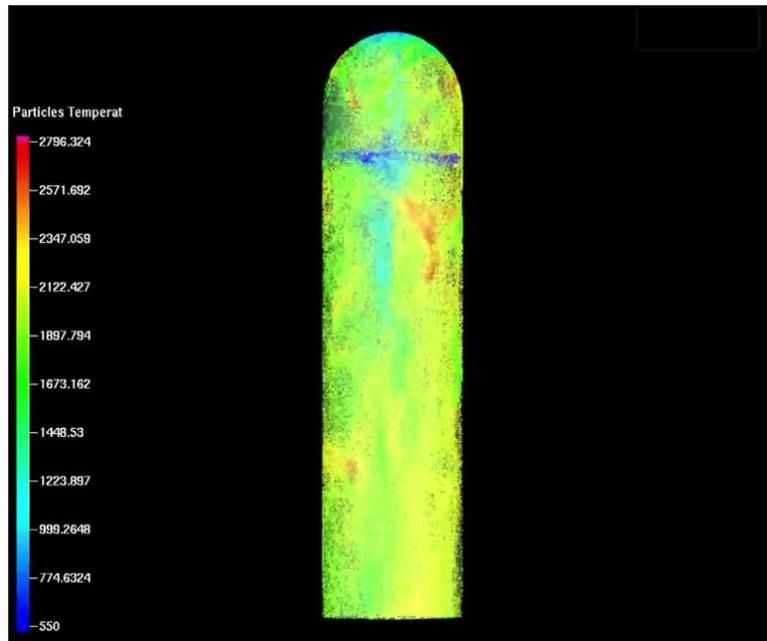
2025-11-02





目录

- 一. 自2023年10月院士专家站落地所取得的CPFD模拟工作创新点，业绩和CPFD软件包
- 二. 鑫立发明专利：一种带螺旋机构的工艺喷嘴和行业共识
- 三. 四喷气化炉热态模拟视频
- 四. 四家客户的实际压力波动数据
- 五. 模拟结果和实际运行参数对比
- 六. 模拟优化后的实际工业应用效果



创新点和仿真模拟软件包

创新点： 以往30多年国内外对喷嘴寿命的研究偏重于喷嘴头部耐高温，耐腐蚀和耐磨材料的升级，但对煤颗粒在喷嘴内部流场的流动状态和出口的雾化状态研究较少，采用CPFD（Computational **P**article Fluid Dynamics）颗粒 - 流体”动力学仿真模拟弥补了国内外这方面的缺陷；

BARRACUDA VIRTUAL REACTOR

软件包：

CPFD流体颗粒动力学软件包是目前在世界上模拟与煤有关的工艺最好的。例如水煤浆气化炉，粉煤气化炉，流化床气化，煤燃烧，固体颗粒分离和输送，等。CPFD模拟结果和实际更接近，CPFD可以计算密相颗粒的流动，浓度（体积分数）高达90%，可包括入炉煤的工业分析数据和颗粒分布（级配），计算喷嘴压差和压力波动，工业级别模拟计算时间：1-2周。

Ansys FLUENT（CFD）的缺点是：不能用于密相煤颗粒（<10%）的流动和化学反应有缺陷，并且计算时间过长，模拟颗粒运动结果和实际差别较大。

Barracuda Virtual Reactor **CPFD** (Computational Particle Fluid Dynamics) “颗粒-流体”动力学软件包



自2023年10月院士专家站取得的CPFD模拟工作总结

- 国内外首次使用更适用于煤相关化工工艺的CPFD (Computational Particle Fluid Dynamics) “颗粒 - 流体”动力学软件包模拟水煤浆气化炉重大关键技术装备工艺喷嘴和在工业上的成功运用，为工艺喷嘴全部国产化迈出了关键的一大步；
- 国内外首次采用**可视化的等值面技术**对正在运行的工艺喷嘴状态做出诊断，可以直接观察喷嘴内部流场以及出口流体颗粒流动状态，代替国内无法做的物理实验；
- 用“**科学**”代替了国内过去30多年的“**经验**”，传统带有缺陷的一维设计方法（不考虑煤种，颗粒分布和颗粒运动）；
- 根据**喷嘴的实际工业几何尺寸和实际工艺操作参数**，完成了国内46家大型企业水煤浆气化炉工艺喷嘴CPFD颗粒流体动力学仿真模拟。模拟的工艺喷嘴覆盖了煤浆负荷从**最小 $3.3\text{m}^3/\text{h}$** 到最大 **$178\text{m}^3/\text{h}$** 的范围，包括顶置单喷嘴和**横置多喷嘴（四喷，4家客户）**，带点火装置顶置单喷嘴（清华炉）以及双氧双煤浆的喷嘴，石油焦，以及调和沥青为原料的喷嘴；
- 模拟结果**发现**模拟过46家企业的喷嘴(100%) 在不同程度上都存在不同的问题，其中80%的改动比较大，全国行业的喷嘴优化势在必行；
- 模拟优化结果和工业应用**实际工艺操作参数吻合良好**并在许多工业应用中取得了很好的效果。经模拟优化的多家公司的喷嘴刷新了他们的气化炉最长周期运行纪录，可为企业提高经济效益1000万元到1亿元/年；
- **横置式（多喷嘴）发明专利”一种带螺旋叶片装置的工艺喷嘴 “，技术评审已通过，等待正式批文；**
- **本工作在世界的领先地位引起了美国CPFD软件发展商的特别关注，见下页。**



新闻通报: 2025年8月已上了CPFD公司的官网 Lawrence Wang and Shaanxi Xinli Select Barracuda Virtual Reactor | CPFD Software



TECHNOLOGY

APPLICATIONS

SOLUTIONS

COMMUNITY

RESOURCES

COMPANY

CONTACT

🔍 👤 Login

Lawrence Wang and Shaanxi Xinli Select Barracuda Virtual Reactor

Home / News / Lawrence Wang and Shaanxi Xinli...

CPFD Software (CPFD) is pleased to announce that it has entered into a software licensing agreement with Lawrence Wang Ltd. (Lawrence Wang) and Shaanxi Xinli Nozzle Research and Development Co., Ltd. (Shaanxi Xinli) for use of CPFD's Barracuda Virtual Reactor fluid-particle simulation software.

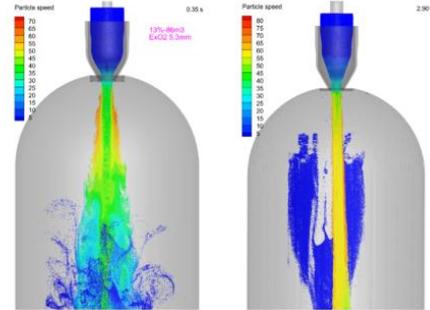
Lawrence Wang (Altrincham, UK) is a leading global sourcing and procurement company that provides materials, fabrication and bespoke production solutions for the chemical processing and energy industries.

Shaanxi Xinli (Xi'an, China) has 30 years' experience as a leading equipment developer for the gasification industry, with specialty expertise in Coal Water Slurry Gasifier (CWSG) applications.

Barracuda Virtual Reactor simulation optimizes gasification nozzle design and operation, delivering significant performance and economic benefits. Key functions include: diagnosing nozzle status, optimizing internal structure/outlet size for better flow field/atomization, reducing pressure fluctuations, and determining optimal O₂ ratio and slurry load. It replaces lab tests and outdated 2D design methods (which ignore particle dynamics and coal properties), reducing shutdowns, carryover loss, and downstream fouling, while boosting carbon conversion and syngas yield.

"CPFD simulation has been successfully applied in numerous industrial cases, demonstrating that this technology is not only reliable and feasible, but has also garnered significant attention and recognition from industry peers," said Dr. Hongming Yan, Chief Engineer of Shaanxi Xinli. "There is substantial market demand for this advanced simulation approach."

"We were impressed to learn of the expertise demonstrated by Dr. Hongming Yan, Mr. Wang XiaoWei and the Shaanxi Xinli team in applying Virtual Reactor to CWSG applications for over 20 gasifiers, optimizing nozzle design and feed atomization while minimizing fluctuations and extending uptime," said Peter Blaser, Vice President of CPFD. "We look forward to a long-term collaboration and global expansion through Lawrence Wang's global reach."



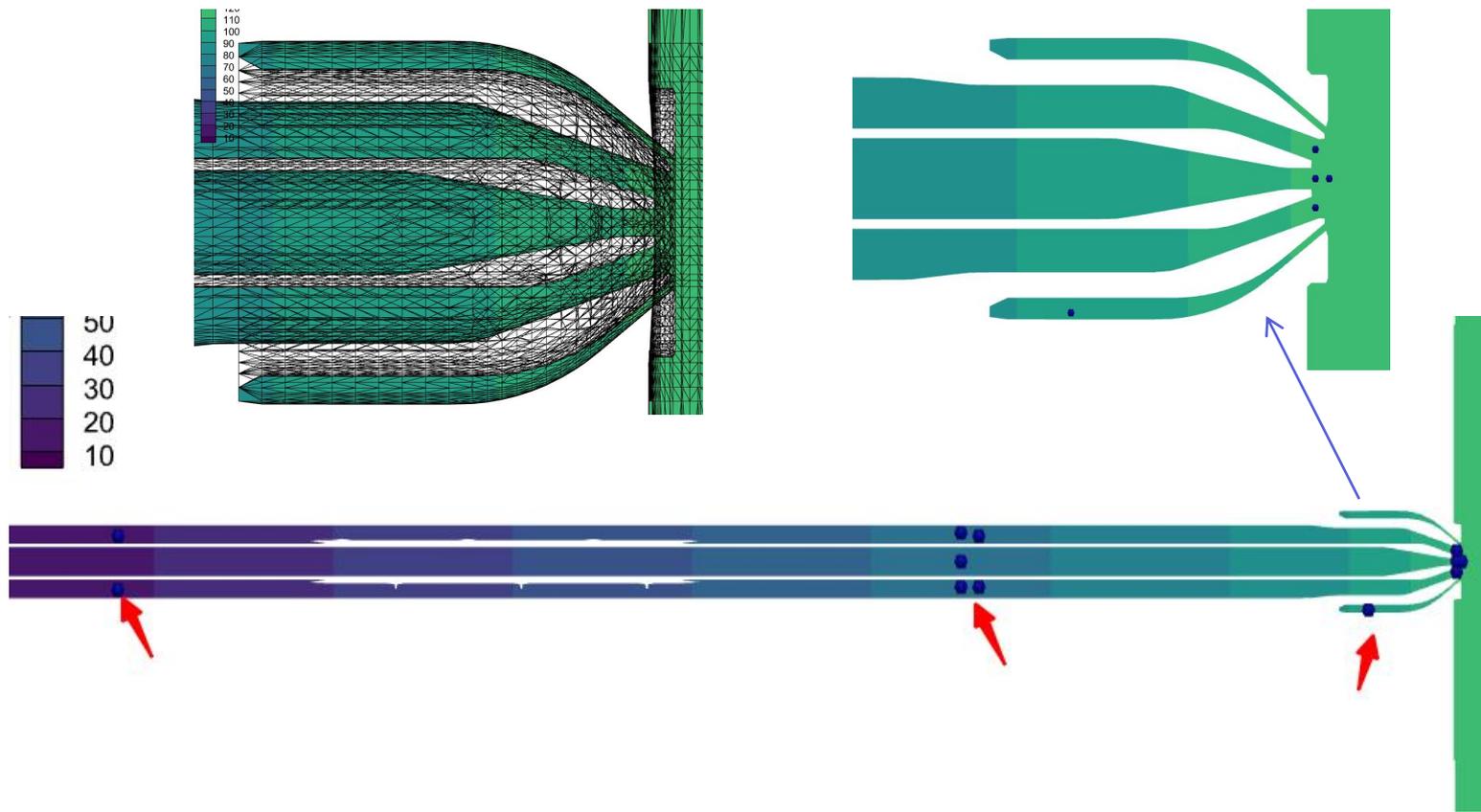
鑫立发明专利：一种带螺旋机构的工艺喷嘴和行业共识

- ◆ 专门用于四(多)喷嘴对置式气化炉,以解决国内20多年来业内制造商和用户的共识:长度为2.3~2.4米喷嘴本体煤浆管通道水平放置引起颗粒在通道内沉积问题是导致压力波动大的根源, 喷嘴偏喷, 和喷嘴寿命较短, 但20多年来没有找到有效的解决办法;
- ◆ 20多年前多喷嘴气化炉技术开发团队做过许多加螺旋叶片的物理实验, 实验结果是无效果, 即不能解决颗粒在喷嘴煤浆通道内沉积问题, 具体主要原因是“不同结构的螺旋叶片”仅装在喷嘴头部, CPTD“颗粒-流体”动力学软件包仿真模拟结果和此结果高度吻合。

鑫立发明专利：喷嘴内的螺旋结构用CPFD仿真确定

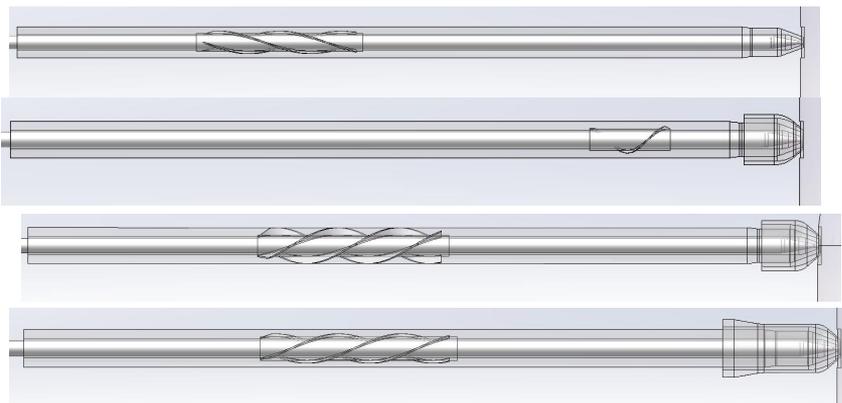
- ◆ 喷嘴内螺旋的安装位置，叶片角度，螺距高度，长度和叶片数的确定均是采用更适合于煤相关化工工艺的CPFD（Computational Particle Fluid Dynamics）“颗粒 - 流体”动力学软件包，并根据实际的运行的喷嘴几何实际尺寸，喷嘴本体的煤浆管路的实际长度，实际气化炉工艺运行操作参数（流量和压力），和煤质，煤浆以及颗粒分布数据进行上千小时的仿真模拟计算确定，更具有创造性，先进性和可靠性；

喷嘴网格图，模拟计算检测速度点

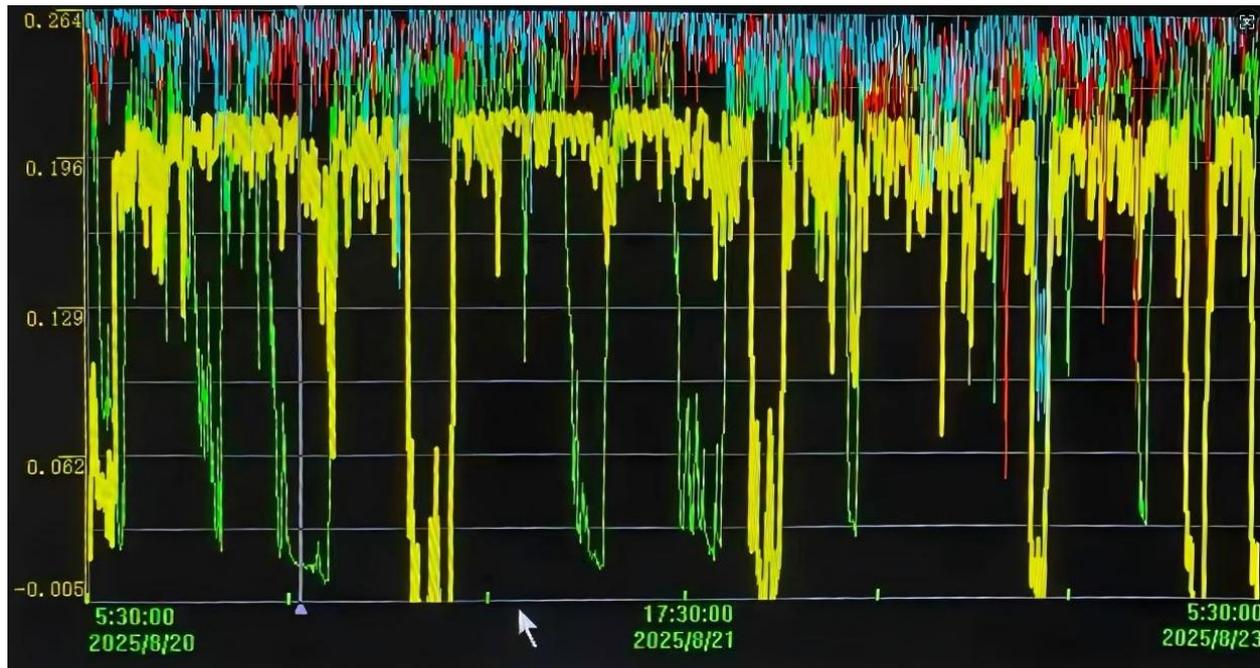


模拟考虑的不同螺旋例子

图号	安装位置	螺旋高度	螺旋长度	叶片数	螺距	套管长度	套管厚度	模拟结果
1	套管入口端面距离煤浆端面660	煤浆通道高度的3/5 (单边)	400mm	2个	400	420mm	4mm	雾化差
2	套管入口端面距离煤浆端面580	煤浆通道高度的一半+2mm (单边)	220mm	1个	220	220mm	6mm	雾化差, 压降大
3	套管入口端面距离煤浆端面580	煤浆通道高度的1/2 (单边)	220mm	1个	220	220mm	4mm	雾化差
4	套管入口端面距离煤浆端面1970	煤浆通道高度的1/2 (单边)	500mm	3个	500	540mm	4mm	雾化差
5	套管入口端面距离煤浆端面2000	煤浆通道高度的3/5 (单边)	600mm	3个	600	700mm	4mm	雾化差, 压降大
6	套管入口端面距离煤浆端面1531	煤浆通道高度的4/5 (单边)	500mm	3个	500	520mm	4mm	雾化差
7	套管入口端面距离煤浆端面1531	煤浆通道全高少0.5mm (单边)	500mm	3个	500	520mm	4mm	雾化差
8	套管入口端面距离煤浆端面1531	煤浆通道高度的一半+2mm (单边)	500mm	3个	500	520mm	6mm	雾化差, 压降大
9	套管入口端面距离煤浆端面1531	煤浆通道高度的1/2 (单边)	500mm	3个	500	520mm	4mm	雾化好和压降合适



客户1：压力波动频率：过高 0.02-0.22MPa 共计72天,：2025, 7月5 - 9月15日



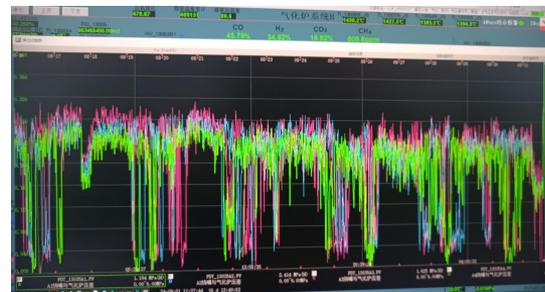
压力波动频率 MPa

2025年7月5日	0.02
2025年7月24日	0.06
2025年8月23日	0.2
2025年9月15日	0.22

其他客户目前运行的四喷嘴压力波动情况

客户2 (图1, 图2,) :

- 10个小时波动从0.05到 0.12 MPa
- 波动: 0.3-0.28 MPa



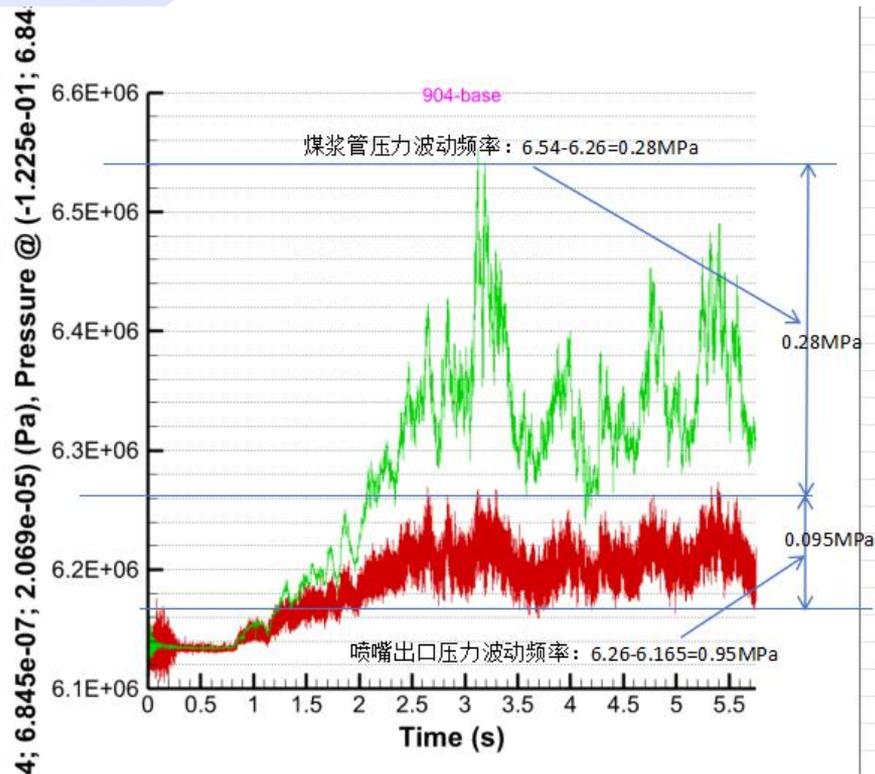
客户3 (图3) :

波动:0.1-0.3 MPa



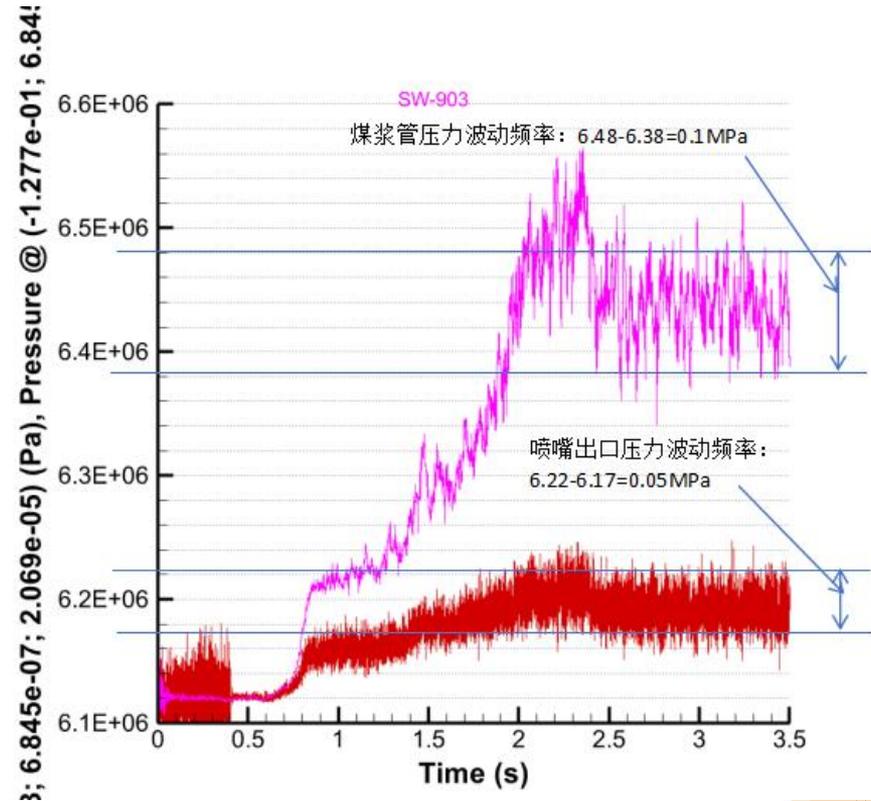
现喷嘴(无螺旋)95小时计算数据

- 1) 喷嘴出口处压力波动频率 = 0.095MPa)
- 2) 煤浆管通道压力波动频率=0.28MPa;
- 3) 喷嘴压差范围 = 0.16-0.44 MPa, **平均=0.22 MPa**



专利的新喷嘴(带螺旋)48小时计算数据

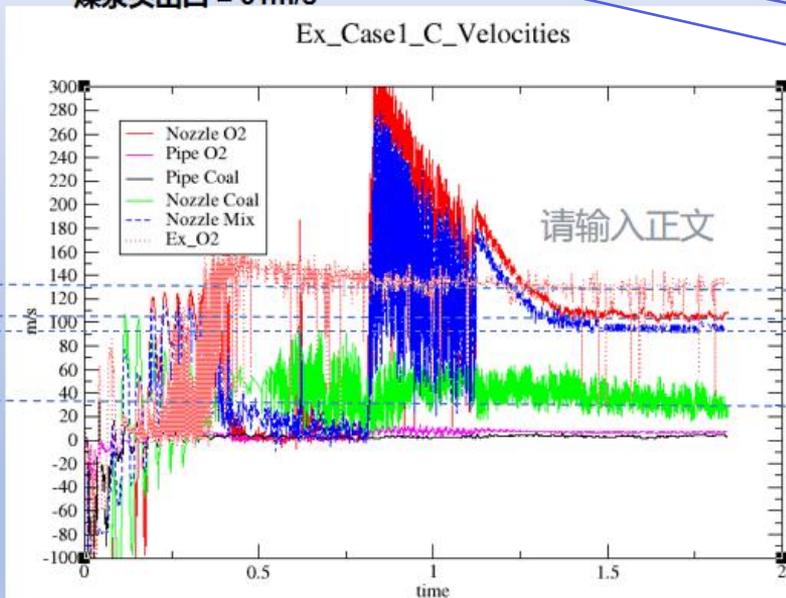
- 1) 喷嘴出口处压力波动频率=0.05MPa)
- 2) 煤浆管压力波动频率=0.1MPa, 大大减低;
- 3) 喷嘴压差范围 = 0.28-0.38 MPa, **平均=0.33 MPa**



CPFD模型预测的外氧和中心氧流量、氧压差 (0.728)、煤浆压差 (0.32) 与现场的实际数据非常接近。无螺旋的氧压差和烧嘴压差比有螺旋的高很多。

CPFD模型预测结果

有螺旋swp-c (SWP_YULIN_C_1.prj)
 外氧流速 = 133 m/s
 中心氧气 = 110m/s, 通道流速6m/s
 煤浆和氧混合物出口=82m/s
 煤浆头出口 = 31m/s



A: 2024年9月加螺旋喷嘴工业实际运行数据

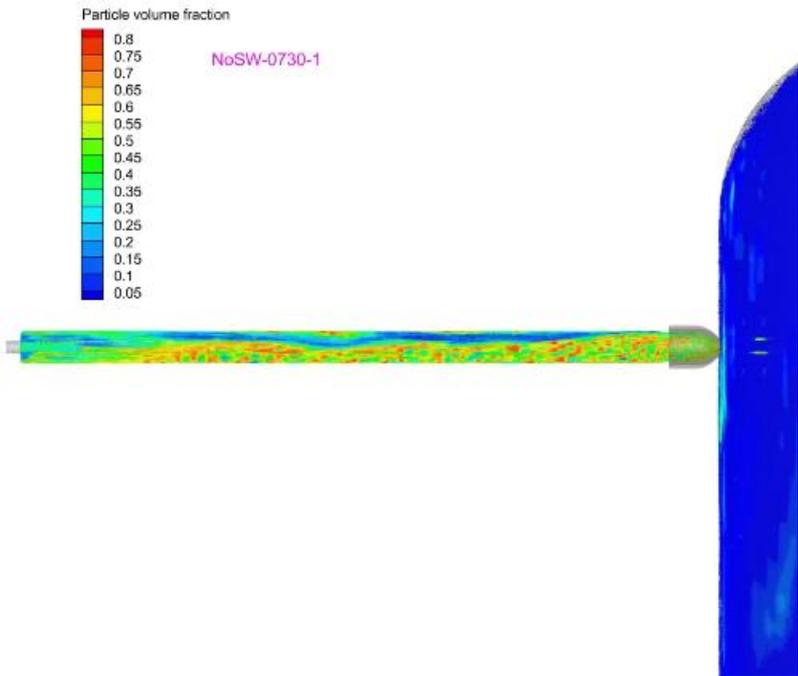
ZT 126C	A烧嘴	B烧嘴	C烧嘴	D烧嘴
344.2°C				
煤浆压差	0.38MPa	0.33MPa	0.38MPa	0.36MPa
氧气压差	0.76MPa	0.65MPa	0.62MPa	0.60MPa
外环氧流速	138.2	133.7	138.9	133.7
中心氧流速	112.0	107.4	107.7	124.9

B: 2024年9月无螺旋喷嘴工业实际运行数据 (氧压和喷嘴压差都高)

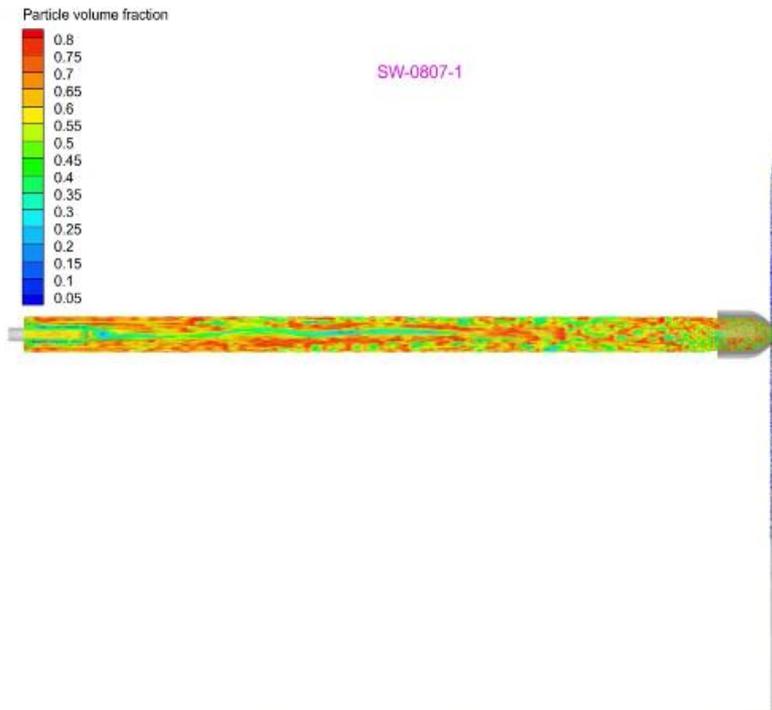
	A烧嘴	B烧嘴	C烧嘴	D烧嘴
煤浆压差	0.70MPa	0.68MPa	0.67MPa	0.70MPa
氧气压差	1.05MPa	1.06MPa	1.06MPa	0.99MPa
外环氧流速	130.6	129.5	128.5	131.3
中心氧流速	112.7	112.0	112.4	109.5

喷嘴管路本体管路流动状态 - 颗粒体积分数视频

原喷嘴无螺旋, 计算90个小时



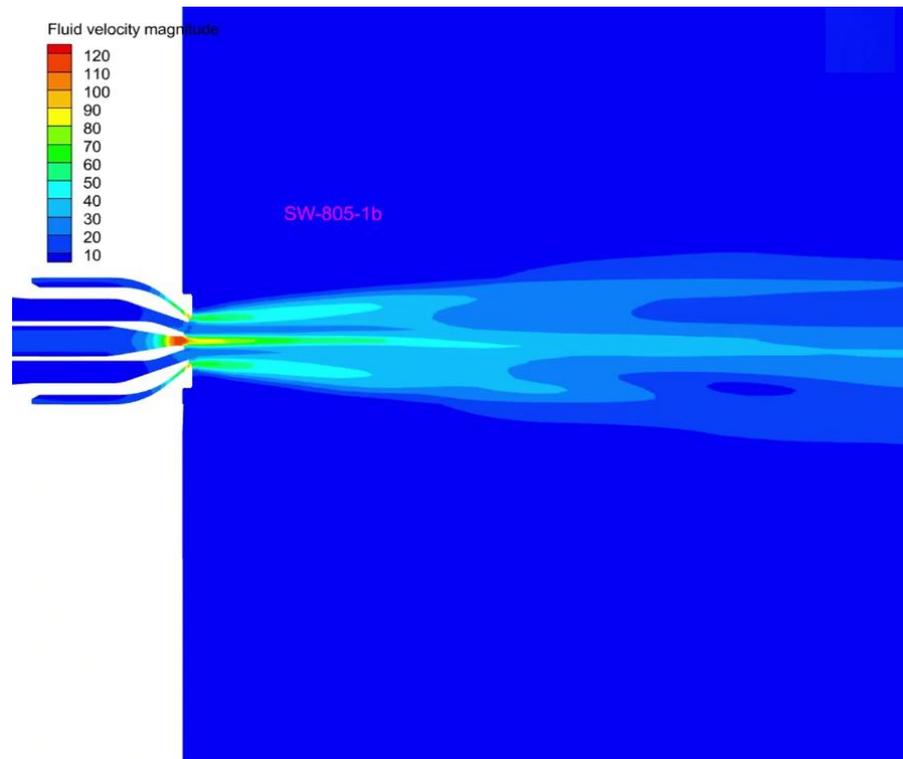
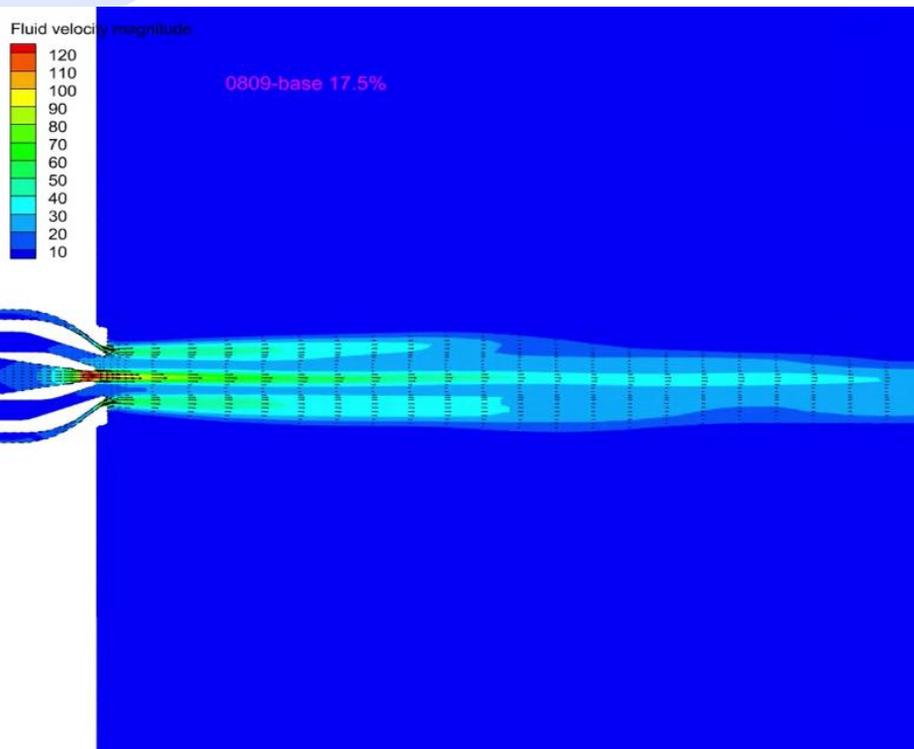
加螺旋, 计算38小时



喷嘴出口流体速度云图

原喷嘴无螺旋，计算90个小时

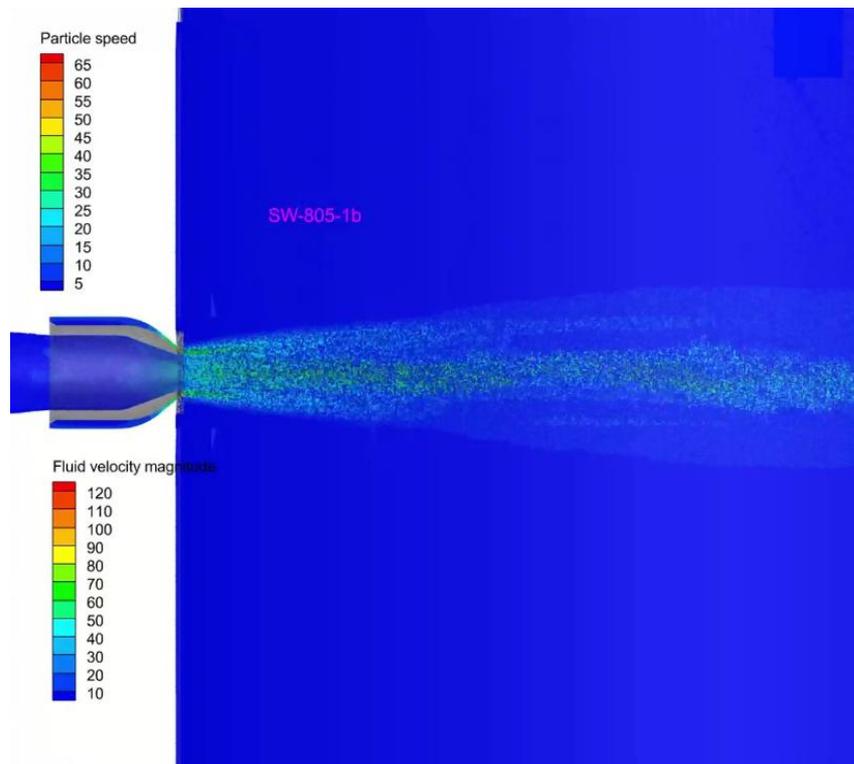
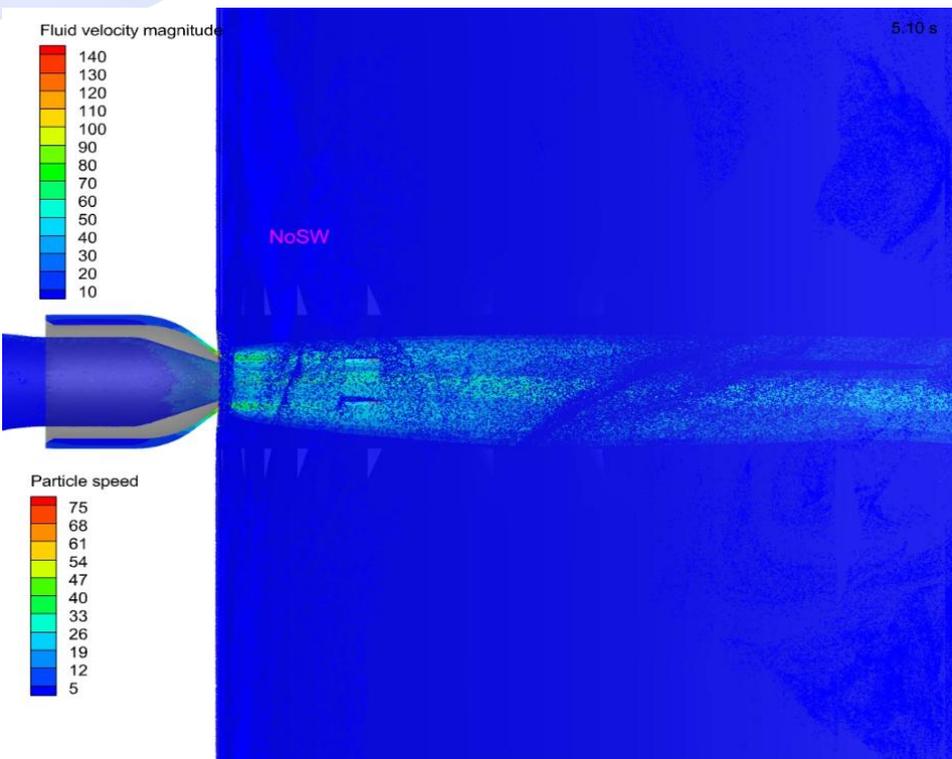
加螺旋计算48小时



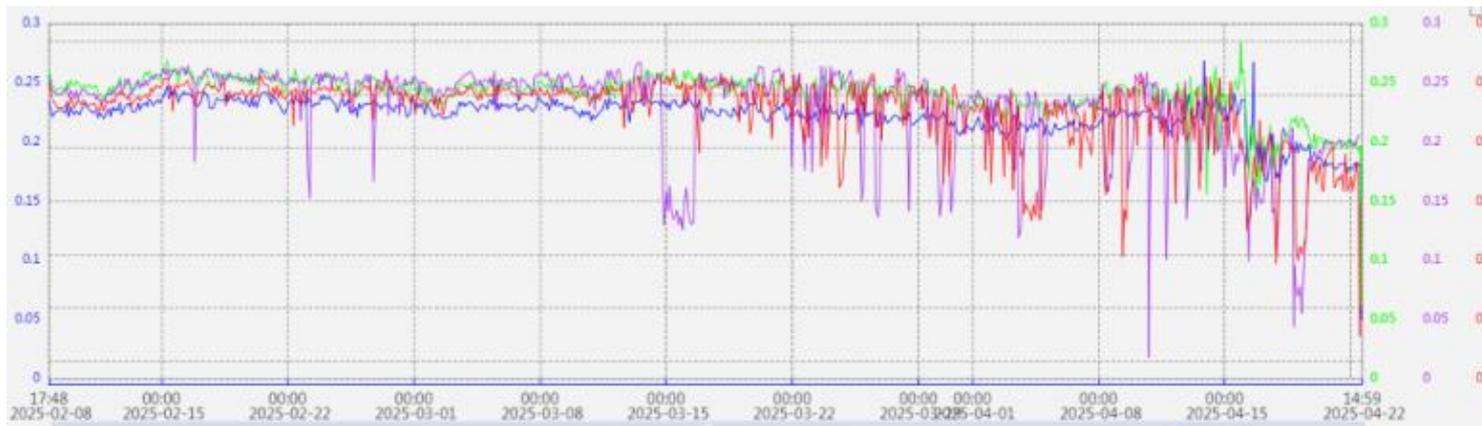
喷嘴出口颗粒速度云图

原喷嘴无螺旋, 计算90个小时

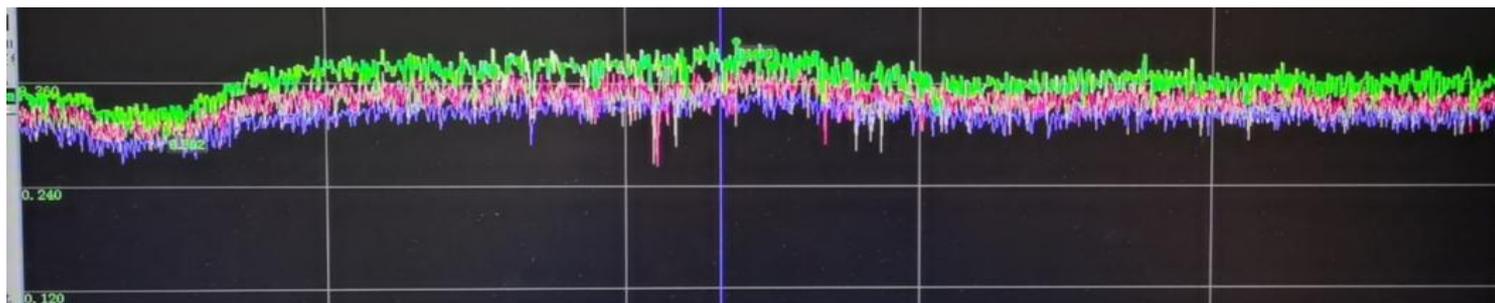
加螺旋, 计算38小时



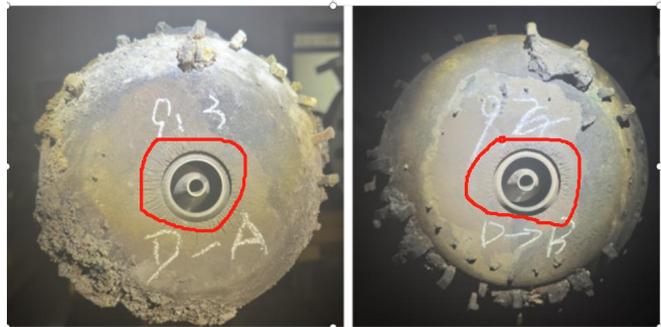
客户4烧嘴使用一个周期内烧嘴压差曲线数据 2月8 - 4月22 = 73天 0.02-0.24MPa



兖矿榆林应用实例：优化后喷嘴实际值和模型预测类似 0.02-0.06 MPa，远远小于优化前的值。四喷运行70天压力波动数值在<0.06 MPa, 9月2日， 2024

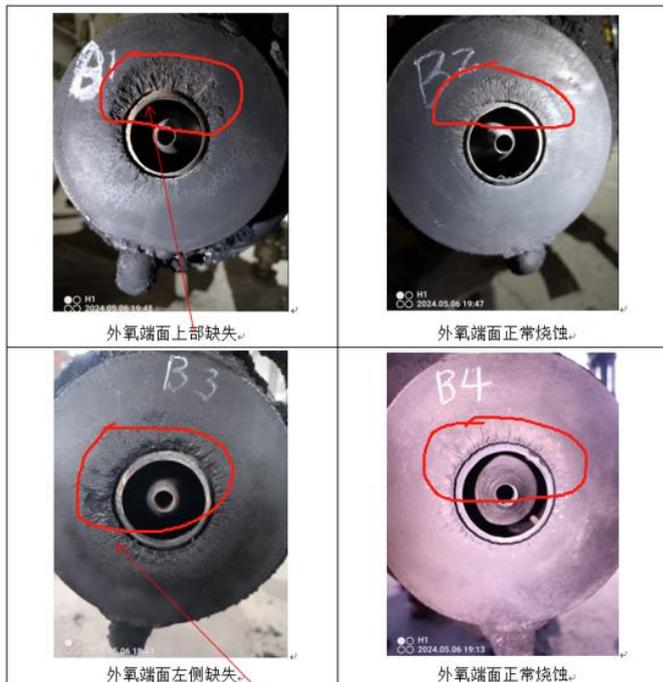


使用73天后加螺旋的喷嘴端面龟裂相
对比较均匀分布并且龟裂程度轻微，再
用几十天也没问题



由于空分机倒机
连投时间过长导
致B号喷嘴烧裂，
但喷嘴稳定运行
73天仍旧证明了
专利的效果。

(客户) 不加螺旋的喷嘴龟裂集中
在喷嘴端面上半部，并且严重，运
行60天



横置式（四喷）工艺喷嘴改造工业应用初见成效

H2%	CO%	Total%
37.67	44.06	81.73
38.87	43.66	82.53
33.32	48.04	81.36
37.48	44.65	82.13
平均		81.94

H2%	CO%	Total%
36.69	46.69	83.38
39.44	44.24	83.68
37.84	46.08	83.92
38.2	45.33	85.18
39.29	45.23	84.52
平均		84.05

实际运行参数和行业现场数据。2024年6月23日投运，喷嘴运行了73天，所有的数据和运行参数都与CPFD模型的预测非常匹配。目前运行状态良好，仍旧很稳定。

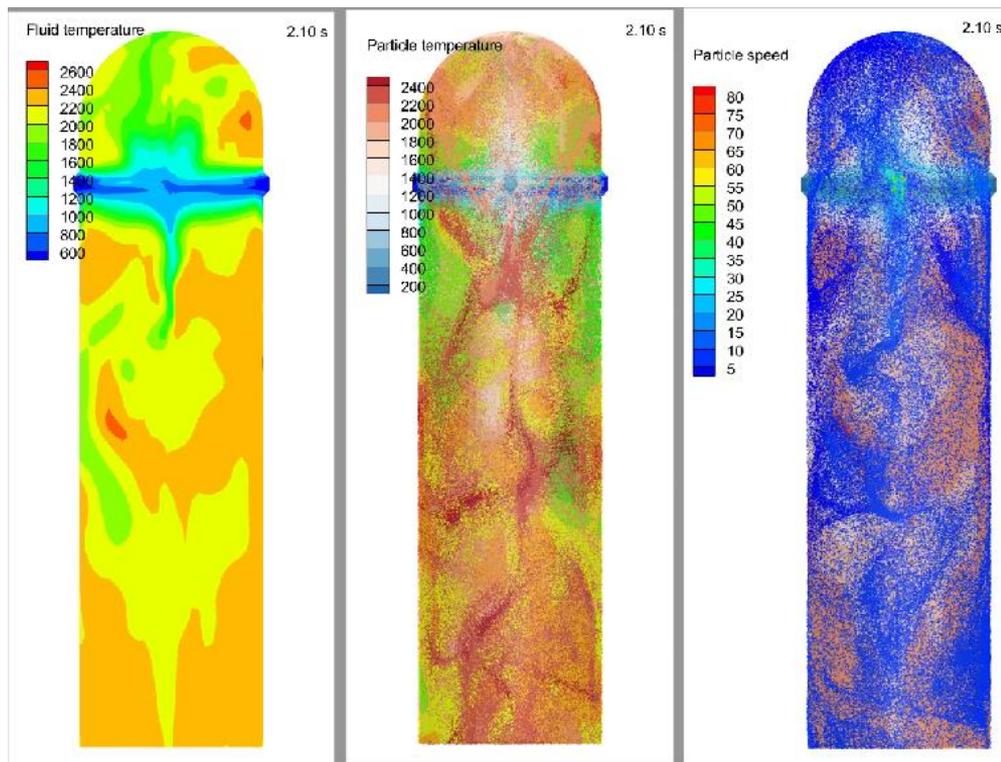
根据文献资料，四喷嘴气化炉的有效气体成分（CO+H₂）通常在82%~84%之间。使用鑫立新喷嘴气化炉的气体成分最高达到85.18%，是我国该类气化炉的最高点，有效气平均成分84.05比以前在同一台炉的（81.94%）高出2.09%。粗渣残碳7.3%。

2024年带螺旋喷嘴在四喷嘴气化炉成功工业应用

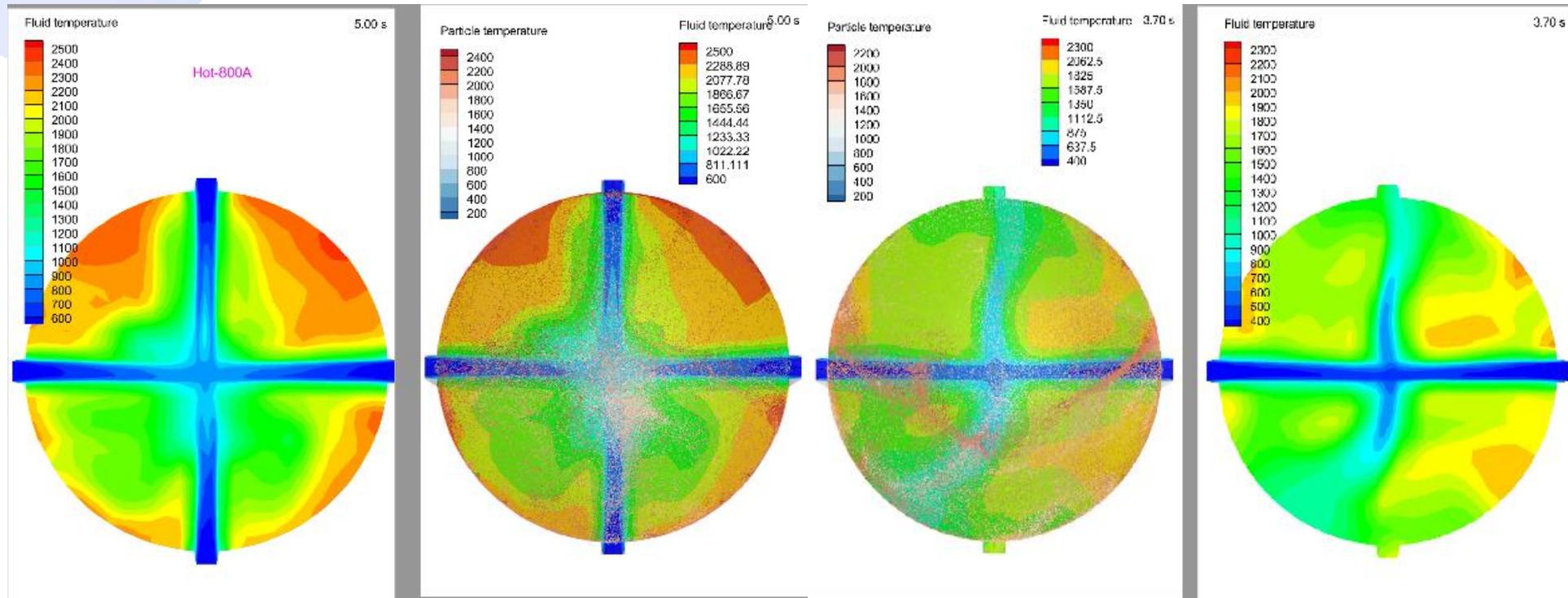
- ◆ 工业应用案例表明：气化炉的工况得到了全面改善，表现在改进了喷嘴出口的雾化状态，避免了喷嘴偏喷，增加了对置喷嘴的颗粒碰撞概率，增加了颗粒停留时间，增加了碳转化率，解决喷嘴出口上半部富氧的问题，降低拱顶温度，并大幅度降低（50%~90%）喷嘴煤浆压力波动频率。因此，喷嘴的平均使用寿命通常可以从平均40~60天提高到100~120天和同时增加气化炉出口有效气成分（CO+H₂）含量0.5~2个百分点，取决于煤灰成分含量，可为企业提高经济效益上千万元/年，取决于气化炉的负荷和台数。

横置式四喷嘴气化炉热态模拟视频

流喷嘴出口流体温度，颗粒温度，颗粒速度云图



四喷嘴气化炉模拟视频



结论

- ◆ CPFDF仿真模拟结果和工业应用成功案例证明，鑫立发明专利可以有效地解决20多年来未解决的煤颗粒在横置式多喷嘴本体水平管的沉积的问题；
- ◆ 降低喷嘴煤浆压力波动频率50% ~ 200%，
- ◆ 喷嘴煤浆压力波动范围可维持在0.015-0.08MPa(末期) ；
- ◆ 避免喷嘴偏喷，增加碰撞概率，增加颗粒停留时间，增加碳转化率；
- ◆ 解决喷嘴出口上半部富氧的问题，降低拱顶温度；
- ◆ 提高有效气0.5-2个百分点和延长使用寿命
- ◆ 操作时尽量避免喷嘴的连投

感谢聆听

- 闫洪明（博士/总工/教授）
- 陕西鑫立西安市院士专家工作站
- Phone: 86-19929955798
- 微信: hongming6458

