

深度空气分级下煤粉耦合氨燃烧 及NO生成特性数值模拟

方庆艳

华中科技大学煤燃烧国家重点实验室

Email: qyfang@hust.edu.cn



目 录

- 一、研究背景**
- 二、研究对象及数值模型**
- 三、结果分析与讨论**
- 四、总结**

多国家将“碳中和”转化为国家战略

二氧化碳排放力争于**2030年前**达到峰值，努力争取**2060年前**实现碳中和。

(2020年9月习近平主席在第75届联大会议发言)

2020年4月，法国颁布法令通过“国家低碳战略”明确2050年实现“碳中和”

2019年5月，德国宣布在21世纪中期达成碳中和，2050年达成碳中和

2020年1月，奥地利承诺2040年实现气候中立，2030年实现100%清洁电力

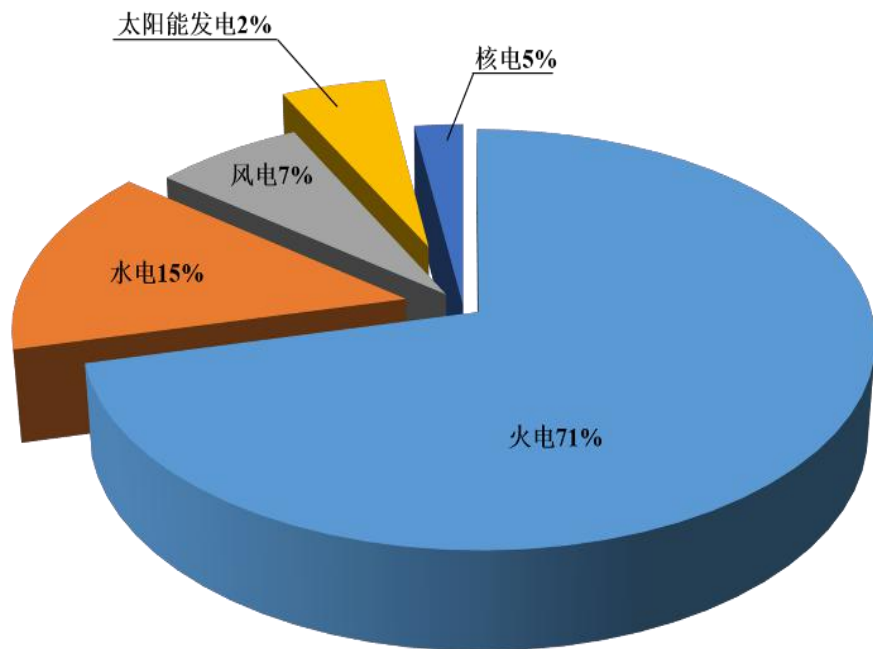
2008年，英国《气候变化法案》明确2050年实现零碳排放

2020年11月，加拿大提出法律草案，明确2050年实现碳中和

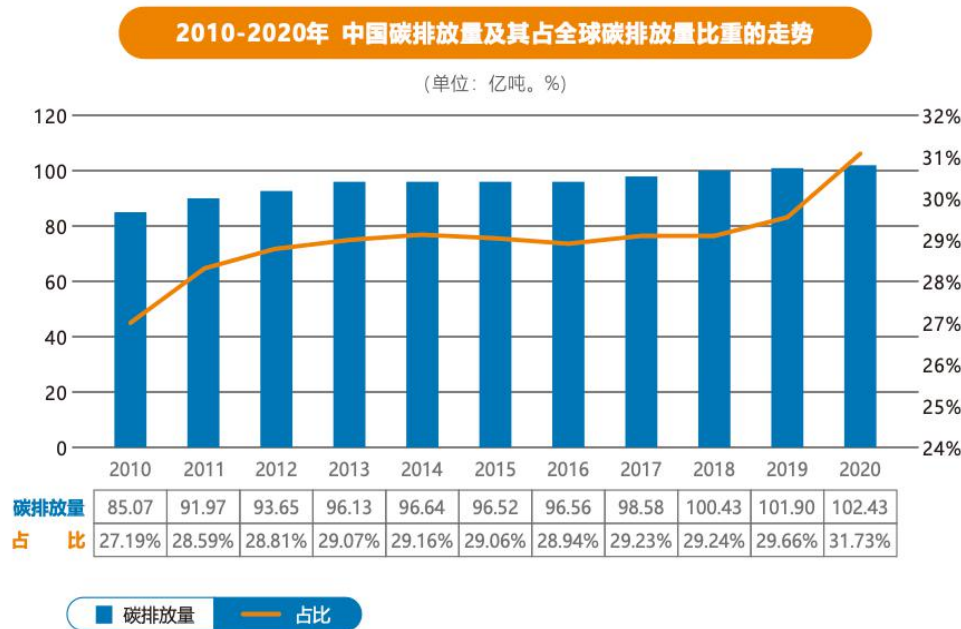
2021年1月，美国明确2035年实现无碳发电，2050年实现碳中和

碳达峰碳中和是党中央国务院作出的重大战略决策

- 以煤炭作为主燃料的火力发电量依然占据主要地位。
- 现有的碳排放结构中，燃煤发电占我国总二氧化碳排放量的34%左右。



2021年我国发电量结构图
(数据来源：国家统计局)

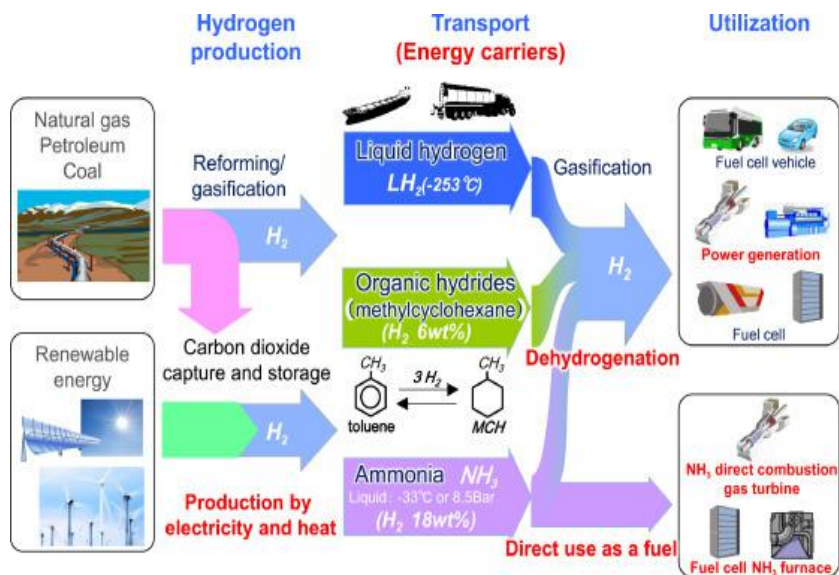


我国碳排放水平
(数据来源：中国碳核算数据库)

该背景下，中国如何快速实现碳中和？

减少燃煤发电的二氧化碳排放是顺利实现碳达峰、碳中和的关键

- 氨作为一种无碳燃料，具有**能量密度高、成本低、储运安全**等优势，近年来受到广泛关注。
- **氨与燃煤耦合可有效减少燃煤机组的碳排放。**



(来源于: Japan Science and Technology Agency; Kobayash, et al.,
Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37:109-133)

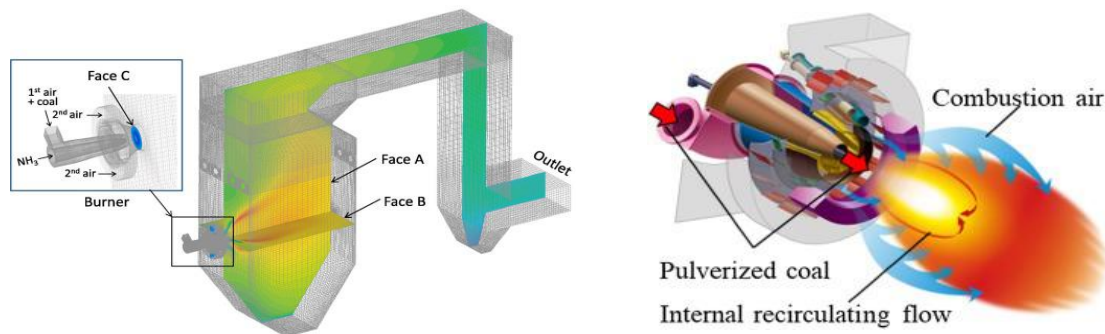


- 国内外已开展了部分研究：烟台龙源电力技术股份有限公司在国际上首次实现40兆瓦等级燃煤锅炉氨混燃比例为35%的中试验证。

燃煤锅炉耦合氨燃烧是燃煤机组实现大幅度减碳的有效技术路径

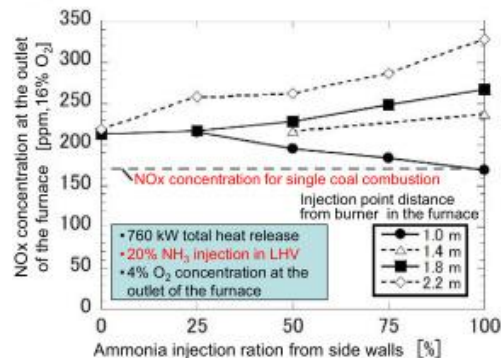
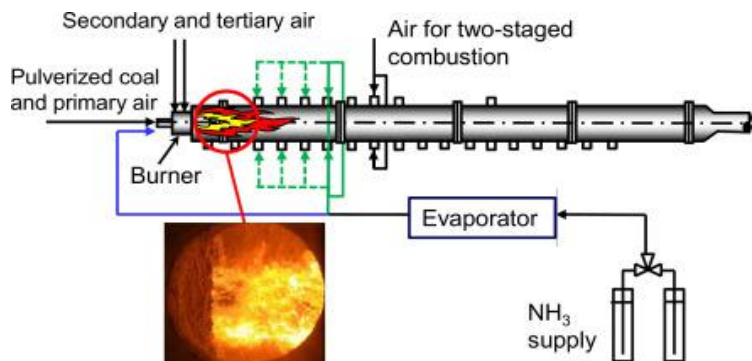
□ 日本IHI株式会社研究人员在旋流燃烧锅炉上开展了氨混烧研究。

- ✓ 将氨从火焰区送入炉内时NO排放最低
- ✓ 氨掺混比例为10%时，飞灰含碳量最低，但会有大量NO生成
- ✓ 增加氨掺混比例，飞灰含碳量逐渐增加，氨会还原已生成NO，NO排放量显著降低



(来源: Zhang JW, et al., Fuel, 2020, 267:117166; Fuel, 2020, 266: 116924)

□ 日本电力工业中央研究院(CRIEPI)，在卧式试验炉上开展了氨煤混烧实验。



✓ 氨从侧墙且距离燃烧器下游1m左右位置送入炉内较优。

(来源: Kobayash, et al., Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37:109-133; Yamamoto A, et al., Proceedings of the 15th NH₃ Fuel Conference, Pittsburgh, USA, 2018.)



目 录

一、研究背景

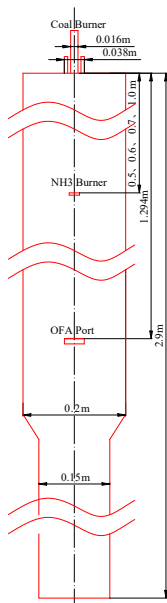
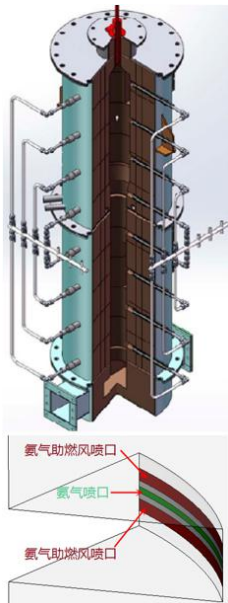
二、研究对象及数值模型

三、结果分析与讨论

四、总结



2.1 研究对象



沉降炉示意图

煤质分析

元素分析/%				
C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}
58.74	3.42	7.40	0.72	0.76
工业分析/%				
M _{ar}	A _{ar}	FC _{ar}	V _{ar}	Q _{net,ar} /(MJ·kg ⁻¹)
12.68	16.28	46.77	24.27	23.495

- 某20 kW沉降炉为研究对象，在燃烧器下游布置有燃尽风喷口。
- 在煤粉火焰下游高温区，氨气从环形喷口送入炉内，其上下布置有助燃空气喷口。
- 煤粉最小粒径为10 μm，最大粒径为150 μm，平均粒径为50 μm，分布指数为1.1；氨发热量为18.6 MJ/kg。



2.2 计算模型

计算模型选择

气相湍流流动	Realizable k-ε湍流模型
气相燃烧反应	有限速率/涡耗散模型
辐射传热	DO模型
气体吸收系数	WSGG模型
煤粉颗粒的运动	轨道模型
煤粉热解	双方程竞争反应模型
焦炭燃烧	表面反应模型
NO的生成	后处理 (氨NO+煤NO+热力型NO)

反应方程及动力学参数

	化学反应	A/s^{-1}	$E/(J \cdot Kmol^{-1})$	反应速率表达式
煤粉燃烧相关反应				
R1	$Vol + 1.229O_2 \rightarrow 0.08CO + 0.717CO_2 + 1.301H_2O + 0.02N_2$	2.119e+11	2.027e+08	$Ae^{-E/(RT)}[vol]^{0.2}[O_2]^{1.3}$
R2	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	2.240e+12	4.180e+07	$Ae^{-E/(RT)}[CO]^1[O_2]^{0.25}$
R3	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	5.690e+11	1.465e+08	$Ae^{-E/(RT)}[H_2]^1[O_2]^{0.5}$
R4	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	0.00500	7.396e+07	$Ae^{-E/(RT)}[O_2]$
R5	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	0.00635	1.620e+08	$Ae^{-E/(RT)}[CO_2]^{1.3}$
R6	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	0.00192	1.469e+08	$Ae^{-E/(RT)}[H_2O]$
R7	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	0.00200	7.900e+07	$Ae^{-E/(RT)}[O_2]^{0.5}$
氨热解/燃烧反应				
R8	$NH_3 \rightarrow 0.5 N_2 + 1.5H_2$	0.18500	6.900e+07	$AT^{1.25}e^{-E/(RT)}[NH_3]$
R9	$NH_3 + O_2 \rightarrow NO + H_2O + 0.5H_2$	3.500e+02	5.240e+08	$AT^{0.65}e^{-E/(RT)}[NH_3][O_2]$
R10	$NH_3 + NO \rightarrow N_2 + H_2O + 0.5H_2$	4.240e+05	3.500e+08	$AT^{5.3}e^{-E/(RT)}[NH_3][NO]$

- 煤粉耦合氨燃烧NO主要来源：
 - 氨燃烧生成NO
 - 高温下N₂被氧化生成热力型NO
 - 煤粉燃烧生成NO
- 考虑到氨反应生成大量的H₂以及深度空气分级下煤粉燃烧生成大量CO，选择CO和H₂作为再燃气体，选择CH₃作为等效燃料再燃作用



研究内容-工况设置

过量空气系数保持为1.20，入炉总热量恒定。主要研究以下三个方面：

- ❑ 氨质量掺混比例(10%、20%、30%)对燃烧及NO生成特性；
- ❑ 氨掺混比例为20%时，氨燃烧器区过量空气系数SR-NH₃(0.72、0.84、0.96、1.08)对燃烧及NO生成特性；
- ❑ 氨掺混比例为20%，氨燃烧器区过量空气系数SR-NH₃为0.96，氨送入位置(距炉顶0.5、0.6、0.7、1.0 m)对燃烧及NO生成特性。

工况设置

煤粉燃烧参数				氨燃烧参数			
通过一次风管送入风率/%	通过二次风管送入风率/%	通过燃尽风管送入风率/%	氨掺烧比例/%	氨送入位置/m	通过氨燃烧器送入风率/%	通过燃尽风管送入风率/%	氨燃烧区过量空气系数SR-NH ₃
20	38	42	0	0.6	80	20	0.96
			10				
			20				
			30				
			20	0.6	60	40	0.72
			70		30	0.84	
			90		10	1.08	
			0.5				
			20	0.7	80	20	0.96
			1.0				



目 录

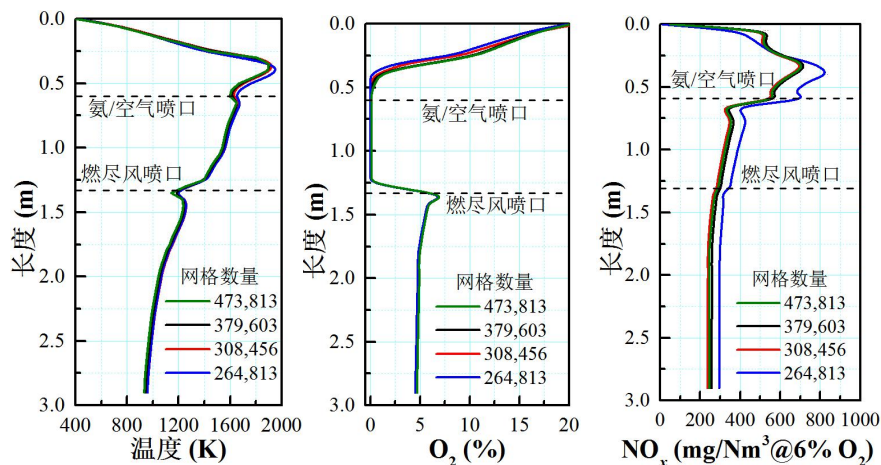
一、研究背景

二、研究对象及数值模型

三、结果分析与讨论

四、总结

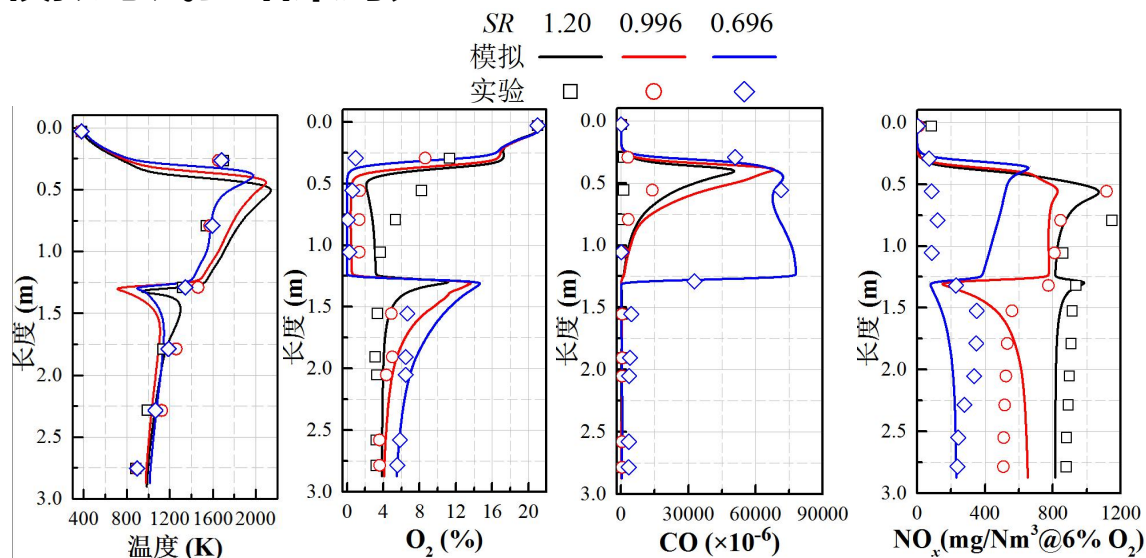
□ 网格无关性测试



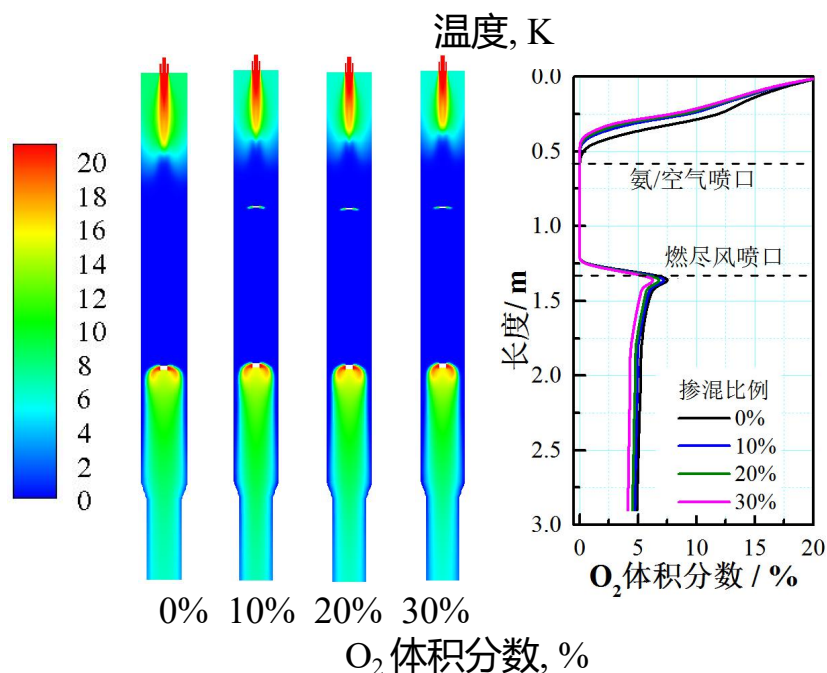
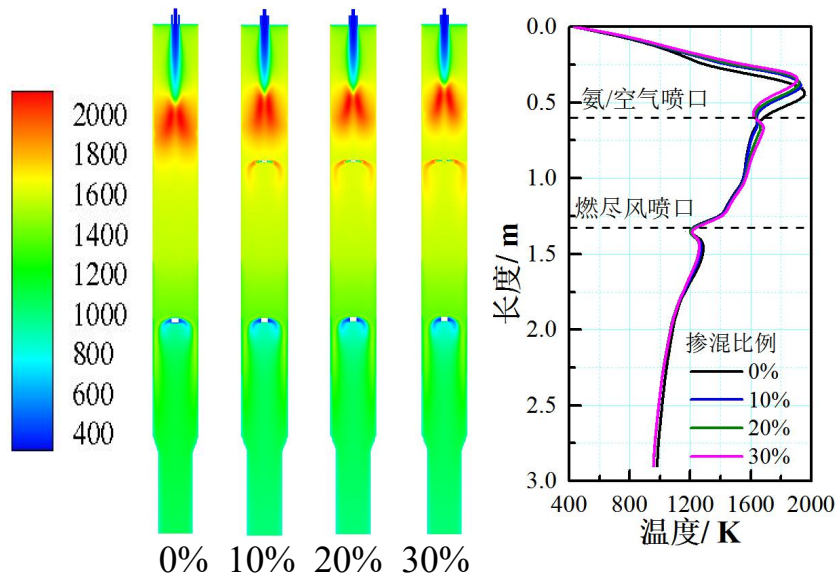
- 网格无关性测试后，最终选择308456网格开展相关研究。

- 缺乏氨与煤混燃实验数据，采用煤燃烧结果开展验证。单煤燃烧时模拟与试验结果一致性相对较好，相对误差都控制在10%以内，所建立的网格与模型较为合理。

□ 模拟与试验结果对比



3.2 氨掺混比例对燃烧及NO生成的影响

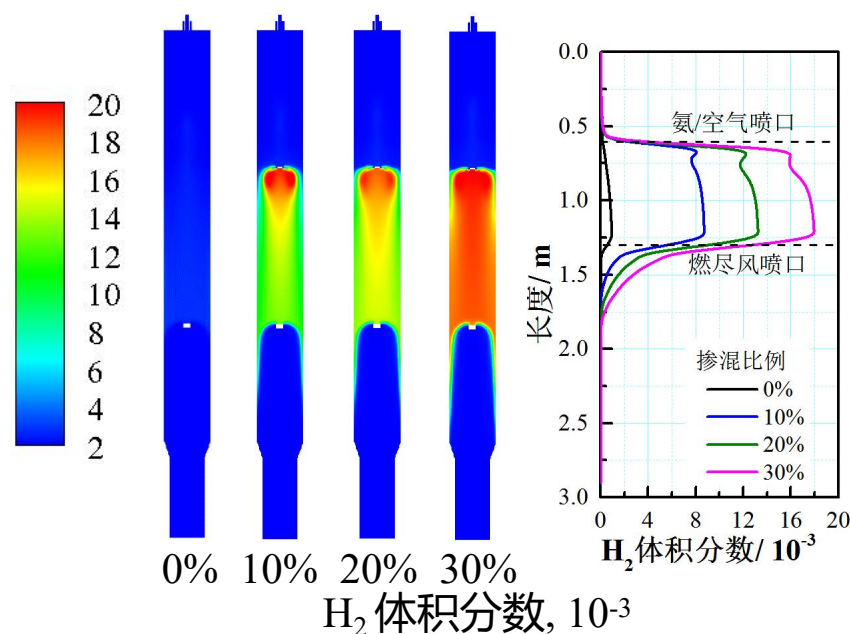
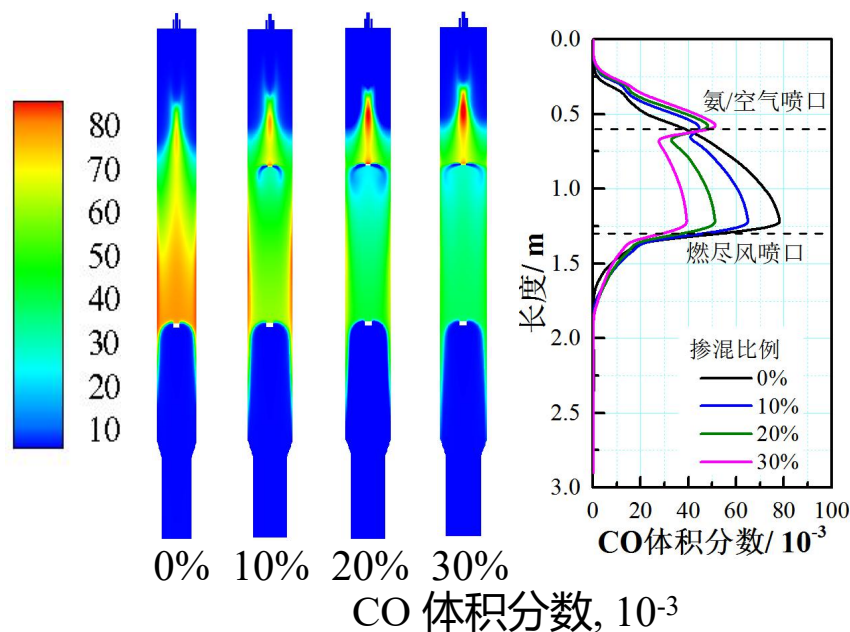


- 在煤粉火焰下游区域将氨送入炉内的高温区，氨迅速反应并燃烧。
- 深度空气分级条件下，主燃烧区煤粉着火燃烧后氧浓度处于较低水平（接近于0）。

随着掺混氨比例的提高：

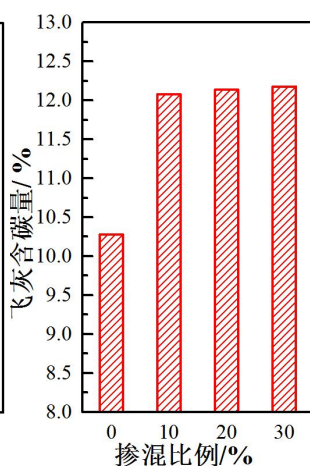
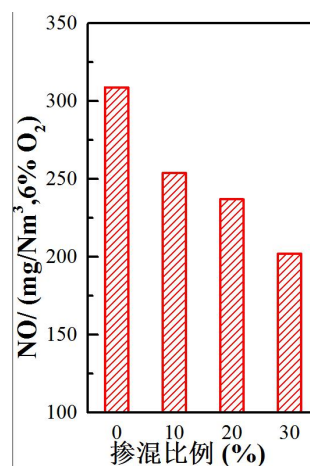
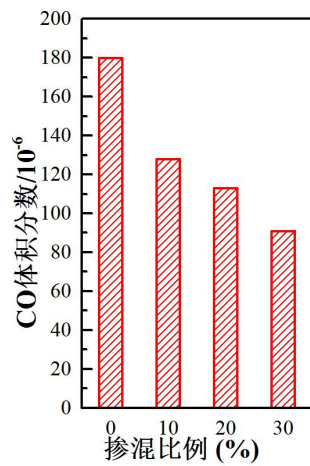
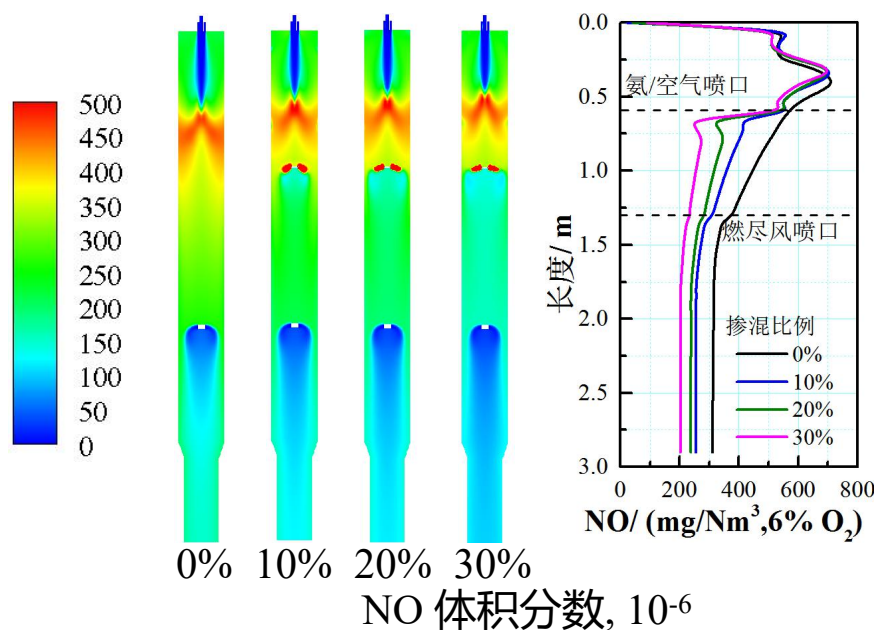
- 氨燃烧区氨燃烧产生的热量越多、火焰越长、温度越高。
- 不同NH₃掺混比例下燃尽区平均温度变化相对较小，沿程平均氧浓度变化相对较小。

3.2 氨掺混比例对燃烧及NO生成的影响



- 深度空气分级下，煤粉主燃烧区CO浓度较高；氨燃烧器区氨/空气送入炉内稀释了烟气中CO，使得NH₃送入炉内后下游CO浓度随着NH₃掺混比例提高而有所降低。
- 氨燃烧区过量空气系数较低，氨轻微过量，产生了大量还原性气体H₂；随着掺混NH₃比例的提高，下游区域H₂逐渐增加。

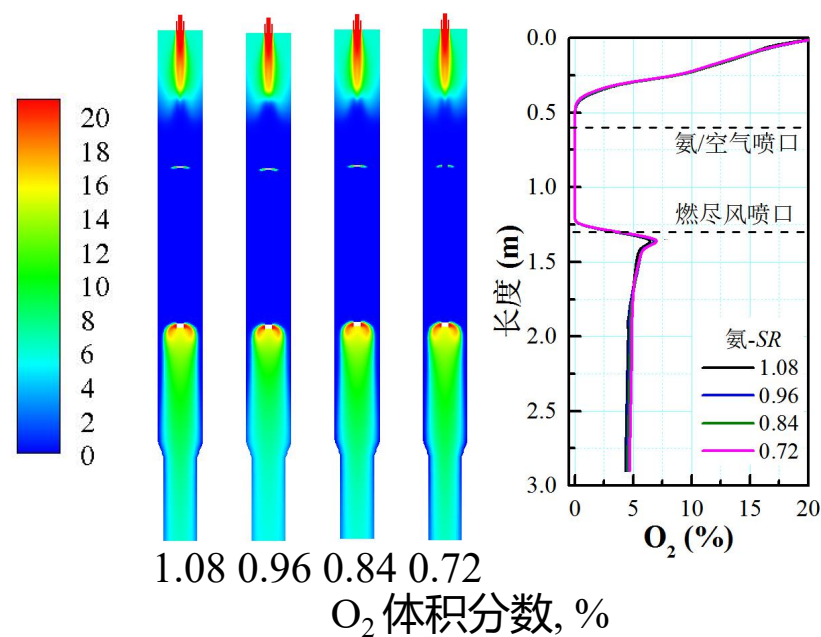
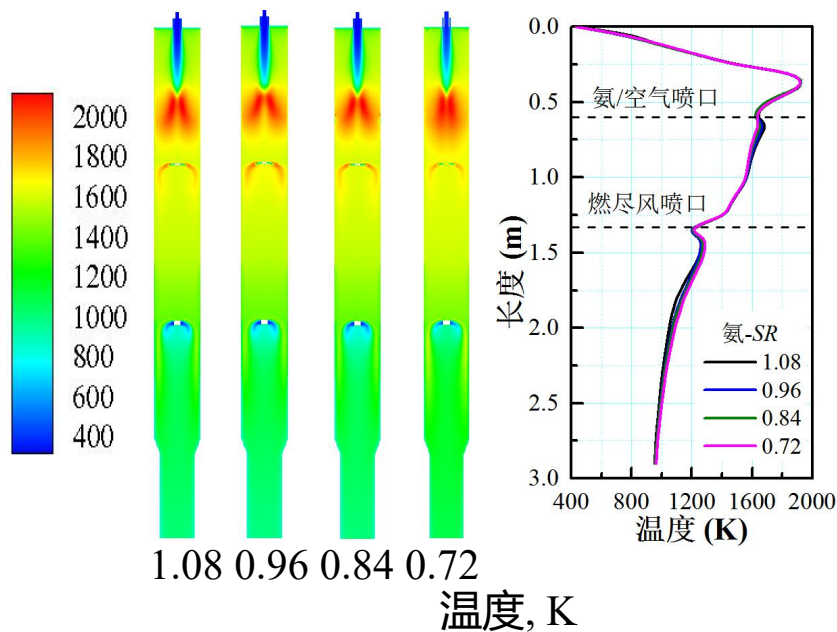
3.2 氨掺混比例对燃烧及NO生成的影响



出口参数统计

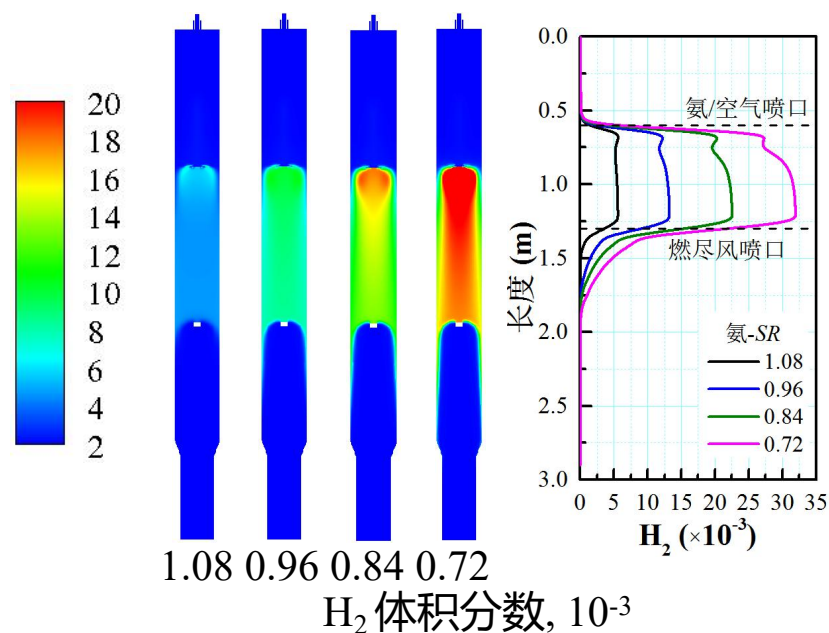
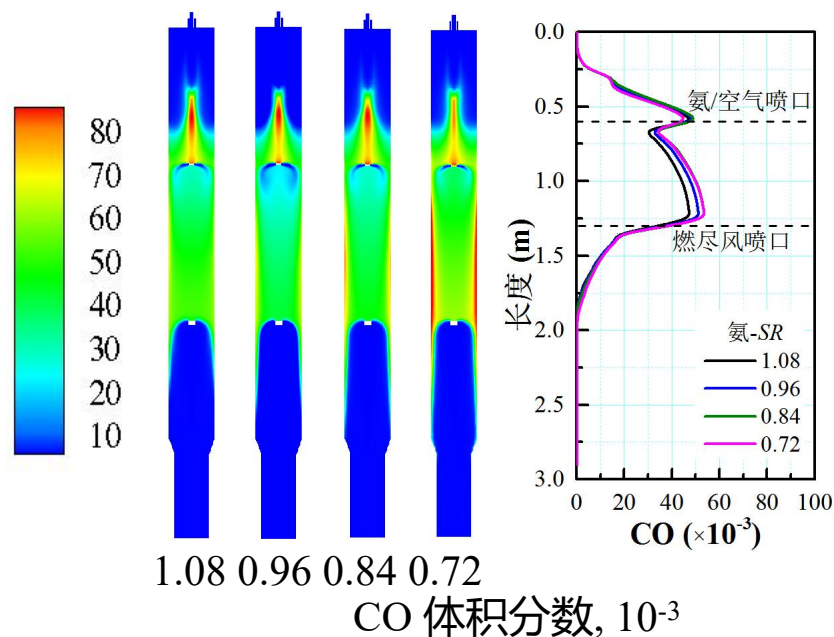
- 随着掺混NH₃比例提高，氨燃烧器到沉降炉出口区域NO平均浓度显著降低。
- 随着NH₃掺混比例的增加，CO和NO浓度逐渐降低，飞灰含碳量有所增加。
- 综合考虑，NH₃掺混比例控制在20%左右较为合适。

3.3 氨燃烧区过量空气系数对燃烧及NO生成的影响

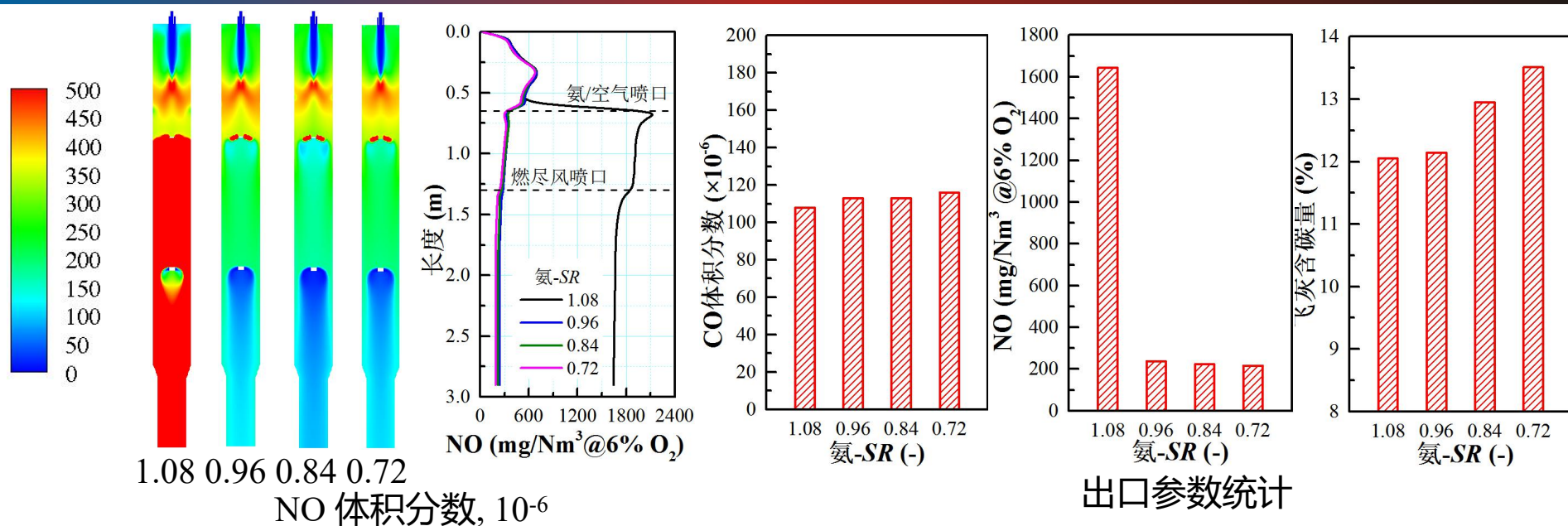


- 减小氨燃烧区过量空气系数，对煤粉剧烈燃烧区温度影响较小，氨燃烧产生的高温火焰变短，氨燃烧后在其下游区域平均温度有所降低，燃尽区温度有所升高。
- 氨燃烧区不同过量空气系数对氨燃烧上游氧浓度分布影响较小；不同氨燃烧区过量空气系数下，沿程氧量平均浓度变化不显著。

3.3 氨燃烧区过量空气系数对燃烧及NO生成的影响



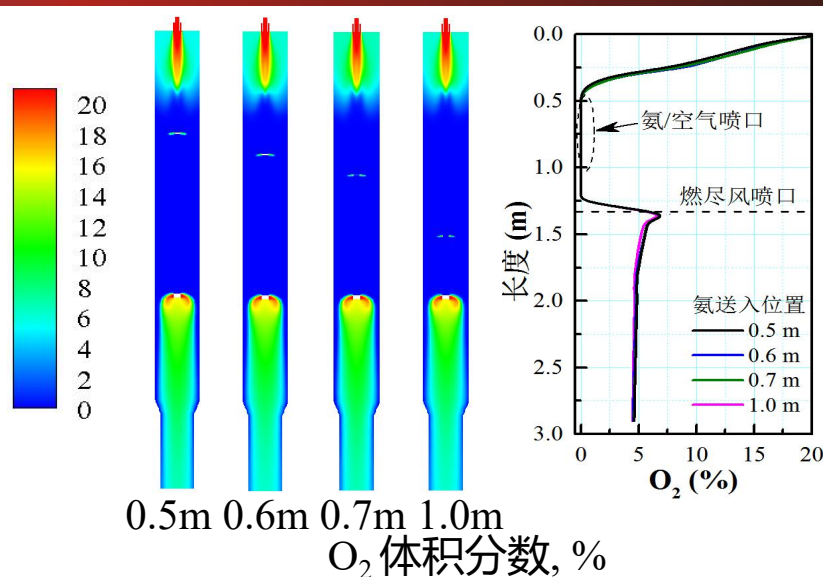
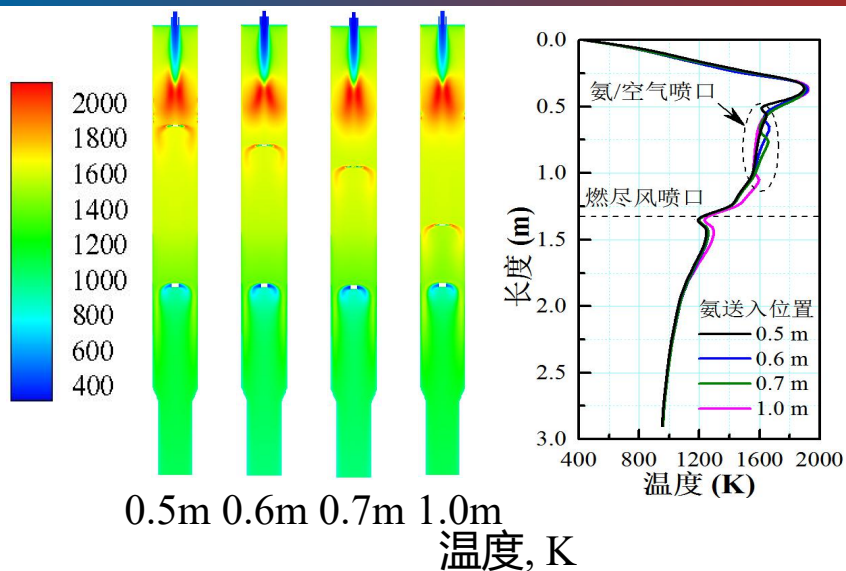
- 减小氨燃烧区过量空气系数，氨燃烧下游区域CO浓度越高，还原性气氛越强，这主要是由于氨燃烧区过量空气系数越小，更多空气通过燃尽风喷口送入炉内，主燃区空气分级程度增加。
- 氨燃烧区过量空气系数越低，氨喷口下游 H_2 浓度越高。



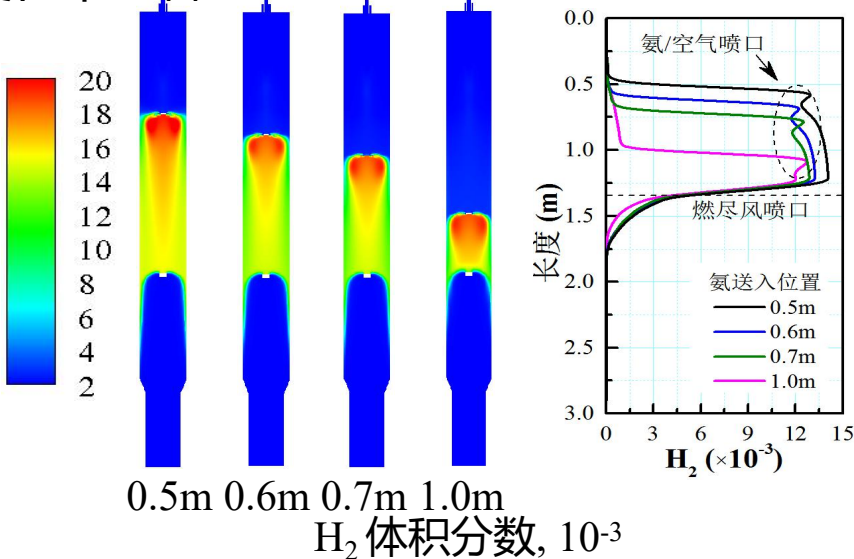
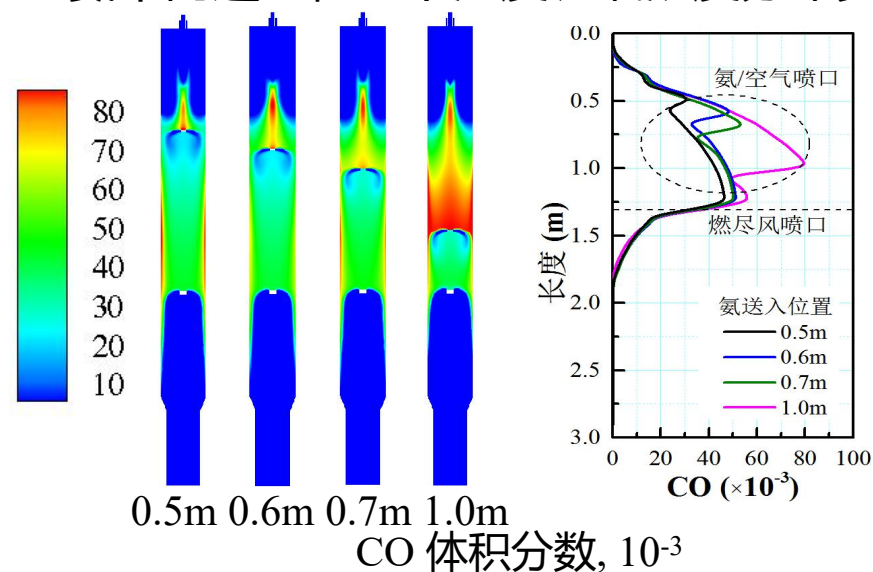
- 氨燃烧区过量空气系数大于1，有利于反应 $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O} + 0.5\text{H}_2$ ，生成NO；氨燃烧区过量空气系数小于1，在氨燃烧下游区域NO浓度显著降低。
- 氨燃烧区过量空气系数从1.08降到0.96，飞灰含碳轻微增加，出口NO浓度显著降低；进一步降低到0.84、0.72，飞灰含碳显著增加，出口NO浓度降幅不明显。
- 氨燃烧区过量空气系数维持在0.96左右，既可以满足煤粉的高效燃烧，又可以有效抑制 NH_3 燃烧过程中NO的生成。



3.4 氨送入位置对燃烧及NO生成影响

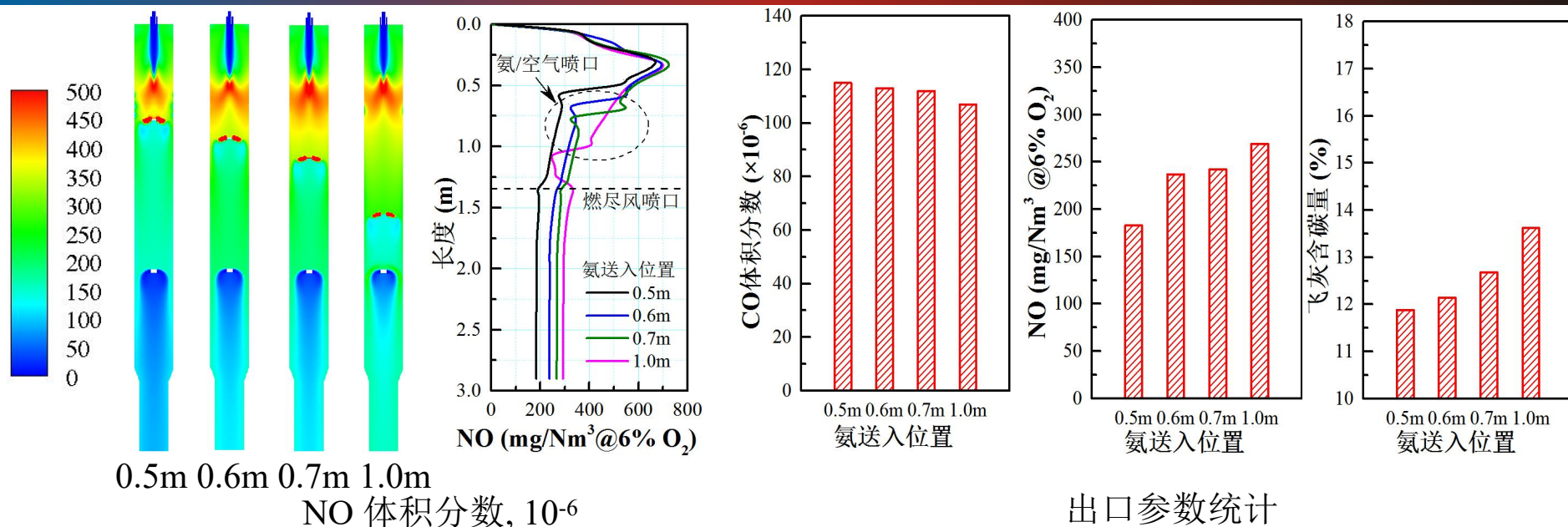


氨不同送入位置下温度、氧浓度分布变化不显著。



喷氨位置越远，氨喷口上游CO高浓度区域越大，氨喷口下游高 H_2 浓度区域越小。

3.4 氨送入位置对燃烧及NO生成影响



- 喷氨位置距离煤粉燃烧器越近，氨燃烧器下游及燃尽区域NO浓度越低。
- 喷氨位置越远离煤粉火焰区，出口CO浓度轻微有所降低，出口NO浓度有所增加；同时，飞灰含碳量越多，这可能主要是由于喷氨位置距离煤粉火焰区越远，未燃尽可燃气体越多，在燃尽区会与未燃尽焦炭抢氧反应，导致焦炭燃烧变差。
- 喷氨位置尽量靠近煤粉燃烧火焰区，既可以满足煤粉的高效燃烧，又可以有效抑制耦合氨燃烧过程中NO的生成。



目 录

一、研究背景

二、研究对象及数值模型

三、结果分析与讨论

四、总结

- 建议氨掺混比例维持在20%左右较为合适。
- 氨燃烧区过量空气系数维持在0.96左右，既满足煤粉的高效燃烧，又可有效抑制煤粉耦合氨燃烧过程中NO的生成。
- 喷氨位置距离煤粉火焰区越远，沉降炉出口飞灰含碳量和NO浓度越高，建议喷氨位置尽量靠近煤粉燃烧火焰区。

联合 竞争 开放 流动

UNION COMPETITION OPENNESS MOBILITY

