

天然气掺混二甲醚扩散式燃烧性能与排放

周 宇, 秦朝葵, 邢慧娟, 姜志标

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 调节二甲醚(DME)与天然气的体积比,在火焰筒试验台上测试了燃烧器的组分响应,在小型工业炉窑上测试了传热与燃烧性能。结果表明:与纯天然气相比,天然气掺混二甲醚时热效率变化不大,混合气相对于天然气具有较好的互换性;混合气燃烧时污染物的排放,与纯天然气相比也相差不大,NO_x等污染物一直维持在较低水平。从经济性角度出发,为提高燃烧效率,建议掺混 10%~30%体积分数的二甲醚为宜。

关键词: 天然气;二甲醚(DME);掺混比例;燃烧效率;污染物排放

中图分类号: F407.22

文献标志码: A

Performance and Emission of Diffusion Combustion Fueled with DME and Natural Gas Mixtures

ZHOU Yu, QIN Chaokui, XING Huijuan, LOU Zhibiao

(College of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Performance response tests of diffusion burner on the burner flame tube and heat transfer within industrial furnace were carried out by means of adjusting the proportion of dimethyl ether (DME) in natural gas. Results show that DME mixtures can give similar thermal efficiency in comparison with natural gas, which implies that the mixture has an acceptable interchangeability with natural gas. In addition, pollutant emissions when fueled with DME mixture were found to be consistent with those under natural gas. Particularly NO_x remained quite low. It was recommended that DME percentage should be controlled within 10%~30% for the sake of economic feasibility.

Key words: natural gas; dimethyl ether (DME); blending ratio; combustion efficiency; pollutant emission

资源日益短缺,环境不断恶化,人们竞相寻求清洁替代能源,二甲醚(DME)以其特有的物理化学性质受到关注^[1-2]。作为一种清洁燃料,DME具有较高的十六烷值(大于 55)、较低的沸点(-24.9℃),是一种理想的替代燃料^[3-4]。国内外关于 DME 燃烧性能研究的报道多集中于发动机替代燃料方面,在多种尺寸和类型的发动机上考察了 DME 的燃烧性能^[5-8]。结果表明,DME 可实现发动机高效、超低排放、柔和燃烧,燃烧噪声比传统柴油机低,所排放的尾气无需催化转化便能满足要求。有关学者曾对液化石油气(LPG),H₂和柴油等掺混 DME 的混合燃料性能进行测试,再一次验证了 DME 的高效和超低排放。因 DME 热值低于 LPG 等其他燃料,在相同流量下,掺混燃料的最大输出功率略有降低^[9-12]。在天然气(NG)中掺混 DME 的研究报道并不多,Yao 等^[13]研究了天然气掺混 DME 的混合燃料在均质混合气燃烧(HCCI)发动机上的性能响应。

本文针对现阶段有可能且有必要采用 DME+天然气联供的用户(使用工业燃烧器的锅炉和炉窑用户),在实验室分别进行了火焰筒上的组分响应测试和小型工业炉窑试验台上的炉内传热与燃烧性能测试,研究工业燃烧器对天然气掺混 DME 混合气的适应性并确定 DME 作为掺混气源将对工业燃烧器产生的影响以及两者的最佳掺混体积比,为燃气公司发展“可中断”用户所采取的技术对策提供技术依据。

1 试验装置

试验采用意大利 A 公司生产的 A40-GS5 强制鼓风燃气燃烧器,额定功率为 43 kW,功率范围为 18~58 kW,天然气的供应压力范围为 1~4 kPa,单段火方式运行。天然气掺混 DME 的扩散式燃烧试验

近年来,随着世界经济的飞速发展,石油等能源

收稿日期: 2013-05-29

第一作者: 周 宇(1989—),男,博士生,主要研究方向为燃气及热能利用技术。E-mail: 86_zhyu@tongji.edu.cn

通讯作者: 秦朝葵(1968—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为天然气燃烧与应用。E-mail: chqin@mail.tongji.edu.cn

系统如图 1 所示. 通过等压比例控制装置分别控制 DME 与天然气在混合气中所占体积分数, 同时使用烟气分析仪测定混合气在火焰筒/小型炉窑内的排放.

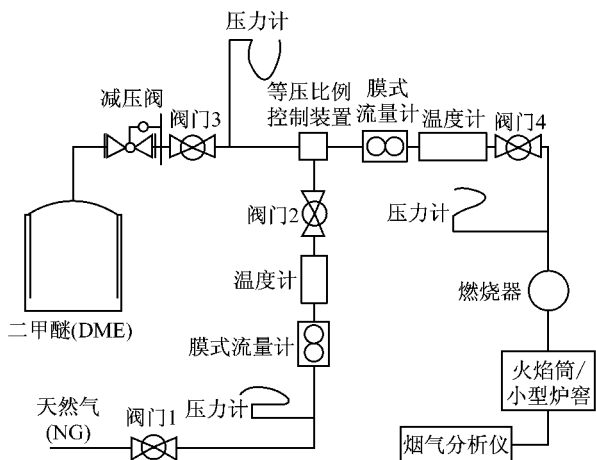


图 1 天然气掺混 DME 混合气的扩散式燃烧试验系统
Fig. 1 The diagram of diffusion combustion fueled with DME-NG mixture

1.1 火焰筒

本次试验用火焰筒参照欧洲标准 EN676 制造, 并进行了适当简化, 省去了烟气导管与可伸缩火焰筒后墙, 无法通过调节炉膛的长短来改变背压的大小, 但足够考察燃烧机在锅炉等应用场合下的性能变化情况.

1.2 小型工业炉窑

试验使用的小型工业炉窑试验台尺寸为 $1\,140\text{ mm} \times 1\,420\text{ mm} \times 1\,060\text{ mm}$, 内部空间尺寸为 $560\text{ mm} \times 850\text{ mm} \times 600\text{ mm}$, 硅酸铝保温层. 测试用燃烧器布置于炉膛侧壁, 燃烧产物由上方直径 160 mm 的烟道排出. 为考察掺入 DME 后被加热物体的受热过程及其温度变化规律, 在炉窑内布置四个钢块, 其尺寸分别为 $22\text{ mm} \times 19\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, $14\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, $20\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 和 $19\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, 如图 2 所示. 在每个钢块上钻一个直径 5 mm 的孔, 埋设镍铬-镍硅热电偶, 然后穿过后墙上的测试孔, 连接数据模块后接入采样软件. 炉膛内布置一支镍铬-镍硅热电偶, 监测炉膛内的温度变化. 在烟道出口下游布置烟气组分测点, 使用 KM9106 型烟气分析仪连续监测 CO_2 , CO , NO_x , O_2 的体积分数.

2 试验结果与分析

2.1 试验步骤

2.1.1 初始状态点的调节

试验选用的燃烧器功率较小, 广泛应用于小型

工业加热、锅炉等场合, 具有一定的代表性. 在一定的背压、空气进口面积和天然气压力下, 改变背压对天然气和空气的影响是不同的, 天然气流量的下降比空气流量的下降要少. 因此, 需选择一个固定的背压和功率点, 作为初始状态点. 在该状态点下, 燃烧器必须在额定背压下达达到额定功率且排放良好. 试验用燃烧器的额定功率及额定背压分别为 43 kW , 70 Pa , 初始状态点的调节步骤如下:

(1) 将火焰筒烟道上的挡板全开(即零背压), 启动燃烧器. 保持燃烧器前的天然气压力(2.1 kPa)不变, 逐渐关闭烟道上的挡板, 将背压提高到 70 Pa , 同时注意观察炉膛内的压力. 此时天然气压力会降低, 保持火焰稳定的同时, 缓慢恢复天然气压力.

(2) 观察烟道上连接的烟气分析仪, 逐步增大燃烧器的空气进口面积, 直到 CO 体积分数降低到允许值之下, 并且体积分数尽可能小.

(3) 保持烟道挡板开度和空气进口面积不变, 关闭天然气. 重新启动燃烧器, 观察在原来的供应压力(2.1 kPa)下, 燃烧器的功率是否恢复到设定值及烟气排放是否正常. 必要时, 仔细调节空气进口, 确认该工况点可以重复.

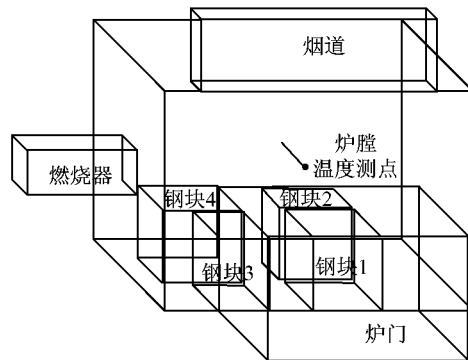


图 2 小型工业炉窑及钢块布置简图

Fig. 2 The diagram of small industrial furnace with the layout of iron cubes

燃烧器实际调节的过程中, 炉膛背压、燃烧器热负荷、测试压力、烟气排放四者相互关联影响, 反复调节方能达到一个平衡点, 使得 CO 体积分数、过剩氧、热负荷、背压均达标. 如此调节的目的在于最大程度地还原燃烧器在锅炉等设备上的工作状态. 最后, 将背压调节为 70 Pa , 实际功率 38 kW , 此时的烟气中 O_2 的体积分数 $\leq 3.5\%$ 且 CO 体积分数远低于允许值.

2.1.2 测试步骤

(1) 用天然气启动燃烧器, 在额定压力(2.1 kPa)、指定背压(70 Pa)下工作至燃烧稳定状态, 测

试其热负荷和燃烧稳定性,烟气中 CO , NO_x , CO_2 及过剩空气的体积分数。

(2) 等压控制比例装置保持一定开度,减小天然气管线上阀门 2 的开度,打开 DME 管路,缓慢增加阀门 3 的开度,使燃烧器进口压力恢复到额定压力(2.1 kPa)。记录两个膜式流量计的测量值,以估算 DME 与天然气的体积比;若非目标值,则调整等压控制比例装置的开度,重复上述过程直至所需体积比。本试验 DME 的测试掺混体积分数分别为 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 100%。由于手动调节导致试验时的体积分数并非正好处于上述值,但均在其附近允许范围内。

(3) 在各掺混体积比下,保持燃烧器进口处的燃料总压力(即阀门 4 后的压力)处于额定压力且背压不变,测试其热负荷和燃烧稳定性,烟气中 CO , NO_x , CO_2 及过剩空气体积分数,冷却水进出口水温及冷却水流量。

2.2 热值测定

纯天然气的组分、DME 组分、混合气体组分均由气相色谱法确定,通过计算确定最终掺混体积比,试验中采用 GC-920 气相色谱仪。DME 成分测定参照 GB25035—2010《城镇燃气用二甲醚》^[14] 和 GB/T13610—2003《天然气的组成分析气相色谱法》^[15],使用外标定量法进行分析。同时,依据 GB/T12206—2006《城镇燃气热值和相对密度测定方法》^[16],采用容克式水流热值仪对试验用 DME 的热值进行测试,结果如表 1 所示。试验所用管道天然气的热值仪测试和色谱分析结果也列于表 1 中。

表 1 试验气体热值测试结果(15℃, 101.325 kPa)

		MJ · m ⁻³	
项目	天然气	试验用 DME	
	色谱分析 计算结果	热值仪 测试结果	色谱分析 计算结果
高热值	38.6	39.0	61.5
低热值	34.8	35.1	56.8

2.3 火焰筒测试

燃烧器测试功率随 DME 体积分数的变化情况如表 2 所示。由表 2 可以看出,由于气态 DME 的热值比天然气高,因此随着 DME 体积分数的上升,混合气热值也随之增加,而燃烧器功率基本不变。因为天然气与 DME 华白数相近,在供气压力不变时,随着 DME 掺混体积分数的增加,混合气热值升高,但

进入燃烧器的总流量减少,故燃烧器功率基本保持不变。

表 2 燃烧器功率随 DME 体积分数的变化情况(火焰筒)

Tab.2 Changes of combustor power at different ratios of DME(burner flame tube)

DME 体积 分数/%	混合气热值/ (MJ · m ⁻³)	混合气流量/ (Nm ³ · h ⁻¹)	功率/kW
0	34.72	1.12	38.90
8.57	36.90	1.04	38.48
22.11	39.74	0.97	38.48
30.96	41.83	0.92	38.63
40.67	43.98	0.86	37.99
100.00	56.60	0.68	38.23

定义火焰筒循环水带走的热量除以输入混合气的能量为火焰筒的冷却效率,以考察固定背压下改变燃料组分时燃烧器传热过程的变化,测试结果见表 3。由表 3 可见,掺入 DME 后,火焰筒的冷却效率并无明显的变化。

表 3 火焰筒冷却效率随 DME 体积分数的变化情况

Tab.3 Cooling efficiency of flame tube at different ratios of DME

DME 体积分数/%	冷却水系统		
	进出口温差/ ℃	冷却水流量/ (Nm ³ · h ⁻¹)	冷却效率/ %
0	14.86	1.586	70.53
8.57	16.21	1.438	70.51
22.11	15.41	1.449	67.56
30.96	14.99	1.522	68.73
40.67	14.72	1.589	71.67
100.00	14.89	1.606	72.81

利用烟道上的烟气分析仪对烟气中 CO 与 NO_x 进行取样分析,其结果见表 4。根据 BS EN676 : 2003,烟气中 CO 和 NO_x 的体积分数均应该折算到过剩空气系数 $\alpha=1$ 时的排放量, α 由下式计算得出:

$$\alpha = 21 / \left(21 - 79 \frac{V_{\text{O}_2}}{100 - (V_{\text{RO}_2} + V_{\text{O}_2})} \right)$$

式中: V_{RO_2} 为烟气中三原子分子的总体积分数, %; V_{O_2} 为烟气中 O_2 的体积分数, %。

EN676 规定,工业燃烧器的燃烧排放应满足 $\text{CO} \leq 100 \text{ mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ (93×10^{-6}), $\text{NO}_x \leq 170 \text{ mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ (96.8×10^{-6})。从表 4 可以看出,随着 DME 体积分数的增加, α 略有增加,排放物中 CO 排放量逐渐减少, NO_x 排放量没有固定趋势,但均变化不大且满足环保要求,这说明 DME 的掺入不显著改变燃烧过程中污染物的排放,相反,在一定程度上还可以改善 CO 的排放。

表 4 不同 DME 体积分数下的燃烧排放情况
Tab.4 Emission at different ratios of DME

DME 体积 分数/%	$V_{O_2}/\%$	$V_{CO_2}/\%$	α	V_{CO}		V_{NO_x}	
				测量值/ 10^{-6}	换算为 $\alpha=1$ 情况/ 10^{-6}	测量值/ 10^{-6}	换算为 $\alpha=1$ 情况/ 10^{-6}
0	0.40	9.72	1.02	88.45	90.19	46.75	47.69
8.57	0.88	8.99	1.03	7.79	8.13	21.30	21.94
22.11	1.02	9.26	1.04	3.65	3.84	23.77	24.72
30.96	1.73	9.16	1.07	2.39	2.61	24.98	26.73
40.67	1.75	10.28	1.07	0.86	0.94	58.54	62.64
100.00	2.16	11.08	1.09	0.02	0.02	69.11	75.33

注: V_{CO_2} , V_{CO} , V_{NO_x} 分别为 CO_2 , CO , NO_x 的体积分数.

2.4 小型炉窑测试

2.4.1 燃烧器排放的变化

与火焰筒测试工况类似,小型炉窑工况下的燃烧器测试功率随 DME 体积分数的变化情况如表 5 所示.

表 5 燃烧器功率随 DME 体积分数的变化情况
(小型工业炉窑)

Tab.5 Changes of combustor power at different ratios of DME (small industrial furnace)

DME 体积 分数/%	混合气热值/ ($MJ \cdot m^{-3}$)	混合气流量/ ($L \cdot s^{-1}$)	功率/kW
0	34.72	1.23	42.82
9.11	37.00	1.14	42.25
13.19	38.31	1.09	41.93
20.53	39.82	1.06	42.33
31.63	42.22	1.01	42.80
41.50	45.07	0.95	42.77
100.00	59.86	0.72	42.90

在不同的 DME 体积分数下,燃烧器连续工作 1.5 h,使用烟气分析仪每隔 10 s 进行取样,最终分析 CO 和 NO_x 随 DME 体积分数变化的结果,如图 3 所示.随着 DME 的体积分数由 0% 到 100%,烟气中

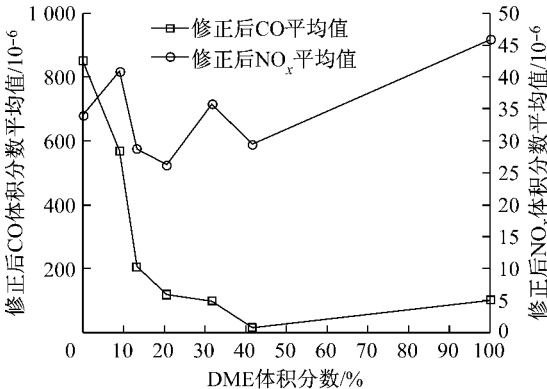


图 3 烟气中 CO 和 NO_x 体积分数(修正后)随 DME 体积分数的变化

Fig.3 Changes of CO , NO_x (revised) at different ratios of DME

CO 体积分数总体呈下降趋势,说明 DME 的掺入有助于改善污染物 CO 的排放.同时,在不同 DME 体积分数下 NO_x 的含量略有波动,但一直维持在 50×10^{-6} 以下,满足环保要求.

2.4.2 温度变化

炉膛温升速度随着 DME 体积分数的增加呈现先加快后减慢的趋势,在 DME 体积分数达到 13% 时温升最快,如图 4 所示.四个钢块的温升速度都随着 DME 体积分数的增加呈现先加快后减慢的趋势,在 DME 体积分数达到 20% 时温升最快,如图 5 所示.炉膛温度的拐点出现在 13% 左右而炉膛内钢块温度的拐点出现在 20% 左右,这是因为钢块温度测点分布在钢块内部,受到炉膛内温度变化和钢块自身热工性能的影响,而炉膛温度的测点分布在炉膛空间中部固定点,受到燃烧情况包括火焰长度、火焰黑度等影响较大.所以从实际工业炉窑的作用来讲,钢块温度的变化情况更具有参考价值.烟气的温升情况随着 DME 体积分数的增加变化不明显,如图 6 所示.

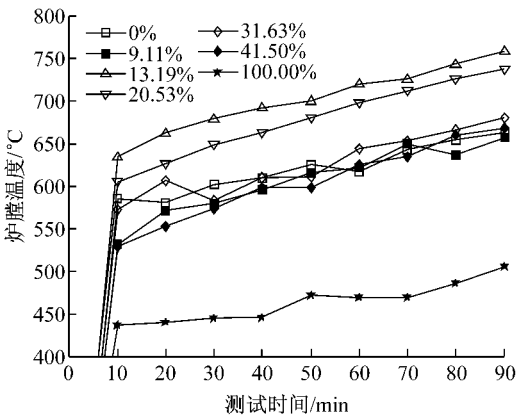


图 4 不同 DME 体积分数下炉膛温度随时间的变化

Fig.4 Changes of furnace temperature at different ratios of DME

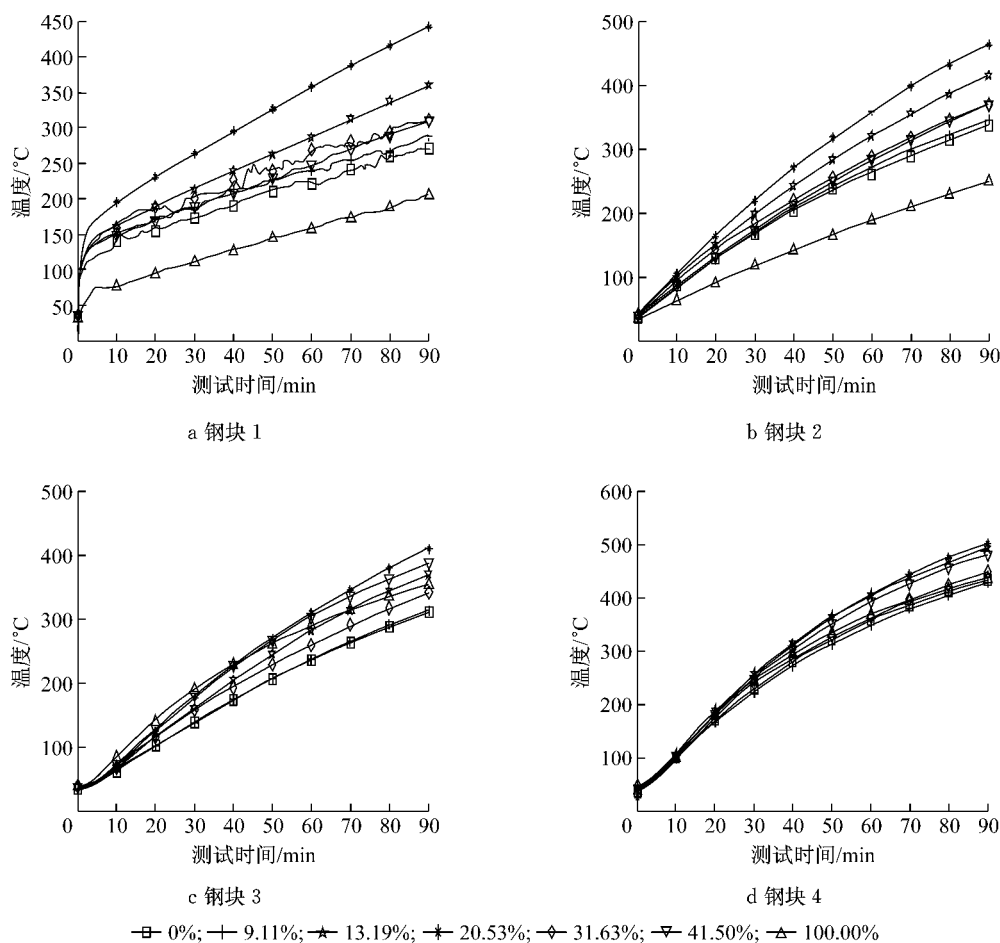


图5 不同DME体积分数下钢块1~4温度随时间的变化

Fig.5 Temperature changes of iron cube 1~4 at different ratios of DME

3 经济性分析

3.1 火焰筒工况

目前上海天然气价格为 $4 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$, DME 价格为 $4.4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 DME 密度 $2.056 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 计, 折合价格为 $9.05 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$. 天然气低热值按照 $35 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$, DME 按照 $28.835 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计算, 则天然气单位热值价格为 $0.114 \text{ 元} \cdot \text{MJ}^{-1}$, DME 单位热值价格为 $0.153 \text{ 元} \cdot \text{MJ}^{-1}$.

如前所述, 火焰筒试验测试主要是燃烧器在固定背压下的性能变化, 而水侧的吸热情况即效率的变化受到火焰形状和传热的双重影响, 测试结果见表6, 表格中的数据适用于锅炉。

取表6的数据进行经济性测算。方法如下: 设定某一掺混体积分数下的混合气流量为 Q_i , 此时的效率取为对应掺混下的测试效率与该掺混体积分数的热值之乘积, 等于纯天然气情况下冷却水的吸热量。这种方法稍微低估了 DME 掺混后的传热加强效

应。分析表7得出, 虽然天然气掺混 DME 后锅炉效率有所提升, 但是由于 DME 相对天然气的单位热量成本高, 所以从经济性角度出发, DME 掺混体积分数取 10% 左右为宜。

表6 燃烧器功率、冷却效率等随 DME 体积分数的变化

Tab.6 Changes of combustor power and cooling efficiency at different ratios of DME

DME 体积分数/%	功率/kW	冷却效率/%	冷却水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	冷却水吸热量/ kW
0	45.77	64.98	1.584	29.71
9.47	46.55	69.57	1.656	32.36
20.29	46.41	68.06	1.561	31.53
31.48	42.14	66.44	1.587	27.98
40.98	40.78	69.58	1.584	28.13

表7 不同 DME 掺混比例下的费用

Tab.7 Costs at different ratios of DME

DME 体积分数/%	混合气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	费用/($\text{元} \cdot \text{h}^{-1}$)
0	4.74	18.97
9.47	4.18	18.72
20.29	4.01	20.17
31.48	3.87	21.63
40.98	3.52	21.36

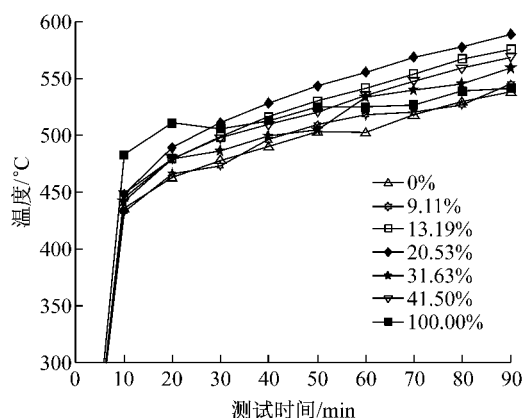


图 6 不同 DME 体积分数烟气温度随时间的变化

Fig.6 Temperature changes of flue gas at different ratios of DME

3.2 小型炉窑工况

在炉窑工况下,被加热工件的温度变化受到炉内气氛、黑度、炉温等多种因素的影响.因此,考虑经济性时困难较火焰筒工况要复杂得多,此处只做定性分析.

如图 4 所示,掺混 13.19%和 20.53%体积分数 DME 时,炉温升高较之纯天然气时要快得多,前者升高到 650℃仅需要 15 min,而后者需要 1.5 h 以上;DME 体积分数加大至 31.63%和 41.50%时温升速率下降,基本与天然气相当;此后再加大 DME 体积分数,温升速率开始下降直至低于天然气.

从被加热钢块的温升情况来看,天然气中适当掺混 DME 会改变炉内的传热,效率必然提高.但是从经济性角度出发,DME 在工业窑炉加热状况下,为了提高炉体的温升速率,建议 DME 体积分数控制在 10%~30%之间.

4 结论

(1) 天然气掺混 DME 混合气用于火焰筒时,定压状态且其他条件均不变的情况下,掺混不同体积分数 DME 时热效率变化不大,说明混合气相对于天然气具有较好的互换性.另外,掺混不同体积分数 DME 时污染物排放相差也不大,且都在锅炉允许排放范围之内.

(2) 天然气掺混 DME 混合气用于小型炉窑时,可以看到,保持供气压力不变的条件下,天然气掺混 DME 混合气与纯天然气相比,热负荷基本不变.随着 DME 体积分数的升高,工业炉窑的烟气温升速度基本保持不变;工业炉窑内的温升速度呈现先加快

后减缓的趋势,其中钢块的温度在 DME 体积分数达 20%左右时温升最快;工业炉窑烟气中的 CO 体积分数总体呈现减少的趋势,工业炉窑烟气中的 NO_x 体积分数一直维持在较低水平,基本不受 DME 体积分数变化的影响.

(3) 虽然天然气掺混 DME 后锅炉效率有所提升,但是由于 DME 相对天然气的单位热量成本高,所以从经济性角度出发,DME 体积分数取 10%左右为宜.

(4) 从经济性角度出发,DME 在工业窑炉加热状况下,为了提高炉体的温升速率,建议 DME 体积分数控制在 10%~30%之间.

参考文献:

- [1] Arcoumanis C, Bae C, Crookes R, et al. The potential of dimethyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: a review [J]. *Fuel*, 2008, 87(7): 1014.
- [2] Fleisch T H, Basu A, Sills R A. Introduction and advancement of a new clean global fuel: the status of DME developments in China and beyond [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2012, 9: 94.
- [3] 吴江涛, 刘志刚, 潘江. 二甲醚热物理性质研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(11): 1160.
WU Jiangtao, LIU Zhigang, PAN Jiang. Research of thermophysical properties of Dimethyl Ether [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(11): 1160.
- [4] Khademi M H, Farsi M, Rahimpour M R, et al. DME synthesis and cyclohexane dehydrogenation reaction in an optimized thermally coupled reactor [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2011, 50(1): 113.
- [5] 郎静, 周小松, 张煜盛, 等. 柴油机燃用二甲醚排放实验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(9): 78.
LANG Jing, ZHOU Xiaosong, ZHANG Yusheng, et al. Experimental investigations on the exhaust emissions from a direct-injection diesel engine fueled with dimethylether [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2006, 34(9): 78.
- [6] LIANG Chen, JI Changwei, LIU Xiaolong. Combustion and emissions performance of a DME-enriched spark-ignited methanol engine at idle condition [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(11): 3704.
- [7] Cipolat D. Analysis of energy release and NO_x emissions of a CI engine fuelled on diesel and DME [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27: 2095.
- [8] Kim Myungyoon, Yoon Seunghyun, Ryu Bongwoo, et al. Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system [J]. *Fuel*, 2008, 87(12): 2779.
- [9] 梁晨, 纪常伟, 孔令凯, 等. 二甲醚-氢气混合燃料 HCCI 燃烧与排放试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 15.

- LIANG Chen, JI Changwei, KONG Linkai, et al. Combustion and emissions performance of a HCCI engine fueled with DME and hydrogen blends [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 15.
- [10] WANG Ying, LI Genbao, ZHU Wei, et al. Study on the application of DME/diesel blends in a diesel engine [J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(12): 1272.
- [11] LEE Seokhwan, OH Seungmook, CHOI Young, et al. Effect of n-Butane and propane on performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME-blended LPG fuel [J]. Fuel, 2011, 90(4): 1674.
- [12] LEE Seokhwan, OH Seungmook, CHOI Young. Performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME blended LPG fuel [J]. Fuel, 2009, 88(6): 1009.
- [13] YAO Mingfa, ZHENG Zunqing, QIN Jin. Experimental study on homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and natural gas [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(2): 414.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB25035—2010 城镇燃气用二甲醚[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB25035—2010 Dimethyl ether for city gas [S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T13610—2003 天然气的组成分析气相色谱法[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T13610—2003 Analysis of natural gas by gas chromatography [S]. Beijing: China Standards Press, 2003.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T12206—2006 城镇燃气热值和相对密度测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T12206—2006 Testing method to determine the calorific values of town gas[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.

(上接第 563 页)

- [8] Zhang K, Taylor M A P. Effective arterial road incident detection: a Bayesian network based algorithm [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2006, 14(6): 403.
- [9] 徐涛,杨晓光,徐爱功,等. 面向城市道路交通状态估计的数据融合研究[J]. 计算机工程与应用,2011,47(7):218.
- XU Tao, YANG Xiaoguang, XU Aigong, et al. Urban road traffic state estimation based on data fusion [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(7): 218.
- [10] Koc L, Mazzuchi T, Sarkani S. A network intrusion detection system based on a hidden naive Bayes multiclass classifier [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(18): 13492.
- [11] Jihad S A M, Lee Y, Lee S Y. A smoothed naive Bayes-based classifier for activity recognition [J]. IETE Technical Review, 2010, 27(2): 107.
- [12] Li B B. Recursive estimation of average vehicle time headway using single inductive loop detector data [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(1): 85.
- [13] Boyles S, Fajardo D, Waller S T. A naive Bayesian classifier for incident duration prediction [C/CD]//The 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C: TRB, 2007.
- [14] Zhang H. Exploring conditions for the optimality of naive bayes [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2005, 19(2): 183.
- [15] Kerner B S. Synchronized flow as a new traffic phase and related problems for traffic flow modeling [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 35(5): 481.
- [16] John G H, Langley P. Estimating continuous distributions in Bayesian classifiers [C]//The 11th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Mateo: [s. n.], 1995: 338-345.
- [17] 中华人民共和国交通部. JTG D20—2006 公路路线设计规范 [S]. 北京:人民交通出版社,2006.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D20—2006 Design specification for highway alignment [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [18] 李娟. 相关系数法在通道交通需求预测中的应用 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 98.
- LI Juan. Application of correlation coefficient method for corridor traffic demand forecast [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 98.
- [19] 邱世卉,王琪. 基于 BP 神经网络的高速公路交通事件检测 [J]. 中国测试, 2009, 35(2): 48.
- QIU Shihui, WANG Qi. Freeway traffic incident detection based on BP neural network [J]. China Measurement & Test, 2009, 35(2): 48.