

空气湿度对柴油机 NO_x 和碳烟排放影响的模拟分析

王向丽, 王忠*, 倪培永, 毛功平, 魏胜利

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了解空气湿度对柴油机排放的影响, 该文利用 KIVA-3V 软件, 建立柴油机燃烧过程模型, 研究了空气含湿量分别为 0、5、10 和 20 g/kg 时柴油机 NO_x 和碳烟排放的变化规律, 模拟了热物性参数、进气成分、燃烧中间产物演化过程。计算结果表明: 随着空气湿度增加, NO_x 排放近似呈线性减少, 含湿量 20 g/kg 时 NO_x 排放可减少 30% 以上, 除大负荷外, 湿度对碳烟排放影响均较小。随着湿度增加, 除了 N₂ 和 O₂ 减少, 自由基 O 和 OH 也会减少。在大负荷、高湿度时, O₂ 浓度的下降并由此引起的碳烟氧化量减少是碳烟生成量增加的重要原因, 空气湿度对碳烟排放具有双重影响。

关键词: 柴油机, 碳烟, NO_x, 含湿量, 热物性参数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.12.012

中图分类号: TK421+.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-12-0068-06

王向丽, 王忠, 倪培永, 等. 空气湿度对柴油机 NO_x 和碳烟排放影响的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 68-73.

Wang Xiangli, Wang Zhong, Ni Peiyong, et al. Simulation analysis of effects of air humidity on NO_x and soot emissions in diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 68-73. (in Chinese with English abstract)

0 引言

柴油机具有高效率、低油耗的特点, 在国民经济中得到广泛的应用^[1], 但同时也具有氮氧化物(NO_x)和碳烟排放高等缺点。柴油机加水燃烧能够降低 NO_x 排放^[2-7], 已被国内外相关研究所证实, 其机理为^[8]: 水的热容量大, 可以降低缸内温度、防止局部富氧; 利用微爆效应优化燃烧。

与柴油机喷水 and 进气空气增湿法相比, 空气湿度是一个客观因素, 对柴油机排放有着重要的影响^[9-13], 尤其是在大湿度条件下。目前, 在解释 NO_x 和碳烟排放规律时, 给予更多的是定性分析, 而缺少定量分析。尤其是湿空气热物性参数的研究多集中于湿空气透平 HAT (humid air turbine) 循环方面^[14-19], 而内燃机缸内湿空气燃烧缸内工质热物性参数研究的比较少。

本文通过应用 KIVA-3V 软件对柴油机燃烧过程进行模拟研究, 研究进气湿度对柴油机 NO_x 和碳烟排放的影响规律, 建立进气湿度与 NO_x、碳烟排放、热物性参数、进气成分、燃烧中间组分间定量关系。这有助于加深了

解空气湿度对柴油机排放的影响, 促进工程热物理学科与大气学科交叉融合。本研究同时为应用进气加湿装置降低柴油机排放、优化整机性能提供了科学依据和技术基础。

1 计算模型

为了缩短研究周期、节约研究成本, 本文采用多维数值模拟方法研究柴油机热力过程和排放性能。本文采用的数学子模型如表 1 所示。为研究 NO_x 的响应特征, 有必要对 NO_x 主要成分 NO 的生成速率表达式进行简化。简化后的 NO 生成速率表达式为

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N][N_2] \quad (1)$$

式中, $\frac{d[NO]}{dt}$ 为 NO 生成速率, mol/(cm³·s); k_1 为正向反应速率常数, cm³/(mol·s); $[N]$ 、 $[N_2]$ 分别为 N、N₂ 的摩尔浓度, mol/cm³。

从式(1)看出, NO_x 生成量主要与正向反应速率常数 k_1 、自由基 N 和 N₂ 的浓度有关。而正向反应速率常数主要由温度控制。

在碳烟模型中, 目前应用广泛的是修正的广安博之碳烟模型^[20], 但该模型中没有考虑 OH 的氧化作用。由于水蒸汽的加入会引起 OH 基浓度的变化, 而 OH 基对碳烟有较强的氧化作用。因此, 在本文中, 保留原广安碳烟生成模型, 采用了 Neoh 等的 OH 基作用下的碳烟氧化模型^[21-22]对现有碳烟氧化模型进行修正, 即构建新的碳烟模型为

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{dM_{sf}}{dt} - \frac{dM_{so}}{dt} - \frac{dM_{soh}}{dt} \quad (2)$$

收稿日期: 2011-12-04 修订日期: 2012-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51106065); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发(2011)6号); 内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金项目(K2012-09); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11_0563)。

作者简介: 王向丽(1984-), 女, 内蒙古赤峰人, 主要从事内燃机燃料与燃烧。镇江 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013。

Email: wang-xiangli@163.com

※通信作者: 王忠(1961-), 男, 江苏镇江人, 教授, 博士生导师, 主要从事清洁代用燃料方面的研究工作。镇江 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013。Email: wangzhong@ujs.edu.cn

式中，左边为碳烟的净生成速率，g/s；右边 3 项依次为碳烟的形成速率(g/s)、氧气作用下的碳烟氧化速率(g/s)和 OH 基作用下的碳烟氧化速率(g/s)。

表 1 数学模型
Table 1 Mathematical model

子模型	名称
油滴破碎模型	TAB model
湍流模型	RNG k-epsilon model
燃烧模型	Characteristic time model
NO _x 模型	Extended Zeldo'vich
碳烟模型	Revised Hiroyasu and Nagle-Strickland

计算用柴油机主要技术参数见表 2。燃烧室的简化三维网格结构如图 1 所示。柴油机喷油器喷孔数为 5，故选取燃烧室的 1/5 作为计算区域。其中，Z 向与气缸中心线重合并指向气缸盖。

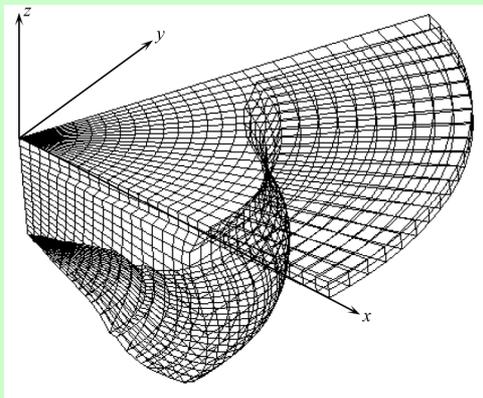


图 1 计算网格

Fig.1 Computational mesh

表 2 柴油机主要技术参数

Table 2 Diesel engine specifications

项目	参数
型式	直列四缸、水冷、自然吸气
缸径×行程/mm	102×118
压缩比	17.5
标定功率/kW	70.6
标定功率转速/(r·min ⁻¹)	3200
最大扭矩/(N·m)	245
最大扭矩转速/(r·min ⁻¹)	2200
燃烧室	ω 形

2 计算条件

计算从进气门关闭(下止点后 30°)开始到排气门打开(下止点前 56°)结束。进气门关闭时刻气缸压力为 0.095 MPa，缸内温度为 320 K。计算工况：标定转速 3 200 r/min；负荷为 10%、50%和 75%，对应的循环喷油量(由前期原机试验结果并计算获得)为 0.0127、0.0235 和 0.0322。

空气湿度一般采用绝对湿度、相对湿度和含湿量来表示。为方便计算，在这里采用含湿量来表示空气湿度，

其定义是与 1 kg 干空气同时并存的水蒸汽量(g/kg)。表 3 为中国部分城市的空气含湿量。由表 3 可知，空气平均含湿量约在 0.2~22 g/kg 范围内。本文以含湿量为 0、5、10 和 20 g/kg(分别记作 H0、H5、10 和 H20)为例进行计算。含湿量为 H0 时定义为原机。需要注意的是，本文不考虑极端高湿天气情况。

表 3 中国部分城市空气含湿量
Table 3 Humidity ratio of air in part of cities of China

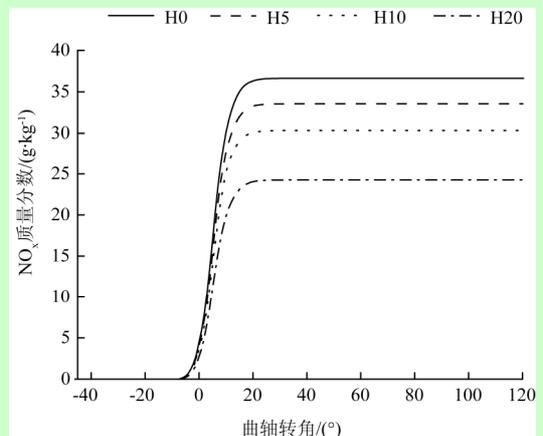
地名	大气压力/kPa		室外温度/℃		空气含湿量/(g·kg ⁻¹)	
	冬季	夏季	冬季	夏季	夏季	冬季
乌鲁木齐	91.9	90.6	-27.0	34.1	6.90	0.25
昆明	81.1	80.8	1.0	25.8	12.10	2.79
哈尔滨	100.1	98.5	-29.0	30.3	15.30	0.17
西安	97.8	95.9	-8.0	35.2	15.30	1.25
北京	102.0	99.8	-12.0	33.2	19.00	0.60
成都	96.3	94.7	1.0	31.6	20.20	3.29
广州	101.9	100.4	5.0	33.5	21.10	3.83
海口	101.6	100.2	10.0	34.5	21.30	6.57
上海	102.5	100.5	-4.0	34.0	21.70	2.04

注：<http://www.hnjstar.com/html/yewuchangshi/200912/03-427.html> 数据来源于湖南机电设备网。

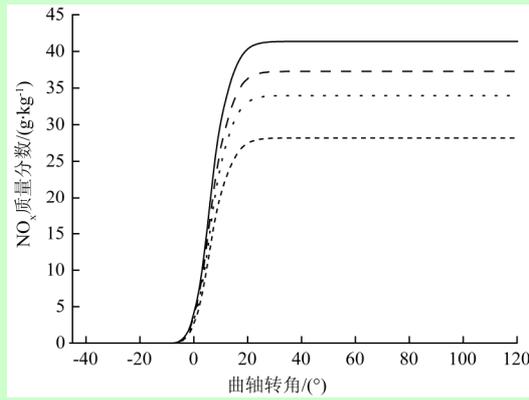
3 结果与分析

3.1 空气湿度对 NO_x 排放的影响

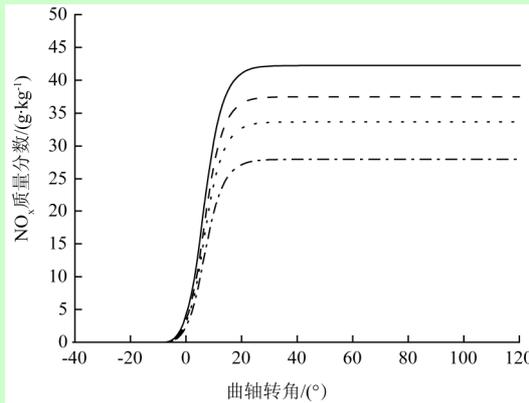
图 2 给出了 3 种负荷工况下，湿度不同时缸内 NO_x 排放随曲轴转角变化的关系对比图。从图 2 可以看出，在同一负荷条件下，随着湿度的增加，缸内 NO_x 排放有不同程度的下降。在 10% 负荷时，原机、含湿量为 5、10、20 g/kg 时的 NO_x 排放分别为 36.6、33.5、30.3、24.3 g/kg。相比原机，当含湿量为 20 g/kg 时，缸内最终 NO_x 排放减少 33.6%。与 10% 相比，在相同湿度时，50%、75% 负荷时 NO_x 排放增加。随湿度增加时，中、高负荷时 NO_x 排放变化规律与低负荷时类似。空气湿度增加时 NO_x 排放下降的原因有：水的热容较大，降低了缸内温度；水蒸汽的加入稀释了空气，不仅降低了进气中 N₂ 和 O₂ 的浓度，还有利于消除混合气局部富氧。



a. 10% 负荷



b. 50%负荷



c. 75%负荷

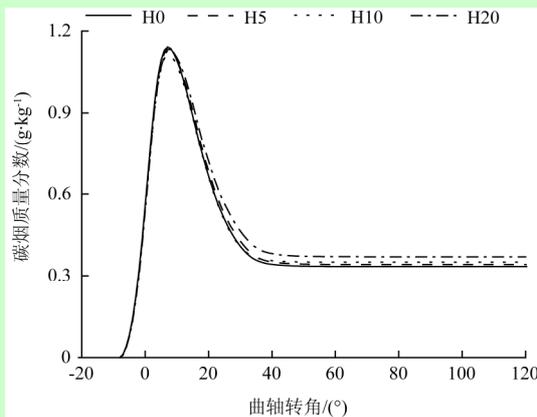
注: H0、H5、H10 和 H20 分别表示空气含湿量为 0、5、10 和 20 g/kg, 下同。

图 2 空气湿度对 NO_x 排放的影响

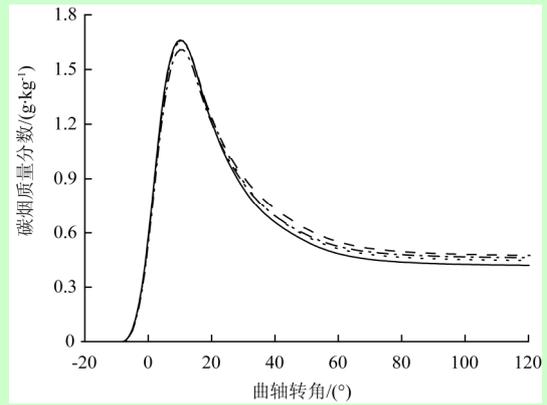
Fig.2 Effects of air humidity on NO_x emissions

3.2 空气湿度对碳烟排放的影响

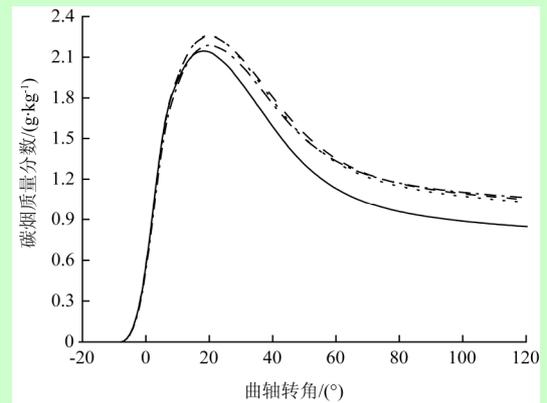
湿度对缸内碳烟变化历程的影响情况如图 3 所示。不难看出,碳烟与 NO_x 排放均呈互为消长关系。在 10%、50%、75%负荷时,原机碳烟排放分别为 0.33、0.42、0.84 g/kg,含湿量 10 g/kg 时碳烟排放分别为 0.35、0.45、1.0 g/kg,含湿量 20 g/kg 时碳烟排放分别为 0.37、0.46、1.1 g/kg。相比原机,在中、小负荷条件下,碳烟排放量变化较小;大负荷下湿度对碳烟排放影响较大,而且负荷越大,碳烟排放恶化越严重。另外,在大负荷条件下,由于水分对空气的稀释影响较大,氧气量相对不足,燃烧恶化程度加大,在含湿量较小时(如 5 g/kg)碳烟排放增加较多。



a. 10%负荷



b. 50%负荷



c. 75%负荷

图 3 空气湿度对碳烟排放的影响

Fig.3 Effects of air humidity on soot emissions

从图 3 看出,在中小负荷时含湿量从 5 g/kg 增加到 20 g/kg 时,碳烟几乎没有增加。这是因为空气湿度增加时,一方面会造成燃烧恶化,造成碳烟的形成量增加,但另一方面,燃油裂解减少,减少碳烟生成量,最终使得碳烟排放(净生成量)没有进一步恶化。图 4 给出了碳烟形成与氧化之间的关系。可以看出,湿度一方面使碳烟形成量增加,另一方面还会抑制碳烟形成,因此湿度对碳烟生成具有双重影响。而在大湿度下,虽然能有效地抑制燃油的裂解,降低其生成量,但由于此时燃烧条件变差,使得碳烟氧化量减少,最终使得缸内碳烟生成量增加较多。

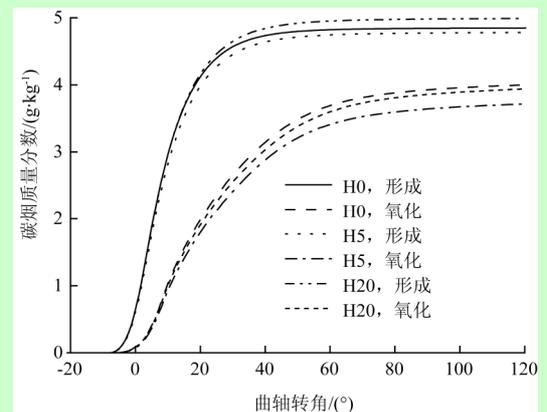


图 4 75%负荷时碳烟形成与氧化的关系

Fig.4 Soot formation and oxidation at 75% load

3.3 空气湿度对 NO_x 和碳烟排放影响的机理分析

图 5 给出了转速 3 200 r/min、75% 负荷下不同空气含湿量时缸内介质热物性参数随发动机曲轴转角的变化关系。由图 5 看出：随着湿度的增加，混合气比热容增加，缸内平均温度下降；在相同湿度时，比热容和缸内平均温度均先增加后下降。与燃烧干空气相比，含湿量为 20 g/kg 时，最高燃烧温度可降低 30 K，这有利于减少 NO_x 排放。由于水的比热较大，含湿量增加，即水蒸汽含量增加，因此混合气比热容也增加^[23]，在相同的热量情况下，混合气温度和燃烧温度都降低。随着活塞上行，缸内压缩气体温度升高，混合气着火后，缸内温度迅速升高，在上止点后某一时刻达到最大，之后逐渐降低，因此，比热容也呈现先升高后逐渐降低的趋势。

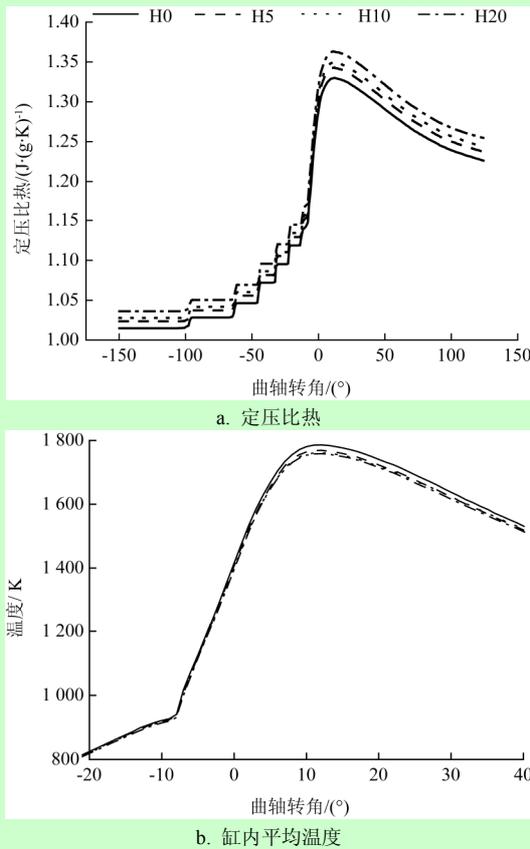


图 5 空气湿度对缸内工质热物性参数的影响

Fig.5 Effects of air humidity on thermal physical parameters of working fluid in cylinder

除上述参数外，还得到了湿度对比热容、导热系数、动力黏度、比焓、普朗特数等热物性参数的变化规律。计算结果表明，湿度增加引起混合气和燃气温度的降低是这些参数变化的根本原因。

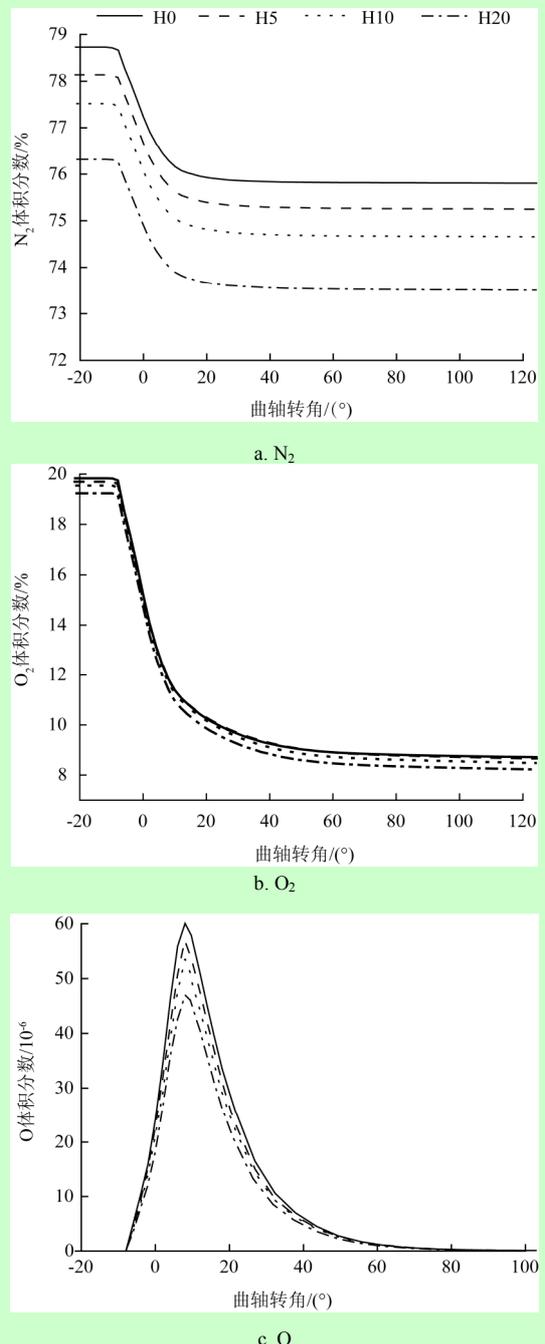
图 6 给出了 75% 负荷时空气湿度对进气组分和中间产物的影响。由图 6 看出：随着的湿度增加，N₂、O₂、O 和 OH 浓度均下降；在上止点前 7°CA 左右，N₂ 和 O₂ 浓度开始逐渐下降最后趋于不变，而 O 和 OH 浓度开始增加后逐渐下降。

空气湿度增加时，由于进气成分受到稀释作用，因此 N₂ 和 O₂ 浓度均有不同程度的下降，分别如图 6a、b 所示。当 N₂ 和 O₂ 浓度降低时，根据化学反应 $O+N_2 \leftrightarrow NO+N$ 和 $N+O_2 \leftrightarrow NO+O$ ，NO 生成量减少。当空气湿度增加时，

自由基 O 浓度也随之下降，如图 6c 所示，这主要是由于燃烧温度降低所致。而且，空气湿度对燃烧的抑制作用是自由基 O 浓度下降的内因。从公式 (1) 也可看出，N₂ 和自由基 O 浓度下降，NO 生成量减少。另外，O₂ 浓度的下降及混合气局部富氧条件的改善对抑制 NO_x 生成也起到了重要的作用。

空气湿度增加时，还能抑制 OH 基的生成，如图 6d 所示。这是因为湿度增加时，燃烧温度下降，从而抑制 OH 基的生成。显然，燃烧温度及 OH 基浓度降低的根本原因是由于水分对空气的稀释作用造成的。因此，空气湿度的增加导致燃烧温度的降低，O₂ 和自由基 OH 均下降，不利于碳烟的氧化（从公式 (2) 也可以看出）。

然而，需要明确指出的是，本模型没有再考虑水煤气的化学反应。若考虑此反应，湿度增加时，最终生成的碳烟量还会有所减少。



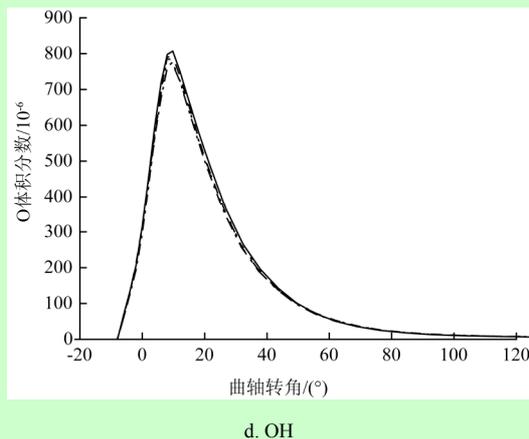


图6 75%负荷时空气湿度对进气组分和燃烧中间产物的影响
Fig.6 Effects of air humidity on intake composition and intermediate production at 75% load

4 结论

1) 获得了空气湿度与柴油机 NO_x 和碳烟排放的定量关系。相比原机, 当含湿量为 20 g/kg 时, 缸内最终 NO_x 排放减少 30% 以上。在大负荷时, 当含湿量为 10 和 20 g/kg 时, 缸内最终碳烟排放分别增加 19% 和 30%。在中小负荷时, 湿度对碳烟生成影响较小。

2) 与燃烧干空气相比, 含湿量为 20 g/kg 时, 最高燃烧温度可降低 30 K。比热容和比热比的变化规律解释了湿度对燃烧温度的影响作用。

3) 自由基 O 是影响 NO_x 生成的重要中间物质, 而 N_2 、 O_2 浓度的下降及混合气局部富氧的改善在降低 NO_x 过程中也起到了重要的作用。对碳烟来说, 在详细化学反应动力学中, 可考虑水煤气反应, 以减少计算误差。

4) 本文采用的研究方法和计算结果, 可为降低发电用和船用等柴油机 NO_x 排放提供有益的借鉴, 对研究柴油机进气加湿降低排放具有重要的实用价值。

[参 考 文 献]

- [1] 龚金科, 吴钢, 王曙辉, 等. 径向柴油机微粒捕集器流速分布特性数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 119—126.
Gong Jinke, Wu Gang, Wang Shuhui, et al. Numerical analysis on distribution characteristics of flow velocity in a radial style diesel particulate filter[J]. Transactions of CSAE, 2010, 26(4): 119—126. (in Chinese with English abstract)
- [2] Benini E, Pandolfo S, Zoppellari S. Reduction of NO emissions in a turbojet combustor by direct water/steam injection: Numerical and experimental assessment[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(17): 3506—3510.
- [3] Sarvi A, Kilpinen P, Zevenhoven R. Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 3. Influence of direct water injection and common rail[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(2): 221—231.
- [4] Tauzia X, Maiboom A, Shah S R. Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine[J]. Energy, 2010, 35(9): 3628—3639.
- [5] Maiboom A, Tauzia X. NO_x and PM emissions reduction on an automotive HSDI Diesel engine with water-in-diesel emulsion and EGR: An experimental study[J]. Fuel, 2011, 90(11): 3179—3192.
- [6] Subramanian K A. A comparison of water-diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(2): 849—857.
- [7] Roy M M, Parvez R, Sarker R I. Exhaust odor and smoke reduction of stationary DI diesel engines to acceptable level by water-scrubbing and air-dilution system[J]. Applied Energy, 2011, 88(7): 2391—2399.
- [8] Alahmer A, Yamin J, Sakhrieh A, et al. Engine performance using emulsified diesel fuel[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(8): 1708—1713.
- [9] Toback A T, Hearne J S, Kuritz B, et al. The Effect of ambient temperature and humidity on measured idling emissions from diesel school buses [C]// SAE paper 2004-01-1087.
- [10] Lin Cheng Yuan, Chen Wei Cheng. Effects of potassium sulfide content in marine diesel fuel oil on emission characteristics of marine furnaces under varying humidity of inlet air[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(8/9): 1260—1270.
- [11] Casati R, Scheer V, Vogt R, et al. Measurement of nucleation and soot mode particle emission from a diesel passenger car in real world and laboratory in situ dilution[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(10): 2125—2135.
- [12] Leskinen A P, Jokiniemi J K, Lehtinen K E J. Transformation of diesel engine exhaust in an environmental chamber[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(39): 8865—8873.
- [13] Strawa A W, Kirchstetter T W, Hallar A G, et al. Optical and physical properties of primary on-road vehicle particle emissions and their implications for climate change[J]. Journal of Aerosol Science, 2010, 41(1): 36—50.
- [14] 丁皓, 吉晓燕, 秦建华, 等. 高温高压下饱和湿空气焓与湿度的预测[J]. 化工学报, 2002, 53(8): 879—882.
Ding Hao, Ji Xiaoyan, Qin Jianhua, et al. Prediction of saturated humidity and enthalpy of humid air at high temperature and pressure[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2002, 53(8): 879—882. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨文滨, 苏明. 高湿空气在高温高压区域内的热物性计算及分析[J]. 动力工程, 2004, 24(3): 383—387, 410.
Yang Wenbin, Su Ming. Calculation and analysis of thermodynamic properties for high humid air in high temperature and high pressure[J]. Power Engineering, 2004, 24(3): 383—387, 410. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘朝, 杨智勇, 刘娟芳. 高温高压下湿空气的焓和熵计算[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 557—560.
Liu Chao, Yang Zhiyong, Liu Juanfang. The calculations of moist air's enthalpy and entropy in high temperature and pressure[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(4): 557—560. (in Chinese with English abstract)
- [17] 常勇强, 曹子栋, 赵振兴, 等. 多组分气体热物性参数的计算方法[J]. 动力工程学报, 2010, 30(10): 772—776.

- Chang Yongqiang, Cao Zidong, Zhao Zhenxing, et al. Calculation method for thermal properties of multi-component gas[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(10): 772—776. (in Chinese with English abstract)
- [18] 周见广, 臧述升, 葛冰, 等. 大湿度旋流扩散燃烧的变工况特性[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(4): 1617—1622. Zhou Jianguang, Zang Shusheng, Ge Bing, et al. The character of swirl diffusion humid air combustion under different work conditions[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(4): 1617—1622. (in Chinese with English abstract)
- [19] 顾欣, 臧述升, 葛冰. 湿空气扩散燃烧火焰结构特性研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 343—346. Gu Xin, Zang Shusheng, Ge Bing. Characteristics of non-premixed flame structure in humid air combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 343—346. (in Chinese with English abstract)
- [20] 石秀勇, 李国祥, 周雷. 基于平均反应速率的现象学碳烟氧化模型研究与应用[J]. 内燃机学报, 2008, 26(2): 161—167. Shi Xiuyong, Li Guoxiang, Zhou lei. A phenomenological model for soot oxidation in diesel engine based on average reaction rate[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(2): 161—167. (in Chinese with English abstract)
- [21] Tao Feng, Golovitchev V I, Chomiak J. A phenomenological model for the prediction of soot formation in diesel spray combustion[J]. Combustion and Flame, 2004, 136(2): 270—282.
- [22] Tao Feng, Reitz R D, Foster D E, et al. Nine-step phenomenological diesel soot model validated over a wide range of engine conditions[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(6): 1223—1234.
- [23] 贾和坤, 刘胜吉, 尹必峰, 等. EGR 对轻型柴油机缸内燃烧及排放性能影响的可视化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 44—49. Jia Hekun, Liu Shengji, Yin Bifeng, et al. Visualization of influence of ERG on combustion process and emission performance for light-duty diesel engine[J]. Transactions of CSAE, 2012, 28(5): 44—49. (in Chinese with English abstract)

Simulation analysis of effects of air humidity on NO_x and soot emissions in diesel engine

Wang Xiangli, Wang Zhong^{*}, Ni Peiyong, Mao Gongping, Wei Shengli

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To understand the effects of air humidity on diesel engine emissions, the NO_x and soot emissions were calculated during diesel combustion at different humidity ration (0, 5, 10 and 20 g/kg) using KIVA-3V software. The thermal physical parameters, intake composition and intermediate production were obtained. The simulation results show that NO_x decrease linearly with increasing humidity ratio. At the humidity ratio of 20 g/kg, the NO_x reduction of more than 30% can be achieved. Except at heavy load, humidity has a little effect on soot. Besides N₂ and O₂, O and OH radicals are reduced with increasing humidity ratio. At heavy load and high humidity, the decrease of O₂ and soot oxidation resulting from decreasing O₂ greatly contributes to soot yield. Humidity has dual effects on soot formation.

Key words: diesel engines, soot, NO_x, humidity ratio, thermal physical parameters