

空气源 NTP 喷射系统再生 EGR 冷却器试验研究

蔡忆昔 郑益 施蕴曦 李伟俊 徐辉

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 以压缩空气为气源,建立了低温等离子体(NTP)喷射系统再生废气再循环(EGR)冷却器的试验系统,在不同的再生温度下进行EGR冷却器的再生试验,通过测量再生过程中主要活性物质(NO_2 、 O_3)以及再生产物 CO_x 的变化情况,分析了再生温度对EGR冷却器再生的影响。试验结果表明:空气源NTP能在 $18\sim 300^\circ\text{C}$ 的温度范围内实现EGR冷却器再生。再生过程中, O_3 和 NO_2 均随着温度的升高而降低,在 150°C 时被完全消耗。再生过程产生的CO较少,故 C_1 (CO中C的质量)的值较小,占 C_{12} (CO_x 中C的质量)的比例不足 $1/8$ 。而 C_2 (CO_2 中C的质量)与 C_{12} 的趋势趋于一致,均随着温度的升高先增加后减小,当再生温度为 150°C 时, C_2 和 C_{12} 均达到较大值。当再生温度为 150°C 时,NTP产生的活性物质的利用率较高,去除积碳量较多,再生效果较好。

关键词: EGR冷却器;再生;低温等离子体;空气源

中图分类号:TK421+.5 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2016)01-0349-06

Experimental Study of EGR Cooler Regeneration by Air-fed NTP Injection System

Cai Yixi Zheng Yi Shi Yunxi Li Weijun Xu Hui

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

Abstract: Using air as the gas source, the regeneration system of exhaust gas recirculation (EGR) cooler was built to do an experimental study at 18°C , 60°C , 90°C , 120°C , 150°C , 200°C and 300°C , which was based on non-thermal plasma (NTP) injection system. The influence of temperature on regeneration was investigated by measuring the volume fraction of main active substance (O_3 , NO_2) and regeneration products (CO_x). The results indicate that CO and CO_2 can be detected all the time, which means that the EGR cooler can be regenerated by air-fed NTP at a wide temperature range of $18\sim 300^\circ\text{C}$. In the process of regeneration, the volume fractions of O_3 and NO_2 show drop trends with the increasing temperature, and they are completely consumed when the temperature is 150°C . And the concentration of NO_x decreases obviously firstly and then increases slightly with the rising temperature and gets a low level when temperature is above 90°C . Therefore, the temperature should be controlled at 150°C in consideration of active substance utilization and NO_x control. Additionally, little CO is produced, so that C_1 (the mass of C in CO) in C_{12} (the mass of C in CO_x) is less than $1/8$. However, much CO_2 is generated and remains relatively stable with the regeneration time. Besides, the trend of C_2 (the mass of C in CO_2) and C_{12} are almost same, they are all rising firstly and then dropping with the rising temperature, furthermore, they get the peak at 150°C . In total, the efficiency of main active substance which is generated by NTP reactor, is higher, the more carbon deposition is removed and the regenerative effect is more remarkable, when the regeneration temperature is 150°C .

Key words: EGR cooler; regeneration; non-thermal plasma; air-fed

收稿日期:2015-05-09 修回日期:2015-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51176067)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(2010322711014)和江苏省高校优势学科建设项目(PDPA)

作者简介:蔡忆昔(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事内燃机工作过程及排放控制研究,E-mail: qc001@ujs.edu.cn

引言

目前,柴油机以其燃油经济性好、CO₂ 排放低等优点,广泛应用于重型车领域,同时也日益受到轻型车和乘用车市场的青睐。但柴油机空气-燃料的混合方式,导致其 PM 和 NO_x 的排放高于汽油机。目前各国的排放法规日益严格,这就要求汽车生产厂家减少柴油车 PM 和 NO_x 的排放。为满足排放法规的要求,目前较为典型的一条后处理路线为: EGR (Exhaust gas recirculation) + DOC + DPF^[1-2]。相较于普通的 EGR 系统,采用冷却废气再循环(Cooled exhaust gas recirculation, CEGR)技术,即在 EGR 系统中加入冷却器,有利于降低 NO_x 排放及烟度,进一步提高柴油机的性能^[3-4]。在柴油机运行过程中,废气中的 PM 会沉积在 EGR 冷却器上,形成顽固的积碳层,增加冷却液与废气之间的热阻,从而导致 EGR 冷却器的冷却效率下降、气流通道压降增加、EGR 率难以控制等问题^[5-7]。因此,采用相关技术去除 EGR 冷却器内部积碳,使其得以再生,具有十分重要的意义。

低温等离子体(Non-thermal plasma, NTP)技术以其高效、安全、无二次污染且适用范围广等优点,成为目前柴油机尾气净化领域的研究热点^[8-10]。近年来,国内外在利用介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge, DBD)产生低温等离子体技术处理柴油机排放污染物方面开展了大量研究工作。Vinh 等利用 NTP 处理 N₂/NO/O₂ 的发动机排气模拟气,并将处理后的气体通入加载有 PM 的 DPF 中,同时去除 NO_x 和 PM^[11]。Kim 等通过对比 NO₂ 和低温等离子体对 SOOT 的氧化速率,得出低温等离子体氧化速率更快的结论^[12]。另外,Chen 等以纯氧作为 NTP 系统的气源,实现了 EGR 冷却器的再生^[13]。

然而,以纯氧为气源成本太高,不利于实际应用过程中的成本控制,因此本文以压缩空气作为气源,建立 NTP 再生 EGR 冷却器的试验系统,通过改变再生温度,探究温度对 NTP 再生 EGR 冷却器的影响,以期实现 EGR 冷却器的低温高效再生。

1 试验系统与方法

1.1 EGR 冷却器积碳加载试验

翅片管-壳式 EGR 冷却器具有冷却效率高、适应性强、能预防积碳等优点,广泛应用于大型柴油机。本试验采用的 EGR 冷却器即为翅片管-壳式 EGR 冷却器,由外壳和 6 根扁平的翅片管装配而成。其中,外壳长为 500 mm,翅片管长为 460 mm,翅片的翅距/波距为 1.5 mm/3.5 mm。EGR 冷却器

的积碳加载试验装置如图 1 所示,主要包括柴油机和 EGR 冷却装置。试验中所用柴油机型号为 YD480,排量为 1.8 L,活塞行程为 90 mm,标定功率为 29 kW,标定转速为 3 000 r/min,压缩比为 18。试验过程中,柴油机运行工况为:转速为 2 500 r/min,扭矩为 69 N·m (75% 负荷),连续运转时间为 2 h,以保证积碳足量。EGR 冷却装置由水箱、水泵、温控仪、热电偶以及电热管组成。试验中,通过水泵实现冷却效率较高的逆流冷却,温控仪监控冷却水温度,水温控制为 80℃。

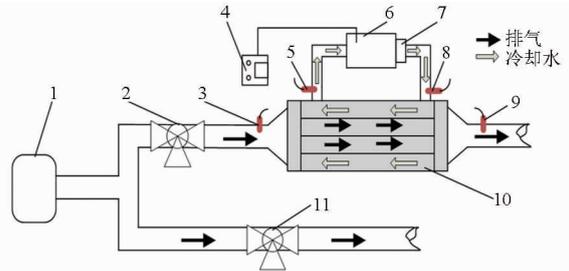


图 1 EGR 冷却器积碳加载试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram for EGR cooler carbon loading
1. 柴油机 2, 11. 蝶阀 3, 5, 8, 9. 热电偶 4. 温控仪 6. 水箱
7. 水泵 10. EGR 冷却器

1.2 EGR 冷却器再生试验

EGR 冷却器再生试验系统主要由配气系统、NTP 喷射系统、冷却系统、温度测控系统以及气体成分测量系统组成,其试验系统如图 2、3 所示。



图 2 EGR 冷却器再生试验装置实物图

Fig. 2 Pictures of EGR cooler regeneration

配气系统由压缩空气、AFR2000 过滤调压阀、稳压桶、MF5706 气体质量流量计(0~10 L/min)以及气体管路组成。NTP 喷射系统主要包括 NTP 发生器、低温等离子体电源、数字示波器等。NTP 发生器采用同轴圆柱结构,内电极为外径 32 mm 的不锈钢管,阻挡介质为内径 36 mm、壁厚 2 mm 的石英玻璃管,外电极采用轴向长度为 100 mm 的细铁丝网,包覆在石英玻璃管上。细铁丝网和不锈钢管之间为 NTP 发生器的放电区域,放电间隙为 2 mm。低温等离子体电源采用 CTP-2000K 型智能电子冲击机(0~25 kV, 7~20 kHz),电路中分压电容 C1 为 47 pF, C2 为 47 nF,传输电荷测量电容 Cm 为 47 μF。TDS3034B 型数字示波器用以监测放电过程中的放

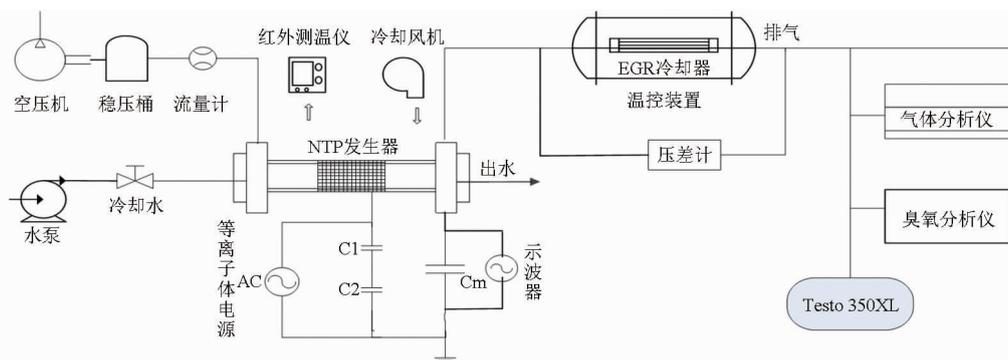


图 3 EGR 冷却器再生试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of EGR cooler regeneration

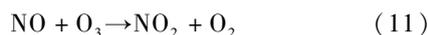
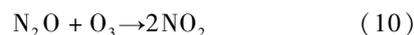
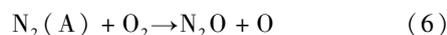
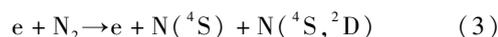
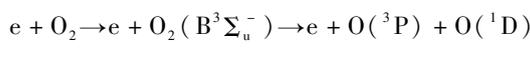
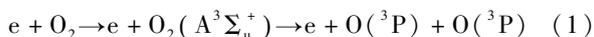
电电压和放电频率。

冷却系统包括风冷系统和水冷系统。风冷系统通过冷却风机将空气吹向放电电极表面,水冷系统则利用循环水泵实现冷却水在不锈钢管内的循环。风冷和水冷系统保证了 NTP 发生器稳定、高效的产生活性物质。温控系统用于控制 EGR 冷却器内部温度,使 EGR 冷却器内部积碳分别处于 18℃、60℃、90℃、120℃、150℃、200℃、300℃ 条件下进行再生反应。温度测量系统采用 4 个低温 K 型热电偶 (Omega, GG-K-30-SLE), 其量程为 -73 ~ 482℃。试验时,热电偶沿 EGR 冷却器轴向均布,以确保 EGR 冷却器内部积碳温度均处于试验预设温度。气体成分测量系统由气体分析仪、Testo 350XL 以及 Mini-HiCon 臭氧分析仪组成,主要用以测量再生过程中 CO_x、NO_x 的体积分数以及 O₃ 的质量浓度。

试验时,控制压缩空气流量为 5 L/min,开启数字示波器,调节低温等离子体电源的电压为 18 kV、频率为 7.3 kHz。调节冷却风机和循环水泵,控制放电区表面温度为 70℃。压缩空气经 NTP 发生器作用后,产生具有较强氧化性的活性物质 (O、O₂^{*}、OH、O₃、NO₂ 等),其中 NO₂ 和 O₃ 是氧化 PM 的主要物质^[14]。将活性物质通入 EGR 冷却器中,活性物质迅速与碳层发生反应,实现 EGR 冷却器的再生。再生过程中,利用臭氧分析仪监测再生前后臭氧浓度的变化,利用 Testo 350XL 测量再生前后气体中的 NO 和 NO₂ 的体积分数,利用气体分析仪测量排气中 CO 和 CO₂ 的体积分数。

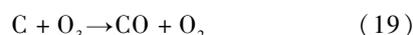
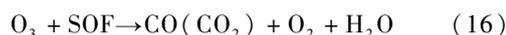
2 空气源 NTP 喷射系统再生 EGR 冷却器的化学反应模型

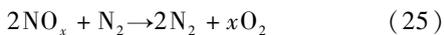
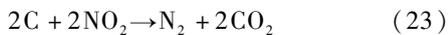
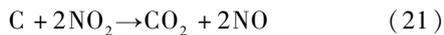
空气经 NTP 发生器的介质阻挡放电作用后,产生大量的活性物质 (光子、电子、离子、亚稳态分子等),其主要化学反应式为^[15-17]



一般认为,在介质阻挡放电过程中, O₃ 的生成分为两个步骤。第 1 步是 O₂ 在电子碰撞中被分解为 O 原子,如式 (1)、(2)、(4)、(6)、(8) 所示;第 2 步是 O 原子和 O₂ 的化合作用生成 O₃,如式 (5) 所示,其中 M 代表第 3 种物质。当 O 原子体积分数过高时,会发生式 (12) ~ (14) 的反应,从而抑制 O₃ 的生成。NO₂ 是放电产生的 NO_x 中的主要成分,在放电微通道形成后的 100 ns 内, N₂O 和 NO 首先通过式 (6) ~ (8) 生成,然后被 O₃ 氧化成 NO₂,如式 (10)、(11) 所示^[18]。

将 NTP 发生器产生的活性物质通入 EGR 冷却器中,在较低的温度范围内, O 原子、O₃、NO₂ 等活性物质能迅速与附着在 EGR 冷却器翅片上的积碳发生剧烈氧化反应,实现 EGR 冷却器的再生。主要的反应方程式为^[19-20]





由式(15)~(24)可知: O_3 与EGR冷却器积碳中的Soot和SOF发生氧化反应,生成物中包括 CO 、 CO_2 、 O_2 、 H_2O ;而 NO_2 与积碳反应则生成 CO 、 CO_2 、 NO 、 N_2 。另外,通过利用Testo 350XL测量 NO_x (NO 、 NO_2)的体积分数,可知再生过程中反应式(21)~(25)进行的剧烈程度,这对于NTP再生EGR冷却器过程中的污染物控制是一个重要参考^[14]。

3 试验结果与分析

3.1 再生温度对活性物质消耗量的影响

EGR冷却器的再生试验在不同的再生温度下进行,为了准确分析再生温度对EGR冷却器再生的影响,需实时测量再生前后主要活性物质的变化。试验测得再生前NTP发生器稳定放电产生的 O_3 质量浓度为 6.3 mg/L , NO 的体积分数为0, NO_2 的体积分数为 1.335×10^{-3} 。由于再生过程中,同一再生温度下活性物质的量几乎不变,因此选取各测点的平均值,得出 O_3 、 NO 、 NO_2 的量随再生温度的变化。 O_3 质量浓度随再生温度的变化如图4所示, NO_x 体积分数随再生温度的变化如图5所示。

由图4可见,随着再生温度的升高, O_3 的质量浓度迅速下降,当再生温度达到 150°C 及以上时, O_3 的质量浓度均为0。这是由于 O_3 与积碳的反应随着温度的升高越来越剧烈,且高温导致 O_3 分解,温度越高,分解作用越明显。

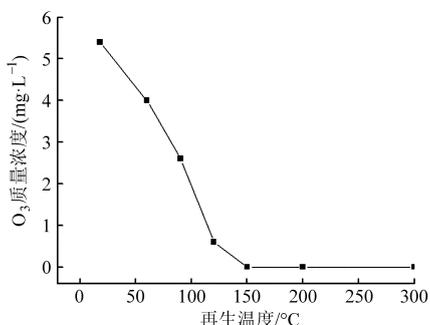


图4 O_3 质量浓度随再生温度的变化曲线

Fig.4 Mass concentration of O_3 vs regeneration temperature

由图5可见,当再生温度低于 90°C 时, NO 的体积分数为0,而 NO_2 的体积分数随再生温度的升高而降低,且降幅明显。当再生温度为 120°C 时, NO 的体积分数为 2.5×10^{-5} ,而 NO_2 的体积分数则降

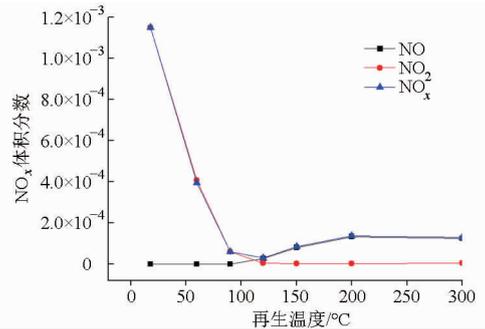


图5 NO_x 体积分数随再生温度的变化曲线

Fig.5 Volume fraction of NO_x vs regeneration temperature

至 4×10^{-6} 。随着温度继续升高, NO 的体积分数先增加后略有降低, NO_2 体积分数几乎不变。这表明,在NTP的作用下,当温度较低时, NO_2 被还原成 N_2 ,如式(23)、(24)所示;而当温度较高时, NO_2 则被还原为 NO 和 N_2 ,如式(21)~(25)所示。就整个再生过程而言,再生后的 NO_x 的总量较再生前有所降低,且其体积分数随着再生温度的升高先降低后增加,最后趋于平稳,当再生温度高于 90°C 时总量均较低。综合图4、图5可知,从活性物质的利用率及 NO_x 的控制角度而言,应尽量将再生温度控制为 150°C 。

3.2 再生温度对积碳去除量的影响

再生过程中,再生温度不同,活性物质与积碳反应的剧烈程度不同,导致氧化产物成分和比例的差异。而要评估EGR冷却器的再生效果,则需准确测量反应过程中 CO_x 的含量变化。不同再生温度下,活性物质与积碳反应生成的 CO 和 CO_2 体积分数随再生时间的变化如图6、7所示。

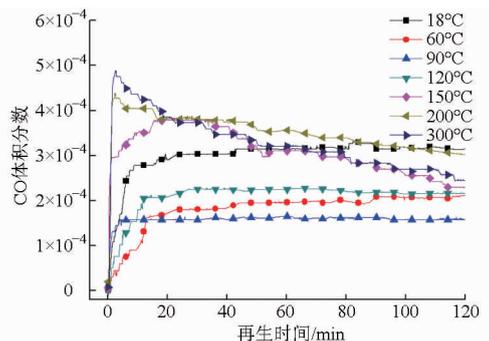


图6 CO 体积分数随再生时间的变化曲线

Fig.6 Volume fraction of CO vs regeneration time

由图6可见,当再生温度低于 120°C 时,再生过程中的 CO 体积分数在经历初期的快速上升后,便趋于稳定。当再生温度高于 120°C 时, CO 体积分数在达到峰值之后,便一直呈现下降的趋势,且当再生温度为 300°C 时,降幅最大,由 4.88×10^{-4} 降到了 2.43×10^{-4} 。另外,再生温度为 90°C 时, CO 的体积分数明显低于其它再生温度的体积分数。

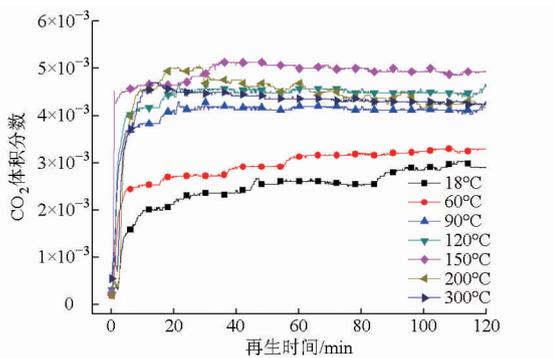


图 7 CO₂ 体积分数随再生时间的变化曲线

Fig. 7 Volume fraction of CO₂ vs regeneration time

由图 7 可见,当再生温度为 18℃ 和 60℃ 时,CO₂ 的体积分数较低,经历再生初期的快速增长后,便呈现缓慢增长的趋势,最终趋于稳定。当再生温度为 60 ~ 150℃ 时,CO₂ 的体积分数整体较为稳定,而随着温度继续升高,CO₂ 体积分数略有下降。当再生温度为 150℃ 时,CO₂ 体积分数较高。这是由于在 150℃ 时,主要活性物质中 O₃ 和 NO₂ 均已被完全消耗,且此时 O₃ 的反应活性与受热分解达到了一个较佳平衡点,如图 4、图 5 所示。

由于 EGR 冷却器内部积碳与活性物质反应后的主要产物是 CO 和 CO₂,可认为包含在 CO 和 CO₂ 中 C 的质量便是去除的积碳质量。C 质量的计算式为^[20]

$$m(C_1) = \int c_1 dt Mv / V_m \quad (26)$$

$$m(C_2) = \int c_2 dt Mv / V_m \quad (27)$$

$$m(C_{12}) = m(C_1) + m(C_2) \quad (28)$$

式中 C₁——CO 中所含的 C 质量
 C₂——CO₂ 中所含的 C 质量
 C₁₂——CO_x 中的 C 质量
 c₁——CO 的体积分数
 c₂——CO₂ 的体积分数

v ——气体流速
 V_m ——气体摩尔体积
 M ——C 的摩尔质量

其中, $v = 5 \text{ L/min}$, $V_m = 22.4 \text{ L/mol}$ 。

再生过程中 C₁、C₂ 和 C₁₂ 随再生温度的变化如图 8 所示。

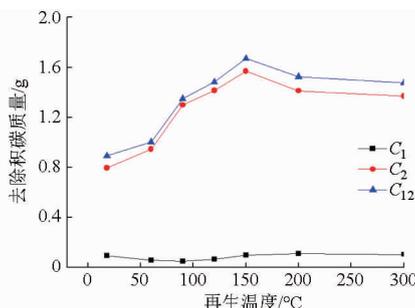


图 8 CO、CO₂ 和 CO_x 中 C 的质量随再生温度的变化曲线

Fig. 8 Mass of C in CO, CO₂ and CO_x vs regeneration temperature

由图 8 可见,C₁ 随再生温度的升高而先降低后升高再略有降低,且当再生温度为 90℃ 时,C₁ 达到较低值。另外,再生过程中 CO₂ 的量远高于 CO,C₁ 占 C₁₂ 的比例不足 1/8。C₂ 与 C₁₂ 的变化趋势趋于一致,均随着温度的升高先增加后降低,且当再生温度为 150℃ 时,C₂ 和 C₁₂ 均达到较大值,NTP 去除 EGR 冷却器的积碳量较多,再生效果较好。这是由于当温度低于 150℃ 时,活性物质的利用率随着温度的升高而升高,而当温度高于 150℃ 时,某些活性物质(如 O₃)的分解作用增强,导致活性物质的利用率略有下降。

由图 6 ~ 8 可见,当再生温度为 18 ~ 300℃ 时,均可检测到 CO 和 CO₂,这表明空气源 NTP 喷射系统可以实现 EGR 冷却器的再生,且再生温度范围较广。

再生前后 EGR 冷却器进气端端面图如图 9 所

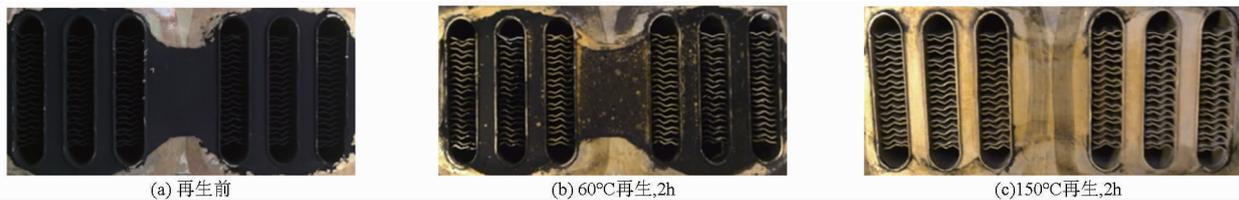


图 9 再生前后 EGR 冷却器进气端端面

Fig. 9 Photograph taken from EGR cooler exhaust gas inlet before and after regeneration

示,其中图 9b、图 9c 表示当再生温度为 60℃ 和 150℃ 时 NTP 再生 EGR 冷却器 2h 后端面的差异。由图 9 可见,当再生温度为 150℃ 时,EGR 冷却器进气端端面的积碳几乎被完全清除,而再生温度为 60℃ 时,则仍有部分积碳残留在端面上,这也直观印证了前文关于再生温度为 150℃ 时再生效果较好的

分析。

4 结论

建立了空气源条件下 NTP 再生 EGR 冷却器的试验系统,探究了再生温度对 EGR 冷却器再生效果的影响,得出如下结论:

(1) 空气源 NTP 喷射系统可以在 18 ~ 300℃ 的温度范围内实现 EGR 冷却器再生。

(2) 再生过程中,主要活性物质(O_3 和 NO_2) 均随着温度的升高而降低。 O_3 在温度为 150℃ 时被完全消耗,而 NO_2 和 NO_x 的量则均在温度高于 90℃ 时较低。因此,为提高活性物质的利用率同时控制再生过程中的 NO_x ,应尽量将再生温度控制为 150℃。

(3) C_1 (CO 中 C 的质量)随再生温度的升高而先减少后增加,且 C_1 较小,占 C_{12} 的比例不足 1/8。 C_2 (CO_2 中 C 的质量)与 C_{12} (CO_x 中 C 的质量)的变化趋势趋于一致,均随着再生温度的升高先增加后减少。当再生温度为 150℃ 时, C_2 和 C_{12} 均达到较大值,NTP 产生的活性物质的利用率较高,去除积碳量较多,再生效果较好。

参 考 文 献

- 孙跃东,张振东,王葵. 增压中冷柴油机 EGR 排放特性试验研究[J]. 农业机械学报,2004,35(5):47-50.
Sun Yuedong, Zhang Zhendong, Wang Yan. Experimental investigation on emission property of a supercharged inter-cooled diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 47-50. (in Chinese)
- Chen P G, Wang J M. Air-fraction modeling for simultaneous diesel engine NO_x and PM emissions control during active DPF regenerations[J]. Applied Energy, 2014, 122: 310-320.
- 傅旭光,郭新民,刘永进,等. 柴油机废气再循环冷却控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2006,37(5):34-36.
Fu Xuguang, Guo Xinmin, Liu Yongjin, et al. Design and experiment of control system for EGR cooling system on diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 34-36. (in Chinese)
- Lim J, Kang B, Park J, et al. A study on the effects of EGR temperature on emission characteristics in a HSDI diesel engine using EGR coolers[C]//Proceedings of KSAE 2004 Fall Conference, 2004: 306-312.
- Kim H M, Lee D H, Park S K, et al. An experimental study on heat exchange effectiveness in the diesel engine EGR coolers[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(2): 361-366.
- Hoard J, Abarham M, Styles D, et al. Diesel EGR Cooler Fouling[C]. SAE Paper 2008-01-2475, 2008.
- Jiang S H, Hwang S J, Park S K, et al. Effects of PM fouling on the heat exchange effectiveness of wave fin type EGR cooler for diesel engine use[J]. Heat and Mass Transfer, 2012, 48(6): 1081-1087.
- 蔡忆昔,施蕴曦,李康华,等. NTP 喷射系统再生泡沫陶瓷 PM 吸附体的试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2013,34(6): 621-625.
Cai Yixi, Shi Yunxi, Li Kanghua, et al. Experiment of regeneration ceramic foam adsorbate based on NTP injection system[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2013, 34(6): 621-625. (in Chinese)
- Mohammadi A, Kaneda Y, Sogo T, et al. A study on diesel emission reduction using a high-frequency dielectric barrier discharge plasma[C]. SAE Paper 2003-01-1879, 2003.
- Okubo M, Kuroki T, Miyairi Y, et al. Low-temperature soot incineration of diesel particulate filter using remote nonthermal plasma induced by a pulsed barrier discharge[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(6): 1504-1512.
- Vinh T Q, Watanabe S, Furuhashi T, et al. Fundamental study of NO_x removal from diesel exhaust gas by dielectric barrier discharge reactor[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(6): 1921-1928.
- Kim D, Lee S H, Chun K M, et al. Comparison of soot oxidation by NO_2 only and plasma-treated gas containing NO_2 , O_2 , and hydrocarbons[C]. SAE Paper 2002-01-2704, 2002.
- Chen Y Y, Cai Y X, Li X H, et al. Experimental study on regenerating fouled EGR cooler by NTPI technology[J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(2): 183-191.
- Okubo M, Arita N, Kuroki T, et al. Total diesel emission control technology using ozone injection and plasma desorption[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2008, 28(2): 173-187.
- Kogelschatz U, Eliasson B, Hirth M. Ozone generation from oxygen and air: discharge physics and reaction mechanisms[J]. Ozone: Science and Engineering Journal, 1988, 10(4): 366-377.
- 丁伟,何立明,宋振兴. 常压空气介质阻挡放电的能量传递过程[J]. 高压电技术,2010,36(3):745-751.
Ding Wei, He Liming, Song Zhenxing. Energy transfer processes in atmospheric dielectric barrier discharge in air[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 745-751. (in Chinese)
- Uchida Y, Takaki K, Chang J S. Atmospheric pressure of nitrogen plasmas in a ferro-electric packed bed barrier discharge reactor part I: Modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 481-490.
- 韩文赫,蔡忆昔,王军,等. 空气介质阻挡放电型间接低温等离子体系统性能实验分析[J]. 高压电技术,2010,36(12): 3065-3069.
Han Wenhe, Cai Yixi, Wang Jun, et al. Experimental analysis on characteristics of an air-fed indirect non-thermal plasma system using dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3065-3069. (in Chinese)
- Kuwahara T, Kuroki T, Okubo M, et al. Pilot-scale experiment of total marine diesel emission control using ozone injection and nonthermal plasma reduction[C]//2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, FL, 2013.
- Shi Y X, Cai Y X, Li X H, et al. Mechanism and method of DPF regeneration by oxygen radical generated by NTP technology [J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(6): 871-876.