

DOI: 10.7652/xjtuxb201607009

增压直喷汽油机中润滑油液滴 诱发早燃机制的数值研究

李耀庭¹, 黄勇成¹, 孟凡胜¹, 张文嘉¹, 陈锐²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂, 214026, 江苏无锡)

摘要: 通过利用多维计算流体动力学(CFD)耦合一个多组分汽油替代物的骨架反应机理,对增压直喷汽油机中润滑油液滴诱发早燃的机制进行了研究。首先,在模拟增压高强化汽油机压缩上止点热力学状态的定容圆柱网格内,研究了润滑油液滴的存在对汽油/空气混合气自燃过程的影响,结果表明:以正庚烷和过氧氢酮分别作为润滑油蒸发产物时润滑油液滴的存在均可缩短混合气的着火延迟时间,尤其是以过氧氢酮作为润滑油蒸发产物时混合气的着火延迟时间缩短更为明显;随着润滑油液滴粒径的增大,混合气的着火延迟时间先缩短后延长,润滑油液滴温度和混合气的温度、压力升高会进一步缩短混合气的着火延迟时间。然后,以过氧氢酮作为润滑油蒸发产物,在增压直喷汽油机动网格内模拟了润滑油液滴存在时缸内混合气的自燃过程,结果表明:润滑油液滴蒸发释放出了着火性能较好的组分,缩短了液滴周围混合气的着火延迟时间,导致液滴周围混合气在火花点火之前自燃,从而引发早燃。最后,根据以上结论提出了一个润滑油液滴诱发早燃的机制。

关键词: 增压直喷汽油机;早燃;润滑油液滴;骨架反应机理;数值研究

中图分类号: TK411.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)07-0051-07

Numerical Investigations for Mechanism of Pre-Ignition Induced by Lubricant Oil Droplets in Supercharged DISI Engines

LI Yaoting¹, HUANG Yongcheng¹, MENG Fansheng¹, ZHANG Wenjia¹, CHEN Rui²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Wuxi Diesel Engine Works, FAW Jiefang Automotive Co. Ltd., Wuxi, Jiangsu 214026, China)

Abstract: Multidimensional computational fluid dynamics coupled with a skeletal chemical kinetic model of gasoline substitute is used to investigate the mechanism of pre-ignition induced by lubricant oil droplets in a supercharged direct-injection spark-ignition (DISI) engine under high load and at low speed. The influence of lubricant oil droplet on the auto-ignition of gasoline and air mixture is evaluated in a constant volume combustion bomb with the thermodynamic conditions similar to those in the DISI engine cylinder at the compression top dead center. The results show that the ignition delay time of gasoline and air mixture is shortened by the presence of lubricant oil droplet when n-heptane and hydrogen peroxide ketone (C₈KET) are used as lubricant oil evaporation substitutes respectively, and this behavior is more obvious when C₈KET is used as lubricant oil evaporation substitute. The ignition delay time of gasoline and air mixture first decreases then increases with the increasing lubricant oil droplet diameter. In addition, the

收稿日期: 2015-11-29。 作者简介: 李耀庭(1992—),男,硕士生;黄勇成(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776069);陕西省自然科学基金资助项目(2015JM5236)。

网络出版时间: 2016-05-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160510.1519.006.html>

ignition delay time of fuel-air mixture is further shortened with the increasing lubricant oil droplet temperature and the temperature and pressure of the fuel-air mixture. A numerical investigation for auto-ignition of gasoline and air mixture with the presence of lubricant oil droplets in the supercharged DISI engine is carried out by using C_8KET as lubricant oil evaporation substitute. The results show that the ignition delay time of the fuel-air mixture around the lubricant oil droplets is shortened by the constituents with good ignition performance evaporating from lubricating oil droplets, which causes auto-ignition of fuel-air mixture in this area before the spark ignition and leads to the occurrence of pre-ignition. A mechanism of pre-ignition induced by lubricant oil droplets is finally proposed following the conclusions above.

Keywords: supercharged DISI engine; pre-ignition; lubricant oil droplet; skeletal chemical kinetic model; numerical investigation

发动机小型化是车用汽油机提高燃油经济性和降低 CO_2 排放的重要措施之一,一般结合使用缸内直喷技术和废气涡轮增压技术可以实现发动机小型化。随着增压比和功率密度的不断提高,增压直喷汽油机在低速、高负荷工况下出现了一种新的爆震模式——早燃爆震,也称作超级爆震,其诱因是缸内混合气在火花点火前已发生预燃,从而产生极高的爆压和压力波动。发生超级爆震时,最高缸压可达到 30 MPa 以上,压力波动幅度可达到 20 MPa 以上^[1],对发动机的破坏性极大,甚至造成火花塞电极熔断、活塞顶部烧蚀、连杆弯曲等严重后果,导致发动机损毁^[2]。超级爆震具有偶发性和间歇性特征,无法通过加浓混合气、加强壁面传热或采用高辛烷值汽油来避免,所以成为目前发动机增压小型化技术发展的最大阻碍。

早燃是火花点火发动机在常规点火之前出现的异常着火燃烧现象。王志等人的研究发现,超级爆震前一定发生了早燃,为了杜绝超级爆震的发生,必须抑制早燃^[2]。国内外众多机构对早燃进行了研究,提出了多种可能的诱发机制。通过总结归纳这些机制,可以将早燃点的来源分为结构热点(火花塞、气门、活塞等炽热表面)和非结构热点(润滑油液滴、燃烧室颗粒物等)两大类。到目前为止,虽然对于早燃的诱发原因学术界尚无定论,但是近年来大量的研究表明,结构热点对早燃的产生基本没有影响,而非结构热点中的润滑油液滴则被认为是最有可能引发增压直喷汽油机缸内混合气早燃的重要物质。

Dahnz 等人通过分析实验数据和一维模拟结果,最早指出了润滑油液滴是诱发早燃的可能原因^[1]。Kalghatgi 等人提出早燃可能是混合气中混入的润滑油长链成分自燃引起的^[3]。Palaveev 等人

发现,增加喷雾碰壁能够显著提升早燃发生的几率,说明诱发早燃的物质很可能来自润滑油的蒸发产物或者由润滑油和燃油相互反应生成的^[4]。以上研究均表明,诱发混合气早燃的物质很有可能来自于润滑油,但是诱发机制和具体物质的确定还有待进一步研究。

基于以上背景,本文充分发挥了数值模拟技术的独特优势,通过多维计算流体动力学耦合化学反应动力学,从正面对润滑油液滴诱发早燃的机制进行了详细的数值研究,开创性地探讨了不同润滑油蒸发产物替代物诱发早燃的可能性,研究了润滑油液滴粒径、温度和混合气温度、压力对汽油/空气混合气着火延迟时间及早燃的影响,最后对润滑油液滴存在时增压直喷汽油机缸内混合气的自燃过程进行了模拟验证。

1 计算模型

1.1 化学反应动力学骨架机理模型

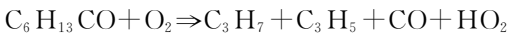
研究早燃主要涉及到缸内工质的自燃和火焰的传播过程,所以需要采用化学反应动力学模型准确模拟燃料/空气混合气的着火延迟时间和层流火焰传播速率。

本文选用异辛烷和正庚烷的混合物作为汽油替代物,通过分析和借鉴前人建立的 PRF(primary reference fuel)骨架反应机理,利用路径分析法建立了一个新的能够满足上述要求的化学反应动力学骨架反应机理,构建思路如下。

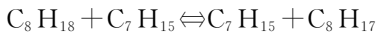
首先,参考 Tsurushima 机理初步建立了正庚烷和异辛烷的低温反应机理^[5]。然后,根据 C_3H_8 是异辛烷低温反应阶段的主要烃类生成物^[6],将 Tsurushima 模型中的反应



修改为



再根据 Tanaka 的研究^[7], 添加了正庚烷和异辛烷的耦合反应



高温反应区借鉴 Liu 等^[8]的思路建立了烷基的高温裂解反应, 同时添加了 C_1-C_3 以及 H_2 的一些小分子反应。

最终, 骨架反应机理包含了 41 种组分和 125 个反应^[9]。图 1 给出了该机理在混合气压力 p 为 4 MPa 时以化学计量比混合的不同辛烷值汽油/空气混合气着火延迟时间的计算值与实验值的对比, 其中激波管的实验结果来自 Fieweger 等的结果^[10]。图 2 给出了该机理对不同辛烷值汽油/空气混合气在常规工况下层流火焰传播速率的计算值与实验值的对比, 其中实验数据来自 Huang 等的结果^[11]。图中所有计算值均来自气相化学反应动力学程序 CHEMKIN PRO 的计算结果。

由图 1 和图 2 可以看出, 本文的骨架反应机理能够较为准确地模拟不同辛烷值汽油/空气混合气的着火延迟时间和层流火焰传播速率, 可用于预测内燃机缸内工质的自燃及燃烧过程。所以, 下文中建立的多维数值模型将通过耦合本文骨架反应机理进行早燃诱发机制的研究。

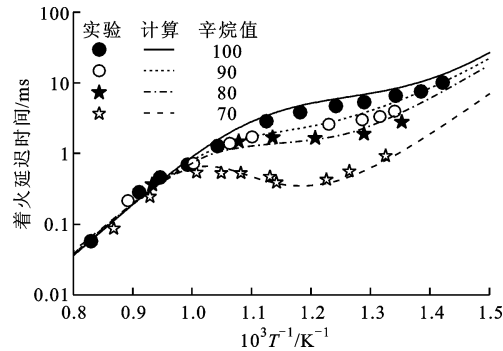


图 1 着火延迟时间计算值与实验值的对比

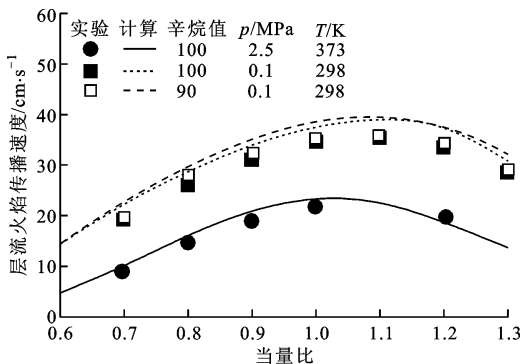


图 2 层流火焰传播速率计算值与实验值的对比

1.2 多维数值模型

增压直喷汽油机普遍存在喷雾碰壁现象, 气缸壁上的润滑油膜被喷雾油束稀释导致润滑油膜黏度、表面张力下降, 进而液滴飞溅与蒸发的可能性增加。润滑油液滴蒸发后燃油蒸气与空气形成可燃混合气, 由于润滑油组分的着火性较好, 润滑油液滴周围混合气的着火延迟时间缩短, 所以混合气便有可能在点火之前自燃而引发早燃^[12]。图 3 给出了燃烧室内润滑油液滴诱发混合气早燃的过程。

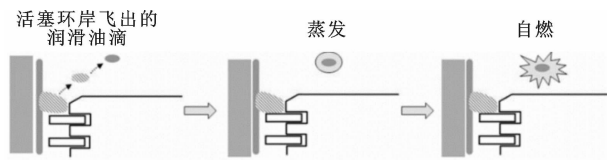


图 3 润滑油液滴诱发早燃的过程

据此, 本文使用通用流体分析软件包 STAR-CD 建立了定容圆柱网格, 用以研究润滑油液滴的存在及其粒径、温度和混合气温度、压力对汽油/空气混合气着火延迟时间以及早燃的影响, 同时建立了增压直喷汽油机的动网格, 用以验证在汽油机缸内定容圆柱网格中得到的结论, 并对缸内润滑油液滴诱发早燃的详细过程进行研究。

1.2.1 定容圆柱网格 模型 1 采用直径为 84 mm (约等于气缸直径)、高度为 10 mm 的定容圆柱网格, 该网格用来模拟增压直喷汽油机压缩上止点的热力学状态, 网格总数为 72 000。计算区域内设定充满当量比为 1 的均质汽油/空气混合气, 汽油选用正庚烷和异辛烷的混合物替代, 以耦合本文的 PRF 骨架反应机理。辛烷值为 93, 是常规车用汽油辛烷值。通过用户子程序 droico.f 定义了润滑油液滴的位置、粒径以及温度等参数, 润滑油液滴的位置固定在圆截面右侧 5 mm 高度处, 如图 4 所示。

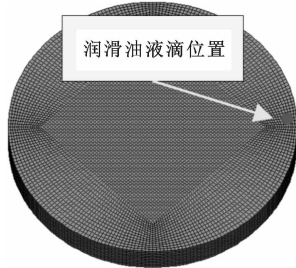


图 4 定容圆柱网格和润滑油液滴位置示意图

1.2.2 发动机动网格 模型 2 为基于某增压直喷汽油机(发动机参数见表 1)建立的发动机的动网格, 上止点网格总数为 353 756, 下止点网格总数为 602 860, 如图 5 所示。根据增压直喷汽油机易于产生早燃的

低速大负荷工况,设定发动机转速为 1 600 r/min,最大扭矩为 280 N·m,增压压力为 0.19 MPa。相应地设置了计算的初始条件和边界条件,其中进、排气口温度分别设定为 320 K 和 990 K,进、排气口压力分别设定为 0.19 MPa 和 0.22 MPa。计算的湍流模型选择 $k-\epsilon$ 模型,算法采用 PISO 算法。通过建立多组分喷雾蒸发模型来预测直喷发动机喷雾油束的发展及雾化蒸发过程;通过耦合本文汽油替代物骨架反应机理来模拟汽油的着火延迟时间和层流火焰速率;利用特征时间法建立基于复杂化学反应动力学的湍流燃烧模型,来模拟多组分汽油混合气的湍流燃烧过程^[9]。

表 1 发动机基本参数

参数	数值	参数	数值
缸径/mm	84	连杆长度/mm	147.9
冲程/mm	90	压缩比	10.3
活塞销偏置/mm	0.8		

为了研究增压直喷汽油机工作过程中润滑油液滴蒸发对缸内工质着火及火焰传播过程的影响,假设在发动机压缩行程后半段,由于活塞的减速运动使得润滑油液滴因惯性力从活塞间隙处的油膜内飞溅出来。润滑油液滴的初始运动速度定义为活塞运动的瞬时最大速度,为 7.8 m/s,初始运动方向定义为与垂直方向成 10° 的方向,如图 6 所示。

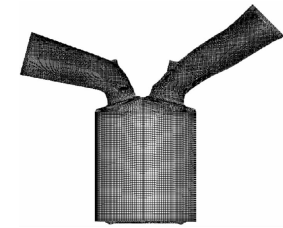


图 5 增压直喷汽油机动网格

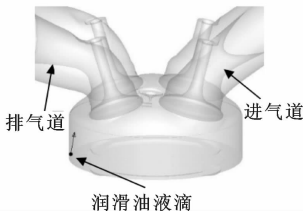


图 6 润滑油液滴的初始位置及运动方向示意图

2 结果分析

本文通过耦合化学反应动力学,依次在定容圆柱网格和增压直喷汽油机动网格中,针对润滑油液滴对汽油/空气混合气自燃过程的影响进行了多维数值模拟研究。值得注意的是,在 STAR-CD 中,润滑油替代物的选取将直接影响模拟结果,润滑油液滴的替代物和蒸发产物需要分别进行定义。在本文的骨架反应机理的 41 种反应物中,正庚烷能够较为恰当地模拟润滑油组分良好的着火性能^[1],所以选用正庚烷作为润滑油液滴替代物,并在定容圆柱网

格内研究了润滑油液滴对汽油/空气混合气着火延迟时间的影响。着火延迟时间定义为混合气温度上升梯度为 400 K 所经历的时间。

图 7 给出了润滑油液滴粒径对汽油/空气混合气着火延迟时间的影响,其中润滑油蒸发产物为正庚烷,润滑油液滴温度为 440 K,混合气温度为 760 K,混合气压力为 4 MPa(与发动机增压压力为 0.2 MPa 时压缩上止点压力相当)。由图中可以看出:当混合气中存在用正庚烷替代的润滑油液滴时,混合气的着火延迟时间比没有润滑油液滴时(3.0 ms)缩短;随着润滑油液滴粒径的增大,混合气的着火延迟时间先逐渐减小后逐渐增大;当液滴的粒径在 45 μm 左右时,混合气的着火延迟时间(2.21 ms)最短。这是因为:当液滴粒径较小时,其氧化过程不足以提供火焰传播所需要的热值,火焰不能够向外传播;当液滴粒径较大时,液滴蒸发吸热现象较明显,混合气周围温度降低,氧化过程较缓慢。

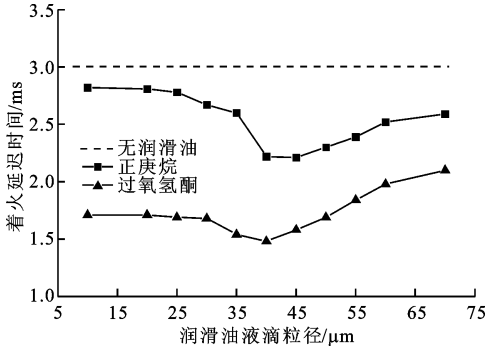


图 7 汽油/空气混合气着火延迟时间与润滑油液滴粒径的关系

值得注意的是,当正庚烷直接作为润滑油蒸发产物时,混合气的着火延迟时间最短达到 2.21 ms,比无润滑油时最多缩短了 0.79 ms。在发动机转速为 1 600 r/min 的低速工况下,即使不考虑活塞的下行运动,混合气着火延迟角度也只能减小 7.6°,这说明正庚烷作为润滑油蒸发产物时汽油/空气混合气的着火延迟时间仍然较长,直接诱发混合气自燃的可能性较低,混合气的早燃可能是由除正庚烷以外的与润滑油相关的其他物质导致的。

Palaveev 等利用着火性能更好的正十六烷作为润滑油蒸发产物进行了模拟,发现直到压缩行程末期缸内混合气仍未出现着火现象^[4],说明诱发早燃的根本物质应该不是正构直链烷烃。烃类低温燃烧的中间产物过氧化物的着火延迟时间比正构直链烷烃更短,这可能是诱发缸内混合气早燃的根本物质。根据本文骨架反应机理的路径分析,在低温反应区,

烷烃通过脱氢、加氧、异构化、二次加氧、二次异构化和最终的离解反应生成了稳定的中间基过氧氢酮, 根据 Magar 等人的研究, 过氧氢酮在整个低温反应阶段是活性最强的稳定中间基^[13], 所以本文认为过氧氢酮更有可能是诱发早燃的根本物质。

图 8 给出了定容圆柱网格内不同辛烷值汽油/空气混合气自燃时过氧氢酮浓度随时间的变化, 其中润滑油液滴温度为 760 K, 混合气压力为 4 MPa。由图中可以看出, 随着辛烷值的降低, 即正庚烷比例的增加, 混合气内过氧氢酮浓度峰值的出现时间提前, 这说明正庚烷的存在会促进稳定中间基过氧氢酮的生成。因此, 在润滑油液滴(正庚烷)的作用下, 液滴周围混合气会有较高浓度的过氧氢酮, 当其积累达到一定量之后就有可能使混合气在点火之前发生自燃。

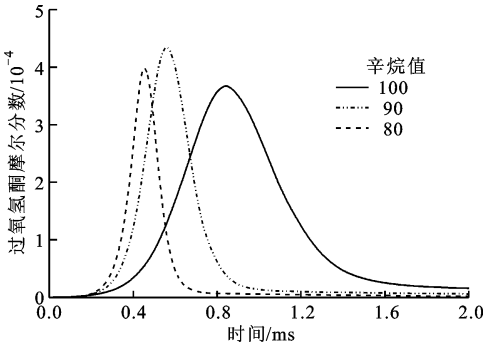


图 8 不同辛烷值混合气自燃时过氧氢酮浓度的变化

基于以上结论, 为了简化问题, 本文选取过氧氢酮作为润滑油的蒸发产物, 由此研究了润滑油液滴粒径对混合气着火延迟时间的影响, 结果见图 7。对比图中的结果可以看出: 正庚烷、过氧氢酮随液滴粒径的变化趋势相同, 当过氧氢酮作为润滑油蒸发产物时, 混合气的着火延迟时间最短达到 1.43 ms, 比无润滑油液滴时缩短了 1.57 ms, 对应的着火延迟角度减小了 15°, 说明过氧氢酮的存在相较于正庚烷大大缩短了混合气的着火延迟时间, 过氧氢酮更有可能是导致缸内工质早燃的重要物质。

图 9 给出了润滑油液滴温度对汽油/空气混合气着火延迟时间的影响, 其中润滑油蒸发产物分别为正庚烷和过氧氢酮, 液滴粒径为 45 μm , 混合气温度为 760 K, 混合气压力为 4 MPa。由图中可以看出, 随着润滑油液滴温度的升高, 混合气的着火延迟时间逐渐缩短。这是因为液滴的表面张力和黏度随着温度的升高而不断降低, 由此加快了液滴的破碎速度, 缩短了蒸发所需时间; 液滴温度升高, 蒸发所需的吸热量有所降低, 由此加快了液滴由液相向气

相的转化, 促进了周围混合气的氧化反应。

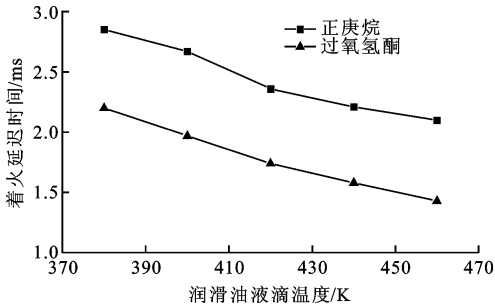


图 9 汽油/空气混合气着火延迟时间与润滑油液滴温度的关系

图 10 给出了润滑油液滴对不同温度混合气着火延迟时间的影响, 其中润滑油蒸发产物分别为正庚烷和过氧氢酮, 润滑油液滴温度为 460 K, 液滴粒径为 45 μm , 混合气压力为 4 MPa。由图中可以看出, 随着混合气温度的升高, 混合气的着火延迟时间逐渐缩短。这是因为混合气温度的上升直接加速了润滑油液滴的蒸发, 促进了润滑油蒸气与汽油/空气混合气的混合, 同时温度的升高也直接加速了混合气的氧化过程。

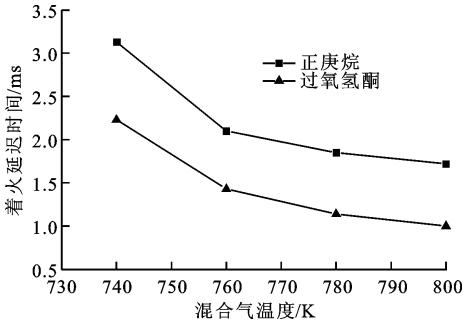


图 10 汽油/空气混合气着火延迟时间与混合气温度的关系

图 11 给出了润滑油液滴对不同压力混合气着火延迟时间的影响, 其中润滑油蒸发产物分别为正庚烷和过氧氢酮, 润滑油液滴温度为 460 K, 液滴粒

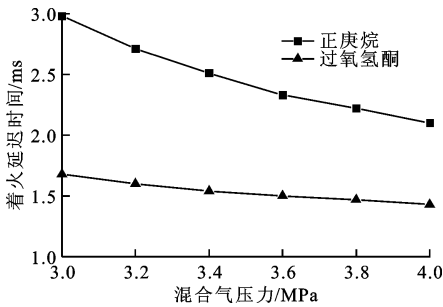


图 11 汽油/空气混合气着火延迟时间与混合气压力的关系

径为 $45\text{ }\mu\text{m}$, 混合气温度为 760 K 。由图中可以看出, 随着混合气压力的升高, 混合气的着火延迟时间逐渐缩短。这主要是当量比一定时, 高压环境下混合气的浓度较高, 而高浓度有利于低温化学反应, 加速了冷焰火焰的传播, 从而促进了润滑油液滴周围混合气的低温氧化过程和自燃。

由图 9~图 11 仍然可以看出: 当过氧氢酮作为润滑油蒸发产物时, 汽油/空气混合气的着火延迟时间相较于正庚烷大大缩短, 说明过氧氢酮更有可能是导致缸内工质早燃的物质。

本文在初次使用正庚烷作为缸内飞溅的润滑油液滴的蒸发产物进行缸内工质的燃烧计算时发现, 润滑油液滴的存在无法促进缸内工质在火花点火之前自燃, 改用过氧氢酮作为润滑油蒸发产物时则成

功地预测了润滑油液滴周围混合气早燃火核的形成及发展过程。

图 12 给出了过氧氢酮作为润滑油蒸发产物时润滑油液滴周围混合气在火花点火之前发生自燃后的缸内温度场分布, 计算时设定润滑油液滴的初始粒径为 $45\text{ }\mu\text{m}$, 温度为 460 K 。由图中可以看出, 火花点火角度在 715° 时, 润滑油附近的混合气已发生自燃现象, 有明确的火核形成, 局部温度迅速上升, 火焰开始向四周传播, 到火花点火角度 720° 时, 缸内已燃面积已达到 $1/3$ 左右。火花点火之后, 由火花点火形成的火焰面与之前润滑油附近混合气自燃形成的火焰面相交, 使得火焰的传播速度加快, 并迅速充满了整个燃烧室。

图 13 给出了 715° 自燃火核形成时过氧氢酮的

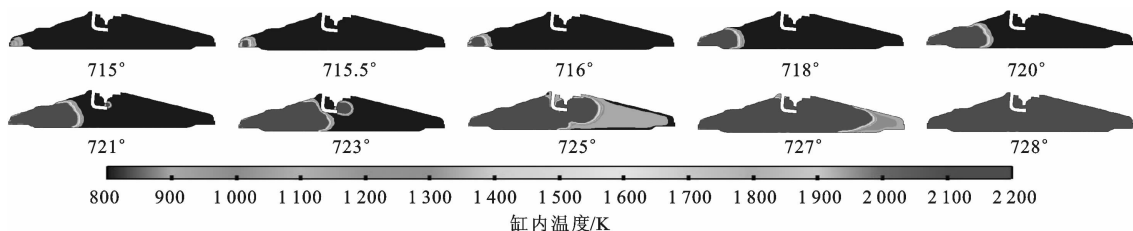


图 12 润滑油液滴周围混合气在火花点火之前、自燃后缸内温度场分布

浓度场分布。由图中可以看出: 活塞减速时飞溅出来的润滑油液滴因蒸发形成的过氧氢酮逐渐向四周扩散, 然后与汽油/空气混合气混合; 火核中心处过氧氢酮具有较高的浓度, 其加速了该区域的低温氧化过程, 促进了火核的进一步形成及火焰的扩散。

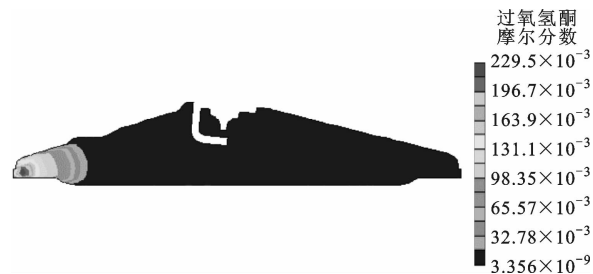


图 13 过氧氢酮浓度场分布

图 14 给出了 715° 燃烧流场的 OH 自由基浓度场分布。OH 自由基浓度可以用来描述火焰面。由图中可以看出, 在自燃的开始时刻, OH 自由基在火核中心处有较高的浓度, 其浓度场分布与过氧氢酮的浓度场分布类似。

综上所述, 一个合理的假设机制可以用来解释润滑油液滴诱发增压直喷汽油机缸内工质的早燃: 增压直喷汽油机的喷雾碰壁现象导致了气缸壁上的润滑油膜黏度、表面张力下降, 使得部分润滑油液滴飞溅、蒸发后与汽油/空气混合气混合, 润滑油组分

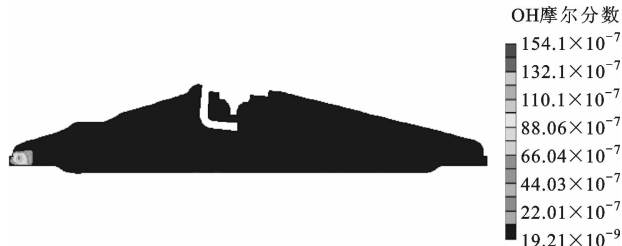


图 14 OH 浓度场分布

(正庚烷)促进了混合气低温氧化过程中稳定中间基(过氧氢酮)的产生, 使活塞间隙处残留的稳定中间基(过氧氢酮)具有较高的浓度, 在经过几个循环的积累后进入燃烧室, 从而缩短了混合气的着火延迟时间, 导致混合气发生早燃。由于整个过程需要满足一定的物理和化学条件, 而且该稳定中间基(过氧氢酮)浓度需要多个循环的积累来提高, 所以该假设也能够间接解释增压直喷汽油机中超级爆震具有偶发性和间歇性的特点。

3 结 论

本文利用化学反应动力学和多维数值模拟的耦合对早燃的诱发机制进行了研究, 得出以下结论。

(1) 本文建立的多组分汽油替代物骨架反应机理能够较为准确地模拟不同辛烷值汽油/空气混合

气的着火延迟时间和层流火焰传播速率,可用于预测内燃机缸内工质的自燃及燃烧过程。

(2)当发动机缸内存在易于蒸发的润滑油液滴时,缸内混合气的着火延迟时间明显缩短,所以润滑油液滴很有可能是增压直喷汽油机中缸内工质发生早燃的一大诱因。

(3)正庚烷作为润滑油蒸发产物时,汽油/空气混合气的着火延迟时间仍较长,说明正庚烷直接诱发早燃的可能性较低。过氧氢酮作为润滑油蒸发产物时,混合气的着火延迟时间明显缩短,说明过氧氢酮更有可能是引发增压直喷汽油机缸内工质早燃的物质,具体诱发机制有待进一步研究与验证。

(4)随着润滑油液滴粒径的增大,汽油/空气混合气的着火延迟时间先缩短后延长,说明存在一个最适宜的润滑油液滴粒径,使得混合气的着火延迟时间最短。润滑油液滴温度和混合气温度、压力的升高也会进一步缩短汽油/空气混合气的着火延迟时间,诱发混合气早燃。

参考文献:

- [1] DAHNZ C, HAN KM, SPICHER U. Investigations on pre-ignition in highly supercharged SI engines [J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(1): 214-224.
- [2] 王志, 龙岩, 王建昕. 增压汽油机中早燃和超级爆震的研究进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2015(1): 17-29.
WANG Zhi, LONG Yan, WANG Jianxin. Research progress of pre-ignition and super-knock in boost gasoline engine [J]. Automotive Safety and Energy, 2015(1): 17-29.
- [3] KALGHATGI G T, BRADLEY D. Pre-ignition and 'super-knock' in turbo-charged spark-ignition engines [J]. International Journal of Engine Research, 2012, 13(4): 399-414.
- [4] PALAVEEV S, MAGAR M, KUBACH H, et al. Premature flame initiation in a turbocharged DISI engine: numerical and experimental investigations [J]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6(1): 54-66.
- [5] TSURUSHIMA T. A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2835-2841.
- [6] ZHENG J, YANG W, MILLER D L, et al. A skeletal

chemical kinetic model for the HCCI combustion process, SAE 2002-01-0423 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2002.

- [7] TANAKA S, AYALA F, KECK J C. A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine [J]. Combustion and Flame, 2003, 133(4): 467-481.
- [8] LIU Y D, JIA M, XIE M Z, et al. Improvement on a skeletal chemical kinetic model of iso-octane for internal combustion engine by using a practical methodology [J]. Fuel, 2013, 103: 884-891.
- [9] 陈锐. 润滑油对增压高强化汽油机早燃爆震影响的数值模拟研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2014.
- [10] FIEWEGER K, BLUMENTHAL R, ADOMEIT G. Self-ignition of SI engine model fuels: a shock tube investigation at high pressure [J]. Combustion and Flame 1997, 109(4): 599-619.
- [11] HUANG Y, SUNG C J, ENG J A. Laminar flame speeds of primary reference fuels and reformer gas mixtures [J]. Combustion and Flame, 2004, 139(3): 239-251.
- [12] STEPINA V, VESELY V. Lubricants and special fluids [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1992: 12-35.
- [13] LAUER T, HEISS M, BOBICIC N, et al. A comprehensive simulation approach to irregular combustion, SAE 2014-01-1214 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2014.

[本刊相关文献链接]

- 汪映, 黄智勇, 柯希春, 等. 液化石油气对二甲醚-柴油双燃料发动机燃烧和排放特性的影响. 2016, 50(5): 19-23. [doi:10.7652/xjtuxb201605003]
- 钟兵, 洪伟, 苏岩, 等. 控制参数对增压缸内直喷汽油机部分负荷下微粒排放特性的影响. 2016, 50(5): 95-100. [doi:10.7652/xjtuxb201605014]
- 胡鹏, 王伟, 邓康耀, 等. 排气再循环与燃烧边界条件耦合对增压汽油机有效热效率的影响. 2016, 50(1): 34-40. [doi:10.7652/xjtuxb201601006]
- 麻斌, 董伟, 高莹, 等. 稀燃条件下废气再循环对缸内直喷汽油机微粒排放粒径分布的影响. 2016, 50(5): 87-94. [doi:10.7652/xjtuxb201605013]
- 高忠权, 李春艳, 刘兵, 等. 采用离子电流法的发动机非正常燃烧诊断. 2015, 49(5): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201505001]

(编辑 苗凌)