

【文章编号】 1004-1540(2011)04-0337-07

高压瞬变下的柴油加热数值仿真

顾乐峰¹, 李孝禄¹, 王 君¹, 许沧粟²

(1. 中国计量学院 机电工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江大学 机械与能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

【摘 要】 提出一种通过加热高压油管内的柴油来降低柴油机冷起动排放和改善冷起动性能的方法. 以某柴油机工作时, 实测的高压油管嘴端与泵端的压力作为边界条件, 建立高压油管内的柴油的加热模型. 运用计算流体力学软件进行非稳态的传热数值仿真, 得到油管内的温度场分布和燃油加热效果. 仿真结果表明, 在合适加热长度和加热温度下, 可以有效提高高压油管内的柴油温度; 加热长度的增加可以防止温度产生较大的波动.

【关键词】 高压瞬变; 柴油; 仿真计算

【中图分类号】 TK421+.1

【文献标识码】 A

Simulation of diesel fuel heating under transient high pressure

GU Le-feng¹, LI Xiao-lu¹, WANG Jun¹, XU Cang-su²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the cold starting and emissions of engine, a new way which utilized the heating elements to preheat diesel fuel in the high-pressure tube was given. A heating model of high-pressure tube was brought forward, and the pressure of tube measured at a Diesel engine as the computational boundary condition. The unsteady heat transfer was simulated using the computational fluid dynamics by the temperature field and heating effect. Simulation results show that the diesel fuel temperature could improve by the right heating size and temperature in the high-pressure tube. And the longer heating length can prevent drastic fluctuations of the temperature.

Key words: transient high pressure; diesel fuel; simulation

随着我国的经济迅速发展,使用化石能源的动力机械保有量逐年攀升.伴随着这些动力机械保有量逐年攀升的是石油资源的日益枯竭和环境污染的日益严重.内燃机作为主要的动力机械,如何降

低其油耗及排放是人们研究的重点^[1-3].方晓敏等^[4]模拟计算了柴油混合二甲醚的喷射过程,通过改善燃料的物性,降低发动机的排放.李孝禄等^[5]对于柴油机燃烧方式的研究发现早喷可以形成均

【收稿日期】 2011-04-15

【基金项目】 浙江省大学生科技创新项目(No. 2010R409036),浙江省公益性技术应用研究计划(No. 2011C21060),浙江省自然科学基金一般项目(No. Y1110666)

【作者简介】 顾乐峰(1987-),男,浙江省宁波人,硕士研究生.主要研究方向为燃烧测试与仿真.

质混合气,降低排放.针对由于内燃机工作温度过低造成的冷启动排放过高和冷启动困难的问题,作者提出了利用加热元件对柴油机高压油管内柴油进行加热来降低它的冷启动排放和改善冷启动性能.柴油机工作时,柴油在高压油管内的压力在几十个大气压到一千多个大气压之间波动,其压力波动的周期在几个到几十个毫秒之间,这就是文章所指的高压瞬变环境.柴油机工作时高压油管内的柴油流动为高压、极快条件下的非定常超强湍流流动.运用流体动力学分析软件数值模拟高压瞬变环境下的柴油加热过程,研究其加热效果.

1 物理与数学模型

对柴油在高压瞬变环境下的加热效果进行仿真,加热图如图1.以管长为500 mm,内径为2 mm的高压油管为例.以某柴油机在1500 r/min,50%负荷工况下实测的高压油管内泵端与嘴端的压力作为油管进口与出口的计算边界条件.油管进口与出口的压力变化如图2,其中,泵端压力即为进口压力,嘴端压力即为出口压力.1500 r/min 转速时,柴油机一次喷油的工作周期为40 ms.柴油进口温度为298 K,加热元件的加热温度固定为398 K.

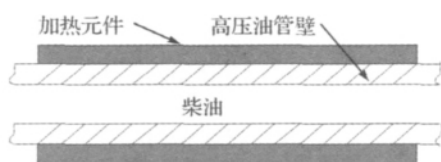


图1 加热模型

Figure 1 Heating model

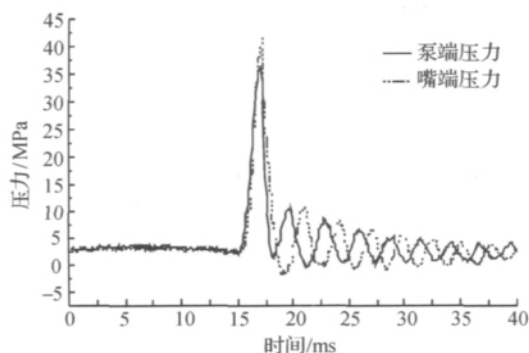


图2 高压油管压力曲线

Figure 2 Pressure in high pressure pipe

高压油管内的柴油流动为湍流运动,在数值仿真计算中,湍流模型采用时均形式的微分方程^[6-8].

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{D(\rho \mathbf{U})}{Dt} = \rho \mathbf{F} - \nabla p + \mu \Delta \mathbf{U} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{D(\rho c_p T)}{Dt} = \Phi + \lambda \Delta T + \rho q \quad (3)$$

其中, $\Phi = 2\mu \epsilon_1^2$

式(1-3)中: \mathbf{U} —速度矢量; p —流体压力; μ —柴油动力粘度; T —柴油温度; c_p —柴油比热容; λ —导热系数; \mathbf{F} —作用在流体上的质量力,在重力场中 $\mathbf{F} = g$; q —柴油吸收的热量; Φ —能量耗散函数; ρ —柴油密度; ϵ_1 —柴油的变形张量,代表流体克服粘性所消耗的机械能,它将不可逆转地转化为热而耗散掉.

在充分发展的湍流区域,反映湍流脉动量对流场影响的湍流动能方程和湍流应力方程可通过标准 $k-\epsilon$ 方程得到^[9,10],形式为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{d}{dx_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$

式中: k —湍流动能; μ_t —湍流粘度; ϵ —湍流动能耗散系数; G_k —由于平均速度梯度引起的产生项; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 C_μ 、 σ_k 和 σ_ϵ —经验常数,各项值分别为1.44、1.92、0.09、1.0和1.3.

2 0.5 m 高压油管计算结果分析

假设柴油开始在油管内静止加热至稳定温度,即398 K.当柴油机工作时,对一个喷油周期内柴油加热效果的变化进行仿真计算,加热长度为500 mm.根据图2中高压油管内泵端与嘴端的压力变化曲线,可以将一个喷油周期的加热过程分

成0~15 ms的压力稳定加热阶段,15~25 ms的压力剧变加热阶段和25~40 ms的压力波动加热阶段.各时刻高压油管内沿中心轴线切面和径向切面的温度场分布,以及相应时刻切面的压力场分布如图3至图5.其中径向切面分别取高压油管0.4 m、0.45 m和出口面0.5 m处.

2.1 压力稳定加热阶段温度分布及分析

图3(a)、4(a)、5(a)为各时刻油管内的压力场分布,管内压差较小.不同时刻稳定加热阶段的温度场如图3(b)、4(b)、5(b).由于高压油管内泵端与嘴端的压力波动较小,使整个管内处于近似稳压流动状态.随着时间的增加,进入高压油管中的较低温度的柴油越来越多,导致油管中的柴油平均温度下降.例如,在2 ms、8 ms、14 ms时,在加热段0.40 m处,随时间增加油管截面柴油平均温度下降.进一步分析表明,油管内的温度分层明显,柴油温度沿轴向方向逐渐增加.在接近管壁处,由于柴油距离加热源较近且流速较慢,柴油温度较高.

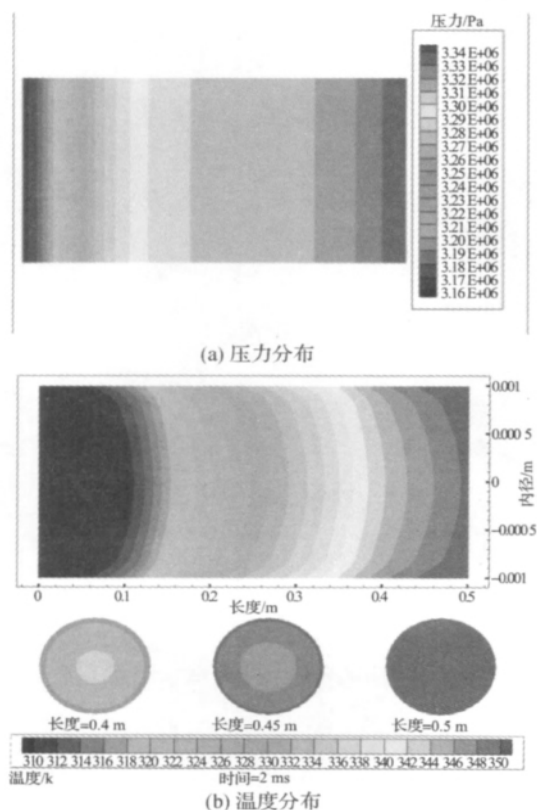


图3 2 ms时压力/温度分布

Figure 3 Pressure and temperature fields at 2 ms

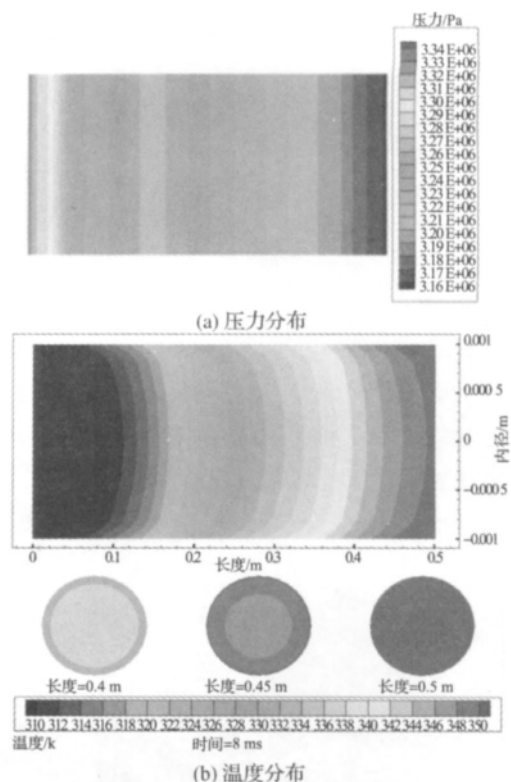


图4 8 ms时压力/温度分布

Figure 4 Pressure and temperature fields at 8 ms

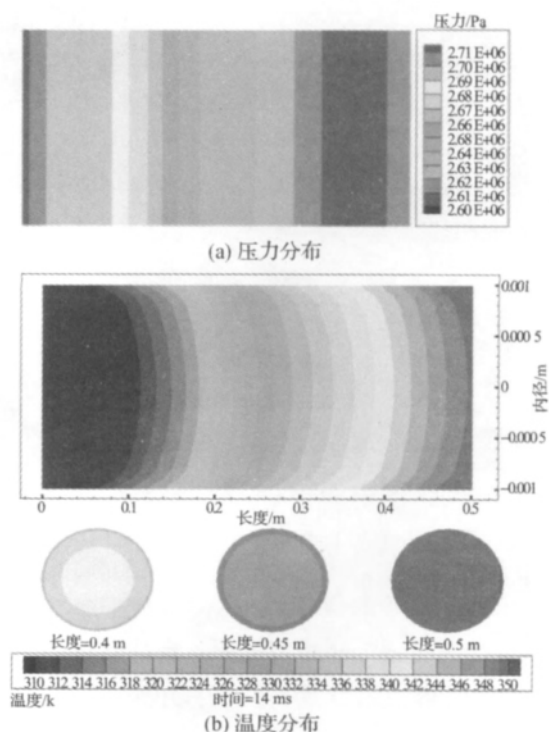


图5 14 ms时压力/温度分布

Figure 5 Pressure and temperature fields at 14 ms

2.2 压力剧变加热阶段温度分布及分析

图6(a)和图7(a)为高压油管内柴油压力处于急剧变化阶段的压力分布. 图6(b)和图7(b)为18 ms、22 ms时刻高压油管内柴油受热的温度场. 此时, 油泵供油开始, 泵端与嘴端之间形成明显的压差, 使柴油的流速增加, 流入加热段的未加热柴油明显增加, 平均温度下降. 供油结束后的一段时间内, 油管内的波动仍然很大. 例如, 在18 ms、22 ms时刻, 在加热段0.40 m处, 随时间增加油管截面柴油平均温度明显下降. 由于柴油流速加快, 传热效果降低, 在同一截面内, 油管内的柴油温度分布明显不均.

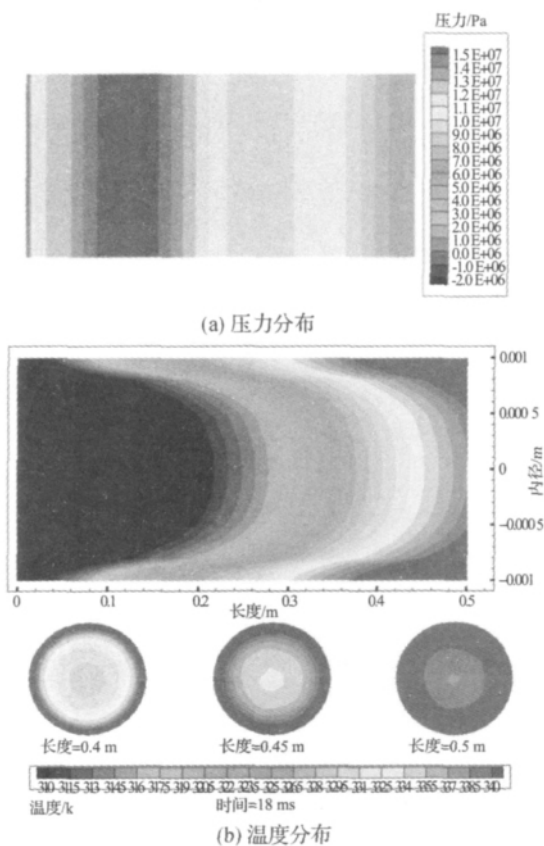


图6 18 ms时压力/温度分布

Figure 6 Pressure and temperature fields at 18 ms

2.3 压力波动加热阶段温度分布及分析

图8(a)、9(a)、10(a)为压力波动加热阶段高压油管内的压力分布. 图8(b)、9(b)、10(b)为不同时刻柴油温度场分布. 在压力波动阶段, 油管内的压力开始逐渐减弱, 柴油流速减慢, 柴油

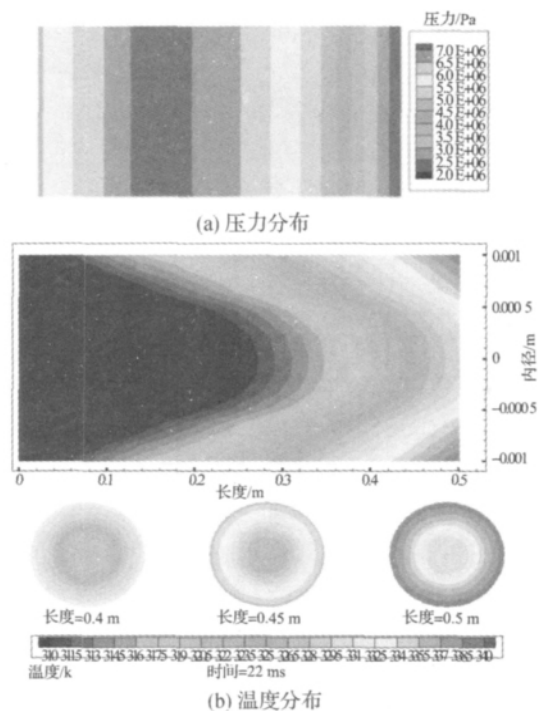


图7 22 ms时压力/温度分布

Figure 7 Pressure and temperature fields at 22 ms

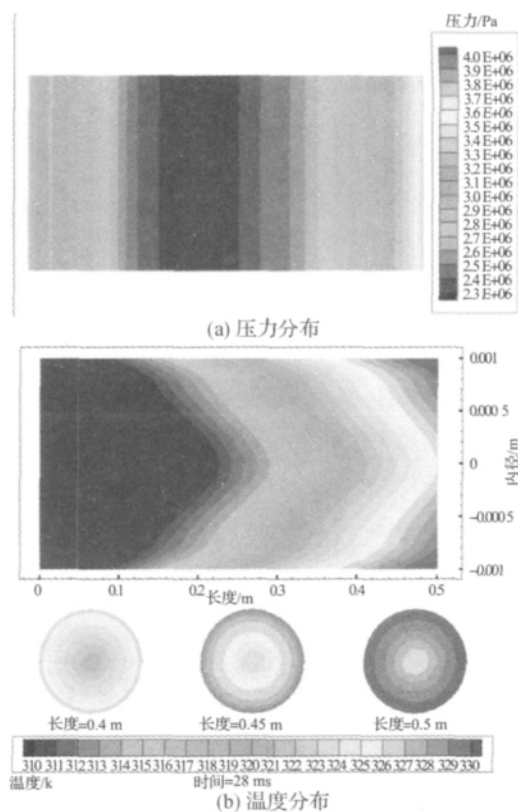


图8 28 ms时压力/温度分布

Figure 8 Pressure and temperature fields at 28 ms

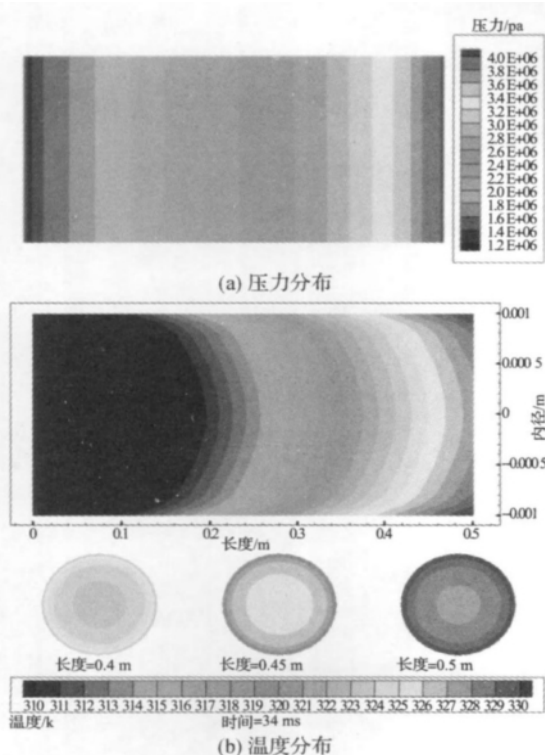


图 9 34 ms 时压力/温度分布

Figure 9 Pressure and temperature fields at 34 ms

的加热效果又趋于稳定. 由于余压的存在, 使管内的压差要高于初始时刻, 柴油流速较大, 柴油的加热温度与初始时刻相比有所降低. 同时, 管内柴油的加热逐渐平稳, 柴油的温度达到一个新的稳定值.

2.4 加热效果分析

图 11 和图 12 给出了一个喷油周期内油管内不同位置的温度及出口处的平均温度.

图中所取温度点为沿油管中心轴线上 300 mm、400 mm 和 500 mm 三处. 由图 11 分析可得, 油泵供油之前, 各点都处于一个相对平衡温度. 当供油开始后, 温度降低, 当喷油结束后, 油温又逐渐稳定. 进一步分析, 油温的分布呈现沿轴向递增的趋势, 越接近出口柴油温度越高. 同时, 柴油的加热温度又具有一个从稳定到降低然后回升, 最后达到一个新稳定值的过程. 分析图 12 可知, 出口处的柴油平均温度在压力剧烈变化时逐渐降低, 当压力再次稳定后, 达到一个新的稳定值. 这个变化过程与高压油管内的压力波动比较吻合.

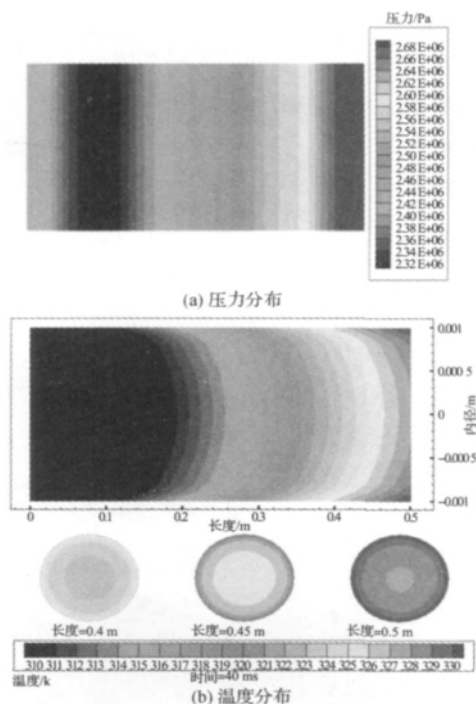


图 10 40 ms 时压力/温度分布

Figure 10 Pressure and temperature fields at 40 ms

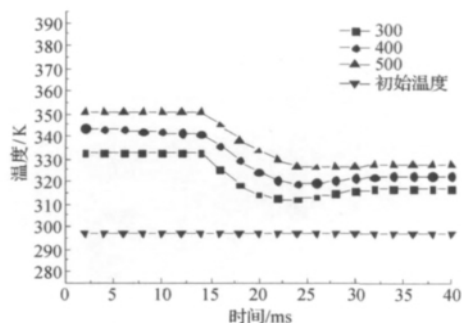


图 11 0.5 m 油管轴向各点温度变化

Figure 11 Axial temperature of 0.5 m pipe

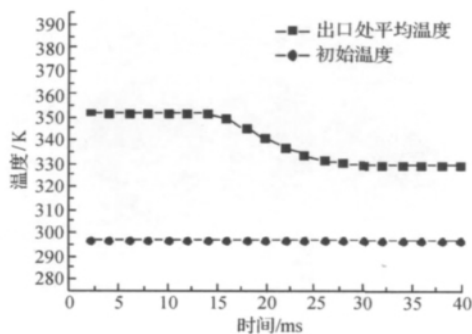


图 12 0.5 m 油管出口处平均温度变化

Figure 12 Average outlet temperature of 0.5 m pipe

3 增加高压油管长度进行仿真计算

由管长为 0.5 m 的高压油管的仿真结果可知,加热出口平均油温为 330 K,远低于初始加热温度 398 K.通过加大加热长度研究加热长度对加热效果的影响.延长高压油管的长度至 0.7 m,油管泵端与嘴端压力采用实测值作为边界条件.

3.1 温度分布分析

图 13~16 为不同加热长度的油管出口面的温度分布.在相同时刻,0.7 m 长高压油管内的柴油平均温度要高于 0.5 m 长高压油管内的柴油.同时,由截面的温度场分布可知,0.7 m 长高压油管的截面温差要小于 0.5 m 长高压油管,即柴油的加热更加充分.加热长度的增加可以提高加热效果,以加热源为 398 K,柴油进口温度为 298 K 为例,增加 0.2 m 的加热长度可以使柴油最终的加热温度提高 30~40 K.

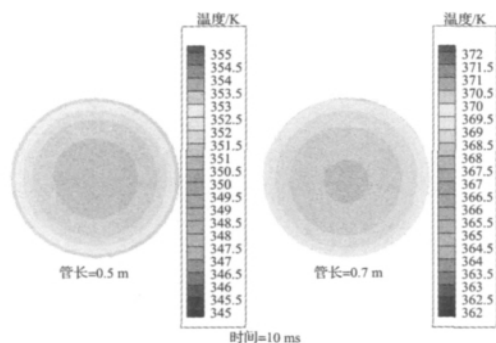


图 13 10 ms 时两种加热段出口处温度分布

Figure 13 Outlet temperature of different heating length at 10 ms

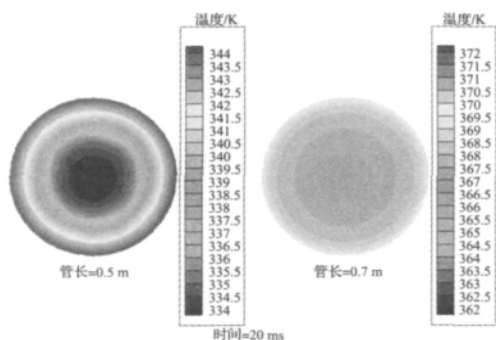


图 14 20 ms 时两种加热段出口处温度分布

Figure 14 Outlet temperature of different heating length at 20 ms

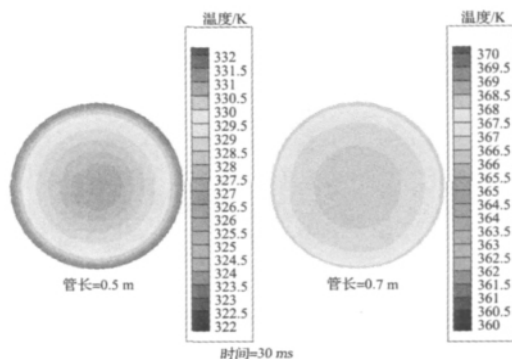


图 15 30 ms 时两种加热段出口处温度分布

Figure 15 Outlet temperature of different heating length at 30 ms

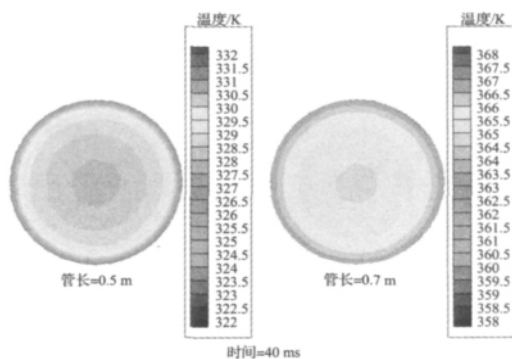


图 16 40 ms 时两种加热段出口处温度分布

Figure 16 Outlet temperature of different heating length at 40 ms

3.2 加热效果分析

图 17 给出了一个喷油周期内油管内不同位置的温度.其中,取油管中心轴线上 500 mm、600 mm 和 700 mm 三处作为不同位置的温度点.由图可知,各点温度随时间变化缓慢降低.

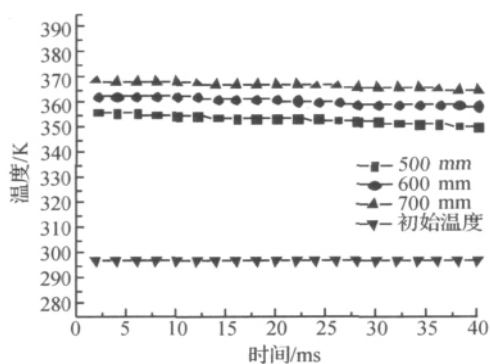


图 17 0.7 m 油管轴向各点温度变化

Figure 17 Axial temperature of 0.7 m pipe

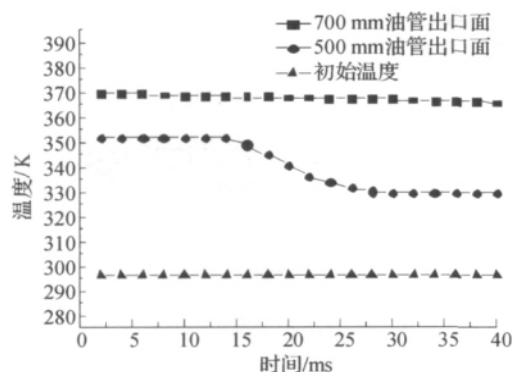


图18 两种加热段出口处平均温度变化

Figure 18 Average outlet temperature of different heating lengths

图18为两种加热长度的高压油管出口面的平均温度,700 mm长高压油管的出口处平均油温基本保持在370 K左右,平均温度高于500 mm长高压油管的出口处油温。根据计算结果可知,管长为0.7 m的高压油管内出口处柴油温度随着时间的变化缓慢降低,加热长度的增加可以防止温度产生较大的波动。

4 结 语

由仿真计算结果可知,尽管高压油管内压力波动很大,但温度的变化相对迟缓;在给定的计算条件下,加热段有一个较合适的加热长度,可以将柴

油加热到合适的温度,例如加热段分别为500 mm、700 mm时,其出口柴油温度分别为330 K、366 K。同时,加热长度的增加可以防止温度产生较大的波动。

【参 考 文 献】

- [1] 蒋德明. 内燃机化石燃料(汽油和柴油)的研究进展[J]. 车用发动机, 2010, 4(2): 2-6.
- [2] 丁 焰, 葛蕴珊, 王军方, 等. 生物柴油发动机PM排放的理化特性研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(2): 39-43.
- [3] 贾全仓, 李俊文, 张 智. 柴油机冷启动预热技术研究[J]. 内燃机, 2009, 6(3): 21-23.
- [4] 方晓敏, 李孝禄, 徐立军, 等. 柴油/二甲醚混合燃料的模拟计算[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(2): 158-162.
- [5] 李孝禄, 李 迎, 冯 娟, 等. 直喷柴油机两种燃烧方式混合气体形成的比较[J]. 中国计量学院学报, 2007, 18(3): 232-236.
- [6] INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T L, et al. 传热和传质基本原理[M], 6版. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007: 318-320.
- [7] 陈红岩, 李 迎, 李孝禄. 柴油机流固耦合仿真计算[J]. 中国计量学院学报, 2006, 17(4): 284-288.
- [8] 陈红岩, 李 迎, 俞小莉. 柴油机流固耦合系统稳态传热数值仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 56-60.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 120-124.
- [10] 朱 霖, 池作和, 孙公钢. 一种适用于煤粉工业锅炉燃烧器的冷态流场特性研究[J]. 中国计量学院学报, 2011, 22(1): 39-43.