

应用 PTC 自控温材料加热柴油机燃油的模拟计算

李孝禄, 顾乐峰, 王 君, 李 迎

(中国计量学院 机电工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了研究柴油发动机中 PTC 材料对柴油的加热效果, 应用集中参数法建立了 PTC 加热系统以及受控对象温度变化的动态特性模型, 并进行了加热效果的仿真分析。计算结果表明, 利用 PTC 材料加热高压油管可以有效提高柴油温度, 并总结出 PTC 材料加热高压油管内柴油的一般规律。

关键词: PTC 材料; 柴油; 温度控制

中图分类号: TK421+.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2011)11-0211-06

0 引言

由于能源紧张和环境保护的迫切性, 近年来各国对汽车排放标准的制定越来越严格。由于汽车排放物中 50% ~ 80% 的碳氢化合物 (HC) 和一氧化碳 (CO) 是在冷起动过程中产生的, 欧 III、欧 IV 和美国 FTP75 测试法规都要求在 -7℃ 环境下开始测试发动机冷起动尾气排放^[1]。我国实施的轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (GB 18352.3-2005) 也同样对 -7℃ 环境下冷起动时总碳氢 (THC) 和 CO 的排放有严格的要求。柴油黏度大, 雾化不良, 易造成柴油机冷启动困难和排放高。为了改善柴油雾化效果, 使其燃烧充分, 一般应用电加热器预热柴油或进气。但是普通的电加热器采用的是一种开环式的控制, 存在很多不足。PTC (positive temperature coefficient) 电加热器是使用一种具有正温度系数的热敏材料作为发热元件, 其电阻率在居里点温度附近随温度升高而急剧升高。因此, 当电压固定时, 其发热功率向着平抑其温度变化的方向急剧变化, 可利用材料自身的物性变化实现自限温加热的目的。合适的 PTC 材料加热燃油不会使其沸腾, 可避免燃油在油管内产生相变^[2-3]。该温度控制系统结构简单、可靠性高、加热迅速, 可用于发动机燃油温度控制^[4]。虽然这种 PTC 温控技术在车辆、建筑、电气等领域有一定程度的应用^[5-7], 但对其的动态特性以及加热效果的研究并不多见。

本文通过研究 PTC 材料电加热在柴油机高压油

管温度控制系统中的应用效果, 建立这种温度控制系统的动态传热模型, 模拟不同传热材料、不同加热结构尺寸下的燃油加热情况; 同时, 利用模拟计算的结果对实际应用进行了分析, 得出 PTC 材料加热柴油提高温度的一般规律。

1 PTC 材料的介绍

正温度系数效应是 1950 年荷兰飞利浦公司的海曼首先发现的^[8]。PTC 效应即电阻在居里温度点以上的温区会突然增高。通常所说的 PTC 材料是指具有非线性 PTC 效应的材料, 即材料的电阻率在某一一定的温度范围内仅有很小的变化, 而当温度达到对材料的特定转变点温度 (居里温度) 附近时, 材料的电阻率会在几度或几十度狭窄的温度范围内发生突变, 电阻率迅速增大 $10^3 \sim 10^9$ 数量级。

目前, 主要的 PTC 材料分为陶瓷基 PTC 材料和高分子基 PTC 材料两种类型^[9-10]。陶瓷基 PTC 材料在 1950 年由荷兰飞利浦公司的海曼最早发现并公开报道的, 经贝尔实验室和日本村田制作所于 1961 年实用化, 现在仍以 BaTiO₃ 基和 V₂O₅ 基为主。高分子基 PTC 复合材料是以有机聚合物 (大多数为结晶聚合物, 如聚乙烯、聚丙烯、聚偏氟乙烯和聚环氧乙烷等) 为基体, 掺入炭黑、石墨或金属粉、金属氧化物等导电填料, 经过特殊设计, 采用分散复合、层积复合以及形成表面导电膜等方式制得的一种多相复合高分子导电体。前者起骨架与填料载体的作用, 后者起电流通道的作用, 受热时聚合物膨胀, 碳链断裂形成高阻。它最先由 Frydman 在 1948 年首先发现, 但当时没有引起人们的重视。直到 1966 年 Kohler 报道了聚乙烯-复合材料具有 PTC 特性后, 才引起人们的广泛关注。工业化高分子基 PTC 复合材料是 20 世纪 80 年代初

收稿日期: 2011-01-05

基金项目: 浙江省大学生科技创新计划项目 (2010R409036)

作者简介: 李孝禄 (1968-), 男, 湖北大悟人, 副教授, 博士, (E-mail) lx2006@cjlu.edu.cn.

由美国首先开发成功的。虽然高聚物基的 PTC 材料准变温度低一些,但其成本低、易加工成型和可设计性好等特点是陶瓷基材料所不可代替的。

2 模型的建立

PTC 材料加热柴油机燃油的加热结构,如图 1 所示。在高压油管外包裹 PTC 材料。假设 PTC 材料加热的保温系数为 1,对外界环境没有热扩散。

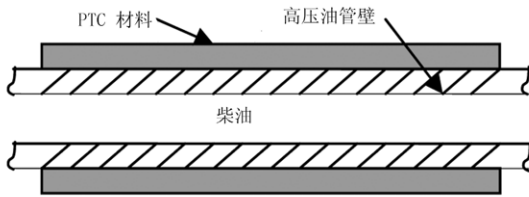


图 1 加热结构

Fig. 1 Structure of heating diesel fuel

为了分析其温度控制系统工作机理和控制效果,采用集中参数法^[11],将该控制系统分为 PTC 加热部分、高压油管和燃油(柴油)共 3 个集中参数对象。并近似认为 PTC 加热部分的导线电阻远小于其热敏发热元件的电阻,则根据焦耳定律可得到 PTC 加热部分的发热功率为

$$Q_p = \frac{U_p^2}{R_p} \quad (1)$$

其中, U_p 为 PTC 加热部分的输入电压; R_p 为发热元件的电阻。

设发热元件的电阻温度系数为 α_p , 根据有关研究可得^[12]

$$\alpha_p = \frac{1}{R_p} \frac{dR_p}{dT_p} \quad (2)$$

其中, T_p 为发热元件的温度。

由此可以得到 PTC 加热部分的电阻变化的动态方程为

$$\frac{dR_p}{dt} = \alpha_p R_p \frac{dT_p}{dt} \quad (3)$$

根据能量守恒定律,由式(1)可得 PTC 加热部分的温度变化的动态方程为

$$C_{ip}\rho_p\pi\left(\frac{D_1^2 - D_2^2}{4}\right)l\frac{dT_p}{dt} = \frac{U_p^2}{R_p} - K_{pm}\pi D_2 l(T_p - T_m) \quad (4)$$

其中, C_{ip} 为 PTC 材料的比热容; ρ_p 为 PTC 材料的密度; D_1 为包裹 PTC 材料后的油管外径; D_2 为高压油管的外径; l 为加热长度; K_{pm} 为 PTC 加热部分与高压油管之间的导热系数; T_m 为高压油管的温度。

根据能量守恒定律,同样可以得到高压油管的温度变化的动态方程为

$$C_{im}\rho_m\pi\left(\frac{D_2^2 - D_3^2}{4}\right)l\frac{dT_m}{dt} = K_{pm}\pi D_2 l(T_p - T_m) - K_{mf}\pi D_3 l(T_m - T_f) \quad (5)$$

其中, C_{im} 为高压油管的比热容; ρ_m 为高压油管材料的密度; D_3 为高压油管的内径; K_{mf} 为高压油管与柴油之间的导热系数; T_f 为柴油的温度。

对高压油管内静止的柴油进行加热,根据能量守恒定律,得到柴油的温度变化的动态方程为

$$K_{mf}\pi D_3 l(T_m - T_f) = C_{if}\rho_f\pi\frac{D_3^2}{4}l\frac{dT_f}{dt} \quad (6)$$

其中, C_{if} 为柴油的比热容; ρ_f 为柴油的密度。

式(3)~式(6)一起构成了应用 PTC 材料加热柴油发动机的油温控制系统的模型。由模型可知,不同的 PTC 加热材料,不同的高压油管的材料,各热控环节间的导热值以及高压油管的不同尺寸结构都会对柴油加热效果产生重要的影响。

3 模拟结果与分析

3.1 PTC 材料加热效果

首先,利用建立的模型对高压油管内柴油的加热效果进行数值模拟。假设高压油管的内径和外径分别为 2.7mm,包裹 PTC 材料后的外径为 14mm,加热管长为 1m。PTC 材料的电阻温度系数为 15%/K。高压油管的材料为冷拉钢。由于 PTC 加热部分在通电后迅速越过其居里点温度达到热平衡,且方程(1)表示的是 PTC 材料在越过居里温度点后的线性特性。所以,方程的初始条件中,PTC 加热部分的初始温度设为其居里点,油管及柴油温度定为室温。PTC 加热部分在安装时直接包裹在油管壁外,接触表面不做任何处理,模拟时间为 10min,则可以得出如图 2 所示的加热效果。

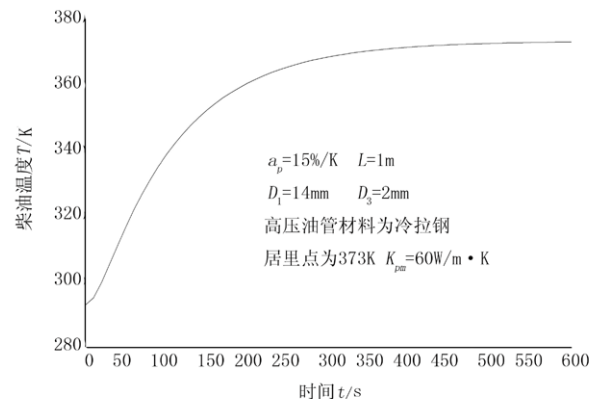


图 2 加热效果

Fig. 2 Heating effect

由图 2 可知, 0 ~ 5min 时, 柴油温度迅速上升, 5min 以后逐渐趋于平稳, 7 min 达到居里温度点附近。可见 PTC 材料加热柴油迅速, 并使柴油稳定在设定的温度。

对于不同的 PTC 材料, 其电阻温度系数也不同。在其它影响因素不变的情况下, 对不同电阻温度系数下柴油加热效果进行模拟。模拟结果表明, 当电阻温度系数分别为 20% /K 和 25% /K 时, 柴油温度分别下降 0.019% 和 0.029%。可见 PTC 材料电阻温度系数的改变对柴油加热效果的影响很小, 可以忽略不计。在下面的模拟计算中电阻温度系数均设定为 15% /K。电阻温度系数表示电阻当温度改变 1℃ 时, 电阻值的相对变化。电阻温度系数的增加意味着材料一旦加上电压就立即升温, 使电阻率突升, 达到室温电阻的几倍、几十倍乃至上千上万倍。而 PTC 材料达到居里点温度是一个非常迅速的过程, 所以本文模拟计算的初始条件是建立在 PTC 发热体已达到居里点温度的基础上的, 而且在 PTC 发热体的 PTC 效应温度区间中, 单位温度的改变所带来的电阻率的变化对于额定电压为 24V 的 PTC 材料而言, 电阻温度系数的增加几乎不会对加热效果产生影响。

假设加热长度分别选为 500, 1500mm, 其它条件不变时, 柴油加热温度分别上升 0.011% 和下降 0.019%。当 PTC 材料的厚度分别为 4.5, 5.5mm 时, 柴油加热温度几乎不变。加热长度以及 PTC 材料厚度的变化均是改变 PTC 发热体的结构, 而对其自身温度的提高影响不大。在下面的模拟计算中加热长度选为 1m, 包裹 PTC 材料后的模型外径选为 14mm。

3.2 柴油静止时计算结果与分析

在上述给定的初始条件下, 分别改变油管壁厚、油管内径、PTC 加热部分与油管壁之间的导热系数、油管材料和不同居里点温度的 PTC 材料, 模拟柴油静止(未流动)时加热温度的变化规律。

当改变油管壁的厚度时, 加热效果随着管壁的增厚而下降, 如图 3 所示。当管壁厚度分别增加 0.5, 1mm 时柴油的升温速度随着管壁的增厚而降低。外径为 7mm 的油管内柴油温度在 7min 左右时首先达到居里温度点附近; 9min 后, 3 种油管内的柴油温度均维持在居里温度点附近。若只改变油管内径, 假使内径分别增加 0.5, 1mm 时, 柴油的升温速度则随内径的增加而减小, 如图 4 所示。

在 0 ~ 3min 的加热时间内, 油管内径越小则油管内的柴油升温速度越快; 3min 后 3 种油管内的柴油达到同一温度, 以相同升温速率加热至平衡温度。

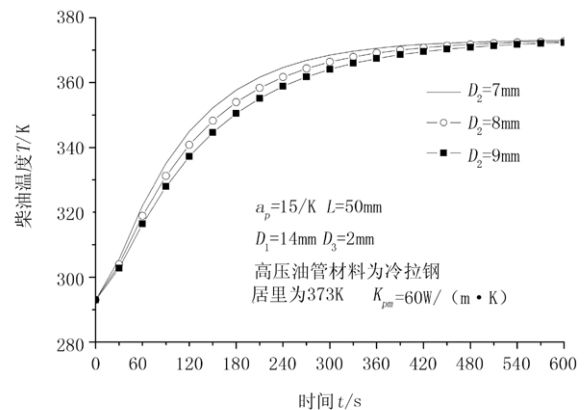


图 3 改变管壁厚度时的加热效果

Fig. 3 Heating effect by changing thickness of pipe

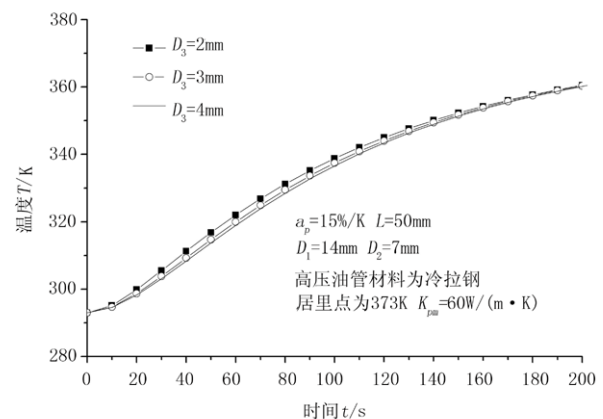


图 4 改变油管内径时的加热效果

Fig. 4 Heating effect by changing radius of pipe

当高压管壁的厚度增加时, 由分析模拟计算的结果可知, 在相同的加热时间, 柴油的温度随着壁厚的增加而降低。如在加热时间达到 5min 时, 随壁厚增加, 柴油温度依次为 368.51, 366.39, 364.14K。但因为 PTC 发热温度相同, 最终柴油温度都会趋于一个相同值。根据傅里叶导热定律, 单位时间内通过某一导热材料的导热热量与该材料的厚度的增加成反比, 所以随着高压油管壁厚的增加, 加热效果降低。

直接使 PTC 加热部分对油管壁进行接触式加热, 由于导热系数较小, 加热效果较差。为此, 本文设想对两者的接触面进行处理, 分别敷设铝粉和铜粉以增大导热系数。铜粉的导热性优于铝粉, 加热效果随着导热系数的增加而明显提高, 柴油的升温速度较快, 如图 5 所示。

采用铜粉和铝粉时, 3min 后均能达到居里温度点附近。当 PTC 材料与油管直接接触时, 由于导热性较差, 柴油的升温速度明显降低, 需要 7min 左右才能达到居里温度点附近。在下面的模拟计算中, 接触表面之间敷设导热良好的铜粉, 油管内径和外径的厚度分别为 2, 7mm。

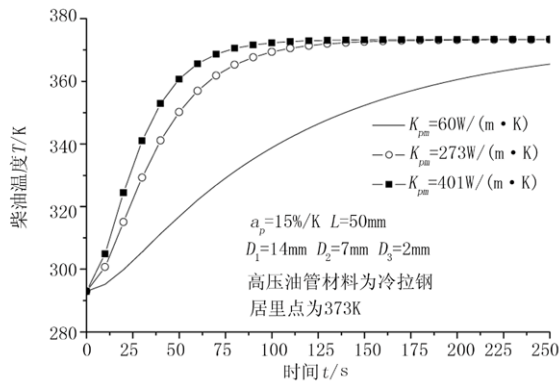


图 5 改变 PTC 加热部分与油管壁之间的导热系数

Fig. 5 Different thermal conductive coefficient between heating section and pipe

当油管材料改变后,模型方程参数中,油管材料的导热率、比热容和密度也随其改变。分别采用黄铜和铜代替原先的冷拉钢,导热率和密度都相应增加,而比热容则减小。改用有利于热传导的油管材料后,加热效果都有一定的提高,如图 6 所示。油管材料为冷拉钢时,柴油温度需要 3min 才能达到居里点附近,如果油管材料采用黄铜或铜,只需 1min 左右。选用不同居里温度点的 PTC 材料加热柴油,加热效果如图 7 所示。

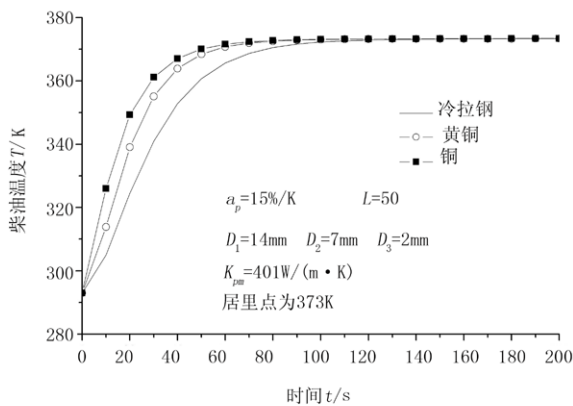


图 6 采用不同的油管材料

Fig. 6 Different pipe materials

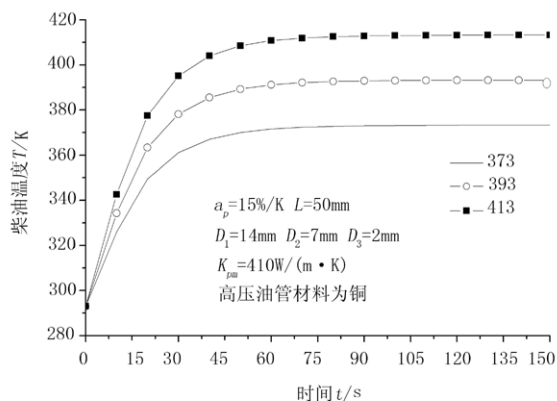


图 7 不同居里点 PTC 材料加热效果

Fig. 7 Heating effect by different Curie Points

PTC 材料居里点温度每增加 20K,柴油加热平衡温度可提高 5.4%,加热速度明显提高。改变 PTC 材料以获得不同的居里温度,其目的就是为了提高 PTC 加热部分的最终平衡温度。

3.3 柴油流动时计算结果与分析

发动机启动前,柴油在静止状态下被加热到居里点温度附近,这部分的柴油可以有效改善发动机冷启动的排放性能。当发动机启动后,静止的柴油逐渐喷入气缸,同时不断有柴油进入 PTC 材料加热段。静止时被加热的那部分柴油喷完后,流动的柴油就充满加热段。因此,有必要研究流动的柴油最终加热效果。由于启动转速和油管内径不同,柴油经过 PTC 加热段的时间不同,即流动的柴油被加热时间不同,从而造成这部分柴油的加热效果也不同。

对长度为 1m,内径为 2mm 油管应用 PTC 材料加热,管内燃油质量由公式 $m = \rho V$ 可知,其柴油质量为 2.7g。假设发动机为 2 缸 4 冲程,怠速时转速为 300r/min,每循环喷油为 10mg。计算得油管内的平均流量为 0.1g/s。因此,静止时被加热的柴油将在 27s 后喷完。当油管内径为 2mm,发动机转速为 200,300,400,500r/min 时,油管内流动的柴油喷完耗时分别为 40,27,20,16s。当油管内径为 3mm 时,相应转速下的喷完耗时分别为 90,61,46,36s,如图 8 所示。

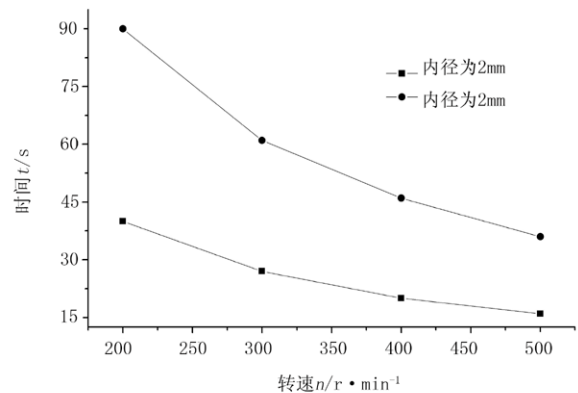


图 8 不同内径下加热的柴油喷完耗时

Fig. 8 Time for diesel fuel injection by different radius of pipe

当油管内径为 2mm,柴油初始温度为 393K 时,由图 8 所示的加热时间可得,在不同转速下,不同油管材料中流动的柴油被加热后的温度如图 9 所示。在相同转速下,导热性能较好的铜制油管内的柴油最终加热温度高于冷拉钢管内柴油的最终加热温度。如当转速为 400r/min 时,即油管内流动的柴油被加热的时间为 20s 时,铜制油管内的柴油最终加热温度比冷拉钢管内的柴油最终加热温度提高 7.7%。同时随着转速的增加,即加热时间的缩短,相同油管材料内的柴油

加热后的温度有所下降。

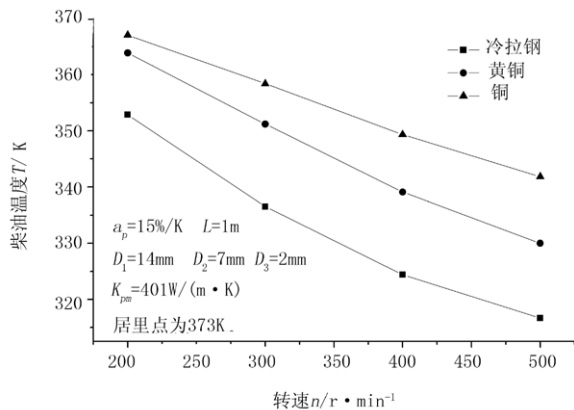


图 9 内径为 2mm 时不同油管材料的加热效果

Fig. 9 Heating effect for different materials of pipe as its radius 2mm

当油管内径增大到 3mm,柴油初始温度为 393K 时,根据图 8 所示的加热时间,在不同转速下、不同油管材料中流动的柴油被加热后的温度如图 10 所示。相同转速下,导热性能较好的油管材料,油管内的柴油被加热后的温度高于导热性能差的油管材料。当转速为 400r/min 时,铜制油管内的柴油最终加热温度比冷拉钢油管内的柴油最终加热温度提高 5.3%。在低转速时,不同油管材料中的柴油加热后的温度较为接近;当转速增加时,不同油管材料中的柴油加热后的温度均降低。其中,冷拉钢油管内的柴油加热后温度下降明显,平均每增加 100r/min,柴油加热后的温度下降 10K。

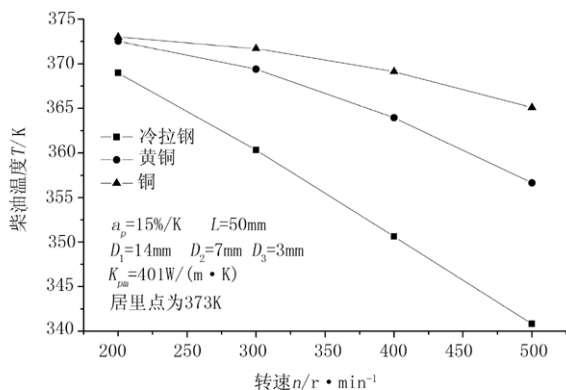


图 10 内径为 3mm 时不同油管材料的加热效果

Fig. 10 Heating effect for different materials of pipe as its radius 3mm

在 PTC 加热材料与油管之间铺设不同导热材料可以改变导热性能。柴油初始温度为 393K,不同转速下,不同铺设条件的柴油加热后的温度如图 11 和图 12 所示。随着转速的增加,加热后的温度均有所降低。但在相同转速下,铺设易导热材料后,加热后的温度明显高于直接接触时的柴油温度。当转速为 400r/min 时,油管内径增为 2mm 时,铺设铜粉后柴油加热后温

度比直接接触方式下的柴油最终加热温度提高 6.1%;转速仍为 400r/min,油管内径增大到 3mm 时,则提高 12.2%。

由此可知,无论是 PTC 材料与油管之间的导热性能的不同还是油管材料的改变,加热的效果都会随着转速的增加而降低,但在相同条件下,内径为 3mm 的油管的加热效果普遍比内径为 2mm 的油管的加热效果有所提高。

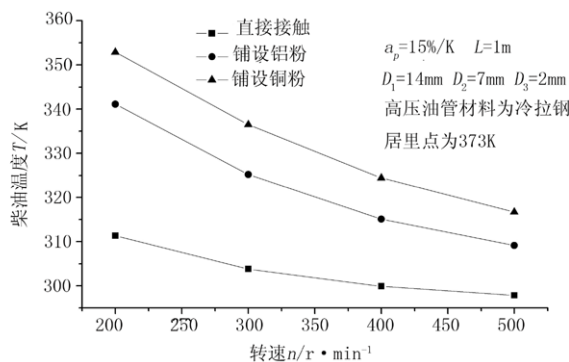


图 11 内径为 2mm 时不同铺设条件的加热效果

Fig. 11 Heating effect for different laying materials as its radius 2mm

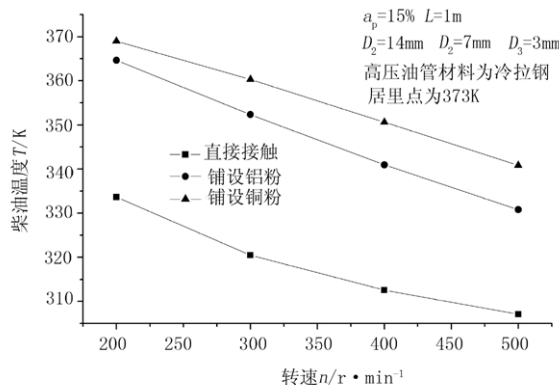


图 12 内径为 3mm 时不同铺设条件的加热效果

Fig. 12 Heating effect for different laying materials as its radius 3mm

4 结论

1) 静止加热完成后,柴油温度均保持在 PTC 材料的居里温度点附近。提高 PTC 材料、高压油管以及柴油三者间的热导率均可有效提高柴油加热的速度,其中以增大 PTC 材料与高压油管间的热导率对温度的影响最为明显。

2) 若改用居里温度点高的 PTC 材料进行静止柴油加热,不仅可以有效提高柴油的加热速度,也可以提高柴油最终的平衡温度,但过高的加热温度可能导致油管内气泡的产生。增加高压油管壁的厚度以及增大油管内径都会对静止柴油加热效果产生不良影响,导致加热速度的降低。

3) 在本模拟计算条件下,改变 PTC 材料的电阻温度系数,加热的长度以及 PTC 材料的厚度对于加热效果的影响较小。

4) 发动机的转速对柴油流动时的加热效果有很大的影响,转速的增加会导致加热效果的降低,但适当的增加油管的内径则有利于改善流动柴油的加热效果。

参考文献:

- [1] N. A. Henein, M. K. Tagomori. Cold-start hydrocarbon emissions in port-injected gasoline engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(6): 563-593.
- [2] 高殿柱,刘义龙,刘豫湘. 自控温材料在机车空气管路系统的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2005(2): 20-22.
- [3] 谭洪生,王日辉,李丽,等. 复合型高分子自限温发热材料及元器件在汽车冷启动方面的应用[J]. 塑料工业, 2004(12): 51-57.
- [4] 易回阳,肖建忠,甘章华,等. 高分子基 PTC 复合材料的研究及其应用[J]. 化学研究与应用, 2003(6): 749-752.
- [5] 李孝禄,赵雪菲,许翔,等. PTC 材料加热柴油的动态温度测试系统[J]. 农机化研究, 2008(4): 202-204.
- [6] 方晓明,李孝禄,特木乐,等. 一种带正温度系数材料加热的柴油喷油器[J]. 机电工程, 2009(1): 95-98.
- [7] 李孝禄,王君,李迎,等. 一种内置正温度系数陶瓷加热材料的喷油器: 中国, 200710070599.6 [P]. 2007-09-04.
- [8] 祝炳和,姚尧,赵梅瑜,等. PTC 陶瓷制造工艺与性质[M]. 上海: 上海大学出版社, 2001.
- [9] 徐海萍,党智敏,施昌勇. 聚合物基复合材料 PTC 效应理论及性能影响因素研究进展[J]. 高技术通讯, 2008(12): 1315-1319.
- [10] 霍伟荣. BaTiO₃ 基复合 PTC 材料的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [11] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 贾德昌. 电子材料[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.

Simulation of Fuel Temperature of Diesel Engine Heating by PTC Materials

Li Xiaolu, Gu Lefeng, Wang Jun, Li Ying

(School of Electromechanical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The PTC materials, as a kind of positive temperature coefficient materials, are used to heat diesel fuel in the high-pressure fuel pipe near the injector in diesel engine, which have a lot of characteristics, such as simple structure, safe and rapid heating, and stable heating temperature around its curie point. In order to study its heating effect on diesel fuel of the high pressure fuel pipe, the dynamical models for both the controlled object and PTC heater are presented by the way of lumped parameter, and the heating effects are also simulated and analyzed. The calculation results show that the diesel temperature is heated by the PTC materials effectively. Meanwhile, the heating law by PTC materials heating diesel fuel in the high pressure fuel pipe of engine is also summarized.

Key words: PTC materials; diesel fuel; temperature control