DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202505046

柴油机高原起动过程及火焰进气预热试验

王宇满[1]，丛明辰[1]，沈宏继[2]，史中杰[1]，黎一锴[1]，李向荣[1]
（1. 北京理工大学机械与车辆学院，北京 100081；2. 中国人民解放军 63963 部队，北京 100072）

摘要：针对柴油机高原起动困难问题，基于高原环境试验舱模拟 5 km 海拔条件，开展火焰进气预热柴油机起动性能影响的试验. 结果表明：在 5 km 海拔进气温度为 303 K 的条件下，未采用火焰进气预热，冷却液温度为 303、318 和 333 K 下柴油机均出现滞速现象，冷却液温度低于 318 K 时柴油机滞速时间较长且无法进入怠速. 仿真与试验结果显示：转速为 200 r/min 时，由于残余废气的作用导致缸内间歇着火，失火率循环较高；转速为 400 r/min 时，不出现失火现象；转速为 500 r/min 以上时，滞燃期增长导致缸内失火循环率大幅增加，造成柴油机在转速为 400 ~ 500 r/min 区间滞速. 5 km 海拔下采用火焰进气预热，控制柴油机转速为 200、400、600 和 800 r/min，对应进气预热功率为 0.84、0.84、1.25 和 2.10 kW，各转速下失火循环率均降低为 0%. 采用供油量精确调控的火焰进气预热系统，可有效改善柴油机在高海拔下的起动性能，5 km 海拔下柴油机起动时间缩短至 4 s 左右.

关键词：柴油机；起动滞速；高原起动；进气预热
中图分类号：TK421　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909(2025)05-0404-09

Experimental study on starting process of diesel engine on plateaus and the flame intake preheating

Wang Ziman[1]，Cong Mingchen[1]，Shen Hongji[2]，Shi Zhongjie[1]，Li Yikai[1]，Li Xiangrong[1]
（1. School of Mechanical Engineering，Beijing Institute of Technology，Beijing 100081，China；
2. Unit 63963 of the People's Liberation Army，Beijing 100072，China）

Abstract：In order to solve the cold start difficulty for diesel engines on the plateau，an experimental study on the effect of flame intake preheating on the starting performance of diesel engine at 5 km altitude was carried out on a plateau environmental test chamber. The results show that under the altitude of 5 km and the intake temperature of 303 K without intake preheating，the diesel engine falters in the speed range of 400—500 r/min at the coolant temperature of 303，318 and 333 K，respectively. At the coolant temperature below 318 K，the diesel engine falters for a longer time and even cannot go to idle condition. After analyzing，it is found that at 200 r/min，large amount of residual gases from the last cycle results in misfire. At 400 r/min，no misfire happens. When the engine speed goes above 500 r/min，the misfire cycle rate increases significantly due to the increased ignition delay period，leading to faltering at 400—500 r/min. Under the altitude of 5 km，when a flame intake preheating device was used and set its preheating power to 0.84 kW at 200 r/min and 400 r/min，1.25 kW at 600 r/min and 2.10 kW at 800 r/min，respectively，the misfire cycle rate drops to 0% across all speeds. Experimental results show that the flame-assisted intake preheating system used with a precise fuel control can effectively improve the starting performance of the diesel engine at plateau，reducing the engine starting time to within 4 s at the altitude of 5 km.

Keywords：diesel engine；starting falter；plateau starting；intake preheating

由于热效率高、可靠性好等特性，柴油机在农业、工业和交通运输等领域应用广泛. 采用较低的压缩比能够有效限制柴油机的爆发压力并改善排放性能，同时提升柴油机功率密度[1-3]，然而低压缩比柴油

收稿日期：2024-12-27；**修回日期**：2025-03-19.
基金项目：国防科工局基础产品创新计划资助项目(2023037).
作者简介：王宇满，博士，副教授，Ziman.wang@bit.edu.cn.
通信作者：史中杰，博士，助理研究员，shizhongjie@bit.edu.cn.

机(压缩比小于 15)高原低温冷起动性能较差. 由于冷机起动过程中转速低、漏气量大、散热量高及涡轮增压器尚未介入等原因，缸内压缩终了温度及密度较低，缸内热力环境将不利于柴油喷雾的快速自燃，甚至发生失火[4-6]. 中国 3 km 以上高原地区占国土面积的 25%[7]，高原环境下柴油机起动性能差的问题亟需解决.

目前常用的高原冷起动辅助措施有电加热进气预热、火焰进气预热、冷却液加热、机油加热、缸内喷油参数优化以及含氧替代燃料等[8-9]. 卢康博等[10]研究表明，在 4 km 高原起动工况下，缸内阶梯式喷油能够降低起动过程的峰值转速，从而加快起动速度. 王宪成等[11]发现，减小喷油器孔径、增加喷孔数可以改善柴油机在 3.7 km 高原起动过程中的燃油雾化过程，从而改善起动过程. 王晓宇等[12]研究表明，在 2.0 km 高原、温度为 230 K 条件下采用含氧燃料也可改善柴油机的起动性能. 楼狄明等[13]试验表明，适当减少高原起动时的喷油量可改善高原起动性能. 随后，胡志远等[14]研究了辅助加温对柴油机高海拔起动性能的影响，结果表明，冷却液加温均能改善柴油机高原起动性能. 岳巍强等[15]在 246 K 的 3.9 km 高原海拔环境条件下，使用格栅式电加热进气预热辅助车辆起动，试验车辆可以在 3 min 内顺利启动.

然而，关于火焰进气预热对柴油机高原起动性能的影响研究较少. 胡志远等[14]试验表明，火焰进气预热能提高燃烧室残余废气量并引入燃烧活性成分，促进化学反应，改善了柴油机在 4.5 km 海拔的高原起动性能，但火焰进气预热会消耗部分氧气[16]，不利于高原条件下柴油机起动性能的提升. 火焰进气预热对柴油机高原起动的辅助效果目前仍无定论，这主要是因为传统火焰进气预热装置采用流道供油方式，供油量不能根据环境压力和柴油机转速变化自适应调控，导致传统火焰进气预热装置仅在柴油机某一转速工况下具备最佳预热效果[17-18]，供油量匹配不当则导致柴油机难以起动. 因此，以往的研究中火焰进气预热对柴油机高原起动性能影响结论不同.

为此，笔者设计了一种喷雾式火焰进气预热装置，根据环境压力、环境温度以及柴油机转速，采用电控喷油器精确控制进气预热装置供油量，实现了火焰进气预热功率的环境自适应以及柴油机工况自适应. 首先，在模拟 5 km 海拔进气温度为 303 K 下，分别使用试验结合一、三维仿真计算，理论公式推导分析了试验柴油机起动过程高、低转速下缸内失火的原因. 其次，通过标定试验确定了喷雾式火焰进气预热装置的最佳喷油频率和喷油脉宽. 最后，开展有/无进气预热对柴油机起动性能的对比研究，结果表明，采用供油量随环境和柴油机工况变化精确调控的火焰进气预热装置，可有效改善柴油机在高海拔下的冷起动性能.

1　研究手段及方法

1.1　试验工况及系统

图 1 为试验系统示意，试验对象为一台 V 型 6 缸柴油机，结构参数如表 1 所示. 采用环境模拟系统调整柴油机进/排气压力模拟实机高原起动条件. 高原起动试验台主要由湘仪 FC2005 测控系统、变海拔环境模拟系统、缸内压力采集与燃烧分析系统等组成. 其中环境模拟系统进/排气压力调节范围为 40 ~ 101 kPa，调节精度为 ± 1 kPa. 试验中控制进/排气压力为 54 kPa，模拟 5 km 海拔高原环境.

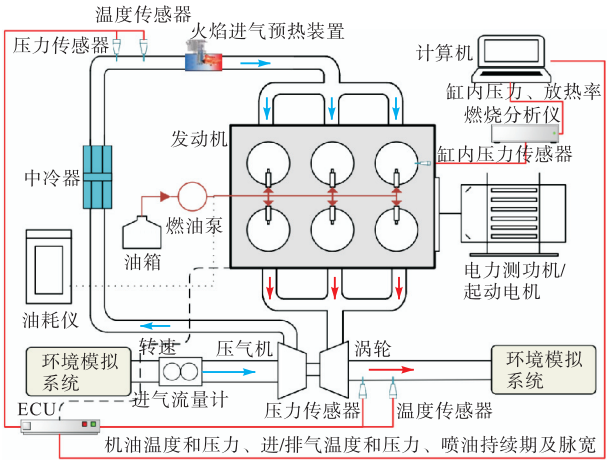


图 1　试验系统示意

Fig.1　Schematic of the experimental setups system

表 1　柴油机参数

Tab.1　Engine specifications

参数	数值
排列	90°V 型
冷却方式	水冷
缸径/mm	132
活塞行程/mm	145
压缩比	13.5
总排量/L	12
缸心距/mm	165
进气门间隙/mm	0.3
排气门间隙/mm	0.5
连杆长度/mm	262

图 2 为喷雾式火焰进气预热装置结构示意，主要由 4 部分组成. 柴油通过喷油器喷射至高温加热棒表面，汽化与空气混合后并被加热棒高温表面点燃. 燃

烧火焰与柴油机进气管内来流空气混合后实现柴油机进气温度的提升.

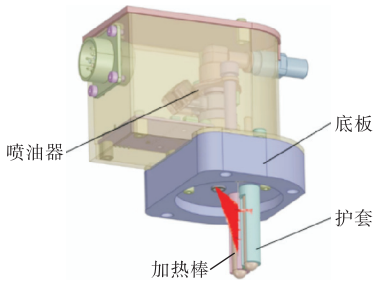


图 2 喷雾式火焰进气预热装置结构示意

Fig.2 Structure of flame preheating plug

试验过程中柴油机进气温度控制为 303 K，冷却液温度分别为 303、318 和 333 K，起动过程缸内喷油提前角和起动过程喷油持续期分别为 13° CA 和 7.5° CA. 各转速下火焰进气预热装置喷油调节范围如表 2 所示.

表 2 试验工况参数设置

Tab.2 Test parameter setting

参数	数值
进气温度/K	303
冷却液温度/K	303，318，333
喷油提前角/(°)CA	13
喷油持续期/(°)CA	7.5
转速/(r·min^{-1})	200，400，600，800
进气预热喷油频率/Hz	5～20，5～20，5～20，5～30
进气预热喷油持续期/μs	700

1.2 仿真模型及设置

建立 1/8 气缸三维仿真模型如图 3 所示，通过侧隙高度调整压缩比为 13.5. 选用的缸内湍流、喷雾破碎、液滴蒸发和燃烧模型如表 3 所示. 图 4 所示在起动工况下试验测试获得缸内压力在曲轴转角为 8° CA 时急剧上升，由于冷起动工况下着火滞燃期较长造成缸内柴油预混燃烧比例大幅增加，最终导致压力升高率较高. 仿真模型较好地再现了柴油机冷起动过程中压力上升率较高的现象，能够模拟柴油机高原起动缸内着火过程.

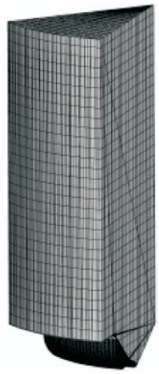


图 3 Converge 三维仿真模型

Fig.3 Converge 3D simulation model

表 3 Converge 仿真选取模型

Tab.3 Selected Converge simulation model

模型	选用模型
湍流模型	k-ε 模型
破碎模型	KH-RT 模型
蒸发模型	Frossling 相关法
燃烧模型	SAGE 模型
化学反应机理	正十二烷 SK54[19]

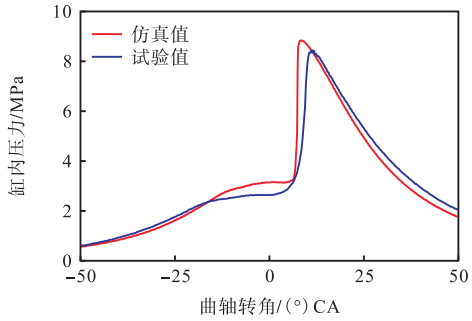


图 4 Converge 模型仿真标定结果

Fig.4 Calibration results of Converge simulation model

采用柴油机一维仿真模型计算柴油机起动过程中进气门开启时刻排气倒流流量，获得柴油机实际残余废气系数. 一维仿真模型参数设置如表 4 所示. 江嘉堃等[20]研究表明，该模型能够精确模拟发动机稳态工作过程，可用于预测柴油机进/排气流量.

表 4 一维仿真模型几何参数设置

Tab.4 Geometric parameter settings of the 1D simulation model mm

参数	中冷器	进气总管	进气歧管 746	进气歧管 774	进气歧管 7508	排气歧管
管长	750	500	15	65	88	165
直径	190	130(入口)，124(出口)	47	47(入口)，42(出口)	42(入口)，39(出口)	50

2 结果与分析

2.1 柴油机无进气预热高原起动过程

不同冷却液温度下柴油机起动过程转速曲线如图 5 所示. 冷却液温度为 333 K 时，柴油机能够成功起动进入怠速. 冷却液温度为 318 K 时，柴油机转速上升至 400 r/min 后稳定较长时间，无法升入怠速. 起动过程中发动机转速高于滞速转速时，柴油机动力矩无法克服阻力矩，导致柴油机在怠速以下转速持续运行较长时间的现象为滞速. 冷却液温度为 303 K 时，柴油机转速首先在 400 r/min 上、下波动，升至 500 r/min 后熄火. 不同冷却液温度下，柴油机均在 400 r/min 左右滞速一段时间. 高原环境下，冷却液温度的

提高降低了起动阻力矩. 冷却液温度的提高增强了柴油机进气道对发动机进气的加热作用、减小了压缩冲程缸内气体散热量，最终提高了缸内压缩终了温度，改善了缸内喷雾着火状态. 以上两方面因素共同作用，导致提高冷却液温度能够大幅减缓柴油机滞速现象、缩短起动时间.

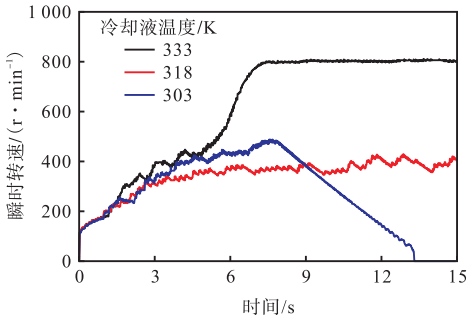
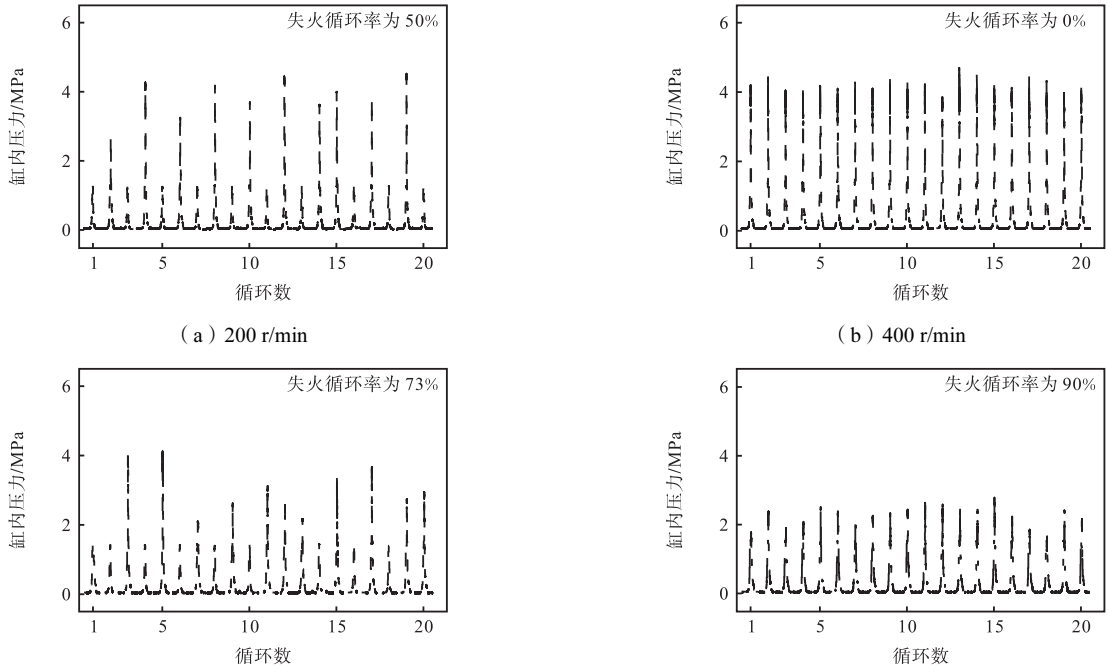


图 5　无预热时不同冷却液温度下柴油机起动转速

Fig.5　Engine starting speeds at different coolant temperatures without intake preheating

图 6 为不同恒定转速下连续 20 循环缸内压力测试结果. 定义失火循环与总记录循环数的比值为失火循环率. 可以看出，未采用进气预热，转速为 200 r/min 下缸内呈现明显的间断着火现象，失火循环率为 50%；转速为 400 r/min 下各循环连续着火，失火循环率为 0%；转速为 500 r/min 下失火循环率增加至 73%；转速为 800 r/min 下失火循环率增加至 90%. 转速为 400 r/min 下柴油机均未出现失火循环，最高燃烧压力较为平稳. 而当转速升至 500 r/min 后，缸内失



（a）200 r/min　（b）400 r/min

（c）500 r/min　（d）800 r/min

图 6　未采用进气预热柴油机不同转速倒拖下的缸内压力

Fig.6　Cylinder pressure at different engine speeds under motored conditions without intake preheating

火循环率大幅增加. 转速为 400 r/min 下缸内喷雾着火燃烧状态较 500 r/min 转速更稳定. 因此，柴油机在 400 r/min 左右出现滞速现象.

2.2　柴油机高原起动失火分析

2.2.1　500 r/min 及以上转速下失火分析

针对试验中出现的发动机失火现象展开试验，保持缸内喷油提前角和喷油脉宽一致，记录不同转速下发动机单缸着火缸内压力，各转速下柴油机所有着火循环的平均缸内压力曲线如图 7 所示. 转速为 200 r/min 下，柴油机在 0° CA 时刻缸内压力急剧上升；而随着转速升至 800 r/min，柴油机在 15° CA 时刻缸内

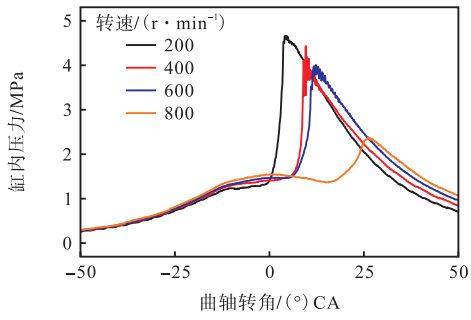


图 7　着火循环时不同转速倒拖下柴油机平均缸内压力

Fig.7　Mean cylinder pressure at different engine speeds under motored conditions under ignition cycle

压力开始上升，且压力升高率低于 200 r/min 工况，该现象与阚泽超[21]试验所得结论相符. 随着转速的增加，以曲轴转角计的滞燃期随之增加.

式(1)以曲轴转角记的缸内柴油喷雾着火滞燃期 IDT_{CA} 主要受喷油时刻缸内压力 p_{back}、缸内温度 T_{amp}、喷孔压降 Δp 以及燃油温度 T_f 的影响[22]，试验过程中进气温度、喷孔压降和燃油温度在各转速下基本保持一致. 由图 7 可知，不同转速下喷油时刻 p_{back} 也基本一致，因而以曲轴转角计的缸内柴油喷雾着火滞燃期主要受转速的影响，转速越高以曲轴转角计的滞燃期越长. 滞燃期的增加导致缸内燃烧始点滞后，着火始点愈发远离压缩上止点，导致柴油机做功能力恶化，燃烧稳定性下降，从而导致失火循环的产生.

$$IDT_{CA} \propto 6Np_{back}^{n}\exp\left(\frac{A}{T_{amb}}\right)\Delta p^{m}T_{f}^{a} \tag{1}$$

式中：m、n、a 和 A 为经验常数；N 为发动机转速.

2.2.2 转速为 200 r/min 下失火分析

在转速为 200 r/min 下，未采用进气预热，柴油机缸内呈现规律的循环间断着火现象，失火循环率为 50%. 上一循环缸内喷雾成功着火，本循环必然失火. 据此分析，着火循环后残余废气对下一循环缸内喷雾着火影响较大. 发动机工作过程中缸内废气主要来源于排气倒流与上一循环燃烧室容积内无法排出的废气. 图 8 为采用一维仿真模型获得的进气门瞬时流量. 可以看出，转速为 200 r/min 时，进气门开启前期存在缸内废气倒流至进气道的现象，根据图 8 累积计算废气倒流质量占进气总量比例为 3%.

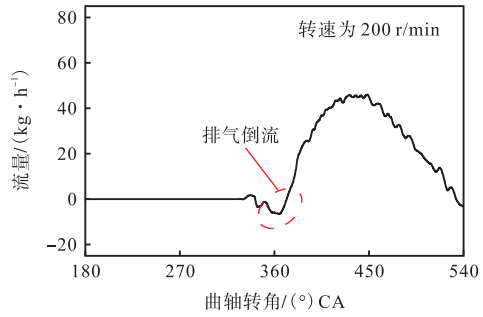


图 8 5 km 海拔下柴油机单缸进气门瞬时流量一维仿真结果

Fig.8 1D simulation result of instantaneous inlet flow rate at 5 km altitude

上一循环燃烧室容积内无法排出的废气系数可以通过理论计算推导得出. 图 7 所示柴油机高原起动时缸内喷雾一般在上止点后着火，且燃烧持续期较短、压力升高率较大. 因而可以近似为奥托循环，理论 p-V 如图 9 所示. 图中：1 为进气终点，2 为压缩终点，3 为燃烧终点，4 为做功冲程终点，5 为残余废气点. 燃烧室容积内废气热力状态(T_{res}，ρ_{res})可通过膨胀冲程延长至进气压力 p_{in} 的方式获得[23].

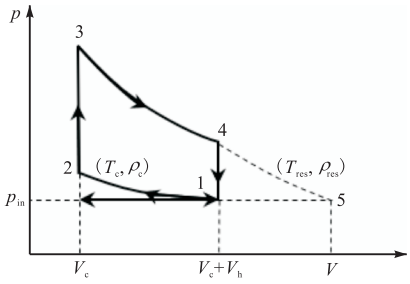


图 9 奥托循环理论 p-V

Fig.9 Theoretical p-V diagram of Otto cycle

图 9 中各点热力状态如表 5 所示. 其中：λ 和 σ 分别为定容压力升高比和燃烧室容积内气体膨胀至进气压力 p_{in} 时的等效膨胀比；p 为压力；T 为温度；ρ 为密度；ε 为压缩比；k 为比热比；下标 res 为残余废气；mixed 为喷油后缸内混合气；下标 c 为活塞运动到上止点；V_c 为活塞位于上止点时燃烧室的体积.

表 5 奥托循环特征点状态

Tab.5 Feature points of Otto cycle

特征点	1(进气终点)	2(压缩终点)	3(燃烧终点)	5(残余废气点)
p	p_{mixed}	$p_2=\varepsilon^k p_{mixed}$	$p_3=\lambda p_2$	$p_{res}=p_{mixed}=p_3/\sigma^k$
T	T_{mixed}	$T_2=\varepsilon^{k-1}T_{mixed}$	$T_3=\lambda T_2$	$T_{res}=T_3/\sigma^{k-1}$
ρ	ρ_{mixed}	$\rho_2=\varepsilon\rho_{mixed}$	$\rho_3=\rho_2$	$\rho_{res}=\rho_3/\sigma$

根据表 5 计算获得燃烧室容积内废气质量占进气总量的比例为 2.2%. 因而进气门废气倒流及燃烧室容积内残余废气共造成柴油机下一循环残余废气系数为 5.2%.

根据计算得出的残余废气系数，使用三维仿真模型探究循环失火原因. 采用 CO_2 模拟残余废气，分别设置残余废气系数为 0%、5% 和 10%. 图 10 示出计算获得的 5 km 海拔、转速为 200 r/min 时不同残余废气系数下的缸内压力曲线. 可以看出，残余废气系数对缸内喷雾能否着火影响较大，残余废气系数 0% 时缸内喷雾可以着火，而残余废气系数大于 5% 时缸内

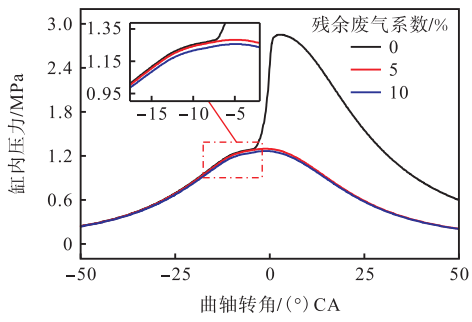


图 10 5 km 海拔不同残余废气系数下缸内压力仿真结果

Fig.10 Simulated cylinder pressure under different residual gas coefficients at 5 km altitude

喷雾失火. 喷油开始后由于柴油蒸发吸热，缸内压力上升变缓. 另外，喷油持续期内着火循环的缸内压力均高于失火循环. 由于残余废气温度高于进气温度，残余废气系数越高，缸内捕捉气体总质量越少、总热容量越少. 在相同喷油量下，燃油蒸发吸热量相同，喷油时刻缸内气体总热容量越少，则压力下降越多.

图 11 为三维仿真模型获得的缸内温度及化学关键中间产物质量变化. 不同残余废气系数下缸内压缩终了温度在 600 ~ 700 K，而该温度区间碳氢燃料（RH）的氧化分为低温反应和高温反应两个阶段，低温反应阶段是高温反应的前置过程. 低温反应阶段 RH 分子依次经历脱氢形成烷基、一次加氧形成过氧化物 RO_2、异构形成 ROOH 及二次加氧等，最后分解生成低温反应标志产物甲醛（CH_2O）. 随着残余废气系数从 0% 增加至 10%，缸内 CH_2O 生成时刻逐渐推迟，累积质量也逐渐降低. 这主要是由于低温反应路径中涉及到一次加氧和二次加氧反应，随着残余废气系数的增加，缸内氧气质量分数降低，导致低温反应速率降低. 图 12 所示三维仿真不同残余废气系数下缸内关键产物 CH_2O 和 OH 质量分数分布，高温着火标志产物 OH 产生于 CH_2O 质量分数最高的区域，缸内出现高温着火. 而当残余废气系统达到 5% 后，CH_2O 质量分数较低（<0.003[24]），OH 产生量较少，缸内喷雾不能着火. 结果证明间断着火现象由着火循环残余废气造成.

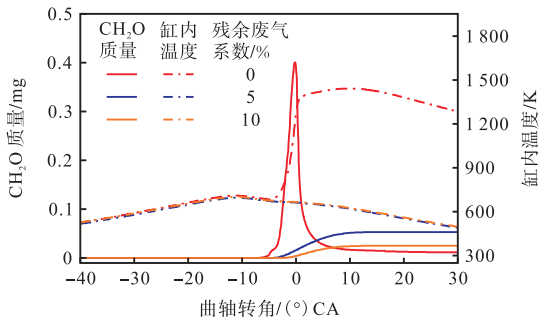


图 11　三维仿真缸内 CH_2O 质量及温度

Fig.11　Simulation results of CH_2O mass and cylinder temperature

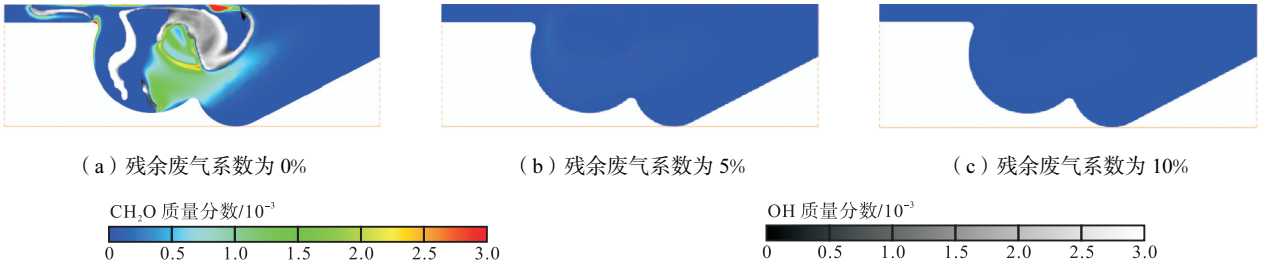


图 12　三维仿真不同残余废气系数下缸内关键产物 CH_2O 和 OH 质量分数分布

Fig.12　Distribution of CH_2O and OH mass fractions in the cylinder under different residual gas coefficients

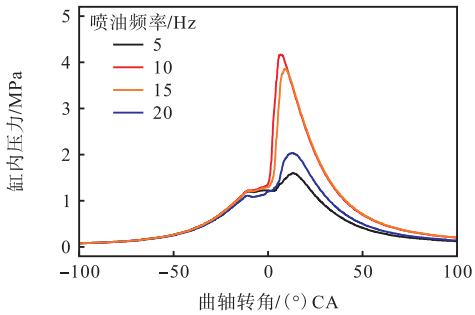
2.3　进气预热喷油参数对不同转速缸内着火的影响

为探究进气预热参数对发动机不同转速下缸内着火的影响，在 5 km 海拔、冷却液温度为 303 K 条件下，采用测功机恒转速倒拖柴油机 200、400、600 和 800 r/min. 在固定转速下依次调整进气预热装置喷油频率为 5 ~ 30 Hz，测试获得不同进气预热喷油频率下缸内压力如图 13 所示. 图 13（a）所示在转速为 200 r/min，随着进气预热装置喷射频率的增加，缸内着火时刻先提前后推迟，缸内爆发压力同样先提升后降低. 喷油频率为 5 Hz 时，进气预热装置对发动机新鲜空气加热不足，导致压缩终了缸内温度偏低，以曲轴转角计的缸内着火滞燃期延长. 而喷油频率为 25 Hz 时，进气预热装置过量消耗了发动机新鲜空气中的氧气，导致缸内着火滞燃期延长. 因此，在高原环境下，进气预热装置最佳喷油频率是其加热量和耗氧量的折中，只有精确控制喷油才能发挥进气预热装置在高海拔下的效果. 同样，图 13（b）~ 图 13（d）中转速为 400、600 和 800 r/min 时，缸内着火时刻和爆发压力随进气预热装置喷油频率的变化规律类似.

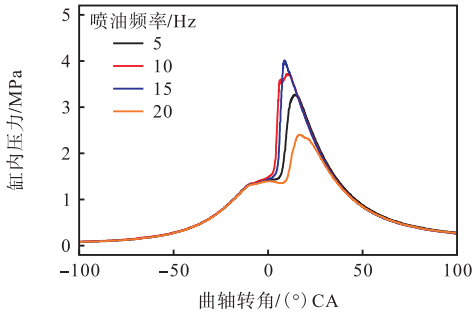
柴油机高海拔起动时，以曲轴转角计的缸内喷雾着火滞燃期较长，缸内喷雾一般在上止点后着火. 着火时刻越远离上止点，则缸内燃烧废气做功能力越差. 图 14 为不同转速下缸内着火时刻随喷油频率变化的统计曲线. 以着火时刻距离上止点最近为判据，5 km 海拔发动机转速为 200、400、600 和 800 r/min 时的最佳喷油频率分别为 10、10、15 和 25 Hz.

采用测功机恒转速模式，控制发动机转速固定在 200、400、600 及 800 r/min，在不同进气预热喷油参数下采用测功机以 1 Hz 的频率连续测取 20 s 内柴油机的转矩平均值，如图 15 所示. 转速为 200 r/min 时，随着进气预热喷油频率的增加，柴油机输出转矩先增加后减小，在进气预热喷油频率为 10 Hz 时转矩输出最高为 277.7 N · m. 转速为 400 r/min 时缸内热力状态较好，不采用进气预热缸内喷雾也不发生失

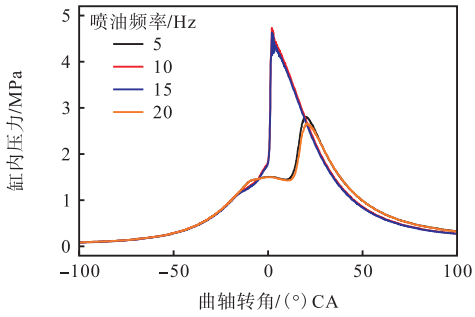
火，进气预热喷油频率对其转矩输出影响不大. 转速为 600 r/min 时，在进气预热喷油频率为 15 Hz 时转矩输出最高为 361.9 N · m. 转速为 800 r/min 时，在进气预热喷油频率为 25 Hz 下转矩输出最高为 349.4 N · m. 综合考虑缸内着火时刻及柴油机输出转矩，柴油机转速为 200、400、600 和 800 r/min 时的最佳进气预热喷油频率分别为 10、10、15 和 25 Hz.



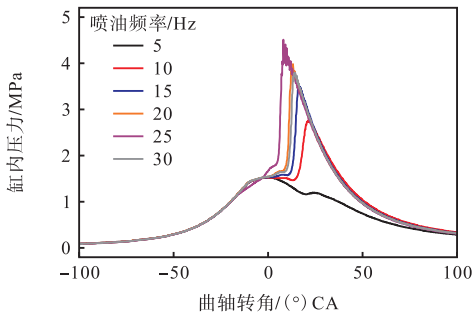
（a）200 r/min



（b）400 r/min



（c）600 r/min



（d）800 r/min

图 13　不同转速采用不同进气预热喷油频率的 50 循环平均缸内压力

Fig.13　Average cylinder pressure over 50 cycles under different intake preheating frequencies at different engine speeds

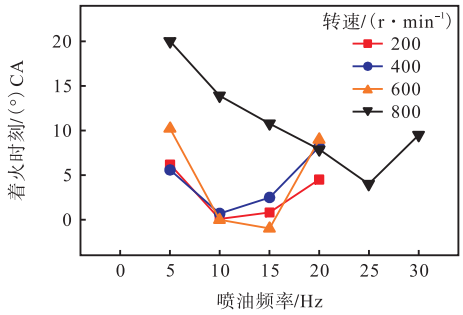


图 14　不同转速时不同进气预热喷油频率下的着火时刻

Fig.14　Ignition timing under different intake preheating frequencies at different engine speeds

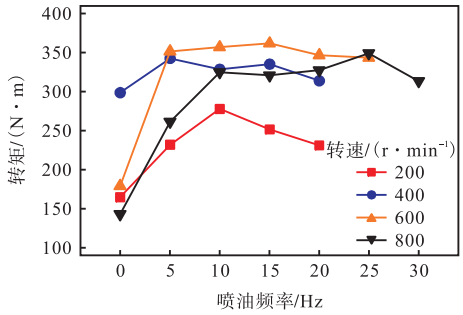


图 15　不同进气预热喷油频率下柴油机转矩输出测量值

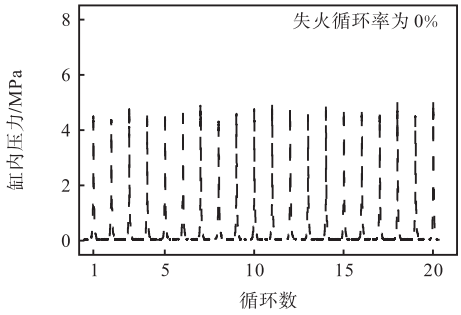
Fig.15　Measured torque output under different intake preheating frequencies

2.4　柴油机进气预热辅助高原起动过程

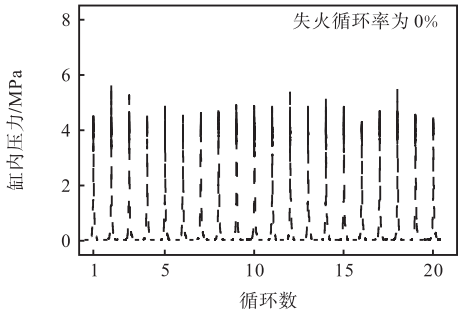
基于 2.3 节获得的最佳进气预热喷油频率，采用测功机恒转速倒拖柴油机至 200、400、500 和 800 r/min. 记录不同转速下连续 50 循环缸内压力，如图 16 所示（由于各循环缸内压力曲线类似，仅展示前 20 循环）. 对比图 6 与图 16，未采用进气预热时，在 5 km 海拔下柴油机在转速为 200、500 和 800 r/min 时存在循环失火现象，失火循环率最高达到 90%. 而采用进气预热辅助后，各转速下连续 50 个循环均未发生失火，最高燃烧压力显著增加，失火循环率降低为 0%.

转速为 200 r/min 时由于残余废气系数较高，导致柴油机循环间断着火. 采用火焰进气预热后，尽管提高了缸内废气系数，但同时也大幅提高了缸内压缩终了温度. 由于缸内喷雾着火对温度的敏感性远高于缸内废气系数[25]，所以转速为 200 r/min 时采用火焰进气预热降低了缸内失火循环率. 另外，转速为 500 r/min 以上时，以曲轴转角计的滞燃期增长是导致失火循环率增加的主要原因，采用火焰进气预热提高了压缩终了温度，缩短了缸内柴油喷雾滞燃期见图 14，提高了缸内喷雾着火成功率.

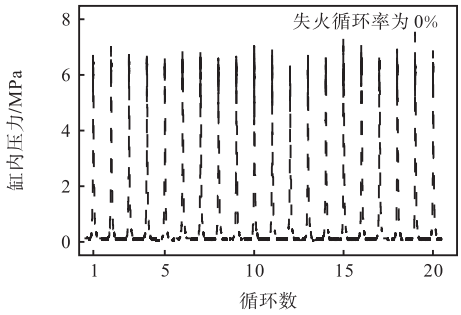
图 17 示出 5 km 海拔冷却液温度为 303 K 时进气预热辅助对柴油机起动过程的影响. 未采用进气预热时，柴油机在转速为 400 r/min 上下长时间滞速，起动失败. 采用进气预热辅助后，柴油机用时 4 s 转速迅速上升至 800 r/min 以上，起动成功. 试验结果表明，采用供油量精确调控的火焰进气预热系统可有效改善柴油机在高海拔下的起动性能.



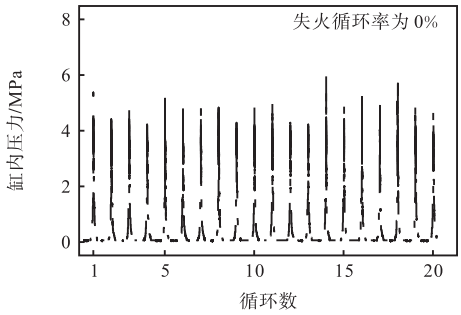
（a）200 r/min



（b）400 r/min



（c）500 r/min



（d）800 r/min

图 16　不同转速时采用进气预热连续 50 循环缸内压力

Fig.16　Cylinder pressure over 50 cycles with intake preheating at different engine speeds

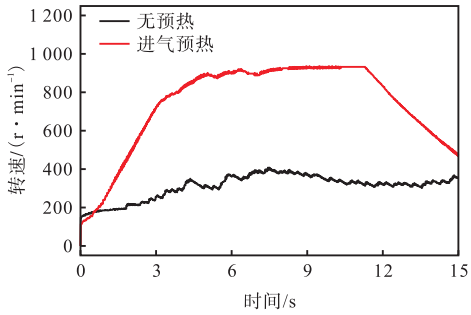


图 17　5 km 海拔冷却液温度为 303 K 时进气预热辅助对柴油机起动过程的影响

Fig.17　Effect of intake preheating assistance on the starting process of the diesel engine at an altitude of 5 km with coolant temperature at 303 K

3　结　论

针对柴油机高原起动困难问题，设计了一种供油量精确调控的喷雾式火焰进气预热装置，实现高海拔环境下柴油机起动过程无失火循环，提升了柴油机高海拔环境下的起动性能. 通过试验和仿真计算分析，获得结论如下：

（1）未采用火焰进气预热，冷却液温度为 303、318 和 333 K 时柴油机均在转速为 400 ~ 500 r/min 区间出现滞速现象，其中冷却液温度为 333 K 时柴油机滞速时间较短最终进入怠速，而冷却液温度低于 318 K 时柴油机滞速时间较长且无法进入怠速；转速为 200 r/min 时缸内失火循环率为 50%；转速为 400 r/min 时失火循环率为 0%；转速为 500 r/min 以上时，由于以曲轴转角计的滞燃期推迟，造成缸内失火循环率随转速增大而大幅增加，最终导致柴油机在转速为 400 ~ 500 r/min 区间滞速.

（2）仿真计算表明，转速为 200 r/min 时由于上一着火循环残余废气的作用，本循环缸内低温反应产物甲醛（CH_2O）质量分数显著下降，导致本循环缸内失火，因而缸内失火循环率为 50%；转速为 500 r/min 以上时，以曲轴转角计的滞燃期增长导致缸内燃烧始点滞后，着火始点愈发远离压缩上止点，柴油机做功能力恶化、燃烧稳定性下降，是导致失火循环率增加的主要原因.

（3）5 km 海拔下柴油机转速为 200、400、600 和 800 r/min 时进气预热最佳喷油频率分别为 10、10、15 和 25 Hz，各转速下失火循环率均降低为 0%，柴油机输出转矩分别提升至 277.7、328.9、361.9 和 349.4 N · m；采用进气预热辅助后，柴油机用时 4 s

转速迅速上升至 800 r/min 以上，起动成功；试验结果证明，采用供油量精确调控的火焰进气预热系统可有效改善柴油机在高海拔下的起动性能.

参考文献：

[1] 刘瑞，黄立，吕兴才，等. 不同环境温度下增压压力对柴油机性能的影响[J]. 内燃机学报，2022，40(6)：489-494.

[2] 石晓晨. 低压缩比柴油机的低温冷起动辅助控制研究[D]. 北京：北京理工大学机械与车辆学院，2021.

[3] Ogawa H，Miyamoto N，Kawabe T，et al. Characteristics of unburned hydrocarbons in a low compression ratio diesel engine(characteristics under transient operation and eduction with low distillation temperature fuels)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B，2008，74(739)：731-736.

[4] 雷基林，李道硕，王东方，等. 临界温度下循环喷油量对柴油机冷起动和排放特性的影响[J]. 农业工程学报，2024，40(10)：247-254.

[5] 王捧，任正敏，秦彪，等. 预热策略对柴电混合动力低温冷起动的影响[J]. 内燃机学报，2023，41(6)：507-514.

[6] 黎一锴，娄悦，杨子明，等. 喷油压力对柴油喷雾两阶段着火的影响[J]. 内燃机学报，2024，42(3)：193-202.

[7] 李华雷，利奇，石磊，等. 柴油机可调两级增压系统高原自适应控制策略[J]. 农业机械学报，2015，46(9)：335-342.

[8] 王霞，陈月春，李素婷，等. 不同海拔高度下柴油机低温起动性能试验研究[J]. 内燃机与动力装置，2022，39(1)：7-11.

[9] 刘红彬，桂勇，骆清国，等. 高功率密度柴油机不同增压系统方案性能比较研究[J]. 兵器装备工程学报，2020，41(10)：112-116，145.

[10] 卢康博，任正敏，杨凯，等. 喷油策略对柴油机高原起动过程性能影响研究[J]. 内燃机工程，2023，44(5)：385-392.

[11] 王宪成，郭猛超，和穆，等. 高原环境大功率柴油机性能综合改进技术研究[J]. 内燃机工程，2014，35(2)：113-118.

[12] 王晓宇，王正江，贾丹丹，等. 极寒条件下含氧燃料对柴油机冷起动特性的影响[J]. 内燃机学报，2024，42(1)：18-25.

[13] 楼狄明，阚泽超，胡志远，等. 喷油策略对低压缩比柴油机不同海拔起动性能的影响[J]. 同济大学学报：自然科学版，2017，45(4)：582-588.

[14] 胡志远，谢毅，阚泽超，等. 辅助加温对柴油机变海拔起动性能的影响[J]. 同济大学学报：自然科学版，2018，46(6)：828-833.

[15] 岳巍强，王朔，刘炳均，等. 高原高寒地域中重型车辆进气预热起动辅助装置研究[J]. 装备环境工程，2017，14(10)：41-46.

[16] 陈龙，张颖超，李龙，等. 柴油发电机组高原环境适应性技术综述[J]. 移动电源与车辆，2021，52(3)：46-50，27.

[17] 王东方，王奕，黎一锴，等. 柴油机进气火焰预热系统着火临界温度的研究[J]. 内燃机学报，2021，39(4)：289-296.

[18] 张乾坤，樊丰，王琰，等. 火焰进气预热塞电加热特性分析[J]. 柴油机，2018，40(2)：30-35.

[19] Yao T，Pei Y，Zhong B，et al. A compact skeletal mechanism for *n*-dodecane with optimized semi-global low-temperature chemistry for diesel engine simulations[J]. Fuel，2017，191：334-339.

[20] 江嘉堃，李向荣，陈彦林，等. 增压方式对柴油机配气相位的影响规律研究[J]. 车用发动机，2020(6)：24-30，37.

[21] 阚泽超. 柴油机高原起动过程着火燃烧基础研究[D]. 上海：同济大学汽车学院，2018.

[22] Payri R，García-Oliver J M，Bardi M，et al. Fuel temperature influence on diesel sprays in inert and reacting conditions[J]. Applied Thermal Engineering，2012，35：185-195.

[23] 张国强，郭巍，曲延涛. 内燃机理论循环的改进[C]// 中国动力工程学会第三届青年学术年会，南京，中国，2005：590-594.

[24] Liu F，Shi Z，Zhang Z，et al. Numerical study on critical ambient temperature for auto-ignition of the diesel spray under cold-start conditions[J]. Fuel，2019，258：116191.

[25] 杨欣欣，石磊，曲栓，等. EGR 率和进气温度耦合作用下的低温燃烧试验研究[J]. 车用发动机，2017(3)：8-13.