

# 高原环境对大功率柴油机起动过程影响研究

王宪成<sup>1</sup>, 马宁<sup>1</sup>, 王雪<sup>1</sup>, 孙志新<sup>1</sup>, 吉世文<sup>1</sup>, 刘大可<sup>2</sup>

(1.装甲兵工程学院, 北京 100072; 2.装甲兵学院, 安徽 蚌埠 233050)

**摘要:** **目的** 研究高原环境对大功率柴油机起动过程影响规律。**方法** 针对平原和高原地区某 12 缸柴油机进行实车起动试验, 对两种环境下柴油机起动过程转速与缸压数据进行分析, 对比两种环境起动过程滞燃期变化规律, 同时对两种环境起动过程喷雾特性进行仿真计算。**结果** 发现在高原环境起动过程加速阶段更易出现滞速, 甚至失火现象, 两种环境下起动过程中以时间计滞燃期均在加速阶段快速下降, 在过渡阶段下降平缓, 在同一时刻高原环境滞燃期更大, 且波动更大, 最大可达 0.9 ms。喷雾过程仿真结果发现, 高原环境起动过程喷雾贯穿距发展更快, 油束重心更接近燃烧室壁面。**结论** 高原环境使得柴油机起动过程喷雾贯穿距增大, 油束碰壁导致混合气形成质量变差, 滞燃期变长, 最终导致高原环境下起动过程出现滞速甚至失火等现象。

**关键词:** 高原环境; 柴油机; 起动过程; 滞燃期; 喷雾特性

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.10.002

**中图分类号:** TJ07; TK411.26

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)10-0008-04

## Effects of Altitude Environment on High-power Diesel Engine Starting Process

WANG Xian-cheng<sup>1</sup>, MA Ning<sup>1</sup>, WANG Xue<sup>1</sup>, SUN Zhi-xin<sup>1</sup>, LIU Da-ke<sup>2</sup>

(1. Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China; 2. Academy of Armored Force, Bengbu 233050, China)

**ABSTRACT: Objective** To study influence rules of altitude environment on starting process of high-power diesel engine. **Methods** The starting process of a 12-cylinder diesel engine was tested respectively in plateau and plain to analyze the rotational speed and cylinder pressure of diesel engine in different environment. The laws on change of ignition delay period in different environment were compared and simulating calculation on spray characteristics in different environment were carried out. **Results** The diesel engine was prone to suffer from phenomenon such as stagnation or even misfire in altitude environment. The combustion delay period declined rapidly in accelerating stage, and declined gently in transition stage. The combustion delay period on altitude environment was longer and the volatility was bigger up to 0.9 ms than plain environment. The spray penetration on altitude environment formed faster, and the main part of spray was closer to the wall of combustion chamber. **Conclusion** The altitude environment makes the spray penetration in starting the engine longer. The wall impingement of spray reduces the quality of the formation of mixed gas and makes the combustion delay period longer, causing the phenomenon of stagnation and even misfire in the diesel engine starting process of the altitude environment.

**KEY WORDS:** altitude environment; diesel engine; starting process; combustion delay period; spray characteristic

收稿日期: 2017-05-30; 修订日期: 2017-06-13

基金项目: “973” 计划项目 (201797301)

作者简介: 王宪成 (1964—), 男, 北京人, 教授, 主要研究方向为动力系统论证与运用。

高原环境柴油机起动过程频繁出现若干循环失火造成的滞速现象，甚至熄火<sup>[1]</sup>。敖良忠<sup>[2]</sup>等人通过 CFM56-5B 发动机结合高原地区气压与含氧量低等特点，分析出燃油雾化质量变差以及富油燃烧是造成起动困难的重要原因。S.A.Haba<sup>[3]</sup>等人则研究了一台 V 型 6 缸柴油机在极低温度下的起动状况。文中通过高原实车起动试验数据分析了滞速及失火等现象的产生及特点，并通过燃油喷雾过程计算解释了高原环境起动过程滞燃期偏大的原因。

## 1 柴油机起动过程试验

分别在海拔 3700 m 高原环境和平原环境针对 12 缸柴油机进行实车起动试验。主要测量参数包括瞬时转速、上止点、缸压等参数，测试现场环境参数见表 1，柴油机主要结构参数见表 2。

表 1 环境参数

	高原	平原
摩托小时/h	123	125
水温/°C	55	54
油温/°C	50	48
气温/°C	20	18

表 2 柴油机主要结构参数

柴油机型式	V型12缸、水冷、4冲程、直喷
进气方式/压缩比	废气涡轮增压、13~14
缸径/mm	150
工作总容积/L	38.88
冲程/mm	180 (主)、186.7 (副)

### 1.1 起动过程阶段划分

柴油机起动过程是指柴油机由稳定静止状态到高速转动的过程<sup>[4]</sup>。通过分析柴油机起动过程的瞬时转速曲线，可将柴油机起动过程分为倒拖阶段、加速阶段、过渡阶段以及稳定阶段，如图 1 所示。其中，倒拖阶段是指柴油机在外力驱动下开始转动，到转速开始自行上升时为止；加速阶段是指从转速开始自行上升，到转速升至最大值为止；过渡阶段是指从转速

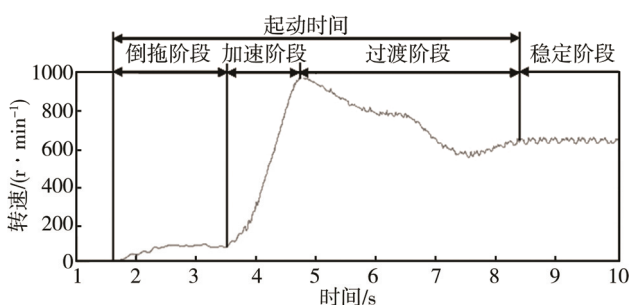


图 1 柴油机起动过程阶段划分

最大值过渡到稳定转速为止；稳定阶段是指转速稳定在怠速转速<sup>[5]</sup>。

加速阶段是柴油机起动过程的关键阶段，在此期间，瞬时转速快速上升，导致以曲轴转角计的滞燃期偏长。在高原环境，空气稀薄导致缸内空气密度低，燃油喷雾质量严重劣化，使得高原环境下起动过程加速阶段以角度计的滞燃期更长<sup>[5]</sup>，起动过程的滞速及失火现象就常发生于加速阶段。

### 1.2 高原环境起动过程滞燃期特点

两种环境以时间计的滞燃期进行对比，如图 2 所示。

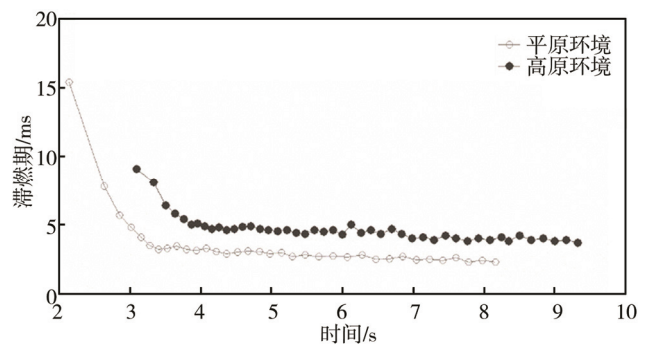


图 2 不同环境以时间计的滞燃期随起动时间变化曲线

从图 2 数据分析可见：在柴油机的起动过程中，随着循环的进行，以时间计的滞燃期呈现下降趋势，在加速阶段下降较快，在过渡阶段下降较慢。同一时刻，高原环境以时间计的滞燃期明显高于平原环境，而下降速度低于平原环境。稳定阶段高原环境滞燃期波动幅度高于平原环境，最大可达 0.9 ms。

## 2 滞速现象及失火

### 2.1 滞速现象产生及特点

在柴油机起动过程加速阶段，瞬时转速停止持续上升而滞留在某一转速附近，这一现象称为滞速现象<sup>[5]</sup>。通过两种环境柴油机起动试验发现，高原起动过程易出现滞速现象。从图 3 转速与缸压曲线可见，在柴油机起动过程的滞速期间出现了无燃烧压力上升的循环，其延长了柴油机的起动时间。

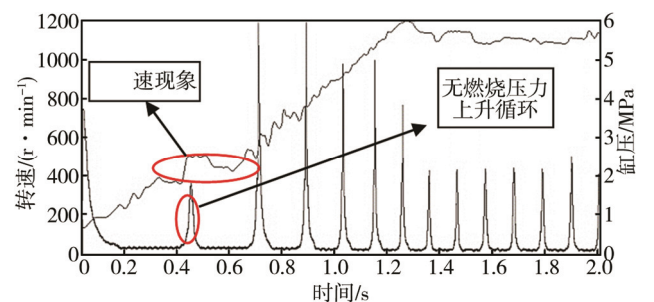


图 3 高原环境起动过程滞速时转速与缸压曲线

在高原环境条件下柴油机起动过程之所以出现滞速现象,是因为高原环境柴油机起动过程以时间计的滞燃期一直处于一个较高水平。在加速阶段,通过 $\varphi_i=6n\tau_i$ 可知,当转速加速上升,并且上升幅度高于以时间计的滞燃期的下降幅度时,以角度计的滞燃期将增大,导致柴油机缸内着火延后。从实验数据也发现,高原环境起动过程出现大量双峰燃烧,着火时刻发生在上止点之后<sup>[6]</sup>。此时,活塞开始远离上止点位置,柴油机缸内压力和温度下降,混合气错失在本循环的燃烧时机,从而导致无燃烧压力循环的出现,柴油机转速停止持续上升,滞速现象出现。

## 2.2 失火产生及特点

通过高原环境多次起动试验发现,高原环境柴油机起动出现滞速现象较为普遍,滞速现象轻则会增长柴油机起动时间,重则导致柴油机起动过程失败。图4为起动失败过程的转速与缸压曲线,从图4中可见,瞬时转速从290 r/min急剧升高到500 r/min。瞬时转速的急剧升高严重减少了循环内混合气形成时间,加之起动工况缸内压缩温度以及壁面温度低。同时高原环境又会造成缸内压缩压力严重偏低,使得缸内混合气形成质量严重变差,从而导致连续若干循环失火,进而起动失败。

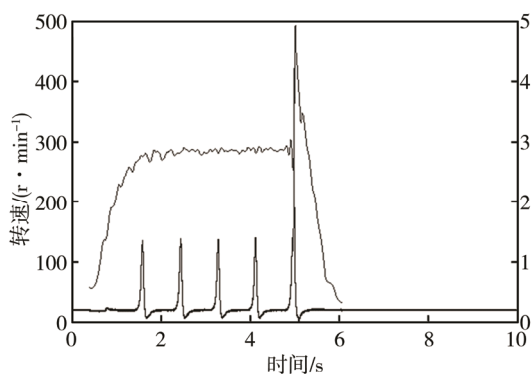


图4 高原环境起动失败时转速与缸压曲线

## 3 高原环境起动工况缸内喷雾分析

通过图2—4的分析发现,高原环境起动过程易出现滞速现象甚至失火,同时高原环境起动过程滞燃期水平明显高于平原环境。高原环境起动工况的压缩压力及温度偏低,其中缸内燃油的喷雾状况对着火燃烧特性产生重大影响。

针对所研究柴油机进行喷雾仿真计算,其主要结构参数见表2。由于高原环境坦克柴油机起动过程喷雾有如下特点:燃油喷射压力低、柴油黏度大、缸内压力低,因此建模时选用的模型见表3。同时考虑六孔喷油器的对称式结构,为提高计算效率,在计算过

程中只计算1/6圆周的区域。

表3 喷雾计算采用的子模型

物理过程	子模型
液滴破碎	KH-RT破碎 <sup>[7-9]</sup>
液滴碰壁	Bai撞壁模型 <sup>[10]</sup>
液滴蒸发	单液滴蒸发模型 <sup>[11-12]</sup>

在定容喷雾模拟计算中,高原环境柴油机起动过程缸内压缩压力介于1.35~1.65 MPa之间,平原环境在2.25~2.70 MPa之间,因此在计算过程中取高原1.5 MPa和平原2.5 MPa作为背压,两种环境下的气体温度均取压缩温度600 K,喷油规律如图5所示。同时缸内气体状态参数在计算初始时刻的分布假定均匀。在计算中,固体边界为气缸盖底面、气缸壁面以及活塞顶面。边界壁面速度条件为无滑移,壁面温度取600 K。

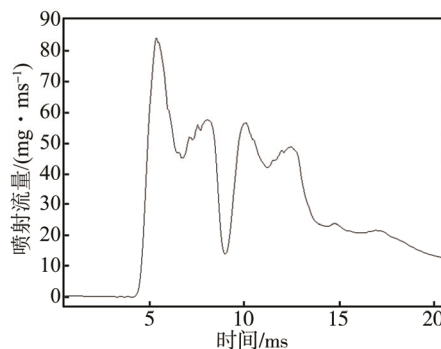


图5 喷油规律曲线

从图6贯穿距以及图7混合气浓度计算结果可以发现,高原环境低背压条件下的喷雾贯穿距更大,且油束重心更加靠近燃烧室壁面。过大的贯穿距使得油束更早接触低温壁面而不易蒸发,部分燃油附着壁面,导致燃油与空气的混合质量变差,使得着火准备时间增长,而起动过程转速升高又使得混合气形成时间缩短。这将导致着火角度严重滞后,重则错失本循环着火时机导致失燃,进而致使高原环境起动性能劣化。

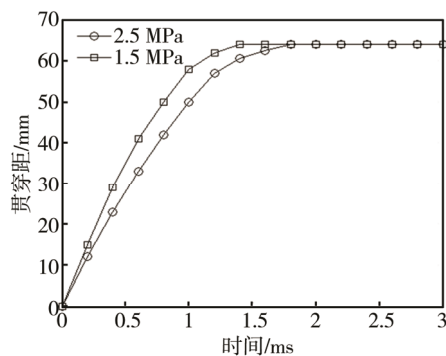


图6 高原与平原环境喷雾贯穿距对比曲线

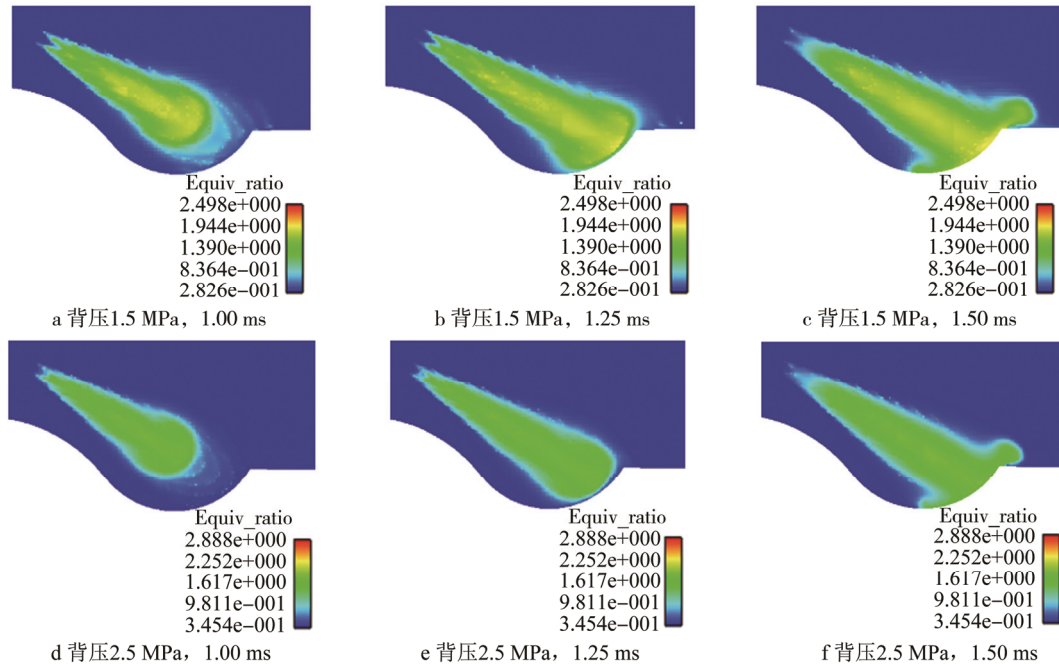


图 7 不同背景压力下气缸内当量比分布

## 4 结论

1) 高原环境下柴油机起动过程易出现滞速甚至失火等现象。

2) 高原环境下柴油机起动过程中燃烧滞燃期更长, 且不稳定性更大, 波动幅度比平原环境高出 0.9 ms 以内。

3) 高原环境下柴油机起动过程喷雾贯穿距更大, 油束重心更靠近燃烧室壁, 混合气质量变差。

### 参考文献:

- [1] BIRCANN R, KAZOUR Y, DAUER K, et al. Cold Performance Challenges with CNG PEI Injectors[J]. Training, 2013.
- [2] 敖良忠, 钱峰. CFM56-5B 发动机高原冷起动困难研究[J]. 西安航空学院学报, 2015, 33(3): 3-6.
- [3] SEVER A H, GHEORGHE O. Studies on Thermal Contraction of Crankshaft Bearing under Extreme Low Temperature[J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24(5): 496-501.
- [4] 李德桃. 柴油机冷起动的基础研究和改善措施[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 马宁, 李若亭, 赵文柱, 等. 高原环境条件下的柴油机起动过程试验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 227-232.
- [6] 苏岩, 刘忠长, 朱昌吉. 直喷式柴油机起动过程燃烧分析[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(2): 126-130.
- [7] REITZ R D, BRACCO F V. Mechanism of Atomization of a Liquid Jet[J]. Physics of Fluids, 1982, 25(10): 114-119.
- [8] SOM S, RAMIREZ A I, AGGARWAL S K, et al. Development and Validation of a Primary Breakup Model for Diesel Engine Applications[J]. SAE Technical Paper, 2009, 838: 156-162.
- [9] SU T F, PATTERSON M A, REITZ R D, et al. Experimental and Numerical Studies of High Pressure Multiple Injection Sprays[C]// SAE Paper 960861, 1996.
- [10] BAI C, GOSMAN A D. Development of Methodology for Spray Impingement Simulation[C]// SAE Paper 950283, 1995.
- [11] JIN J D, BORMAN G L. A Model for Multicomponent Droplet Vaporization at High Ambient Pressures[C]// SAE Technical Paper 850264, 1985.
- [12] ABRAHAM J, MAGI V. A Model for Multicomponent Droplet Vaporization in Sprays[J]. SAE Technical Papers, 1998, 3(4): 386-390.