

文章编号: 1008-1542(2024)03-0243-09

柴油机低温启动过程关键影响参数研究

朱海荣, 张凯伦, 刘晓阳, 李林, 肖旭

(河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:为实现柴油机在极端低温环境下可以具备较好的启动性能,对相关影响柴油机启动的参数进行研究。通过正交仿真研究了环境因素(进气压力、进气温度)、设计参数(压缩比、燃烧室缩口比、喷嘴直径)、控制参数(喷油温度、预喷油量、主喷提前角、主喷持续期、主预喷间隔)对柴油机低温条件下启动过程的影响,通过极差分析提取出对柴油机启动过程影响较大的关键影响参数,并以缸内压力、缸内温度和瞬时放热率为评价指标对各因素进行参数匹配研究。结果表明,环境因素和控制参数对柴油机启动过程的影响程度更高,进气压力、进气温度、主喷提前角和主喷持续期为影响柴油机低温条件下启动的关键影响参数,并选择组合1作为最佳参数匹配组合。研究得到了柴油机低温启动过程中的关键影响参数,可为改善低温环境下柴油机的启动效果提供参考。

关键词:内燃机工程;柴油机;低温启动;着火过程;影响参数

中图分类号: TK421

文献标识码: A

DOI: 10.7535/hbkd.2024yx03003

Research on key influence parameters of low-temperature starting process of diesel engine

ZHU Hairong, ZHANG Kailun, LIU Xiaoyang, LI Lin, XIAO Xu

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to achieve better starting performance of diesel engine in extreme low-temperature environment, the relevant parameters affecting the starting of diesel engine were researched. Through orthogonal simulation, the influence of environmental factors (intake pressure, intake temperature), design parameters (compression ratio, combustor reentrant ratio, nozzle diameter), control parameters (injection temperature, pilot injection quantity, start of main injection, main injection duration, injection interval between pilot injection and main injection) on diesel engine starting process under low-temperature conditions were studied. The key parameters affecting the starting process of diesel engine were extracted by range analysis. Meanwhile the parameters matching of each factor were studied by taking the cylinder pressure, the cylinder temperature and the instantaneous heat release rate as evaluation indexes. The results show that the environmental factors and control parameters have a higher degree of influence on the starting process of diesel engine. Intake pressure, intake

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2023-12-29; 责任编辑: 冯民

基金项目: 河北省自然科学基金(E202208009); 教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220237); 国家产业基础再造和制造业高质量发展专项(2023ZY02001); 国家自然科学基金(51706058)

第一作者简介: 朱海荣(1979—), 女, 河北廊坊人, 副教授, 博士, 主要从事多相流传热传质、内燃机热负荷方面的研究。

通信作者: 刘晓阳, 副教授。E-mail: lxy_841211@163.com

朱海荣, 张凯伦, 刘晓阳, 等. 柴油机低温启动过程关键影响参数研究[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(3): 243-251.

ZHU Hairong, ZHANG Kailun, LIU Xiaoyang, et al. Research on key influence parameters of low-temperature starting process of diesel engine[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(3): 243-251.

temperature, start of main injection and main injection duration are the key parameters affecting the starting of diesel engine under low temperature conditions, and combination one is selected as the best parameter matching combination. The key parameters influencing the low temperature starting process of diesel engine are obtained, which provides a theoretical basis for improving the starting effect of diesel engine under low temperature.

Keywords: internal combustion engine engineering; diesel engine; low-temperature starting; ignition process; influence parameters

柴油发动机具有扭矩大、热效率高、输出功率大、运行可靠性高和燃料安全性好等诸多优势,广泛应用于车辆、船舶动力、航空航天、农业机械、国防装备等诸多领域^[1]。目前,要求柴油机的输出功率在保持现有水平甚至更高的条件下,大幅度压缩体积,提高其功率密度,即高功率密度动力技术已经成为中国柴油机发展的必然趋势。中国幅员辽阔,南北地理纬度跨度大,位于中国东北和西北的部分省份,冬季时常出现极端天气,多地的冬季平均气温都在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,新疆、内蒙古、西藏以及东北地区最冷月的平均温度在 $-41\sim-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,黑龙江漠河的最低温度甚至可达到 $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。因此,中国的地理条件和气候特征要求柴油机在极端低温环境下具有很好的启动性能。保证柴油机在极端低温环境下快速启动,改善高功率密度柴油机低温环境下的机动性和可靠性,对中国北方地区冬季柴油机工作效率的提高具有一定的现实意义。

柴油机在低温和低压环境下的缸内燃烧过程已经引起学者们的广泛研究。洪印涛^[3]对柴油机在极端低温环境下缸内的工作过程进行分析,对柴油机冷启动过程中不同热力阶段的数学模型进行了简化。有研究表明低温环境对最大瞬态放热率、最大压升率和喷雾贯穿距离的影响较大,初始点火稳定性也随环境温度的降低而降低^[4-6]。还有研究表明随海拔高度升高,柴油机启动需要的循环数增加,启动时间变长,缸内进气量减少,喷雾贯穿距离增大,燃烧始点推迟,燃烧持续期增加^[7-8]。

与此同时,学者们也针对设计参数对柴油机燃烧过程和缸内喷雾过程的影响进行了研究。张志强等^[9]研究表明随着喷孔直径增大,最高爆发压力和瞬时放热率峰值显著升高,燃烧持续期缩短,热效率升高。有研究表明燃烧室喉口直径对喷雾贯穿距离和索特平均直径等喷雾特性影响较小,对缸内压力和温度影响较大,同时缩口参数的增大能够提高放热率和燃烧累计放热量,且 NO_x 和碳烟的排放减少^[10-12]。

控制参数同样对柴油机的缸内燃烧有很大程度的影响。王龙等^[13]研究了喷油温度对高原环境下柴油机燃烧首循环的影响,结果表明提高喷油温度可使缸内平均温度和缸内放热率峰值升高,峰值相位前移。强永平等^[14]研究表明,回水温度降低是导致活塞烧蚀故障的重要因素,回水温度降低会导致最高燃烧压力、最大压升率显著升高并使燃烧始点推后。对于重型柴油机来说,适当提高喷射压力,既能保证快速启动,又能减少低温下的失火或不完全燃烧^[15]。分段喷射策略可以改善柴油机的启动效果。研究表明,多次喷射有利于改善启动性能,可有效缩短启动时间且有利于提高启动首循环燃烧效率和启动过程的燃烧稳定性^[16-19]。马铭铭^[20]对喷油正时、喷油压力、进气门及排气门开启角度进行优化仿真,得到了冷启动达到最佳状态时的各项参数。除此之外,学者们还针对柴油掺混煤油、甲醇以及天然气等燃料对柴油机燃烧效果的影响进行研究,研究表明在柴油中掺混其他燃料可以增强冷焰强度,有利于冷焰向高温热焰的转变,有助于在低温下快速启动^[21-26]。

目前对柴油机启动过程影响因素的研究大多集中在单个参数,对影响参数的系统性研究较少。因此本文基于正交仿真,具体分析各环境参数、设计参数和控制参数对启动过程的影响,并根据极差分析,获得各参数对缸内评价指标的影响权重,提取柴油机启动过程的关键影响参数。

1 模型建立

1.1 几何模型建立及网格设定

在本研究中,利用 SolidWorks 建模软件,根据表 1 所示柴油机主要参数,建立柴油机燃烧室和进、排气道的三维模型,并导出 STL 格式,然后将其导入 CONVERGE 软件中,进行边界划分和喷雾器的参数设置。柴油机燃烧室的三维模型如图 1 所示。基础网格的尺寸设置为 4 mm ,同时对气缸内部和进气道进行速度和温度的自适应加密,并且对缸套壁面和喷雾油束分别进行 2 级和 3 级局部固定加密,经过加密后的最大网格数约为 $1\ 060\ 000$ 。图 2 所示为上止点时网格截面图。

表 1 柴油机主要参数

Tab. 1 Main engine parameters

参数	数值
缸径/mm	90
行程/mm	105
连杆长度/mm	158
压缩比	17.5

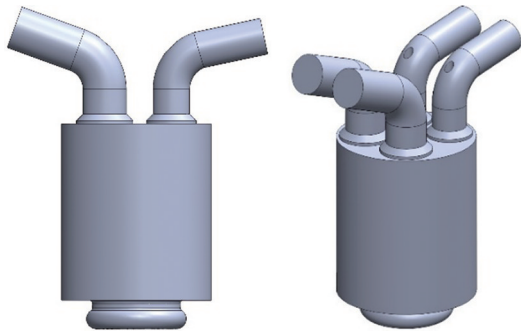


图 1 燃烧室三维模型

Fig. 1 3D model of combustion chamber

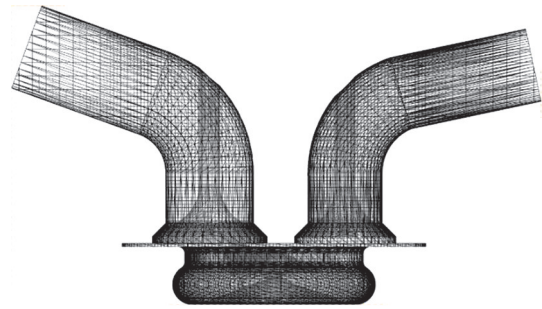


图 2 上止点时计算网格截面图

Fig. 2 Section of mesh at TDC

1.2 仿真计算物理模型选择

本文利用 CONVERGE 软件对柴油机低温启动过程进行数值模拟研究。CONVERGE 是一款发动机缸内 CFD 专业分析软件,可以根据不同研究对象选择物理模型,对发动机的燃烧过程、流体运动过程进行详细分析和求解。本研究选择的主要计算物理模型如表 2 所示。

表 2 物理模型选择

Tab. 2 Selection of physical model

物理模型	名称
湍流模型	RNG $k-\epsilon$
喷雾破碎模型	KH-RT
液滴碰撞模型	NTC
液滴蒸发模型	Frossling
燃烧模型	SAGE

1.3 网格无关性验证

选择合适的基础网格尺寸既可以保证计算结果的准确性,又可以减少计算时间。本文选取 8.0、4.0、2.8 mm 3 种基础网格尺寸,设置发动机转速为 2 000 r/min,进气温度为 363 K,进气压力为 1 MPa,活塞表面温度为 525 K,气缸盖温度和燃烧室壁面温度为 450 K,进气道壁温为 425 K,排气道壁温为 500 K。采用 3 种网格尺寸分别进行计算,得到网格无关性验证结果,如图 3 所示。由图 3 可知,采用 3 种基础网格尺寸计算得到的结果十分接近,在活塞达到上止点之前的缸内压力和缸内温度曲线几乎重合,在上止点后 8.0 mm 的结果与另外 2 组略有不同,因此综合计算时间和计算结果准确性选择 4.0 mm 基础网格尺寸。

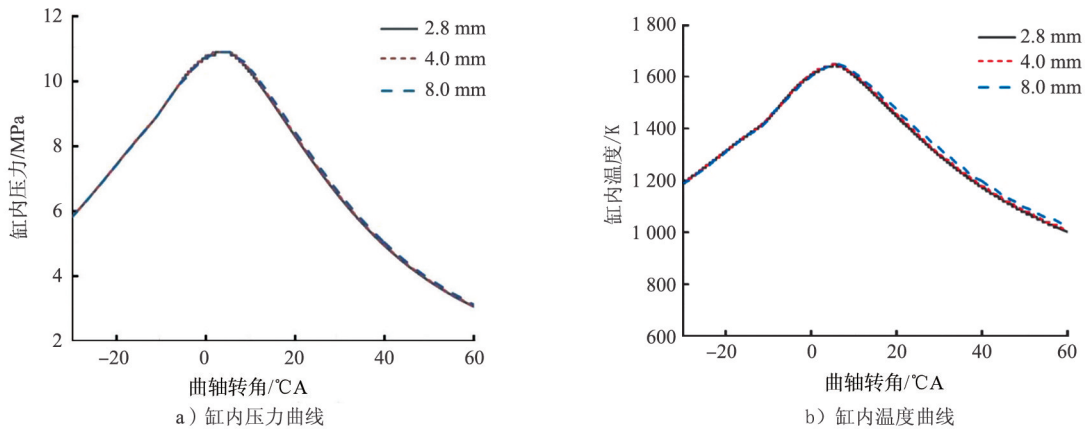


图 3 网格无关性验证结果对比图

Fig. 3 Comparison of grid independence verification results

2 影响参数分析

正交试验是一种利用正交表来安排和分析多因素试验的数理统计方法,该方法可以通过最少的仿真次数获得最优结果指标,还可以通过极差分析得出各因素对评价指标的影响权重,从而得到各因素对评价指标的影响主次关系。因此本文基于正交仿真方法对各参数进行研究,从而获得影响柴油机启动过程的关键影响参数。

2.1 因素水平以及评价指标确定

影响柴油机启动过程效果的参数主要为环境因素、设计参数和控制参数,本文主要针对这 3 类参数进行研究,选取进行正交仿真的参数如下:1)环境因素,包括进气温度(A)、进气压力(B);2)设计参数,包括压缩比(C)、燃烧室缩口比(D)、喷嘴直径(E);3)控制参数,包括喷油温度(F)、预喷油量(G)、主喷提前角(H)、

主喷持续期(*I*)、主预喷间隔(*J*)。确定进行正交仿真研究的因素为 10 个,每个因素选取 4 个水平,因素-水平表见表 3。

表 3 因素-水平表
Tab. 3 Factor-level table

水平	A 进气温度/ K	B 进气压力/ MPa	C 压缩比	D 燃烧室 缩口比	E 喷嘴直径/ mm	F 喷油温度/ K	G 预喷油量/ %	H 主喷提前角/ °CA	I 主喷持续期/ °CA	J 主预喷间隔/ °CA
1	248	0.6	15.0	0.85	2.5	263	5	-6	12	15
2	258	0.7	16.0	0.88	2.6	273	10	-10	16	20
3	273	1.0	17.5	0.91	2.7	283	15	-14	20	25
4	283	2.0	18.0	0.94	2.8	343	20	-18	24	30

本文所研究的燃烧室截面形状如图 4 所示。燃烧室缩口比即 $G1/G2$, $G2$ 为固定值,改变 $G1$ 的尺寸即可实现不同的燃烧室缩口比值,为保证压缩比一定, $G3$ 的尺寸会相应改变。预喷油量是指预喷的油量占总喷油量的比例,总循环喷油量为 150 mg。主预喷间隔分别为 15~30 °CA,以 5 °CA 为间隔步长。

本文选择缸内压力、缸内温度和瞬时放热率作为缸内着火效果的评价指标,以判断缸内的燃烧情况。缸内压力过高会导致柴油机工作粗暴,机械负荷增加,而缸内压力过低会造成柴油机动力下降,燃油消耗率升高,排放增加;缸内温度过高会使活塞承受过高的热负荷,温度过低会造成着火失败或缸内不完全燃烧;瞬时放热率过高会导致柴油机工作不平稳,过低则会使燃油消耗率升高,经济性下降。理想的放热规律是燃烧先缓后急,以满足运转柔和的要求,随后燃烧要加快,使燃料尽可能接近上止点附近燃烧,以满足经济性要求^[27]。因此,本研究选取的 3 个指标的评价原则均具有适中性。

2.2 正交仿真计算

由上文可知本研究采用 10 因素、4 水平正交仿真,因此选用 $L_{32}(4^{10})$ 正交表。本文确定的正交仿真计算设计及计算结果如表 4 所示。

表 4 正交仿真计算安排及计算结果

Tab. 4 Orthogonal simulation calculation arrangement and calculation results

序号	A/ K	B/ MPa	C	D	E/ mm	F/ K	G/ %	H/ °CA	I/ °CA	J/ °CA	缸内压力/ MPa	缸内温 度/K	瞬时放 热率/(J/°CA)
1	248	0.6	15	0.85	25	263	5	-6	12	15	13.46	1 396.86	3 927.82
2	248	0.6	16	0.88	26	273	10	-10	16	20	14.24	1 388.94	912.05
3	248	0.6	17.5	0.91	27	283	15	-14	20	25	13.95	1 347.59	919.71
4	248	0.6	18	0.94	28	343	20	-18	24	30	14.52	1 408.15	622.17
5	248	0.7	15	0.85	26	273	15	-14	24	30	13.76	1 201.63	666.45
6	248	0.7	16	0.88	25	263	20	-18	20	25	17.68	1 409.99	853.57
7	248	0.7	17.5	0.91	28	343	5	-6	16	20	13.99	1 221.68	565.43
8	248	0.7	18	0.94	27	283	10	-10	12	15	16.72	1 371.62	706.43
9	258	1	15	0.88	27	343	5	-10	20	30	17.90	1 109.89	981.37
10	258	1	16	0.85	28	283	10	-6	24	25	15.54	1 003.25	261.27
11	258	1	17.5	0.94	25	273	15	-18	12	20	24.27	1 283.63	2 356.24
12	258	1	18	0.91	26	263	20	-14	16	15	22.36	1 252.19	984.91
13	258	2	15	0.88	28	283	15	-18	16	15	43.04	1 053.40	1 171.17
14	258	2	16	0.85	27	343	20	-14	12	20	45.34	1 068.51	1 680.33
15	258	2	17.5	0.94	26	263	5	-10	24	25	39.86	936.52	278.94
16	258	2	18	0.91	25	273	10	-6	20	30	38.70	934.61	319.13
17	273	0.6	15	0.94	25	343	10	-14	16	25	13.77	1 544.22	973.50
18	273	0.6	16	0.91	26	283	5	-18	12	30	15.26	1 633.08	2 199.60

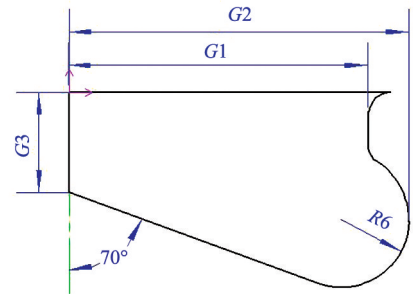


图 4 燃烧室截面结构图
Fig. 4 Structure diagram of combustion chamber section

续表

序号	A/ K	B/ MPa	C	D	E/ mm	F/ K	G/ %	H/ °CA	I/ °CA	J/ °CA	缸内压力/ MPa	缸内温 度/K	瞬时代 热率/(J/°CA)
19	273	0.6	17.5	0.88	27	273	20	-6	24	15	10.92	1 273.74	537.78
20	273	0.6	18	0.85	28	263	15	-10	20	20	12.34	1 340.55	786.46
21	273	0.7	15	0.94	26	283	20	-6	20	20	12.14	1 225.17	784.76
22	273	0.7	16	0.91	25	343	15	-10	24	15	12.90	1 275.79	648.04
23	273	0.7	17.5	0.88	28	263	10	-14	12	30	16.91	1 518.04	979.91
24	273	0.7	18	0.85	27	273	5	-18	16	25	17.30	1 529.23	958.38
25	283	1	15	0.91	27	263	10	-18	24	20	18.86	1 252.07	668.80
26	283	1	16	0.94	28	273	5	-14	20	15	18.91	1 237.61	310.58
27	283	1	17.5	0.85	25	283	20	-10	16	30	20.51	1 298.06	393.40
28	283	1	18	0.88	26	343	15	-6	12	25	20.57	1 306.70	715.19
29	283	2	15	0.91	28	273	20	-10	12	25	38.95	1 092.03	478.77
30	283	2	16	0.94	27	263	15	-6	16	30	35.79	1 018.73	373.86
31	283	2	17.5	0.85	26	343	10	-18	20	15	44.97	1 147.54	359.02
32	283	2	18	0.88	25	283	5	-14	24	20	41.59	1 078.87	307.69

3 数值模拟结果及分析

3.1 评价指标为缸内压力的计算结果分析

缸内压力的极差分析如表 5 所示,其中 k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 分别为 4 个水平的缸内压力均值。根据极差的大小可以判断各因素对评价指标的影响程度,即极差的数值越大,则表示该极差所对应的因素越主要。根据表 5 的极差分析可知,极差最大值 27.47 对应的进气压力对缸内压力峰值结果的影响最大,最小值 0.73 对应的预喷油量对缸内压力峰值影响最小。因此可得出各参数对缸内压力的影响程度主次关系为 $B > A > H > I > C > J > E > D > F > G$,即进气压力 > 进气温度 > 主喷提前角 > 主喷持续期 > 压缩比 > 主预喷间隔 > 喷嘴直径 > 燃烧室缩口比 > 喷油温度 > 预喷油量。

表 5 缸内压力计算结果极差分析

Tab. 5 Range analysis of cylinder pressure calculation results

参数	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
k_1	14.79	13.56	21.49	22.90	22.86	22.16	22.28	20.14	23.94	22.91
k_2	30.88	15.18	21.96	22.86	22.90	22.13	22.46	21.68	22.63	22.85
k_3	13.94	19.87	23.17	21.87	22.10	22.34	22.08	23.63	22.07	22.20
k_4	30.02	41.03	23.01	22.00	21.78	23.00	22.80	24.49	20.99	21.67
极差	16.93	27.47	1.69	1.03	1.12	0.86	0.73	4.35	2.94	1.24

假定影响程度最大的参数,即进气压力对本机缸内压力的影响权重系数为 1,各参数对评价指标缸内压力的影响权重系数如表 6 所示,影响权重系数越大,代表该参数对评价指标的影响程度越大。综上可知,进气压力、进气温度和主喷提前角是影响缸内压力峰值的主要参数。以缸内压力为评价指标时,根据其适中性得出的参数组合方案(组合 1)如表 7 所示。

表 6 各参数对缸内压力的影响权重系数

Tab. 6 Influence weight coefficient of each parameter on cylinder pressure

因素	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
权重系数	0.616	1.000	0.061	0.038	0.041	0.031	0.026	0.158	0.107	0.045

表 7 以缸内压力为评价指标时的参数组合方案

Tab. 7 Parameters combination plan with cylinder pressure as evaluation index

A4	B3	C4	D2	E1	F3	G2	H3	I2	J2
283 K	1 MPa	18	0.88	2.5 mm	283 K	10%	-14 °CA	16 °CA	20 °CA

3.2 评价指标为缸内温度的计算结果分析

根据表 8 的缸内温度极差分析可知,极差最大值 375.37 所对应的进气压力对于缸内温度峰值结果的影

表8 缸内温度计算结果极差分析

Tab. 8 Range analysis of cylinder temperature calculation results

参数	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
k_1	1 343.31	1 416.64	1 234.41	1 248.20	1 277.75	1 265.62	1 267.97	1 172.59	1 333.81	1 251.09
k_2	1 080.25	1 344.14	1 254.49	1 267.45	1 261.47	1 242.68	1 270.04	1 226.68	1 288.31	1 232.43
k_3	1 417.48	1 217.93	1 253.35	1 251.13	1 246.42	1 251.38	1 228.50	1 281.08	1 219.12	1 271.19
k_4	1 178.95	1 041.28	1 277.74	1 253.21	1 234.34	1 260.31	1 253.48	1 339.64	1 178.75	1 265.27
极差	337.23	375.37	43.33	19.24	43.41	22.94	41.53	167.04	155.06	38.76

响最大,极差最小值 19.24 所对应的燃烧室缩口比对缸内温度峰值的影响最小。可以得出,各参数对缸内温度影响程度主次关系为 $B>A>H>I>E>C>G>J>F>D$,即进气压力>进气温度>主喷提前角>主喷持续期>喷嘴直径>压缩比>预喷油量>主预喷间隔>喷油温度>燃烧室缩口比。

假定影响程度最大的参数,即进气压力对本柴油机缸内温度的影响权重系数为 1,则各参数对评价指标缸内温度的影响权重系数如表 9 所示。可知进气压力、进气温度和主喷提前角是影响缸内温度峰值的主要参数。以缸内温度为评价指标时,根据其适中性得出的参数组合方案(组合 2)如表 10 所示。

表9 各参数对缸内温度的影响权重系数

Tab. 9 Influence weight coefficient of each parameter on cylinder temperature

因素	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
权重系数	0.898	1.000	0.115	0.051	0.116	0.061	0.111	0.445	0.413	0.103

表10 以缸内温度为评价指标时的参数组合方案

Tab. 10 Parameters combination plan with cylinder temperature as evaluation index

A4	B3	C3	D3	E3	F3	G4	H2	I3	J1
283 K	1 MPa	17.5	0.91	2.7 mm	283 K	20%	-10 °CA	20 °CA	15 °CA

3.3 评价指标为瞬时放热率的计算结果分析

根据表 11 的瞬时放热率极差分析可知,极差最大值 1 131.64 所对应的主喷持续期对于瞬时放热率峰值结果的影响最大,极差最小值 289.36 所对应的喷油温度对瞬时放热率峰值的影响最小。因此可以得出,对于瞬时放热率各参数影响程度的主次关系为 $I>B>A>E>G>C>H>J>D>F$,即主喷持续期>进气压力>进气温度>喷嘴直径>预喷油量>压缩比>主喷提前角>主预喷间隔>燃烧室缩口比>喷油温度。

表11 瞬时放热率计算结果极差分析

Tab. 11 Range analysis of instantaneous heat release rate calculation results

因素	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
k_1	1 146.70	1 359.89	1 206.58	1 129.14	1 222.42	1 106.78	1 191.23	935.66	1 630.54	1 080.72
k_2	1 004.17	770.37	904.91	807.34	862.62	817.42	647.51	648.18	791.59	1 007.72
k_3	983.55	833.97	798.80	848.05	853.33	843.00	954.64	852.89	664.33	679.92
k_4	450.91	621.11	675.05	800.81	646.97	818.13	791.96	1 148.62	498.89	816.99
极差	695.79	738.77	531.54	328.33	575.45	289.36	543.71	500.44	1 131.64	400.80

假定影响程度最大的参数,即主喷持续期对本柴油机瞬时放热率的影响权重系数为 1,则各参数对评价指标瞬时放热率的影响权重系数如表 12 所示。综上可知主喷持续期、进气压力和进气温度是影响瞬时放热率峰值的主要参数。以瞬时放热率为评价指标时,根据其适中性得出的参数组合方案(组合 3)如表 13 所示。

表12 各参数对瞬时放热率的影响权重系数

Tab. 12 Influence weight coefficient of each parameter on instantaneous heat release rate

因素	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
权重系数	0.615	0.653	0.470	0.290	0.509	0.256	0.480	0.442	1.000	0.354

表13 以瞬时放热率为评价指标时的参数组合方案

Tab. 13 Parameters combination plan with instantaneous heat release rate as evaluation index

A4	B4	C4	D4	E4	F2	G2	H2	I4	J3
273 K	1 MPa	16	0.88	2.6 mm	283 K	15%	-6 °CA	20 °CA	30 °CA

由以上分析可知,影响缸内压力峰值的主要因素是进气压力、进气温度和主喷提前角;影响缸内温度峰值的主要因素是进气压力、进气温度和主喷提前角;影响瞬时放热率峰值的主要因素是主喷持续期、进气压力和进气温度。因此确定进气压力、进气温度、主喷提前角和主喷持续期为影响柴油机低温条件下启动的关键影响因素,其中进气压力和进气温度是环境因素,主喷提前角和主喷持续期为控制参数,即环境因素和控制参数对柴油机启动过程的影响程度更高。

3.4 最佳匹配组合计算结果分析

经过对以上 3 组参数组合的验证计算,得到缸内压力、缸内温度和瞬时放热率曲线如图 5 所示。由图 5 a)、b) 可知,3 个组合的缸内压力峰值分别为 22.10、19.08 和 16.64 MPa,其缸内压力峰值相位分别为 5.6、9.5 和 13 °CA;缸内温度峰值分别为 1 357.87、1 241.38 和 1 122.73 K,其缸内温度峰值相位分别为 8.1、14.3 和 19.0 °CA。

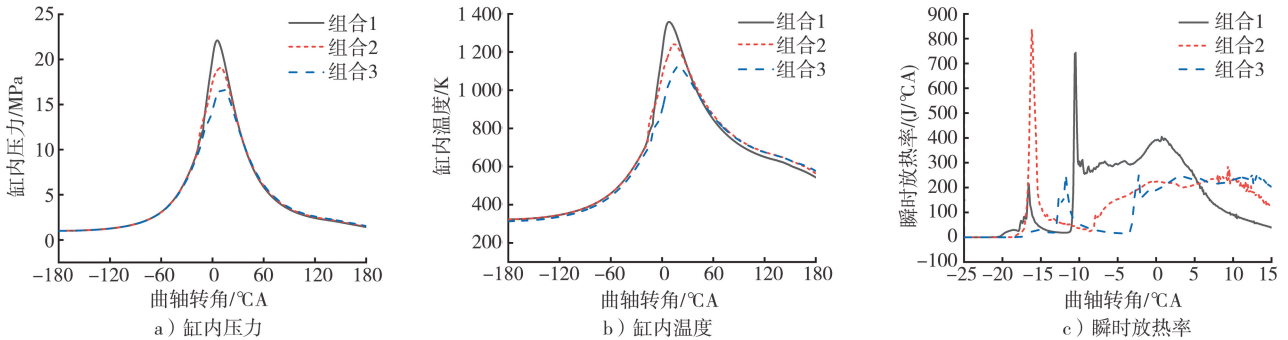


图 5 3 种组合的缸内参数对比图

Fig. 5 Comparison diagram of cylinder parameters of three combination plans

从组合 1 至组合 3,缸内压力和缸内温度的峰值逐渐减小,峰值相位逐渐增大且距离上止点越来越远,理想的缸内燃烧状态要求燃烧尽可能接近上止点,这说明从组合 1 至组合 3,缸内燃烧逐渐出现推迟。此外,从缸压和缸温曲线可看出,组合 2 的缸压和缸温曲线的抬升时间比组合 1 略早,这是由于组合 2 的预喷油时刻在 3 组中最晚,预喷燃油喷入燃烧室时缸内的温度相比其他 2 组略高,因此更先发生着火,燃料在缸内燃烧释放大量热量,缸内压力和温度也随之升高。

3 个组合的瞬时放热率峰值分别为 743.06、837.09 和 261.21 J/°CA,瞬时放热率峰值相位分别为 -10.5、-16.2 和 12.5 °CA。由图 5 c)可知,3 个组合的瞬时放热率曲线均呈双峰状,这是由于预喷燃油的喷雾扩散和燃烧放热可以改善缸内燃烧环境,提高缸内的温度,使放热率升高。通过比较可知,组合 1 的瞬时放热率峰值相位距离上止点最近,燃烧效率较高;组合 2 的瞬时放热率峰值出现的时刻最早,且峰值最大,这是由于组合 2 的喷油时刻最晚,燃油喷入燃烧室时缸内的温度相比其他 2 组略高,且组合 2 的预喷燃油量最大,预喷后缸内温度较高,在主喷燃油喷入缸内后,更容易发生着火,导致滞燃期较短,瞬时放热率相较于另外 2 组更早达到峰值;而组合 1 的主预喷间隔小,主喷的滞燃期较长,形成了更多的预混合气,在进行预混燃烧时,较多的混合气进行燃烧,提高了缸内压力和温度,因此组合 1 的瞬时放热率峰值较高,虽然组合 1 的瞬时放热率峰值比组合 2 略低,但理想的燃烧放热规律要求燃料尽可能接近上止点附近燃烧,因此组合 1 的燃烧放热效果相比于另外 2 组更好。

由图 6 可知,组合 1 的燃油油束喷向活塞凹坑侧壁,并在凹坑底部以及侧壁形成燃油浓区,组合 1 的燃油喷雾扩散比另外 2 组要快,喷雾贯穿距离更大,而组合 3 的燃油喷雾在上止点时未到达凹坑侧壁,这是由于组合 3 的燃烧室深度是这 3 个组合中最大的,且组合 3 的进气温度是 3 组中最低的,较低进气温度会使燃

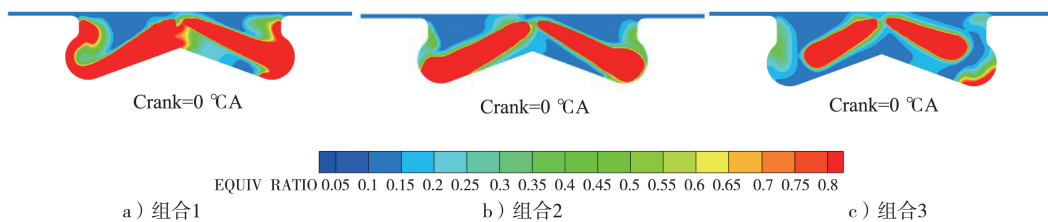


图 6 3 种组合的上止点缸内混合气分布图

Fig. 6 Distribution diagram of mixture in TDC cylinder with three combination plans

油的喷雾扩散速度变慢,因此燃油喷雾到达燃烧室凹坑的时间最晚。此外,组合3的凹坑底部存在油气当量比较高的区域,这是由预喷的燃油喷雾到达凹坑处形成的,然而组合1和组合2由于喷雾扩散速度较快,预喷燃油喷雾早在上止点前就已经扩散完成,因此未同组合3一样在凹坑底部存在油气当量比较高的区域。

由图7可知,燃油油束喷向活塞凹坑侧壁,并先在凹坑侧壁处发生燃烧,出现温度较高区域,燃烧室底部中央接近凸台的区域由于燃油蒸发扩散效果较好也先发生燃烧。可以看出组合1的高温区域最多,组合3的温度场分布高温区域最少,组合3的凹坑底部存在温度较高区域,这是由预喷的燃油喷雾先到达凹坑处发生燃烧形成的,组合1和组合2由于燃油蒸发扩散效果较好,预喷燃油在上止点前就已发生燃烧。组合1由于其喷雾时刻较早,燃油喷入燃烧室后有更长的时间进行蒸发扩散,缸内的混合气分布相较于另外2组更加均匀,更易于充分燃烧,因此其位于上止点时的缸内高温区域比另外2组更多。

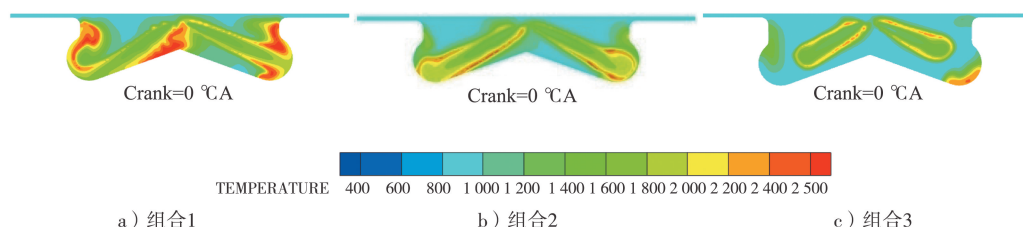


图7 3种组合的上止点缸内温度场分布图

Fig. 7 Distribution diagram of temperature field in TDC cylinder with three combination plans

由缸内压力、缸内温度可以看出,组合1的曲线峰值比另外2组更高且峰值相位更接近上止点;由瞬时放热率曲线可以看出,组合1的峰值虽略低于组合2但其峰值距离上止点最近;从缸内混合气分布和温度场可以看出,组合1的燃油扩散效果更好,温度场的分布相较另外2组更加均匀。因此综合以上结果分析,选择组合1作为最佳参数匹配组合。

4 结 语

基于正交仿真研究了环境因素、设计参数、控制参数对柴油机低温启动过程的影响,通过极差分析获得各参数对缸内评价指标的影响权重,提取出对柴油机启动过程影响较大的关键影响参数,并以缸内压力、缸内温度和瞬时放热率为评价指标对各因素进行参数匹配研究,主要结论如下。

1)各参数对缸内压力的影响程度主次关系为进气压力>进气温度>主喷提前角>主喷持续期>压缩比>主预喷间隔>喷嘴直径>燃烧室缩口比>喷油温度>预喷油量。

对缸内温度的影响程度主次关系为进气压力>进气温度>主喷提前角>主喷持续期>喷嘴直径>压缩比>预喷油量>主预喷间隔>喷油温度>燃烧室缩口比。

对瞬时放热率的影响程度主次关系为主喷持续期>进气压力>进气温度>喷嘴直径>预喷油量>压缩比>主喷提前角>主预喷间隔>燃烧室缩口比>喷油温度。

2)确定进气压力、进气温度、主喷提前角和主喷持续期为影响柴油机低温条件下启动的关键影响参数。

3)对3组参数组合进行仿真,并对结果进行分析得到组合1的燃烧效率较高,并且其缸内油气混合分布较好,温度场分布相较于另外2组更均匀。

综上所述,本文通过CONVERGE软件仿真分析得到了柴油机低温启动过程的关键影响参数,后续将基于最佳参数组合研究各关键影响参数对柴油机启动过程的影响规律。

参考文献/References:

- [1] HEYWOOD J. Internal Combustion Engine Fundamentals[M]. New York:Mc-Graw Hill,1988.
- [2] 蒋齐秦,刘伍权,朱岩,等.车用柴油机冷启动燃烧过程研究及相关技术分析[J].小型内燃机与车辆技术,2018,47(5):81-86.
JIANG Qiqin,LIU Wuquan,ZHU Yan,et al. A review of study on cold start combustion process of vehicle diesel engine and related techniques[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle,2018,47(5):81-86.
- [3] 洪印涛.极端低温环境下柴油机的快速启动研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
HONG Yintao. The Research of Rapid Start of Diesel Engine Under Extreme Low Temperature Environment[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2015.
- [4] 强永平,李海鹰,张炜,等.低温环境柴油机活塞烧蚀燃烧过程分析研究[J].车用发动机,2021(3):64-70.
QIANG Yongping,LI Haiying,ZHANG Wei,et al. Research on combustion process of piston ablation for diesel engine at low temperature

- [J]. *Vehicle Engine*, 2021(3):64-70.
- [5] ZHANG Z, LIU F S, WANG P, et al. Ignition-characteristic research of the diesel fuel in combustion vessel simulated diesel engine cold start condition[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2018. DOI:10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000499.
- [6] PACHIANNAN T, ZHONG Wenjun, XUAN Tiemei, et al. Simultaneous study on spray liquid length, ignition and combustion characteristics of diesel and hydrogenated catalytic biodiesel in a constant volume combustion chamber[J]. *Renewable Energy*, 2019, 140:761-771.
- [7] 王霞, 陈月春, 李素婷, 等. 不同海拔高度下柴油机低温启动性能试验研究[J]. *内燃机与动力装置*, 2022, 39(1):7-11.
WANG Xia, CHEN Yuechun, LI Suting, et al. Experimental study on cold starting performance of diesel engine at different altitudes[J]. *Internal Combustion Engine & Power Plant*, 2022, 39(1):7-11.
- [8] 王成龙. 高海拔环境下柴油机喷雾撞壁及燃烧特性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
WANG Chenglong. Study of Spray Impingement Characteristics and Combustion Characteristics for Diesel Engine at High Altitude[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [9] 张志强, 刘一泽, 郭斌扬, 等. 喷孔直径对重型柴油机燃烧和排放的影响[J]. *内燃机学报*, 2022, 40(2):97-105.
ZHANG Zhiqiang, LIU Yize, WU Binyang, et al. Effect of nozzle diameter on combustion and emissions of a heavy duty diesel engine[J]. *Transactions of Csice*, 2022, 40(2):97-105.
- [10] 强永平, 蔡忠周, 徐春龙, 等. 燃烧室形状对燃烧过程的影响研究[J]. *柴油机*, 2011, 33(2):1-6.
QIANG Yongping, CAI Zhongzhou, XU Chunlong, et al. Influence of combustion chamber's shape on combustion process[J]. *Diesel Engine*, 2011, 33(2):1-6.
- [11] 陈东润. 直喷柴油机燃烧室形状参数与喷雾特性匹配研究[D]. 长春:吉林大学, 2022.
CHEN Dongrun. Matching Study of Combustion Chamber Geometry Parameters and Spray Characteristics of DI Diesel Engine[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [12] JAFARI B, SEDDIQ M, MIRSALEM S M. Assessment of the impacts of combustion chamber bowl geometry and injection timing on a reactivity controlled compression ignition engine at low and high load conditions[J]. *International Journal of Engine Research*, 2020, 22(9):2852-2868.
- [13] 王龙, 王宪成. 燃油温度对柴油机高原启动热负荷的影响[J]. *山西电子技术*, 2021(5):12-13.
WANG Long, WANG Xiancheng. The influence of fuel temperature on the thermal load of diesel engine at high altitude[J]. *Shanxi Electronic Technology*, 2021(5):12-13.
- [14] 强永平, 李海鹰, 张晓琴, 等. 柴油机回水温度对燃烧过程影响试验研究[J]. *兵工学报*, 2020, 41(2):222-230.
QIANG Yongping, LI Haiying, ZHANG Xiaoqin, et al. Experimental research on effect of return water temperature on the combustion progress in a diesel engine[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(2):222-230.
- [15] SHI Zhicheng, LEE C F, WU Han, et al. Effect of injection pressure on the impinging spray and ignition characteristics of the heavy-duty diesel engine under low-temperature conditions[J]. *Applied Energy*, 2020. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.114552.
- [16] 韩晓梅, 林学东, 李德刚, 等. 喷射方式对 2.0L 直喷柴油机启动首循环燃烧过程的影响[J]. *内燃机工程*, 2016, 37(2):1-6.
HAN Xiaomei, LIN Xuedong, LI Degang, et al. Influence of injection strategy on the first cycle combustion process of 2.0 L DI diesel engine at starting condition[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, 37(2):1-6.
- [17] PARK H, BAE C, HA C. A comprehensive analysis of multiple injection strategies for improving diesel combustion process under cold-start conditions[J]. *Fuel*, 2019. DOI:10.1016/j.fuel.2019.115762.
- [18] 孙建国. 柴油机燃油分段喷射对缸内燃烧的影响及匹配研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
SUN Jianguo. Study of the Impact of Multi-Injection on the Characteristic of the Combustion and Matching in Cylinder of Diesel[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [19] 马名扬. 喷油策略对柴油机性能影响的试验和计算研究[D]. 天津:天津大学, 2017.
MA Mingyang. Experimental and Computational Study of Fuel Injection Strategies on Engine Performance [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [20] 马泾铭. 低温条件下柴油机性能优化及冷启动耦合系统的设计[D]. 重庆:重庆大学, 2020.
MA Jingming. Optimization of Diesel Engine Performance and Design of a Cold Start Coupling System at Low Temperature [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [21] 路佩. 低温冷启动工况柴油掺混燃料喷雾燃烧特性[D]. 北京:北京理工大学, 2018.
LU Pei. Spray Combustion Characteristics of Diesel Blending Fuel Under Low-Temperature Cold Start Condition [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [22] SHI Zhicheng, LEE C F, WU Han, et al. Optical diagnostics of low-temperature ignition and combustion characteristics of diesel/kerosene blends under cold-start conditions[J]. *Applied Energy*, 2019. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113307.
- [23] 魏建辉. 基于 Converge 的天然气/柴油双燃料发动机燃烧过程的研究与控制[D]. 福州:福州大学, 2021.
WEI Jianhui. Research on In-Cylinder Combustion of Natural Gas/Diesel Dual Fuel Engine Using Converge Simulation Model [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021.
- [24] 王浒, 廖秀科, 梁和平, 等. 柴油/天然气双燃料发动机数值优化[J]. *燃烧科学与技术*, 2022, 28(1):11-19.
WANG Hu, LIAO Xiuke, LIANG Heping, et al. Numerical optimization of diesel/natural gas dual-fuel engine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2022, 28(1):11-19.
- [25] 廖秀科. 柴油/天然气双燃料发动机燃烧机理和控制策略模拟研究[D]. 天津:天津大学, 2021.
LIAO Xiuke. Numerical Research on Combustion Mechanism and Control Strategy of Diesel/Natural Gas Dual Fuel Engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [26] 杨熹. 正庚烷掺混甲醇燃烧机理及特性研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2022.
YANG Xi. Research on Combustion Mechanism and Characteristics of N-Heptane Mixed with Methanol [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022.
- [27] 周龙保. *内燃机学*[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.