

柴油机粗暴燃烧大涡模拟研究

LES Study of Knocking Combustion in a Diesel Engine

李海鹰, 强永平, 张晓琴

(中国北方发动机研究所, 天津, 300400)

摘要: 针对某款柴油机在北方地区冬季频发出现的故障问题, 开展故障工况燃烧过程的仿真研究。通过试验数据的研究发现, 当进气温度低于 40°C 以后, 在 1500r/min 转速 70% 负荷工况点燃燃烧过程缸压出现剧烈的振荡, 压力升高率大幅攀升, 甚至超过 $4\text{MPa}/^{\circ}\text{CA}$ 。本文采用大涡模拟手段, 捕捉到了粗暴燃烧和压力振荡现象。通过仿真手段, 进一步降低进气温度至 -10°C , 在活塞外沿及避阀坑等位置形成了高温区域, 与试验烧蚀活塞对应区域基本贴合。

关键词: 柴油机; 大涡模拟; 粗暴燃烧

Abstract: To resolve the failure problem of a diesel engine frequently occurred in the low-temperature environments, a numerical study of combustion process in the failure operation points was carried out. The experimental results show that, when the intake temperature is below 40°C , a strong fluctuation of in-cylinder pressure occurs during the combustion process under the condition of 70% load at 1500rpm . And especially, the pressure rise rate increases sharply, even beyond $4\text{MPa}/^{\circ}\text{CA}$. In this paper, using by the Large Eddy Simulation (LES) Method, phenomenon of knocking combustion and pressure fluctuation is reproduced. Besides, when intake temperature further reduces to -10°C , the numerical results show that high-temperature zone exists on the locations of piston edge and valve pockets, which agrees with the location of piston erosion basically well.

Key words: diesel engine; LES; knocking combustion

1. 引言

发动机在低温环境运行时, 由于进气和缸壁温度较低、喷雾雾化不良、缸内散热损失大等原因, 容易产生不正常燃烧。关于发动机活塞烧蚀的原因, 大多数些学者认为是由于不正常燃烧导致活塞失效和损坏。何学良等^[1]认为柴油机活塞烧蚀与燃烧压力振荡密切相关, 所谓燃烧压力振荡就是参与预混燃烧的燃料量过多形成的爆炸式燃烧产生的压力冲击波。天津大学姚春德等^[2]认为汽油机爆震燃烧形成的冲击波造成活塞熔化、损坏。中国北方发动机研究所针对某高比功率柴油机在北方地区冬季低温环境下运行时频繁出现的活塞烧蚀故障开展了一系列研究^[3,4], 认为柴油机预混合燃烧放热量多, 造成燃烧过程粗暴, 最大压升率增大, 从而产生强烈的热负荷和机械负荷冲击, 造成活塞烧蚀^[4]。

近年来, 汽油机爆震相关的研究引起了学者们的重视, 天津大学卫海桥等^[5]通过大涡模拟成功捕捉到爆轰波传播的过程。本文基于CONVERGE平台, 采用大涡模拟的仿真手段, 还原了故障工况柴油粗暴燃烧过程, 进一步降低进气温度至 -10°C , 在活塞外沿及避阀坑等位置形成了高温区域, 与试验烧蚀活塞对应区域基本贴合。

2. 发动机参数和试验结果

本研究采用一台高比功率柴油机, 主要参数为排量 2.8L ; 几何压缩比为 13.5。供油系统采用直列泵, 喷孔方案为 $10 \times 0.32\text{mm} \times 150^{\circ}$ 。发动机主要技术参数如下表 1 所示。

表 1 发动机技术参数

参数	数值
排量/L	2.8
压缩比	13.5
燃烧室	ω 型
进气方式	增压中冷
燃油喷射系统	直列泵
喷油器喷孔数	10
喷孔直径/mm	0.32

由图看到，循环平均最大压升率受进气温度影响较大，随进气温度的提高而显著下降。在进气温度为75℃、转速为1500r/min以上工况时，循环平均的最大压升率稳定在1.2MPa左右；在转速1300r/min、进气温度15°时出现了最大的循环平均压升率，其最大值超过5.0MPa/°CA，比进气温度为75℃时的数值高出2倍。在1500r/min、70%负荷工况下，当进气温度为25℃和15℃时，最大压升率均超过4MPa/°CA。

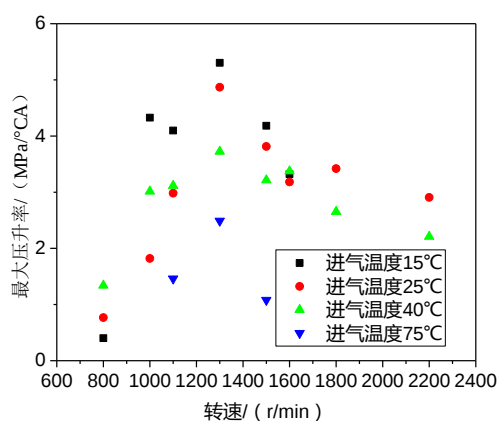


图 1 负荷特性循环平均最大压升率变化

根据对发动机每轮试验结束后几次拆检结果看，进气温度控制在 40℃ 以上时，活塞未出现烧蚀现象；当进气温度控制在 25℃ 左右时，活塞出现轻微或部分烧蚀现象；当进气温度控制在 15℃ 左右时，活塞出现诸如活塞掉块、严重拉缸的严重烧蚀故障。图 2 为部分活塞烧蚀的图片。



图 2 活塞烧蚀现象

从图 3 不同进气温度 120 循环平均缸压曲线对比可知, 进气 75℃时最高燃烧压力约为 10MPa, 缸压曲线较为光顺; 随着进气温度的降低最高燃烧压力逐渐增加, 特别地, 进气温度 25℃和进气温度 15℃时, 最高燃烧压力接近 12MPa, 预混燃烧阶段缸压出现剧烈振荡且均出现燃烧振荡引起的压力波动现象。图 4 为缸压经过高通滤波后 (滤波频率 3kHz) 的压力振荡曲线, 进气温度为 75℃时, 压力振幅为 0.55MPa, 而进气温度低于 40℃的工况, 压力振幅均在 1.2MPa 以上, 存在明显的压力振荡。

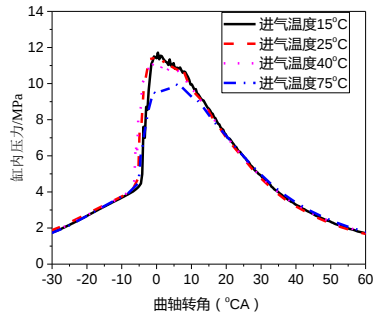


图 3 不同进气温度缸压曲线对比

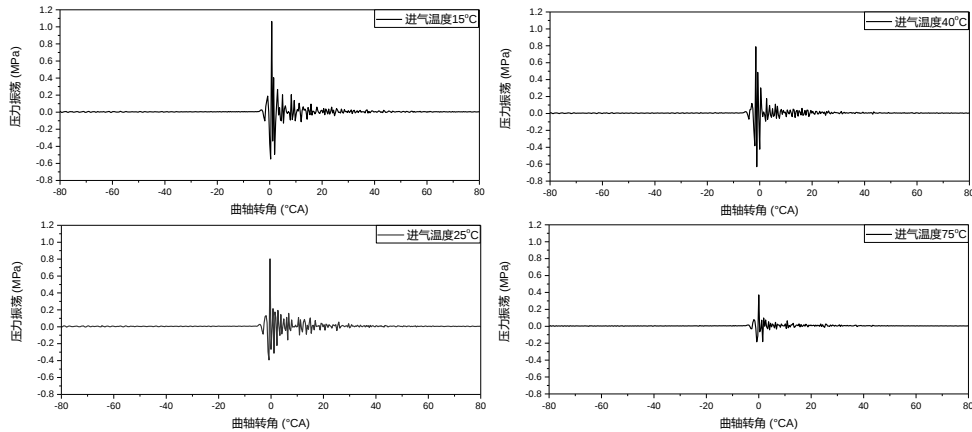


图 4 高通滤波后压力振荡对比

3. 仿真方案及模型选取标定

根据考核试验情况和活塞烧蚀故障分析可知, 进气温度低于 40℃时, 活塞发生烧蚀故障, 以转速 1500r/min 工况 70%负荷为故障特征工况。因此, 通过一维性能计算确定三维仿真计算方案的初始条件, 即进气门关闭时刻缸内压力和缸内温度初始值。进气温度与进气门关闭时刻缸内温度对应表 2 如下。

表 2 进气温度与进气门关闭时刻缸内温度对应表

	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
进气温度/℃	-10	0	10	20	30	40
进气关闭缸内温度/K	314	323	332	342	352	360

缸内过程三维仿真计算采用 CONVERGE 仿真分析软件, 最大网格数量在喷油初期, 对喷雾发展过程进行了加密处理, 网格单元数量达到 444 万。如图 5 所示为上止点时刻网格。

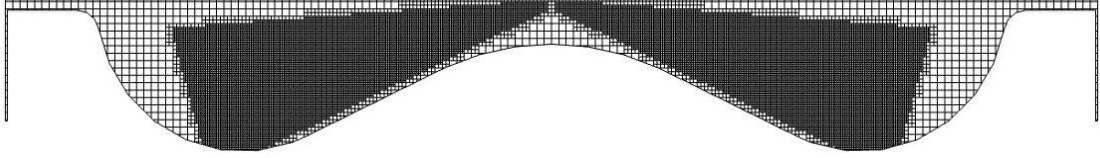


图 5 上止点时刻网格

仿真区间从进气门关闭时刻到排气门开启时刻（上止点前 126°CA —上止点后 100°CA ），最小计算时间步长为 $1 \times 10^{-9}\text{s}$ ，最大计算时间步长为 $1 \times 10^{-6}\text{s}$ 。边界条件：活塞壁温：550K，缸套壁温：400K，缸盖壁温：500K。初始条件为：缸内初始压力：0.165MPa，喷孔参数： $10 \times 0.32 \times 150^{\circ}$ ，喷油提前角： -22°CA ，喷油持续期： 18°CA ，循环油量：204mg/cyc，喷油规律如图 6 所示。

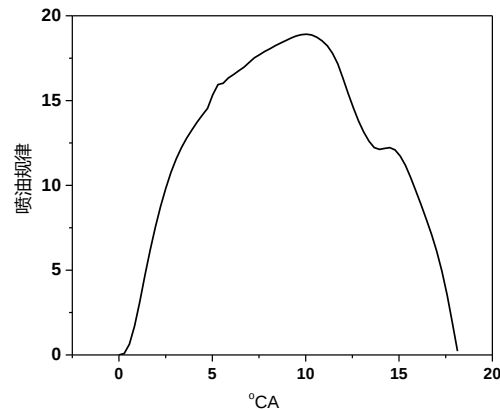


图 6 喷油规律

相关模型参数选取为：湍流模型：LES，喷雾破碎模型：KH，撞壁模型：O'Rourke，燃烧模型：CTC/shell。

图 7、图 8 所示为喷油压力为 40MPa、缸内压力为 3MPa、壁面温度为 393K、喷油时刻缸内温度分别为 650K、700K、750K 下撞壁前仿真与实验的喷雾贯穿距离对比，可以看出，液相贯穿距离的仿真结果与实验数据有很好的吻合度，气相贯穿距离在喷雾初期存在一定的误差，最大误差不超过 10%，认为仿真结果可以接受。

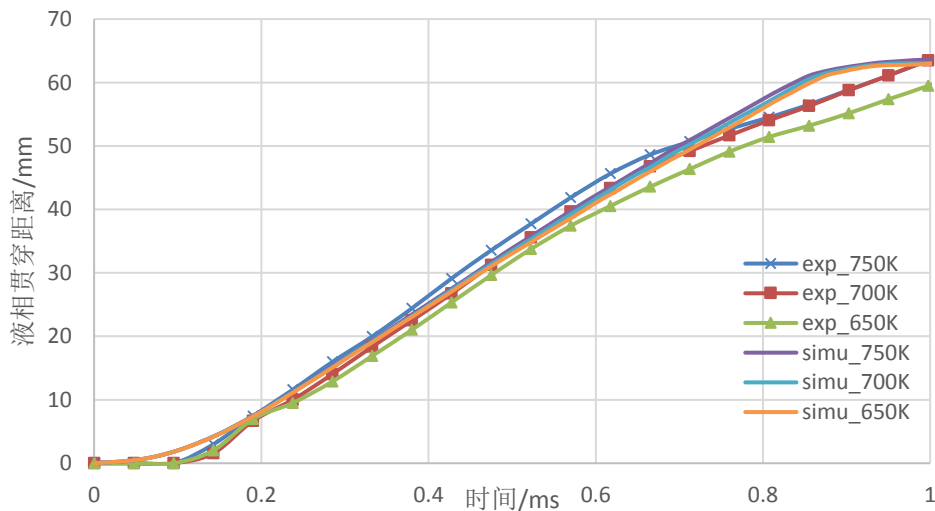


图7 不同缸内温度下仿真与实验液相贯穿距离对比

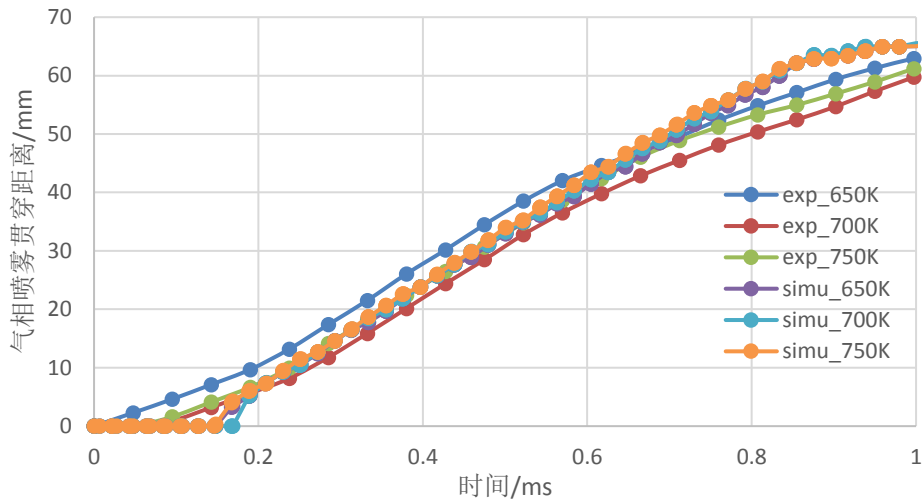
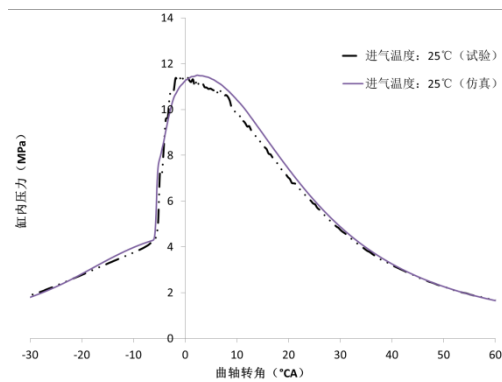
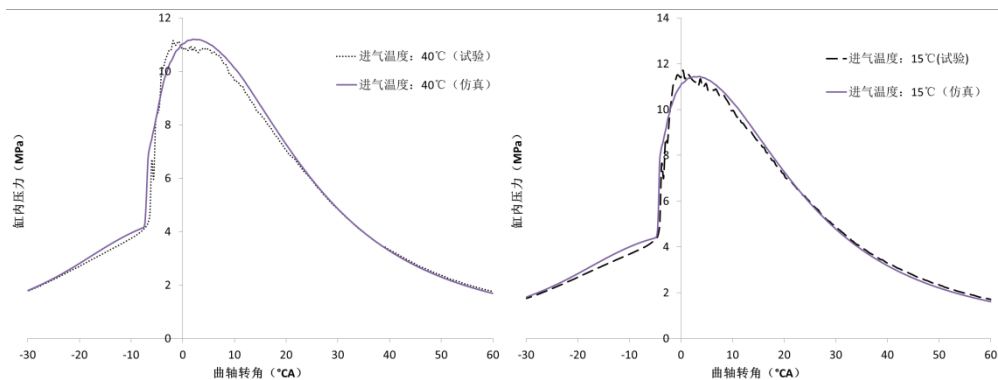


图8 不同缸内温度下仿真与实验气相贯穿距离对比

利用试验数据缸压曲线对仿真模型的选取和相关设置是否合理进行验证。图9为不同进气温度缸压曲线对比。从图9a可知：进气温度为25℃时，二者从燃烧放热缸压突变时刻、缸压快速上升区间以及燃烧膨胀基本吻合，只有在上止点后仿真缸压略低于试验值。在进气温度为15℃和40℃时，仿真结果同样与试验数据取得了较好的一致性。



a) 进气温度 25℃



b) 进气温度 40℃

c) 进气温度 15℃

图9 不同进气温度仿真与试验缸压曲线对比

4. 仿真结果分析

图 10 为不同进气温度喷雾发展过程。在上止点前 10°CA 时刻，所有方案的喷雾前端都已撞壁；进气温度低于 30°C 的各方案喷雾形态相似；进气温度 40°C 时，受蒸发影响，喷雾锥角明显变小。在上止点前 6°CA 时刻（临近喷油终点）进气温度低于 10°C 的方案，雾注形态较完整，说明持续有油束撞壁。在上止点时，除壁面附近存在附壁，其余位置燃油均完成蒸发。除进气温度 40°C 方案，其余方案在避阀坑位置均有附壁，附壁量大体随着进气温度的降低而增加。

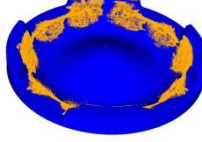
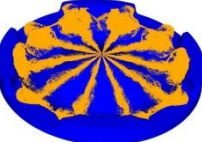
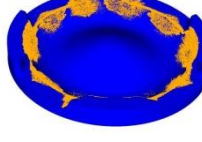
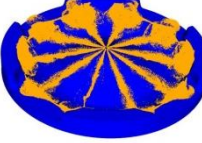
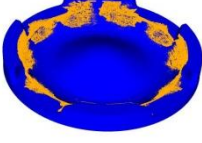
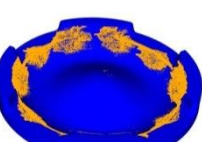
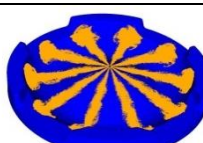
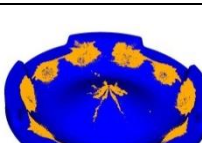
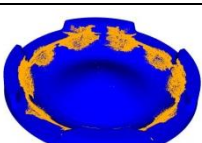
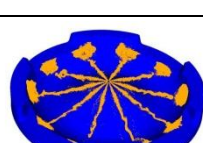
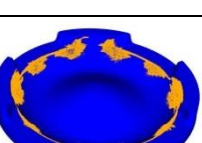
进气温度 (°C)	上止点前 10° CA	上止点前 6° CA	上止点
-10			
0			
10			
20			
30			
40			

图 10 不同进气温度喷雾发展

不同进气温度对燃烧放热参数对比见表 3。图 11 为不同进气温度燃烧室湿壁量曲线对比，从图可知：随进气温度的上升，燃烧室湿壁量随着减少。而进气温度为 40°C 时出现大幅下降现象。从表 3 可知，累积湿壁量随着进气温度的升高而减小，最大值为进气温度 -10°C 时达最大值为 79.8mg，进气温度 40°C 时的 2 倍。

图 12 为不同进气温度燃油蒸发质量曲线对比,蒸发曲线大致分成上升和下降两个阶段,大致对应滞燃期喷雾蒸发和燃烧后燃油消耗阶段。滞燃期内,随进气温度的降低,在着火前缸内平均温度下降,又受到燃油湿壁量的影响,燃油蒸发率下降,但是由于滞燃期推迟,最大燃油蒸发量逐渐增加。燃烧后受放热速率影响,随进气温度的降低,燃油蒸汽质量下降速度逐渐增加。

表3 不同进气温度对主要燃烧参数对比

进气温度/℃	-10	0	10	20	30	40
最高燃烧压力/ MPa	11.66	11.95	11.76	11.78	11.42	10.42
最高燃烧压力对应角度/° CA	3.8	3.6	3.6	3.4	3.3	3.2
最大压升率/MPa/° CA	6.32	8.01	5.01	5.10	3.67	1.87
最大压升率对应角度/° CA	-3.2	-4.4	-5.5	-6.3	-7.1	-10
累积湿壁量/mg	79.8	73.8	73.2	68.3	63.1	38.4

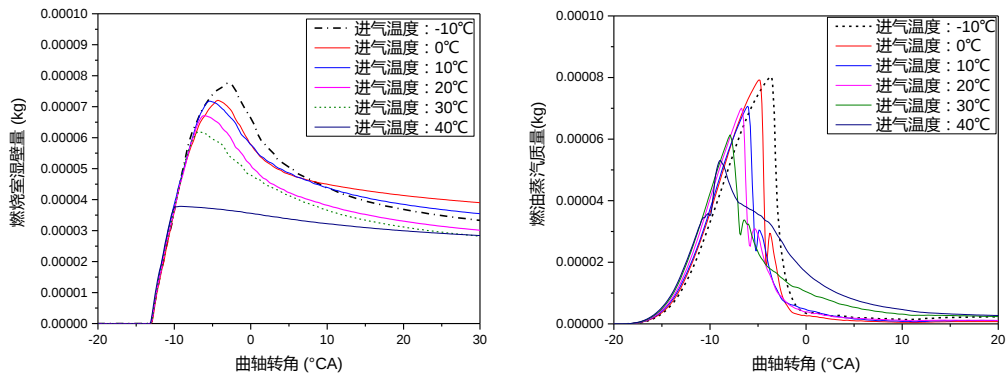


图11 不同进气温度燃烧室湿壁量曲线对比 图12 不同进气温度燃油蒸汽质量曲线对比

图 13 为不同进气温度缸压曲线对比,从图可知,进气温度低于 30℃ 时,缸压脱离纯压缩线的相位较进气温度 40℃ 时推迟 3~7°CA;从表 3 可知,最高燃烧压力增加 1~1.5 MPa,进气温度从 40℃ 降低到 30℃,数值出现明显上升,之后变化趋于稳定,但进气温度对最高燃烧压力所对应的相位影响不大。

图 14 为不同进气温度缸内平均温度曲线对比,从图可知:类似缸压曲线,随进气温度的降低,缸内平均温度拐点明显推迟,但从拐点对应的平均温度来看有所降低,这似乎与缸内压力增加有关。但除进气温度为-10℃ 和 40℃ 以外,其余方案的最高温度较为接近,总体缸内最高温度相差不大。

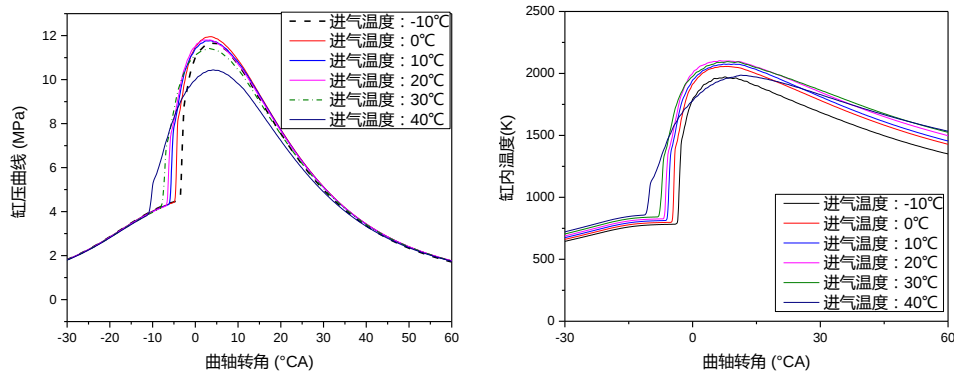


图13 不同进气温度缸压曲线对比 图14 不同进气温度缸内温度曲线对比

具体地,图 15、图 16 分别给出了为不同进气温度缸内压力场和温度场分布。一般地,

柴油燃烧属于多点着火，压力场较为均匀，但从图 15 可以看出，进气温度低于 40°C 的前五个方案的压力场在空间上不同程度地出现了压力差异性。从分布来看，最大值基本均出现在活塞外沿，压力达到 20MPa ，当进气温度为 -10°C 时出现多处非常明显的高压区域。值得注意的是，进气温度为 -10°C 时，明显地可以看到一侧压力向中心传播，上止点时传播到气缸另一侧，之后反复振荡，直到上止点后 2°CA ，缸内的压力基本均匀。其余进气温度低于 40°C 的四个方案也存在类似的发展过程。从表 3 可知，空间最大压升率随着进气温度的升高而减小，其中进气温度 0°C 时达最大值为 $8.01\text{MPa}/^{\circ}\text{CA}$ ，比进气温度为 40°C 时增加 $6.14\text{MPa}/^{\circ}\text{CA}$ ，增幅为 328%；最大压升率对应相位随着进气温度的降低而推迟，即越来越接近上止点。

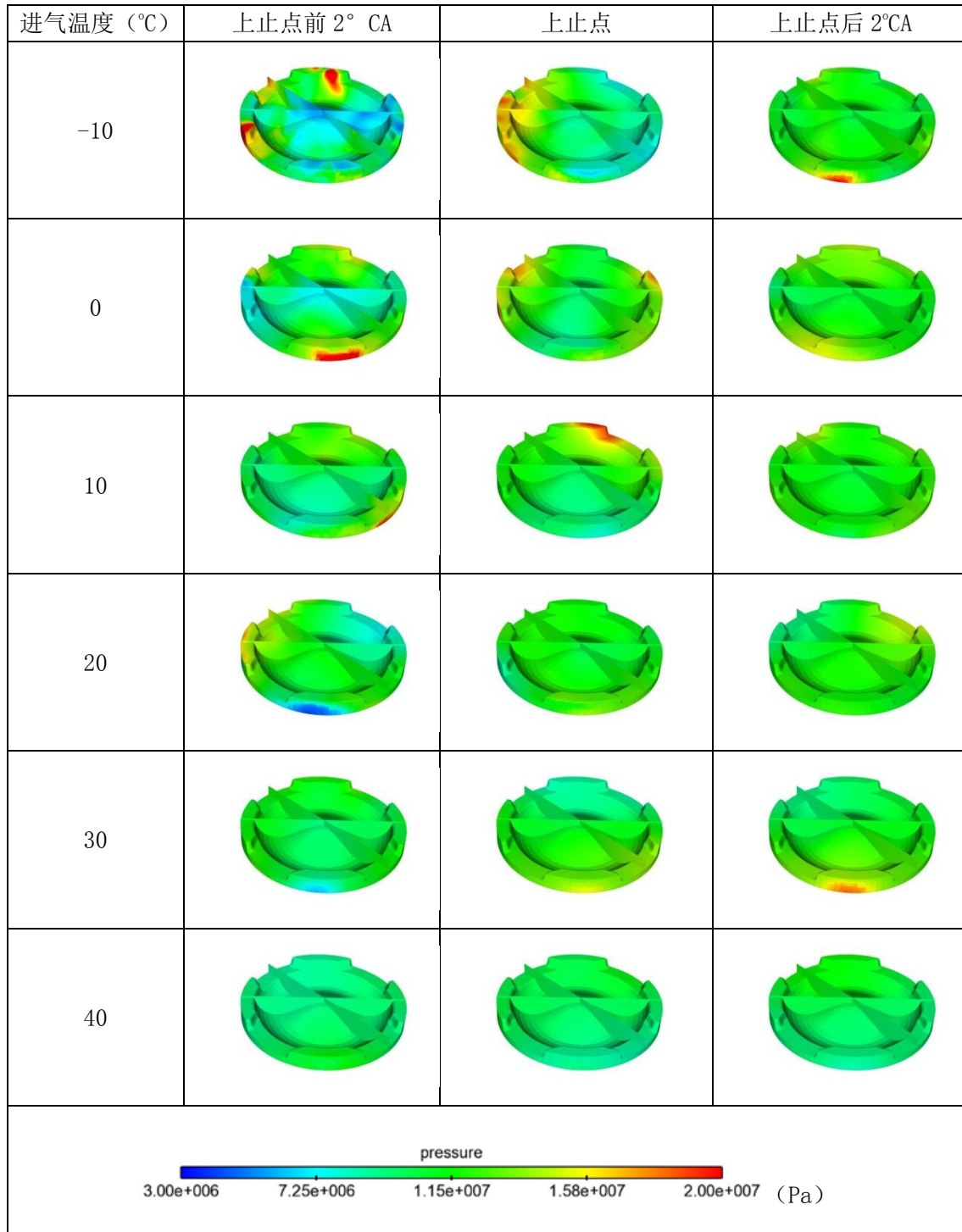


图 15 不同进气温度缸内压力场

从图 16 可以看出, 各方案燃烧室内局部高温均可达 3000K, 进气温度的差异主要影响局部高温区域的面积大小。进气温度为 40℃ 时, 高温区域集中在燃烧室凹坑内; 进气温度 0℃、20℃ 和 30℃ 时, 活塞外沿和避阀坑处均出现高温区域, 避阀坑高温区域更为明显, 超过 2400K, 且面积较大, 显示附壁燃烧的存在。对比图 2 可以看出, 进气温度低于 30℃ 的方案, 活塞外沿和避阀坑高温区域, 与试验中烧蚀区域基本贴合。

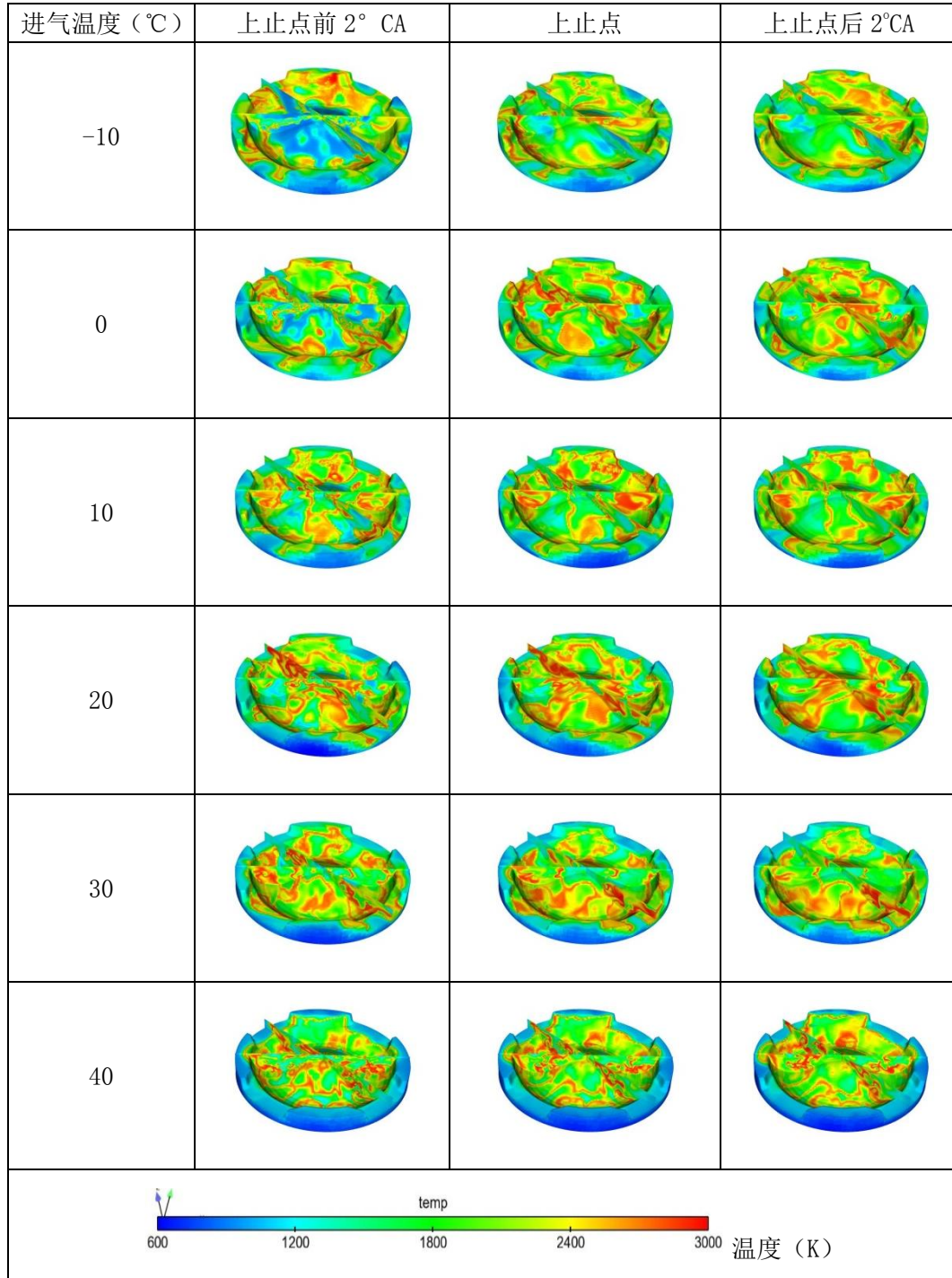


图 16 不同进气温度缸内温度场

图 17 为不同进气温度缸内累积放热率曲线对比, 进气温度 30℃ 以下最终累积放热量差别不大, 放热速率较快, 最终累积放热量较大。但进气温度 40℃ 时, 放热较为缓慢, 最终累积放热量较小。这也说明, 粗暴燃烧时累积放热量有明显增加, 约 14%。

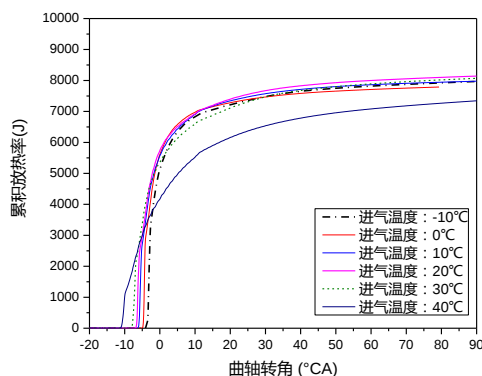


图17 不同进气温度缸内累积放热率

5. 结论

1) 某高比功率柴油机在 1500r/min 70%负荷低进气温度时, 缸内最大压力升高率超过 $4\text{MPa}/^\circ\text{CA}$, 压力振荡振幅超过 1.2MPa 。

2) 基于 CONVERGE 平台, 采用大涡模拟的仿真手段, 实现了不同进气温度下烧蚀特征工况缸压曲线的标定。

3) 当进气温度为 40°C 时, 缸内正常燃烧, 压力均布, 温度集中在燃烧室凹坑内; 而进气温度为 -10°C 时, 缸内出现粗暴燃烧, 压力分布不均匀, 存在压力振荡, 在活塞顶部外沿及避阀坑位置出现高温区域, 与试验中烧蚀区域基本贴合。

参考文献

- [1] 何学良, 李疏松. 内燃机燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [2] 姚安仁, 罗震, 姚春德, 续晗. 甲醇点燃式发动机爆震破坏形式试验研究[J]. 机械工业学报, 2013, 49(4): 122—127.
- [3] 张炜, 陈林祥. 高比功率柴油机活塞失效分析[J]. 车用发动机, 2000, 30(6): 38—40.
- [4] 蔡忠周, 张晓琴, 王增全等. 高原环境下油品对柴油机燃烧特性的影响研究[J]. 车用发动机, 2015, 4: 76—79.
- [5] H.Wei, D. Gao, Z.Lei, D. Feng, C.Rui. Different Combustion Modes Caused by Flame-Shock Interactions in a Confined Chamber with a Perforated Plate[J]. Combustion & Flame, 2017, 178:277-285.