

DOI: 10.7652/xjtuxb201509007

传统缸内壁面传热模型在氢内燃机中的适用性

杨振中¹, 秦朝举^{1,2}, 宋立业², 原彦鹏²

(1. 华北水利水电大学机械学院, 450045, 郑州; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 100081, 北京)

摘要: 针对传统内燃机缸内传热模型在氢内燃机传热预测计算中的适用性问题, 研究了 Launder-Spalding 模型、Huh 模型、Poinso 模型、Han-Reitz 模型和 Rakopoulos 模型在氢内燃机的压缩和膨胀冲程中的应用, 为此编制程序将上述模型嵌入到开源计算流体力学(CFD)工具包 Open-FOAM 的求解器中, 并对一个氢内燃机缸内反应流动的算例进行了传热的预测计算和实验验证。研究表明: 相对其他模型, Rakopoulos 模型对氢内燃机传热热流的预测最为准确, 优于 AVL-Fire 软件中推荐的 Han-Reitz 模型, 可作为 AVL-Fire 软件二次开发进行氢内燃机的相关模拟计算; 除 Rakopoulos 模型之外的模型适用性较差的原因是, 不能准确描述氢内燃机缸内边界层中的工质物性及湍流黏性的分布规律, 通过改进氢内燃机缸内边界层中的密度、黏度、湍流普朗特数分布有望提高氢内燃机传热模型的适用性; 准确预测壁面热流峰值时刻需要对燃烧模型的火焰传播过程计算进行详细校核。

关键词: 氢内燃机; 壁面传热模型; Rakopoulos 模型; Han-Reitz 模型

中图分类号: TK422 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)09-0036-05

Applicability of Conventional Wall Heat Flux Models in Hydrogen Engines

YANG Zhenzhong¹, QIN Zhaoju^{1,2}, SONG Liye², YUAN Yanpeng²

(1. School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power,

Zhengzhou 450045, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Five conventional internal combustion engines wall heat flux models, Launder-Spalding model, Huh model, Poinso model, Han-Reitz model and Rakopoulos model, and their applicability in hydrogen engine compression and expansion strokes are discussed. These five models are codified into OpenFOAM CFD solver, an open source CFD toolkit, and implemented in a hydrogen engine reacting flow case. The experimental data are used to validate the numerical calculation and evaluate the performance of these five models. The results show that Rakopoulos model works best in hydrogen engines application cases, instead of Han-Reitz model recommended by the widely used code AVL-Fire. The poor performance of the other four models is due to the failure in predicting distributions of thermo-physical properties and turbulent viscosity inside the hydrogen engine in-cylinder boundary layer, although these models work well in the conventional fuel engines. Thus improved predictions of ρ^+ , ν^+ and Pr_T inside the boundary layer facilitate heightening the applicability of these models in hydrogen engines. It is suggested that the validation of flame propagation modeling becomes necessary to calculate the peak heat flux time.

Keywords: hydrogen engine; wall heat flux model; Rakopoulos model; Han-Reitz model

收稿日期: 2014-12-25。 作者简介: 杨振中(1957—), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076046); 河南省高等学校重点科研资助项目(15A470017); 2015 年度河南省科技创新杰出人才资助项目; 河南省创新型科技人才队伍建设工程创新型科技团队资助项目(2011-39)。

网络出版时间: 2015-06-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150617.0902.004.html>

预测内燃机缸内壁面传热是十分有意义的,不仅涉及混合气的准备、燃烧、排放及能量转换效率,还关系着内燃机的可靠性和工作寿命。传统内燃机的壁面传热研究在理论方面分为基于零维热力学过程的模型研究和基于三维计算流体动力学(CFD)的模型研究,后者最早见于 Launder 的工作^[1],他在普朗特提出的壁面函数模型的基础上修正、考虑了壁面粗糙度的影响。Huh 结合 KIVA 壁面传热模型提出在传热计算中考虑压力变化率的影响^[2]。Poinsot 将 Launder-Spalding 模型扩展到非等温、可压缩情形^[3]。Reitz 在内燃机传热计算中考虑边界层内物性与湍流黏度的非均匀分布以及燃烧源项的影响后提出了现在被广泛认可的 Han-Reitz 传热模型(当前 AVL-Fire 软件推荐的默认模型)^[4]。近年来,Rakopoulos 从同时包含瞬态项、迁移项、扩散项、压力变化率、燃烧源项的能量方程出发推导了内燃机壁面传热模型^[5]。Demuynck 等利用多燃料内燃机试验台架进行了氢气燃烧过程的壁面传热实验研究^[6-10],但是他们更多的是针对零维的热力学传热模型^[7-8],如 Woschni 模型、Annand 模型等。

CFD 理论是基于守恒定律的理论,与流场工质(内燃机燃料)无关。CFD 中所使用的壁面传热计算模型并非纯粹基于定律的理论,而是属于半经验、半解析的理论,所以适用于传统内燃机缸内反应流动计算的 CFD 壁面传热计算模型逻辑上并不能必然适用氢内燃机。

本文基于氢内燃机台架试验壁面热流测量数据,对现有不同的内燃机壁面传热计算模型进行了氢内燃机工况下的对比应用研究,探究传统内燃机壁面传热模型在氢内燃机中的适用性。本文考虑的传热模型有 Launder-Spalding 模型、Huh 模型、Poinsot 模型、Han-Reitz 模型、Rakopoulos 模型。

1 内燃机缸内壁面传热模型

内燃机缸内反应流动计算中的壁面传热模型是以壁面边界条件的形式施加到 CFD 主程序中去的。模型利用存储在壁面以及壁面上第一层网格质心的相关流场、湍流数据进行壁面传热热流的计算,并将得到的热流结果反馈给 CFD 主程序。

壁面传热模型基于 $y^+ = yu_\tau/\nu$, $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{1/2} = C_\mu^{1/4} k^{1/2} y/\nu$ 为摩擦速度,其中 y 为壁面第一层网格质心到壁面的距离, ν 为运动黏度,下标 W 表示壁面值、T 表示湍流值。

1.1 Launder-Spalding 模型

Launder 和 Spalding 在 1974 年提出了 Launder-Spalding 模型,该模型在普朗特 1925 年提出的经典壁面函数的基础上进行了壁面粗糙度修正。

模型中当壁面第一层网格质心位于黏性底层 $y^+ \leq 11.6$ 时,模型退化为傅里叶导热定律;当第一层网格质心不在层流底层时,便假定质心位于对数温度分布的对数区。

壁面热流

$$q_w = \frac{\rho u_\tau c_p (T_w - T)}{Pr y^+}, \quad y^+ \leq 11.6 \quad (1)$$

$$q_w = \rho u_\tau c_p (T_w - T) / \left\{ Pr_T \left[\frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) + P \left(\frac{Pr_e}{Pr_T} \right) \right] \right\}^{1/2}, \quad y^+ > 11.6 \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; c_p 为定压比热容; T_w 为壁面温度; T 为流体温度; Pr 为普朗特数; Pr_T 为湍流普朗特数; $\kappa=0.4187$ 为冯·卡门常数; E 为表征壁面粗糙度的一个函数,光滑壁面时 $E=9.79$ 。

黏性底层热阻系数

$$P(Pr_e/Pr_T) = \pi/(4/\sin(\pi/4) \cdot$$

$$(A/\kappa)^{0.5} (Pr_e/Pr_T - 1) (Pr_e/Pr_T)^{0.25})$$

式中: A 为 van Driest 常数,光滑壁面时 $A=26$; Pr_e 为有效普朗特数, $Pr_e = Pr + Pr_T$ 。

1.2 Huh 模型

Huh 模型^[2]的出发点是将边界层传热过程描述为

$$\frac{d}{dy} \left[(k + k_T) \frac{dT}{dy} \right] = - \frac{dp}{dt} \quad (3)$$

式中: k 和 k_T 分别为层流和湍流导热系数; p 为压力。该方程主要考虑了扩散过程和压力变化率,利用它可以推导壁面热流,推导过程中假设特定时刻在近壁区域的物性、湍流黏度为均匀固定值,推导结果为

$$q_w = \left(\rho u_\tau c_p (T_w - T) - 0.5 Pr \frac{dp}{dt} \frac{\nu}{u_\tau} (y^+)^2 \right) / (Pr y^+), \quad y^+ \leq 13.2 \quad (4)$$

$$q_w = \left(\rho u_\tau c_p (T_w - T) - \frac{dp}{dt} \frac{\nu}{u_\tau} (87.12 Pr + 2.195 y^+ - 28.98) \right) / (13.2 Pr + 2.195 \ln(y^+) - 5.66), \quad y^+ > 13.2 \quad (5)$$

1.3 Poinsot 模型

Poinsot 模型^[3]是 Launder-Spalding 模型在非等温情形下的修正,其将边界层传热描述为

$$\left(\frac{1}{Pr} + \frac{\nu^+}{Pr_T}\right) \frac{dT^+}{dy^+} = \frac{1}{\rho^+} \frac{\nu_w}{\nu} \quad (6)$$

该方程应用了边界层理论的一般假设: $\partial/\partial x \ll \partial/\partial y$, $u \gg v$, 其中黏度 $\nu^+ = \nu/\nu_T$, 密度 $\rho^+ = \rho/\rho_w$, 温度 $T^+ = (T_w - T)\rho_w c_p u_\tau / q_w$ 。模型的关系式是在等温流动情形中使 Poincot 模型退化为 Spalding 模型, 同时假定非等温流动情形下 T^+ 的分布与等温情形下的分布相同, 即黏性在底层线性分布, 在对数区对数分布。最终, 模型推导结果为

$$q_w = \frac{\rho_w c_p T \ln(T_w/T)}{Pr y^+}, \quad y^+ \leq 11.6 \quad (7)$$

$$q_w = \rho_w c_p T \ln(T_w/T) / \left\{ Pr_T \left[\frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) + P \left(\frac{Pr_e}{Pr_T} \right) \right] \right\}, \quad y^+ > 11.6 \quad (8)$$

1.4 Han-Reitz 模型

Han-Reitz 模型^[4]的出发点为

$$\frac{\partial q}{\partial y} = -Q_c \quad (9)$$

式中: Q_c 为平均放热率, 由燃烧模型计算得到。该模型在推导过程中通过采用 Reynolds 提出的 ν^+ 随 y^+ 变化的关系式^[11] 以及 Kays 提出的 Pr_T 随 ν^+ 变化的关系式^[12], 来考虑相关湍流参数的分布。积分时模型将 ρT 当作一个整体量对待, 并通过推导计算得到 T^+ 的分布。最终, 推导得到壁面热流

$$q_w = \frac{\rho_w c_p T \ln(T_w/T) - (2.1y^+ + 33.4)Q_c \nu / u_\tau}{2.1 \ln(y^+) + 2.5} \quad (10)$$

1.5 Rakopoulos 模型

Rakopoulos 模型^[5]的出发点为

$$c_p \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + c_p \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[(k + k_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial P}{\partial t} + Q_c \quad (11)$$

该模型在推导过程中考虑了 ν^+ 、 Pr_T 的分布, 使用了与 Han-Reitz 模型相同的关于 ν^+ 和 Pr_T 的关系式。最终, 推导的热流

$$q_w = \rho_w c_p T \ln(T_w/T) - \left(\frac{dp}{dt} + Q_c \right) \frac{\nu}{u_\tau} \cdot \left(\frac{y^+ - 40}{0.4767 + 1/Pr} + 117.31 \right) / \left\{ \frac{1}{0.4767} \left[\ln \left(y^+ + \frac{1}{Pr \cdot 0.4767} \right) - \ln \left(40 + \frac{1}{Pr \cdot 0.4767} \right) \right] + 10.2384 \right\} \quad (12)$$

2 内燃机缸内反应流动数值计算

上述模型大多是针对内燃机缸内流动计算提出

的, 一般通用 CFD 软件(如 Fluent 等)不含这些模型, 而针对内燃机缸内反应流动的专用 CFD 软件(如 AVL-Fire 等)也没有全部涵盖这些模型。因此, 本文使用开源 CFD 工具包 OpenFOAM^[13], 自行编程将上述 5 种模型耦合到 CFD 主模块中。

本文计算了可压缩的质量、动量、能量、组分守恒方程, 并采用燃烧过程控制方程、着火判断方程来描述氢内燃机缸内的可压缩反应流动现象。计算中根据化学反应元素守恒将所涉及的组分简化为考虑氢气、空气、反应产物的 3 种组分, 其中反应产物为混合物, 它的物性需要通过按比例加权求和获得, 另外湍流模型选用了 RNG $k-\epsilon$ 模型, 层流火焰模型选用了 Ravipetersen 模型, 湍流火焰速度与燃烧过程计算选用了 Weller 模型^[14], 工质为理想气体, 物性参数取自 JANAF 数据库。数值求解过程中二阶瞬态项采用 Euler 离散格式, 梯度和速度散度项采用 Gauss Linear 格式, 其他散度项采用 Gauss Upwind 格式, 拉普拉斯项采用修正的 Gauss Linear 格式, 插值项用线性格式。求解选用 PISO 算法, 代数方程迭代选用 PCG 算法。

内燃机结构参数: 缸径为 82.55 mm, 冲程为 114.2 mm, 连杆长度为 254 mm, 余隙高度为 16.31 mm, 压缩比为 8。计算时从进气门关闭时刻(压缩上止点前 155°)开始, 在排气门开启时刻(上止点后 120°)结束。进气门关闭时工质平均温度为 370 K, 压力为 0.107 9 MPa, 残余废气系数为 12.04%, 缸内涡流比为 1.5, 壁面温度为 430 K。点火提前角为上止点前 15°, 空燃比在不同算例中各有说明, 其他相关参数可参考文献[6-10]。在网格数量与时间步长收敛性分析之后, 本文的计算算例用实验数据进行了校核验证, 该算例应用不同的传热模型分别进行了计算。

3 结果与讨论

3.1 网格数量收敛性分析

计算时选用了 4 种网格, 网格数分别为 $10 \times 10 \times 20$ (燃烧室圆截面的为 10×10 , 冲程方向的为 20)、 $20 \times 20 \times 40$ 、 $30 \times 30 \times 60$ 、 $50 \times 50 \times 100$, 并取相同位置的壓力数据为参考结果值, 对比结果如图 1 所示。由图 1 可得, 本文算例中 $30 \times 30 \times 60$ 网格满足精度要求。

3.2 时间步长收敛性分析

分别取 0.02° 、 0.01° 、 0.005° 、 0.001° 作为时间步长进行计算, 结果如图 2 所示。由图 2 可得, 本文

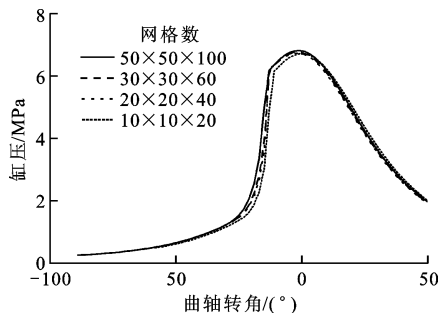


图1 网格收敛性分析

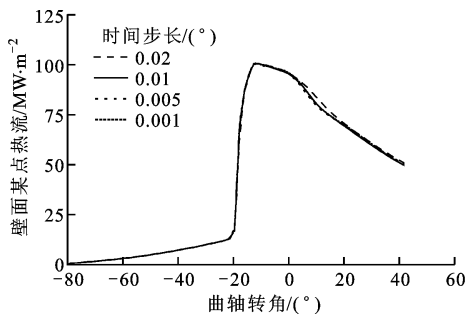


图2 时间步长收敛性分析

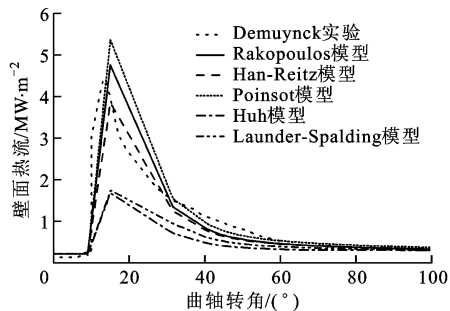


图4 当量比为1时不同传热模型预测结果的对比

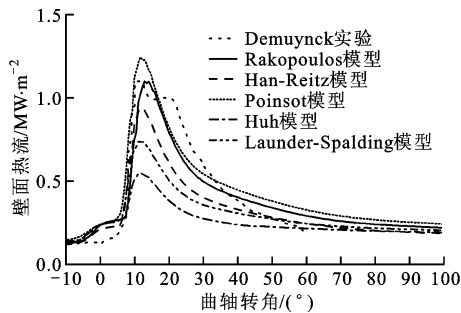


图5 当量比为0.5时不同传热模型预测结果的对比

算例的时间步长为 0.01° 时满足精度要求。

3.3 算例校核

为保证计算结果符合实际,本文的算例利用实验数据进行了校核,如图3所示。校核时采用缸内最高压力作为参考量,校核所需的实验数据来自文献[6-7]。由图3可得,本文的算例和放热率得到了实验的验证。因为在上止点附近实验值与计算值的变化率一致,而从缸内压力的变化率可以推算出放热率的变化历程。

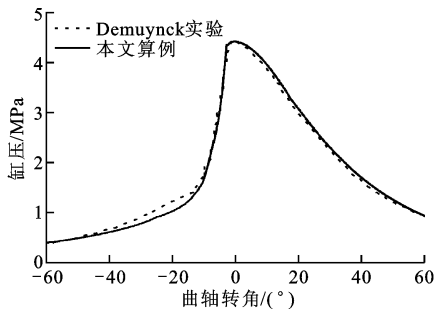


图3 计算算例的实验校核

3.4 传热计算结果

利用本文算例,分别嵌入5种传统缸内壁面传热模型进行了对比计算,所得壁面特定位置(测点位置与火花塞位置见文献[7])的热流分别为当量比为1和0.5时的计算结果,如图4和图5所示。由图4和图5可得,2种热流表现出来的规律是一致的,可以认为该规律独立于当量比的设置。

由图4和图5还可知,Rakopoulos模型能够得到最满意的热流峰值预测结果,Han-Reitz与Poinso模型的结果可以接受,Launder-Spalding和Huh模型低估了热流值。Launder-Spalding与Huh模型对热流值的低估曾被文献[3-4]报道,其主要原因在于这2种模型在近壁区域采用了固定的物性参数、湍流黏度。由式(1)~(4)可知,较大的 Pr 将导致热流预测值偏低。Han-Reitz与Rakopoulos模型将湍流黏度、 Pr_T 以 y^+ 函数形式给出。Poinso模型虽假定了固定的 Pr ,但其 ρ^+ 、 ν^+ 以 T^+ 的函数形式给出。由 $Pr=\nu/a$ 可知,动力黏度变化与 Pr 的变化一样,会影响热扩散系数的计算。相比Rakopoulos模型,Han-Reitz模型的预测值偏低,这是由于该模型没有考虑压力变化率等非平衡因素的缘故。考虑燃烧源项的模型(Han-Reitz与Rakopoulos模型)的预测峰值均不及Poinso模型,这一点在文献[4]中亦有述及,由于边界层内低温导致火焰淬熄,所以在壁面热流的预测计算中燃烧源项的影响不大。Poinso模型的预测值高是由于其采用的湍流参数关系式与Han-Reitz和Rakopoulos模型有所不同。

上述5种模型均不能正确预测热流峰值所处时刻,这是由于热流峰值所处时刻与缸内火焰传播的计算密切相关,该误差本质上是源于燃烧模型的误差。

实际上,Rakopoulos模型、Han-Reitz模型及

Poinsot 模型的预测成功主要依赖于 Reynolds 提出的 $\nu^+(y^+)$ 、Kays 提出的 $Pr_T(\nu^+)$ 及 Poinsot 的 $\rho^+(T^+)$ 和 $\nu^+(T^+)$ 这几个关系式。这些关系式在传统内燃机中的适用性已经在文献中得到了验证。本文通过上述计算与实验验证得出, 这些关系式在氢内燃机中依然可以得到可信赖的结果, 尤其是 Reynolds 的 $\nu^+(y^+)$ 和 Kays 的 $Pr_T(\nu^+)$, 再配合能量方程中考虑压力变化率等非平衡因素的影响, 可以给出精确的预测结果。

4 结 论

(1) Rakopoulos、Han-Reitz 及 Poinsot 模型均可以预测氢内燃机缸内壁面传热过程。上述 3 种模型中 Rakopoulos 模型更适用, 原因在于 Reynolds 的 $\nu^+(y^+)$ 和 Kays 的 $Pr_T(\nu^+)$ 关系式在氢内燃机缸内流场环境中依然成立。Han-Reitz 模型在准确性方面不及 Rakopoulos 模型。

(2) Launder-Spalding 以及 Huh 模型低估了氢内燃机缸内壁面传热, 其假定的物性参数和湍流黏度在边界层内均匀分布不符合氢内燃机的真实情况。

(3) 热流峰值时刻的预测依赖于燃烧模型对火焰传播过程的预测。精确预测热流峰值时刻, 需要对燃烧模型的火焰传播过程计算进行详细校核。

(4) 在内燃机缸内传热计算模型的基本能量方程中, 考虑压力变化率等非平衡因素的影响能够让模型预测更准确。边界层内 ρ^+ 、 ν^+ 、 Pr_T 的分布对内燃机壁面传热计算至关重要, 若考虑氢燃烧产物组分与湍流场特点对相关关系式进行归纳总结, 将会进一步提高氢内燃机壁面传热预测的精度。

参考文献:

- [1] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3 (2): 269-289.
- [2] HUH K Y, CHANG I P, MARTIN J K. A comparison of boundary layer treatments for heat transfer in IC engines, SAE 900252 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 1990.
- [3] ANGELBERGER C, POINSOT T, DELHAYE B. Improving near-wall combustion and wall heat transfer modeling in SI engine computations, SAE 972881 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 1997.
- [4] HAN Z, REITZ R D. A temperature wall function formulation for variable-density turbulent flows with application to engine convective heat transfer modeling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(3): 613-625.
- [5] RAKOPOULOS C D, KOSMADAKIS G M, PARIOTIS E G. Critical evaluation of current heat transfer models used in CFD in-cylinder engine simulations and establishment of a comprehensive wall-function formulation [J]. *Applied Energy*, 2010, 87: 1612-1630.
- [6] DEMUYNCK J, PAEPE M D. Investigation of the influence of engine settings on the heat flux in a hydrogen-and methane-fueled spark ignition engine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31: 1220-1228.
- [7] DEMUYNCK J, PAEPE M D. On the applicability of empirical heat transfer models for hydrogen combustion engines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36: 975-984.
- [8] DEMUYNCK J, PAEPE M D. Applying design of experiments to determine the effect of gas properties on in-cylinder heat flux in a motored SI engine, SAE 2012-01-1209 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2012.
- [9] RAKOPOULOS C D, KOSMADAKIS G M. A combined experimental and numerical study of thermal processes, performance and nitric oxide emissions in a hydrogen-fueled spark-ignition engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36: 5163-5180.
- [10] DEMUYNCK J, PAEPE M D. Heat loss comparison between hydrogen, methane, gasoline and methanol in a spark-ignition internal combustion engine [J]. *Energy Procedia*, 2012, 29: 138-146.
- [11] REYNOLDS W C. Computation of turbulent flows: a review [J]. *Fluid Mech*, 1976, 8: 183-208.
- [12] KAYS W M. Turbulent Prandtl number: where are we? [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1994, 116: 284.
- [13] WELLER H G, TABOR G. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques [J]. *Computers in Physics*, 1998, 12: 620-631.
- [14] WELLER H G, TABOR G. Application of a flame-wrinkling LES combustion model to a turbulent mixing layer [C]//27th International Symposium on Combustion. Pittsburgh, PA, USA: Combustion Institute, 1998: 899-907.

(编辑 苗凌)