

“限流沿”形状与位置对柴油喷雾平板撞壁射流影响的研究

赵昌普, 苏万华, 余 皎

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型及 PISO 算法对平板上设置 BUM P 的柴油喷雾撞壁混合过程进行了模拟计算, 并与用片状激光诱导荧光 (PLIF) 法取得的试验结果进行了对比, 二者基本吻合。试验和模拟计算结果均表明, 撞壁射流在遇到“限流沿”(BUM P) 后会剥离壁面, 形成二次空间射流, 减少壁面燃油堆积量, 且随二次撞壁距离增大, 在 BUM P 和射流撞壁点之间的厚度大约为 1~2 mm 的燃油高浓度区的面积逐渐增大。计算结果还表明, 在平壁上设置 BUM P 后, 在二次射流附近的低压区逐渐形成一个卷吸空气的“双涡结构”, 此“双涡结构”对形成稀混合气有重要作用。BUM P 的形状不同对形成二次空间射流及稀混合气的作用也不相同, 在实际应用中应对其进行优化和合理匹配。

关键词: 混合气形成; 限流沿; 撞壁射流; 二次射流; 数值模拟

中图分类号: TK421.43

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0063-06

0 引言

在中小缸径直喷式柴油机中, 燃油都直接喷入燃烧室, 由于喷嘴到燃烧室壁面的距离较小, 油束撞壁不可避免。油束撞壁后在燃烧室壁面形成一层薄而浓的混合气, 这层浓混合气对未燃 HC 和碳烟排放十分不利^[1,2]。Daniel W. Dicked^[3]等的研究发现, 燃烧室内的局部高温和浓混合气是形成 NO_x 和碳烟排放的主要原因。C. Arcoumanis 和 K. P. Shindler^[4]的研究也发现, 碳烟的形成与燃烧第一阶段中的混合气空燃比有关, 为了防止生成碳烟, 在混合和燃烧过程中过量空气系数应大于 0.7 的碳烟生成极限。所以, 减少燃烧室近壁区浓混合气层的面积或浓混合气的数量十分重要。

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室 Wanhua Su 等^[5]在气体模拟试验中发现限流沿可以将平板撞壁射流形成的附面层从壁面剥离, 形成二次空间射流, 扩大模拟气体与环境气体的接触面积, 与不采用 BUM P 相比使其混合率增大了 40 倍。基于这一结果, Wanhua Su 等^[6]又用片状激光诱导荧光法在定容燃烧喷雾模拟试验装置中对实际柴油喷雾的 BUM P 撞壁混合过程进行了试验研究, 取得了非常有价值的、并与气体模拟试验十分相似的试验结果。但由于试验所得图像的散射光强度受燃油液滴大小、密度、液滴汽化以及激光脉冲能量等诸多因素的影响, 目前对图像的燃油浓度分布进行标定尚有困难^[7]。因此, 选择适当的数学模型和计算方法, 对柴油喷雾撞壁后在不同形状与位置的 BUM P 附近的燃油浓度分布进行数值模拟, 对于减少近壁区浓混合气的数量、揭示 BUM P 在稀扩散燃烧混合气形成中的作用、探索柴油撞壁射流的主要影响因素以及为改进燃烧室设计提供依据很有必要。

1 数学模型与计算方法

1.1 湍流模型与边界条件

常用的湍流模型有亚网格尺度模型、单方程模型、标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型、Chen 氏 $k-\epsilon$ 模型和雷诺应力模型等。本文采用标准 $k-\epsilon$ 模型^[8], 模型中的系数见表 1。

表 1 标准 $k-\epsilon$ 湍流模型的系数

Table 1 Coefficients of the standard $k-\epsilon$ turbulence model

c_μ	σ_k	σ_ϵ	σ_h	σ_m	c_{e1}	c_{e2}	c_{e3}	c_{e4}
0.09	1.0	1.22	0.9	0.9	1.44	1.92	0.0 或 1.44*	-0.33

注: * 当 $P_B > 0$ 时, $c_{e3} = 1.44$; 其它 $c_{e3} = 0$ 。

计算区域的边界采用固壁边界。固壁的温度采用等温边界条件, 固壁的速度采用无滑移速度边界。

1.2 计算方法

柴油机的喷雾、燃烧及流动过程属于瞬态问题, 故采用具有两个压力校正步、对压力场校正精度高, 且比较容易得到收敛解的 PISO 算法。PISO 算法的基本思想和结构都与 SIMPLE 非常相似, 其名称由 Pressure Implicit Solution by Split Operator 的字头组成, 主要用于非稳态计算, 有时也用于相关变量间存在强耦合的场合(例如浮力流)。PISO 的计算步骤如下^[9,10]: (1) 估计压力场 p^* , 并估计一个迭代初始速度场; (2) 求解动量方程, 得到速度场 u^*, v^*, w^* ; (3) 求解 p_1 方程, 得到 p_1 , 用 p_1 校正速度值; (4) 求解 p_2 方程, 得到 p_2 , 用 p_1 和 p_2 校正压力, 即 $p = p^* + p_1 + p_2$; (5) 求解那些通过源项、流体物性等影响流场的其它变量(如温度、浓度等)的离散化方程; (6) 将新求得的速度场及新的物性、源项等代入动量方程, 用新得到的压力 p 当作一个新的试探压力场 p^* , 返回第二步, 重复全部过程, 直到得到收敛解; (7) 得到收敛的速度场后, 求解剩下的其它待求的变量。

2 数值模拟结果

2.1 矩形 BUM P 对撞壁射流的影响

采用长方体计算网格, 计算域网格总数 84000, 节点数 90241。射流入射角为 30°(模拟轴线与缸盖下平面

收稿日期: 2004-02-23 修订日期: 2004-04-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“新一代内燃机燃烧理论和石油燃料替代途径的基础研究”(2001CB209202); 国家自然科学基金重点项目“车用内燃机新概念燃烧过程的研究”(59936130)

作者简介: 赵昌普(1964-), 男, 博士, 主要研究方向为内燃机工作过程激光诊断和数值模拟计算。天津市南开区卫津路 92 号 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 300072。Email: chpzha@eyou.com

成 30 角的喷孔), 喷孔至撞壁点的距离 L_1 为 32 33 mm, 喷孔直径 ϕ 32 mm, 喷油持续时间 2 5 ms, 燃料初温 300 K。其它模拟计算参数见表 2。采用高雷诺数标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、Huh 雾化模型、Reitz-Diwakar 液滴破碎模型、Bai 撞壁模型及 PISO 算法。时间步长及计算

步数分别设为 0 01 ms 和 250 步, 在 Sun Ultra 80 工作站 (UltraSPARC—II 450 双 CPU; 4M 高速缓存; 双 18G SCSI 磁盘; 2G 内存; 中文操作界面, Solaris 8 操作系统) 上使用多维数值分析软件 STAR-CD 进行计算, 每种情形约需 CPU 时间 12 h。

表 2 矩形 BUM P 喷雾模拟计算主要参数

Table 2 Main parameters of spray simulations with a rectangular BUM P on the wall

	Case a	Case b	Case c	Case d	Case e	Case f	Case g	Case h
二次撞壁距离 L_2 /mm	3 834	3 834	5 834	7 834	9 834	5 834	5 834	5 834
BUM P 尺寸 $h \times w$ /mm \times mm	1 \times 1	2 \times 2	2 \times 2	2 \times 2	2 \times 2	2 \times 2	2 \times 2	2 \times 2
喷雾环境条件: 气体	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂
压力/bar	2	2	2	2	2	71	71	51
温度/K	298	298	298	298	298	960	1160	960
密度/kg \cdot m ⁻³	2 26	2 26	2 26	2 26	2 26	24 92	20 62	17 90
壁面温度/K	298	298	298	298	298	500	500	500

2 1 1 相同喷雾环境条件下矩形 BUM P 高度及位置对撞壁射流浓度场的影响

图 1 为不同矩形 BUM P 高度和位置对撞壁射流浓度场影响的计算结果, 计算条件对应表 2 Case a~e。由图 1 可看出, BUM P 的高度和位置对撞壁射流的浓度场影响很大。由图 1a 和 1b 比较可知, 当 BUM P 高度较小时, 撞壁射流越过 BUM P 后再次着壁, 在 BUM P 的上下方均存在一块厚度大约为 1~ 2 mm 的较大面积的燃油高浓度区, 对降低未燃 HC 和碳烟排放极为不利^[1]; 当 BUM P 的高度由 1 mm 增高到 2 mm 时, 撞壁射流越过 BUM P 后没有再着壁, 仅在 BUM P 上方存在

一小块燃油高浓度区, 而在 BUM P 下方没有出现燃油高浓度区, 由喷油时刻 $t = 1.6$ ms ASI (After Start of Injection) 的喷雾撞壁图像可看出, 燃油高浓度区面积明显减小, 说明 BUM P 发挥了作用。由图 1b~ e 的比较可看出, 当 BUM P 高度不变时, 随 BUM P 的下移, 即随二次撞壁距离 L_2 (油束撞壁点到 BUM P 上沿的距离) 的增大, 在 BUM P 和射流撞壁点之间的厚度大约为 1~ 2 mm 的燃油高浓度区面积逐渐增大, 说明二次撞壁距离太大不利于减少壁面燃油涂布量, 也不利于降低碳氢和碳烟排放。所以, BUM P 应有合适的高度和位置, 二次撞壁距离不易过大, 否则就不能很好地发挥作用。

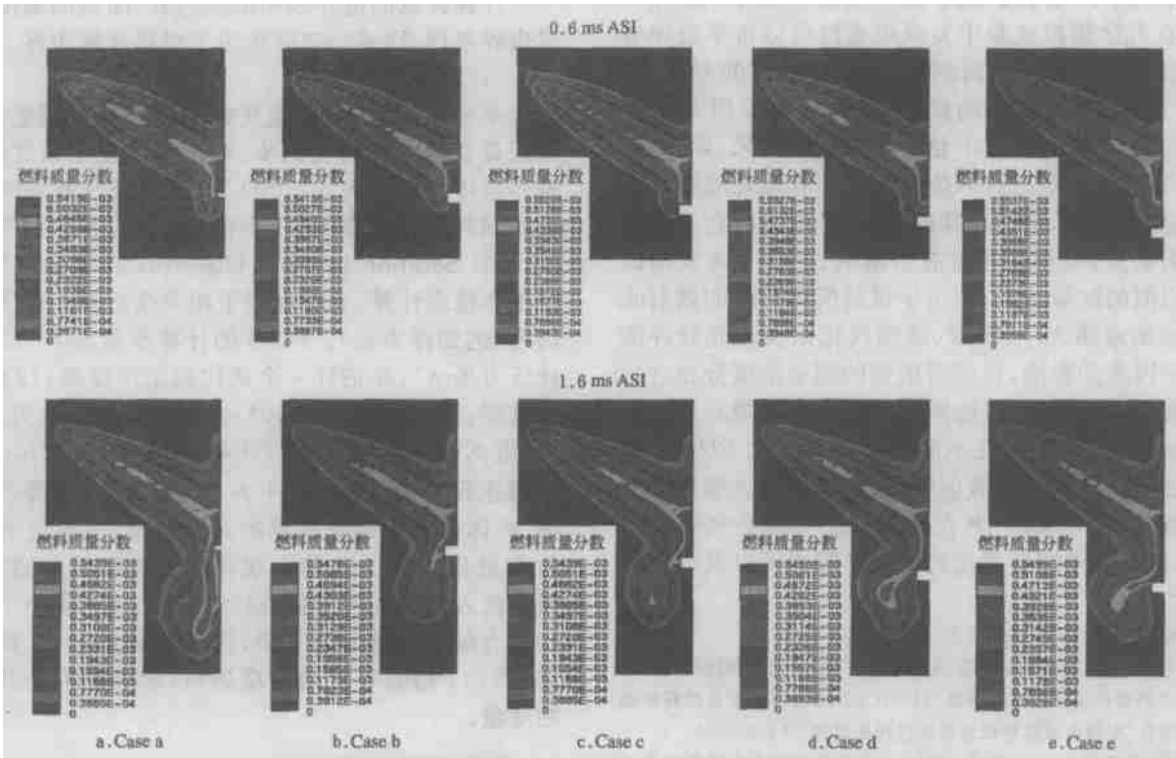


图 1 矩形 BUM P 高度及位置对撞壁射流浓度场的影响

Fig 1 Effects of the height and location of a rectangular BUM P on concentration fields of a wall-impingement jet

2.1.2 不同喷雾环境条件下矩形BUMP对喷雾浓度场及贯穿距的影响

图 2 为不同环境条件下矩形BUMP对柴油喷雾浓度场影响的比较,计算条件对应表 2 Case f, g, h。由图 2a 与图 1c 的比较可以看出,在BUMP 及其位置保持不变的情况下,当环境气体温度、压力及密度增大时,由于

燃油蒸发、汽化及其环境阻力的增大,油束贯穿距明显减小,当 $t = 0.8\text{ ms ASI}$ 时,油束才开始撞壁,当 $t = 1.1\text{ ms ASI}$ 时,壁面射流才到达BUMP;而在表 2 Case c 下,油束大约在 $t = 0.4\text{ ms ASI}$ 时撞壁, $t = 0.5\text{ ms ASI}$ 时壁面射流就到达BUMP 了。可见初始条件对油束贯穿距及壁面射流影响很大。

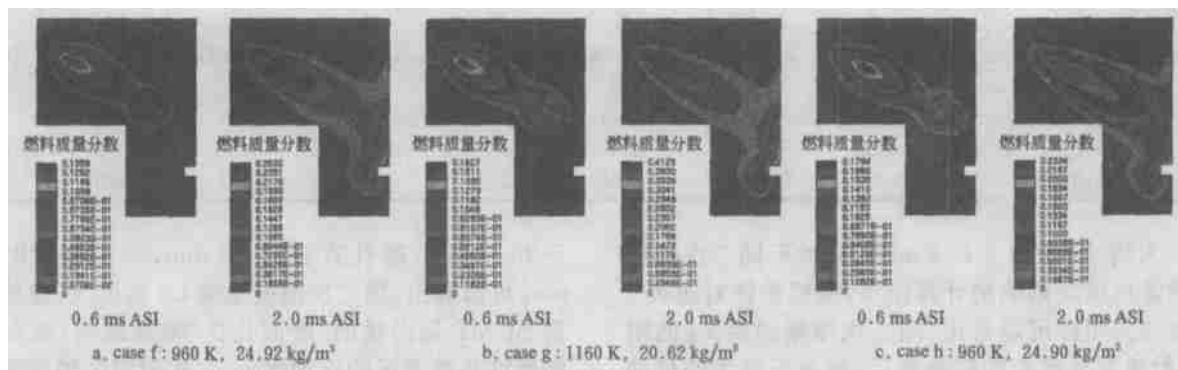


图 2 环境温度及密度对油束特性及喷雾浓度场的影响

Fig 2 Effects of the environmental temperature and density on spray characteristics and concentration fields

由图 2a, b, c 的比较可以看出,环境气体密度对喷雾扩散角影响不大,但对油束贯穿距影响很大。当 $t = 0.6\text{ ms ASI}$ 时,环境气体密度最大的 Case f 的油束离壁面最远,而环境气体密度最小的 Case h 的油束离壁面最近。这与 Jeffrey D. Naber and Dennis L. Siebers 等^[11]的研究结果一致。对贯穿度影响较大是由环境气体密度对空气卷吸的影响引起的。随环境气体密度的增加,卷入油束中的空气量增多。根据动量守恒,空气卷吸量越大,油束动量损失就越大,贯穿速度就越低,因此贯穿度就越小。Jeffrey D. Naber and Dennis L. Siebers 等^[11]的研究结果同时也表明,燃油的蒸发可使油束贯穿度及扩散角减少多达 20%,但其影响的程度随环境气体密度的增高而下降。

图 3 为表 2 Case c, f, g, h 条件下喷雾贯穿距的计算结果,可以看出: (1)在常温低压下喷雾的贯穿距离较大,在高温高压下,喷雾的贯穿距离较小,且随环境密度的升高,喷雾贯穿距下降; (2)Case c 条件下,油束最早到达壁面,而环境密度最大的 Case f 条件下油束最晚到达壁面; (3)在油束到达壁面之前,即喷雾的初期阶段,贯穿距基本上与时间成线性增长关系,射流到达壁面后,沿壁面方向贯穿距增长较慢,最后达到冻结状态; (4)Case f, g, h 三条贯穿距曲线比较接近,最后基本上达到相同的最大值,但在达到冻结之前,3 种情况也存在微小的差别: Case f, g 环境压力相同, Case g 虽然环境温度较高,而环境密度却较低,所以贯穿距较大; Case f, h 环境温度相同,而 Case h 的环境压力较低,其环境密度也较低,因而贯穿距曲线在 Case f 的上方; Case g, h 相比,后者环境温度、压力及密度均较低,其贯穿距较大。

综上所述,环境密度最小的 Case c 的贯穿速度最大,环境密度最大的 Case f 的贯穿速度最小,即从上到

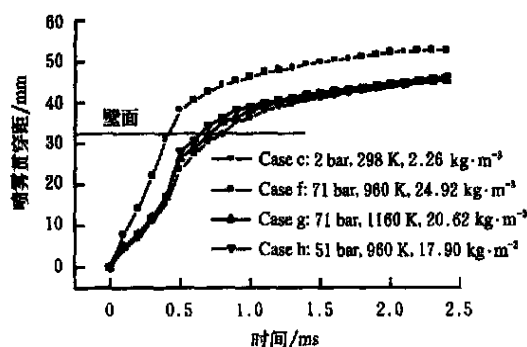


图 3 喷雾贯穿距比较

Fig 3 Comparison of spray tip penetrations

下随环境密度的升高,贯穿速度逐渐减小,对应时刻的贯穿距降低。

2.2 半圆形BUMP对撞壁射流的影响

2.2.1 不同二次撞壁距离对喷雾浓度场的影响

在壁面上设置高度 2 mm 的半圆形BUMP,计算域在 x, y, z 方向的初始网格数为 $30 \times 70 \times 30$,网格边长为 1 mm。为揭示BUMP 附近及附面层的详细物理过程,对BUMP 附近及附面层的网格进行了细化,在壁面垂直方向网格最小尺寸达 0.125 mm,总单元数 85250,节点数 89228。图 4 为BUMP 附近局部计算网格。喷孔直径 0.30 mm,喷孔至撞壁点距离,射流入射角、喷油持续时间、燃料初温、计算模型及算法均同 2.1

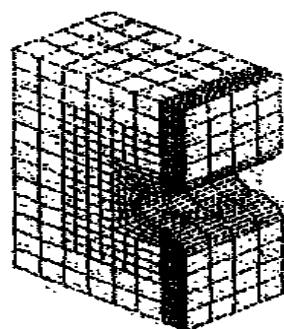


图 4 BUMP 附近局部网格
Fig 4 Partial mesh near the BUMP

节。其它模拟计算参数见表 3。时间步长及计算步数分别设为 0.01 ms 和 250 步, 对每一个二次撞壁距离 L_2 , 约需 CPU 时间 18 h。

表 3 半圆形 BUMP 模拟计算主要参数

Table 3 Main parameters of spray simulations with a semicircular BUMP on the wall								
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
二次撞壁距离 L_2 /mm	3.834	7.834	9.834	平壁	5.834	5.834	5.834	5.834
BUMP 高度 h /mm	2	2	2	0	2	1.3	2	2
喷雾环境条件: 气体	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂	100% N ₂
压力/bar	2	2	2	2	2	71	71	71
温度/K	298	298	298	298	298	960	960	960
密度/kg·m ⁻³	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	24.92	24.92	24.92
壁面温度/K	298	298	298	298	298	500	500	500

图 5 为喷油时刻 $t = 0.8 \text{ ms}$ ASI 时不同二次撞壁距离对喷雾浓度场影响的计算结果, 模拟条件对应表 3 Case 1、2、3。同样可以看出: 随二次撞壁距离 L_2 的增大, 二次射流剥离壁面的时刻滞后, 涂布于壁面的燃油高浓度区随之增大, 与矩形 BUMP 的结论一致, 再次证明二次撞壁距离不易过大。

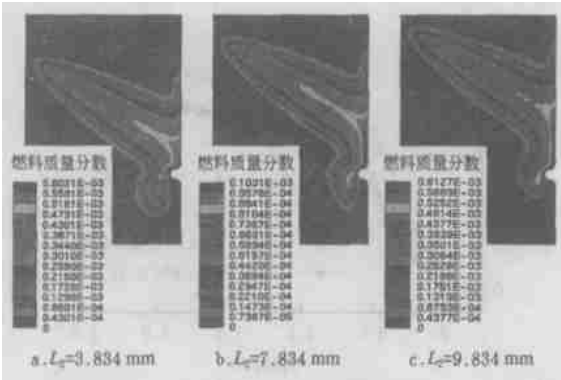


图 5 二次撞壁距离对喷雾浓度场的影响(0.8 ms ASI)
Fig. 5 Effects of the secondary wall-impinging distance on spray concentration fields

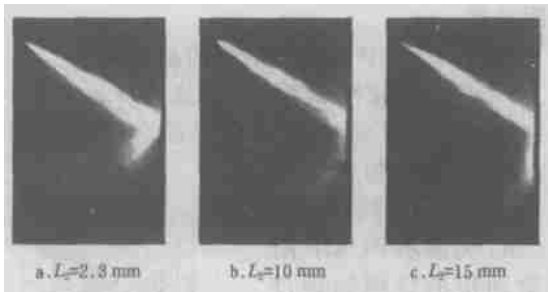


图 6 不同二次撞壁距离的 PLIF 喷雾撞壁图像(1.0 ms ASI)
Fig. 6 PLIF photographs of the wall-impingement jet with different secondary wall-impinging distance distancepray concentration fields

图 6 是在标准状况下, 共轨压力为 580 bar, 激光脉冲能量为 150 mJ、 $t = 1.0 \text{ ms}$ ASI 时不同二次撞壁距离下拍摄的 PLIF 喷雾撞壁图像。试验主要参数: 喷雾入射角 30° ; 半圆形 BUMP 高度 1.3 mm, 撞壁距离 L_1

$= 36.6 \text{ mm}$, 喷孔直径 0.30 mm, 喷油持续时间 3.0 ms。可以看出, 随二次撞壁距离 L_2 的增大, 撞壁射流遇到 BUMP 后出现的“壁面礼花”现象减弱, 涂布于壁面的燃油高浓度区的面积增大, 二次射流的轴截面面积减小, 不利于减少燃油在壁面上的堆积和燃油与周围空气的混合。所以, 试验与模拟计算结果均表明二次撞壁距离对于形成二次空间射流, 减少燃油在壁面上的堆积量以及形成稀扩散燃烧, 降低排放至关重要, 应根据发动机实际工况进行优化。

2.2.2 半圆形 BUMP 对喷雾速度场的影响

图 7 为 BUMP 对喷雾速度场影响的计算结果, 模拟计算条件对应见表 3 Case 4、5。可以看出, 在平壁上设置 BUMP 后, $t = 0.6 \text{ ms}$ ASI 时, 在二次射流的低压区逐步形成一个卷吸空气的“双涡结构”, 即在 BUMP 的左上方首先形成一个顺时针方向旋转的大尺度涡, 然后又在 BUMP 的左下方形成一个逆时针方向旋转的大尺度涡, 与平壁上射流下游的单涡结构相比, BUMP 附近旋向相反的“双涡结构”极大地增强了二次射流对周围空气的卷吸, 加强了燃油与空气的混合。

2.3 BUMP 形状与高度对二次射流及当量比的作用

图 8 为 BUMP 形状及高度对二次射流及燃空当量比分布的影响情况, 模拟计算参数对应表 3 Case 6、7、8。图 9 为其平均燃空当量比随时间的变化关系。可以看出, 在其它条件相同的情况下, 不同的 BUMP 对混合气形成的影响不同。图 8a 的撞壁射流遇到 BUMP 后所形成的二次射流沿壁面向下方向移动的距离最远, 而图 8c 的撞壁射流遇到 BUMP 后所形成的二次射流沿壁面向下方向移动的距离最近, 图 8b 介于二者之间, 即从图 8a 到图 8c 3 种 BUMP 对撞壁射流向下移动的阻碍作用逐渐增强。

由图 9 可以看出, 在喷雾撞壁前, 3 种 BUMP 下燃空当量比的数值基本相同; 油束撞壁后, 图 8c 的高度为 2 mm 的矩形 BUMP 下的当量比最低, 图 8b 的高度为 2 mm 的半圆形 BUMP 下的当量比最高, 而图 8a 的高度为 1.3 mm 的半圆形 BUMP 下的当量比介于二者之间, 看来合理匹配 BUMP 的形状及高度十分重要。

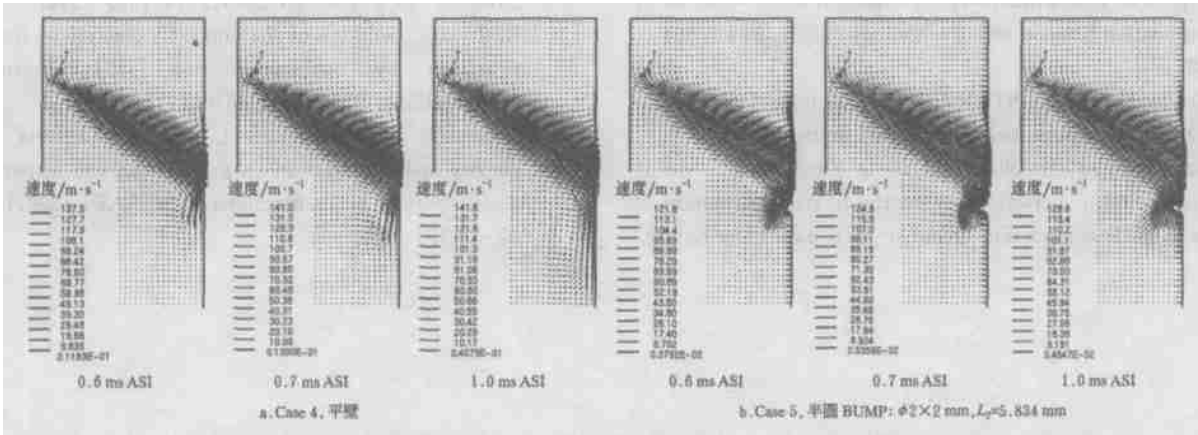


图 7 BUM P 对喷雾速度场的影响
Fig 7 Effects of the BUM P on spray velocity fields



图 8 BUM P 形状及高度对二次射流及当量比的影响(1.8 ms ASI)
Fig 8 Effects of the shape and height of a BUM P on secondary jet and its fuel/air equivalence ratio

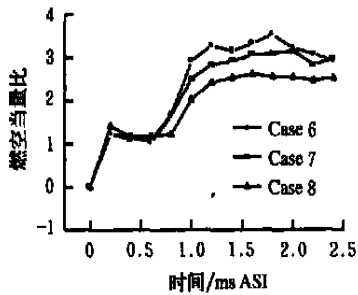


图 9 平壁上不同BUM P 对燃空当量比的影响
Fig 9 Effects of different BUM Ps on spray fuel/air equivalence ratios

3 结 论

1) 矩形BUM P、半圆形BUM P 的数值模拟结果与半圆形BUM P 的试验结果均表明,BUM P 的高度和二次撞壁距离对撞壁射流的浓度场影响很大。随二次撞壁距离的增大,在BUM P 和射流撞壁点之间的厚度大约为1~ 2 mm 的燃油高浓度区的面积逐渐增大。二次撞壁距离对于形成二次空间射流、减少燃油在壁面上的堆积量至关重要,应根据具体情况进行优化。

2) 喷雾环境条件对油束贯穿距及壁面射流影响很大。当环境温度、压力及密度较高时,由于喷雾的空气卷吸量及动量损失增大,而且汽化、蒸发较快,喷雾贯穿速度降低,贯穿距减小,为使BUM P 发挥或及早发挥作用,应适当减小二次撞壁距离。

3) 在平壁上设置BUM P 后,在二次射流的低压区逐渐形成一个卷吸空气的“双涡结构”,与平壁上没有设置BUM P 时射流下游的单涡结构相比,BUM P 附近旋向相反的“双涡结构”对形成稀混合气有重要作用。

4) 在喷雾撞壁前,不同BUM P 下燃空当量比的数值基本相同;油束撞壁后,BUM P 的形状和高度对燃空当量比影响较大,合理匹配BUM P 的形状及高度对于形成稀混合气、实现柴油机稀扩散燃烧以至HCCI燃烧非常重要。

[参 考 文 献]

[1] Jiro Senda, Masaaki Kobayashi, Seiji Iwashita, et al Modeling of diesel spray impingement on a flat wall[J]. Transactions of the SAE, 1994, 103(3): 1918- 1931.

[2] Naber J, Enright B, Farrell P. Fuel impingement in a direct injection diesel engine[J]. Transactions of the SAE, 1988, 97(3): 430- 443.

[3] Daniel W. Dicked NO_x control in heavy-duty diesel engines—what is the limit? [C]. SAE Paper 980174, 1998.

[4] Arcoumanis C, Shindler K P. Mixture formation and combustion in the D. I Diesel Engine [C]. SAE Paper 972681, 1997.

[5] Wanhua Su. Enhancement of near wall mixing of an impinging jet by means BUM P on the wall [C]. SAE Paper 971616, 1997.

[6] Wanhua Su, Jiao Yu, Changpu Zhao, et al A study of BUM P combustion chamber seeking for new conceptual mixture formation and combustion in diesel engine conditions [A]. In: Proceedings of the 2000 Sino-Korea International Conference on I. C. Engines (SKICE'2000) [C]. Tianjin, Tianjin University, 2000, 95- 106.

[7] Su Wanhua, Wang Yang, Yu Jiao, et al Mixture preparation in a BUM P combustion chamber for the purpose of realization of HCCI combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002, 8(4): 364- 368.

[8] CD adapco Group. STAR-CD Methodology (Version 3

- 15) [M]. Computational Dynamics Limited, 2001.
- [9] Zhao Changpu, Su Wanhua, Wang Yang, et al. Multi-dimensional numerical study on the mixture formation in the BUM P combustion chamber of a diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(6): 389- 394.
- [10] R. I. Issa. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1): 40- 65.
- [11] Jeffrey D. Naber, Dennis L. Siebers. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays [J]. Transactions of the SAE, 1996, 105(3): 82- 111.

Effects of the shape and location of the BUM P on a plane on the wall-impingement jet of a diesel fuel spray

Zhao Changpu, Su Wanhua, Yu Jiao

(State Key Laboratory of Engine Combustion, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Numerical simulation of the wall-impingement mixing process of a diesel fuel spray on the plane with a BUM P was carried out by using standard turbulence model and PISO algorithm. The computed results were in good agreement with the experimental ones obtained by planar laser-induced fluorescence (PLIF) method by comparison. Both measured and computed results indicated that the wall-impingement jet would strip off the wall and a secondary space jet was formed when it met with the BUM P on the plane. This resulted in the decrease of the amount of fuel accumulated on the wall. And the area of approximately 1~2 mm thick fuel-rich region between the BUM P and the jet wall-impinging point was extended with the secondary wall-impingement distance increased. The computational results also showed that a "two-vortex structure" which entrained the surrounding air and had an important role in forming lean mixture appeared in the low pressure zone of near the secondary jet. The shape of a BUM P on the plane had significant effects on the formation of a secondary space jet and lean mixture and should be optimized and matched rationally in practical applications.

Key words: mixture formation; BUM P; wall-impingement jet; secondary jet; numerical simulation