

直喷汽油机喷雾特性的 CFD 及可视化研究

Research on Spray Characteristics of GDI Engine based on CFD and Visualization System

丁宁^{1,2}, 高卫民², 平银生², 陈明², 张小矛², 张万平², 邬文睿²

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804;

2. 上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海 201804)

摘要: 为了深入研究喷雾引导型缸内直喷汽油机的喷射特性, 满足燃烧系统研发需求, 利用 STAR-CD 软件数值模拟了汽油喷雾的发展过程。根据定容弹试验结果进行了网格依赖性的研究。最后, 按照 SAE 标准试验要求, 对诸如喷射压力、燃油温度、喷油脉宽等参数对喷雾特性的影响作了进一步详细的研究。

关键词: 缸内直喷汽油机、喷射特性、燃烧系统、定容弹试验

Abstract: The fuel spray process in a GDI engine was simulated by Star-CD to research the spray characteristics and help to reach the requirements of combustion system. The results of different mesh sizes were compared with the constant volume bomb experiment. The effects on the spray of inject pressure, oil temperature and inject impulse were researched according to the SAE criterion.

Keywords: GDI engine, spray characteristics, combustion system, constant volume bomb

1 直喷汽油机喷射系统的组成

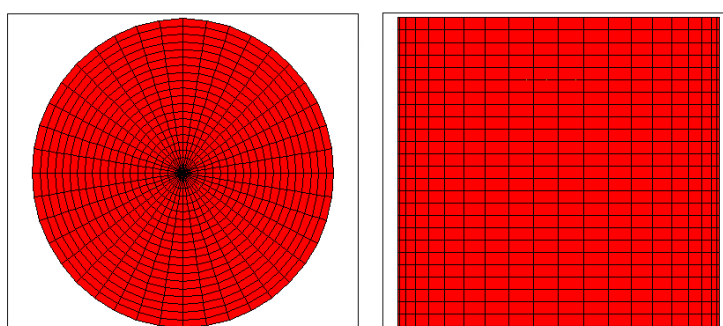
日益严格的废气和噪声排放法规以及降低燃油消耗量的愿望对车用汽油机的喷射系统提出了新的技术要求。而对于喷雾引导型缸内直喷汽油机来说, 因为需要更好的燃油雾化和油气混合效果, 因此需要更高的喷射稳定性和精确性^[1-2]。喷雾引导型直喷汽油机的燃油喷射系统由高压油泵、高压油管、燃油轨、轨压传感器、喷油器、ECU 等设备组成。在该种共轨喷油系统中, 压力的产生与燃油的喷射完全消除了彼此间的相互影响。

2 喷雾模型的网格依赖性研究及试验验证

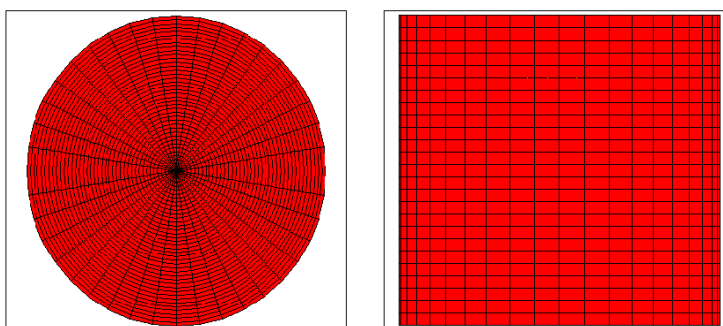
2.1 网格模型的建立

对喷雾引导型直喷汽油机而言, 燃油的喷射、雾化和蒸发及其与空气的混合对发动机的燃烧和排放具有关键性作用。然而, 喷雾的数值模拟却是一个十分困难的课题。这是因为缸内气体的宏观

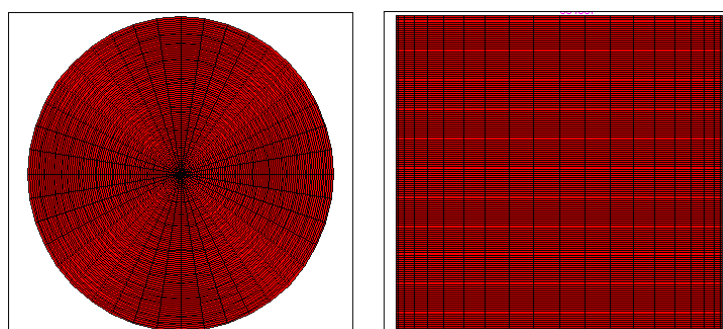
流动和湍流脉动对喷雾都有着强烈的影响。而喷雾本身又是由尺寸各异的大量细微油滴、油蒸汽与空气组成的两相混合物。要正确模拟喷雾形成即燃料与空气的混合过程，必须依靠两相流和统计力学的理论，但这种复杂的两相流计算需要高额的计算成本，目前还很难在世界范围内推广和采用。在实际应用上，人们开发出了复杂程度和预测精度各不相同的湍流和喷雾模型。一般来说，人们进行发动机工作过程的数值模拟计算采用较多的是离散液滴模型 (DDM)，它的单元网格大小无法达到描述液滴雾化之后的微尺度。GDI 汽油喷雾的微尺度一般为几十微米。也就是说不能通过网格直接对大量细微油滴进行分辨，需要采用一定的差分方法对小于网格尺寸的油滴进行描述。而这种差分方法是要依赖于网格本身的节点和尺寸。因此本文选择了三种不同尺寸和密度的网格模型对定容喷射过程进行研究，其具体网格模型如下图 1 所示。该喷嘴喷射的各视角喷雾液柱模型示意图如下图 2 所示。



(a) 粗网格模型



(b) 细网格模型



(c) 精细网格模型

图 1 计算区域网格模型

表 1 网格基本参数

类型	半径 (mm)	网格层数	高度 (mm)	网格层数	圆周 (deg)	网格层数	网格总数
粗网格	80	20	150	25	360	40	20000
细网格	80	40	150	50	360	40	80000
精细网格	80	80	150	150	360	40	480000

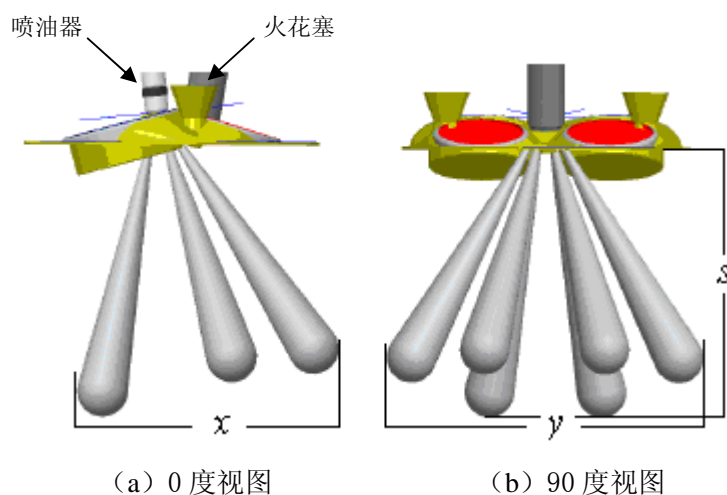


图 2 喷雾模型示意图

x 、 y 分别为 0 和 90 度视图的喷雾的纵向延展距离； s 为喷雾的轴向贯穿距离

2.2 定容条件下喷射过程的数值模拟

考虑到汽油本身是一种多组份和构成极其复杂的物质,而且不同牌号、不同地区的油品有着非常大的差别^[3-5]。而目前应用于发动机喷雾、燃烧过程三维数值模拟的所有的软件都无法对如此繁多的物质进行成份设定和数值模拟。因此本文的数值模拟过程参考了 SAE 的标准测试条件。其燃料物性对比如表 2 所示,具体的数值模拟设置见下表 3。

表 2 几种燃料的物性对比

燃料	汽油	正庚烷(n-Heptane)	异辛烷(Iso-Octane)
化学式	C ₄₋₁₂ 的烃	C ₇ H ₁₆	C ₈ H ₁₈
性质	化合物类	烃化合物类	烃化合物类
外观与性状	无色易挥发液体	无色易挥发液体	无色透明液体
摩尔质量(kg/kmol)	~98	100	114
碳(%)	~85	84	84.2
氢(%)	~15	16	15.8

氧(%)	~0	0	0
C/H 原子量比	5.6~7.4	5.25	5.33
密度(kg/m ³)	730~780	678.3	696.1
沸点(K)	305~483	371.57	398.82
凝固点(K)	~216	182	166
汽化潜热(J/kg)	314000	365754	356435
比热(kJ/kg)	2.3	2.246	2.215
表面张力系数	/	0.0197	0.0212
闪点(K)	223~253	269	285
溶解性	不溶于水	不溶于水	不溶于水
稳定性	稳定	稳定	稳定

表 3 SAE 标准测试条件

流体种类	环境温度 (°C)	环境背压 (bar)	流体温度 (°C)	喷射脉宽 (ms)	涡流强度 (ω)	滚流强度 (ω)
n-heptane	20	1	20	1-2	/	/

喷油规律的合理、正确设定对于在定容条件下，进行数值计算和定容弹试验验证这一环节来讲非常重要，本文的数值模拟采用的喷油规律参考了 FEV 和 Bosch 公司等同类产品的喷油器实验台的测试结果。考虑了在喷射过程中的电控喷射系统对于 ECU 信号的响应时间。其喷油规律示意图如下图 3 所示。

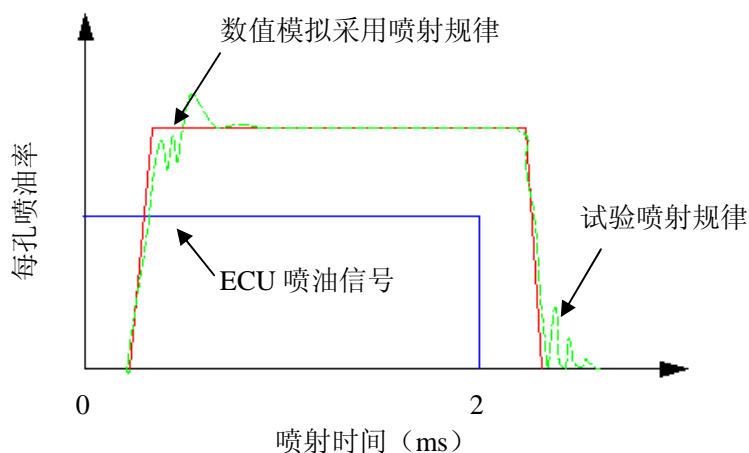
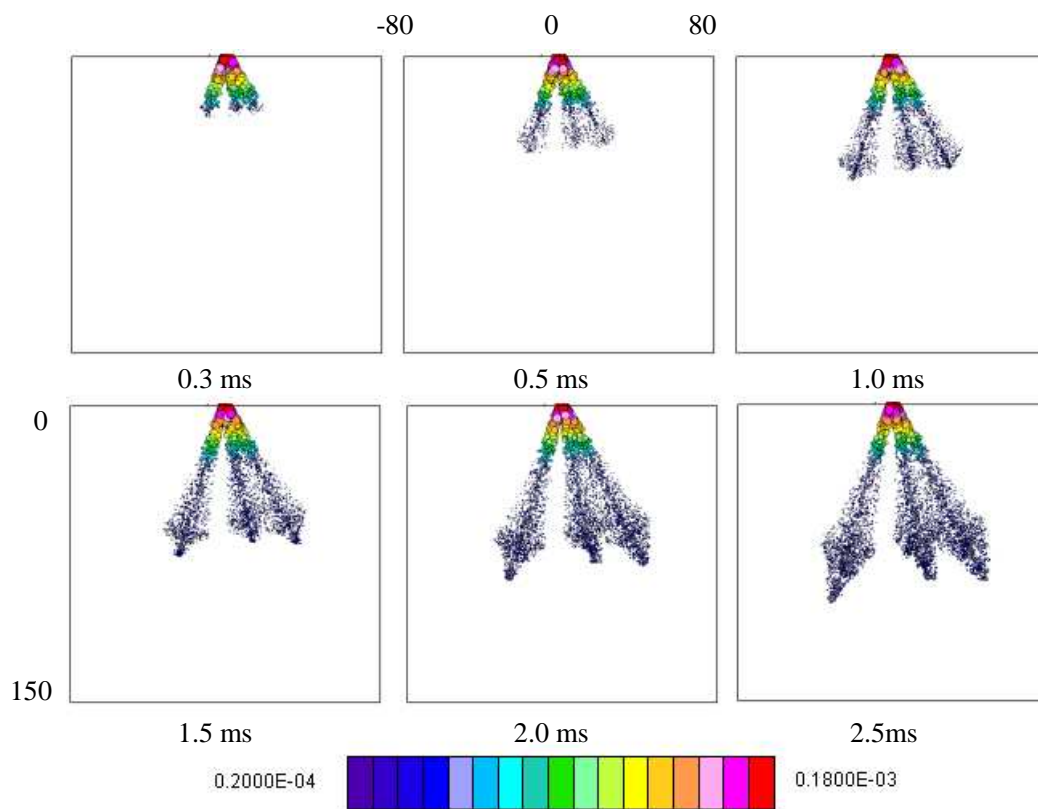
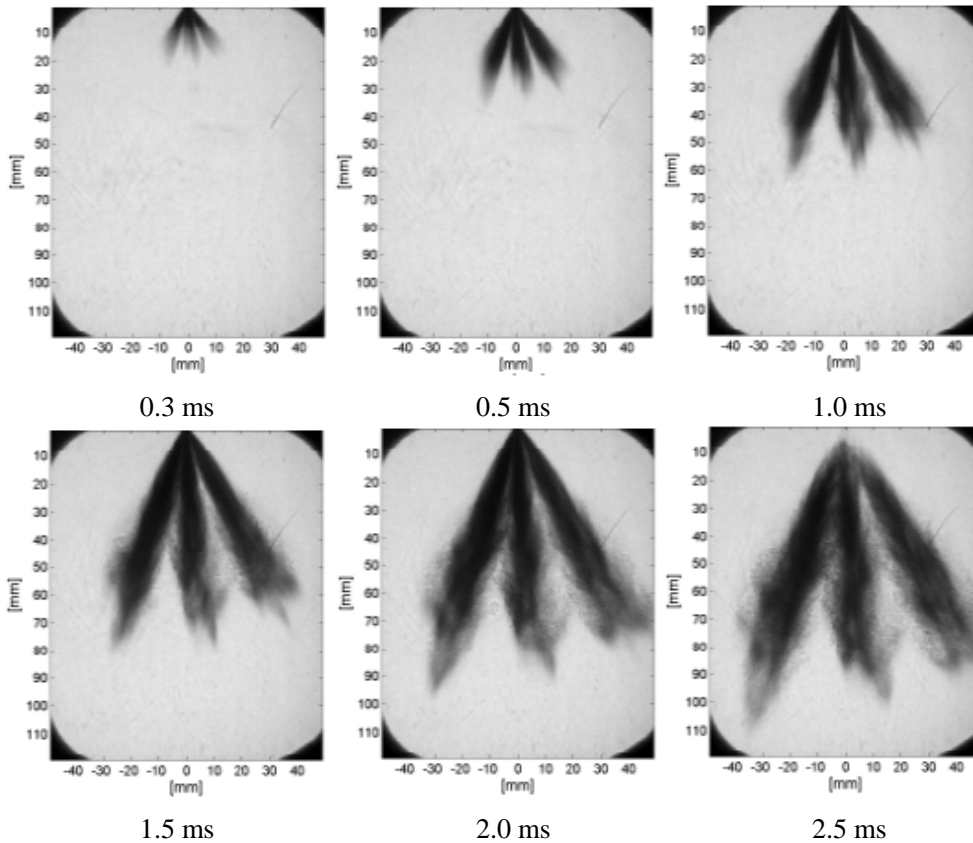


图 3 定容条件下喷油规律示意图

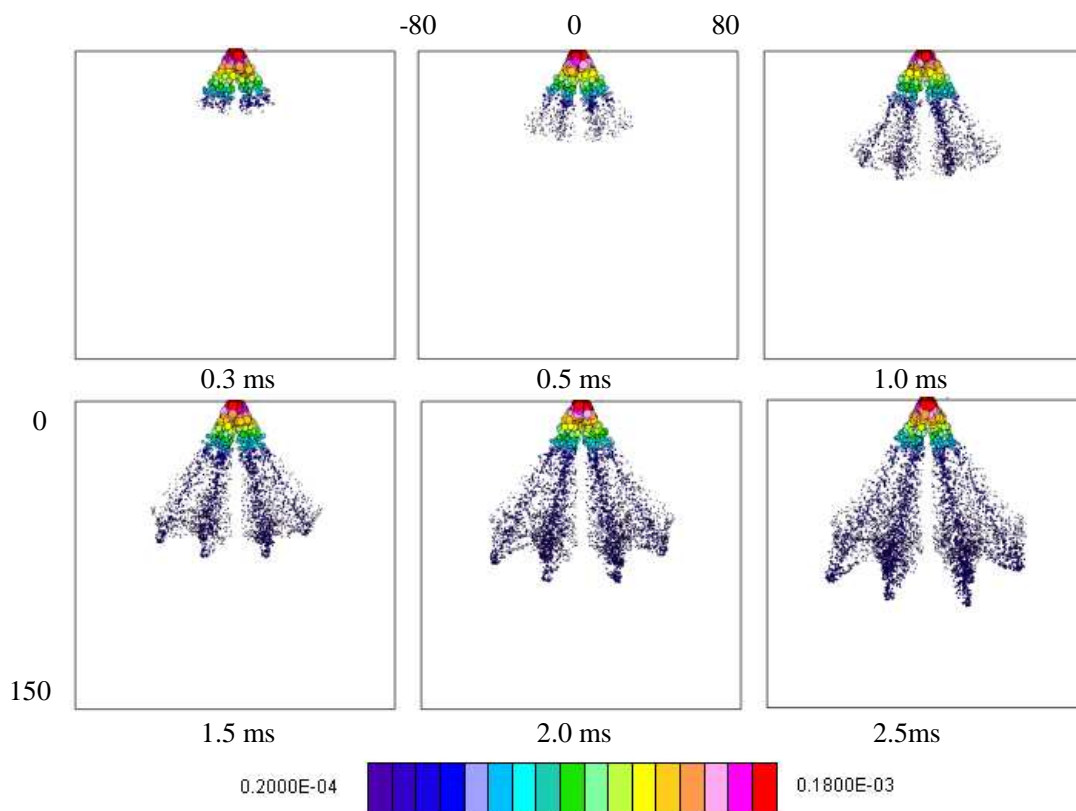
2.3 试验验证



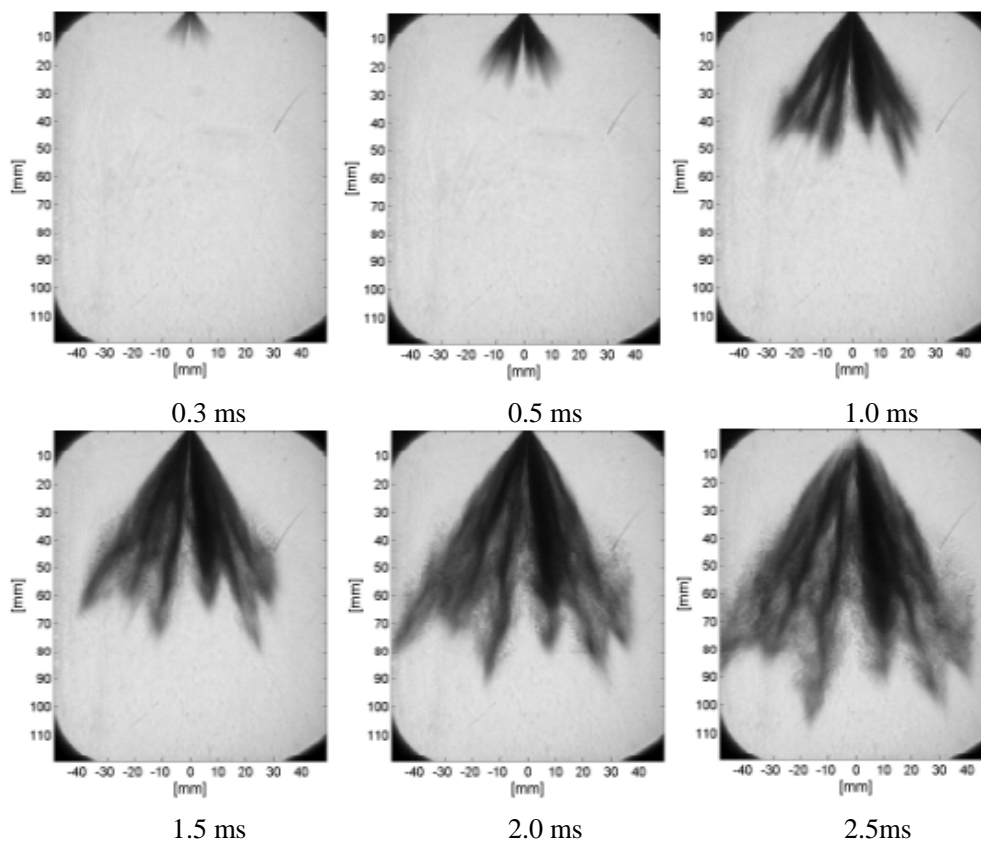
(a) 数值模拟得到的0度视角喷雾发展过程图



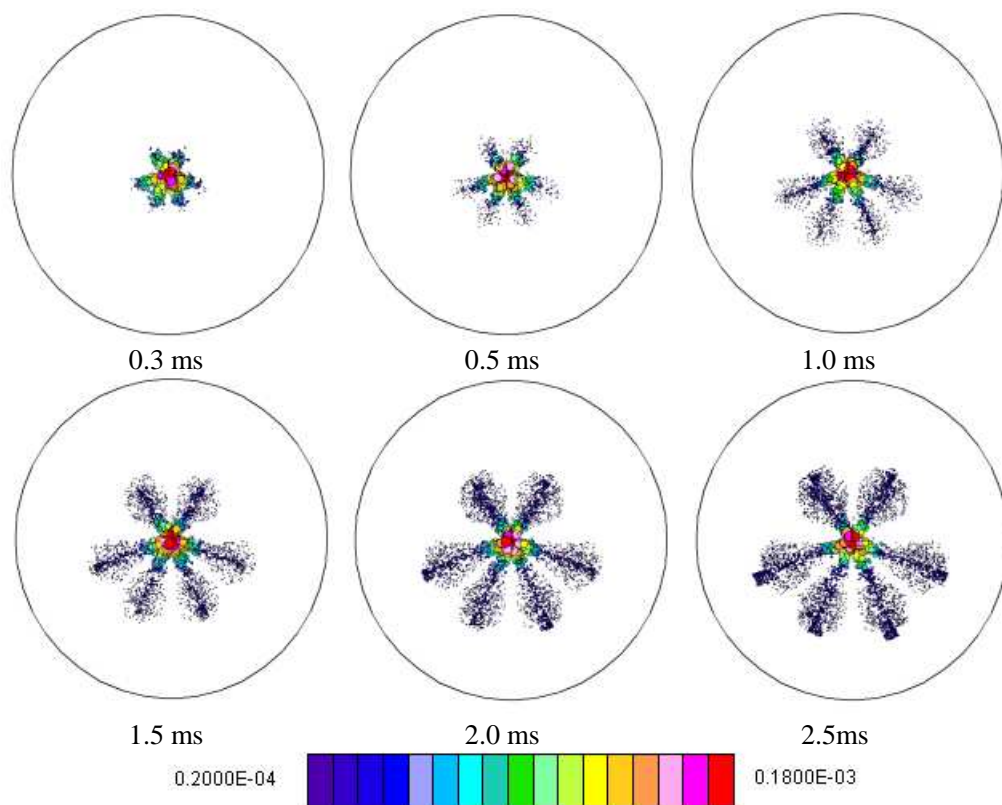
(b) 定容弹试验得到的0度视角喷雾发展过程图



(c) 数值模拟得到的 90 度视角喷雾发展过程图



(d) 定容弹试验得到的 90 度视角喷雾发展过程图



(e) 数值模拟得到的底视角喷雾发展过程图

图 4 喷射过程的数值模拟和定容弹试验对比研究

近年来，可视化方法以其直观性、高效性和可靠性等诸多优点逐渐受到内燃机生产厂家和众多高校的青睐，并展开了大量的研究^[6-8]。目前研究缸内喷油过程主要采用以下几种方法。如在定容弹或光学发动机内用 PDA (Phase Doppler Anemometry) 方法测量喷雾液滴的速度和直径；用 CCD 照相机测量喷雾的形状；用激光诱导荧光法 (Laser Induced) 测量燃油的雾化等等。其中定容弹试验因其结构简单、成本较低、试验周期短、可靠性高等优点，对于研究内燃机缸内气流运动、混合气的形成有着不可替代的作用，是研究发动机燃油喷射、混合气形成过程、喷嘴和燃烧室的设计及其匹配优化的重要辅助手段。

由于采用 CFD 方法直接模拟喷油器内的燃油流动及喷油器出口处的燃油液柱分解过程计算量太大，对于计算资源要求太高，现阶段还难以应用到实际设计当中。目前工程上常用的方法是采用定容弹或光学发动机测量喷雾特性，然后用来对 CFD 计算模型进行标定，最后用标定好的模型研究缸内的油气混合和燃烧。笔者联合某公司正是采用该方法进行直喷汽油机喷雾特性的研究。试验系统由定容室、供油系统、控制系统和图像采集处理系统组成。由于想要在研究喷雾发展过程的同时，能兼顾到喷嘴的宏观布置，如喷嘴的喷孔数目和喷射角度。在 ECU 的控制下，相机同时从相互垂直的两个角度进行拍摄，提高了标定过程的准确性。燃油喷射过程的某 SAE 标准工况下三维数值模拟和定容弹试验对比研究见上图 4 所示。从图中可见，其显示的液柱空间分布除了不规则的边缘和部分视角重叠之外与图 2 的模型和试验结果都相当接近，并且按照不同的粒径大小，分别用了不同的

色彩进行表示。从图中还可以发现喷雾刚开始产生的过程受喷嘴特性影响显著；随着喷射过程的发展，在空气剪切、内部湍流扰动和表面张力的共同作用下，粒子不断的破碎和分裂。到喷射过程结束时，大部分液滴直径分布在 $20\mu\text{m}$ 到 $40\mu\text{m}$ 的区域。

2.4 网格依赖性的研究

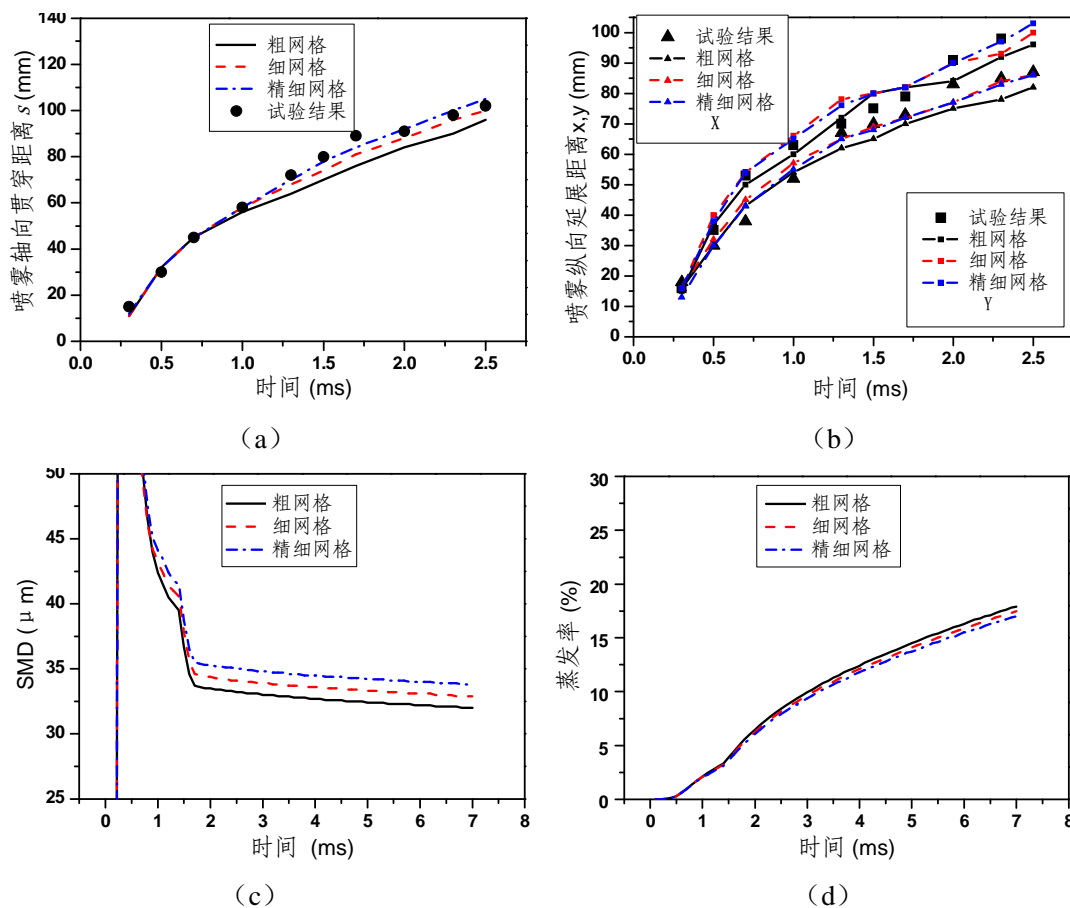


图 5 网格依赖性研究结果

上图 5 是在定容条件下利用上述粗、细和精细三套网格进行的网格依赖性研究结果。其中在喷雾的轴向贯穿距离、纵向延展距离等方面又参考了在相同条件下定容弹试验的结果。由图 5-(a)、图 5-(b)得出，应用细网格和精细网格计算，其结果与定容弹试验更加接近，曲线有良好的拟合度；应用粗网格计算的结果比试验值平均小 5%左右。在对索特平均数 (SMD) 的比较当中，三者平均相差不在 $1\mu\text{m}$ ，而不同的网格尺寸对于蒸发率的计算影响很小。

在网格数量方面，精细网格模型是粗网格模型的 24 倍，是细网格模型的 6 倍，因此计算时间也相对较长，不改变差分方法和湍流模型对结果的影响并不显著。综合考虑到计算精度、计算成本和后处理难度，选择细网格作为具体性能分析网格模型。

3 燃油喷射压力对喷雾特性的影响

表 4 分析工况

燃油压力 (bar)	气体压力 (bar)	燃油温度 (°C)	气体温度 (°C)	喷射脉宽 (ms)	涡流 (ω)	滚流 (ω)
50	1	20	20	1	/	/
100						
150						

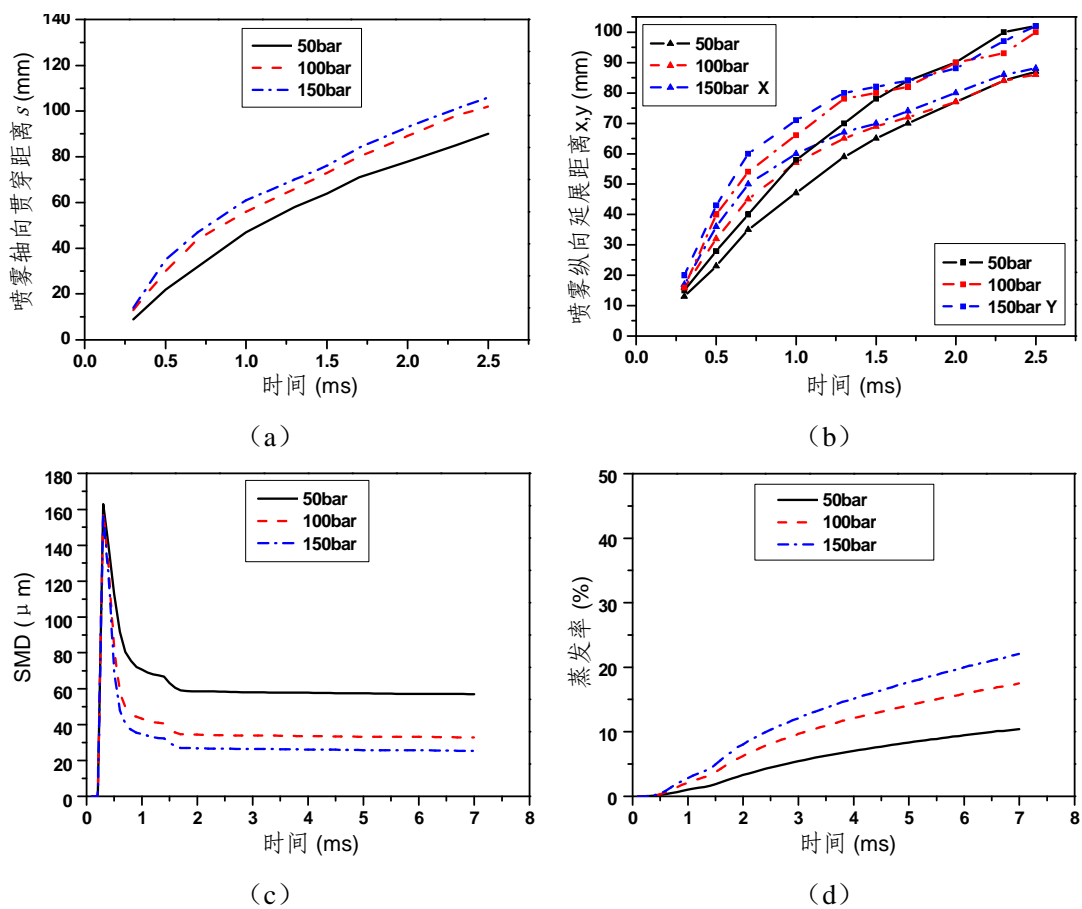


图 6 燃油喷射压力对喷雾特性的影响

燃油喷射压力对喷雾特性的影响如上图 6 所示, 随着喷射压力的提高, 在相同的时间下喷雾的轴向贯穿距离和纵向延展距离均有十分明显的提高, 而索特平均数显著下降。主要是因为喷射压力增加, 燃油粒子在离开喷嘴时可以获得更大初速度和动量, 容易克服空气的阻力, 得到更远的行程。由于喷雾速度的增加, 湍动能提高了, 表面的湍动现象也更加明显, 粒子的分裂加剧, 因而平均直径变小, 蒸发作用加强。燃油喷射 7ms 时, 其蒸发率在喷射压力为 150bar 时比喷射压力为 50bar 时提高近 11.6%。

4 定容室气体压力对喷雾特性的影响

表 5 分析工况

燃油压力 (bar)	气体压力 (bar)	燃油温度 (°C)	气体温度 (°C)	喷射脉宽 (ms)	涡流 (ω)	滚流 (ω)
100	1	20	20	1	/	/
	4					
	7					
	10					

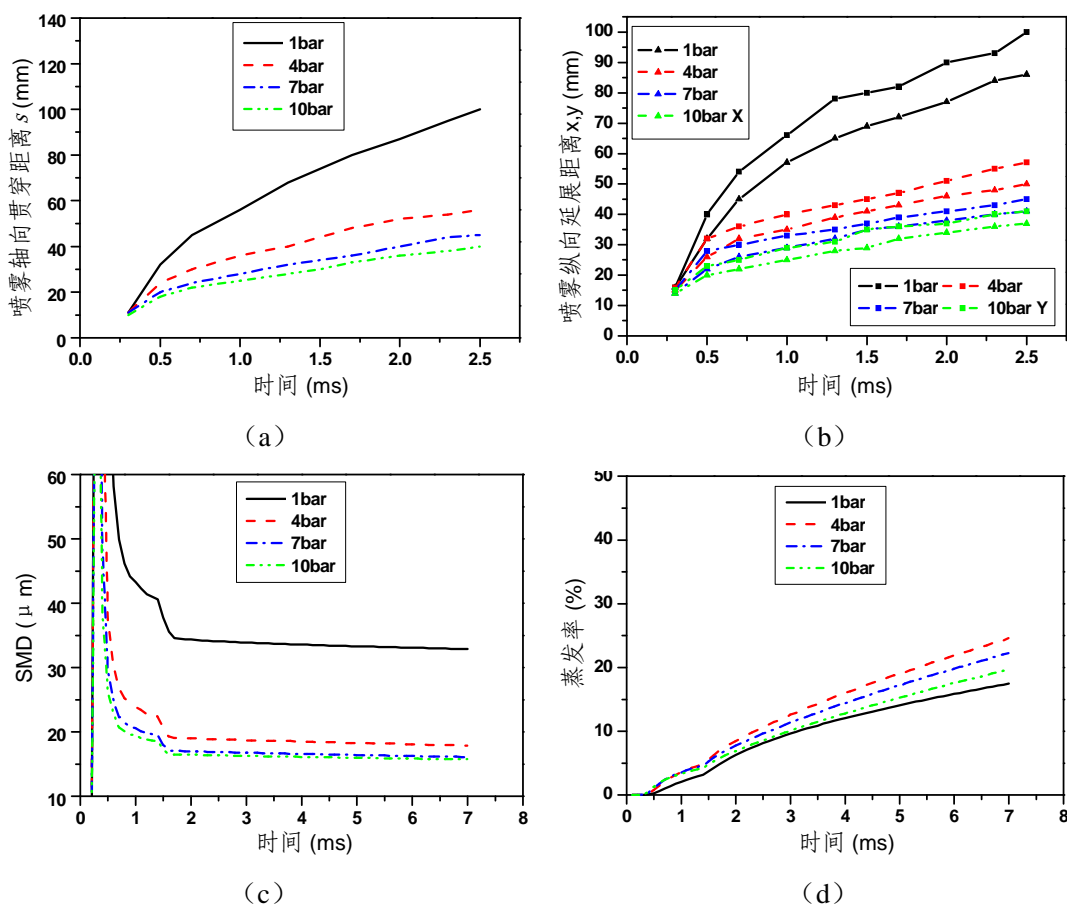


图 7 定容室气体压力对喷雾特性的影响

由上图 7 可知,随着喷射背压的提高,燃油喷雾的轴向贯穿距离、纵向延展距离和索特平均数均呈显著降低的趋势。其中在 2.5ms 时,10bar 比 1bar 背压下的轴向贯穿距离减小了 60mm,0 度与 90 度视角下的纵向延展距离也小了 57% 和 59%,而 SMD 减小了 $16\mu\text{m}$ 。主要原因是随着空气压力的不断增加,其密度显著提高,喷雾在发展过程中受到的阻力和剪切作用增强,贯穿度自然就减小了。另外,粒子破碎加剧,粒径变小,总表面积增加,蒸发作用加强。但是当背压过高时,分子扩散变得困难,因而蒸发率略有降低。

5 燃油温度对喷雾特性的影响

表 6 分析工况

燃油压力 (bar)	气体压力 (bar)	燃油温度 (°C)	气体温度 (°C)	喷射脉宽 (ms)	涡流 (ω)	滚流 (ω)
100	1	-20	20	1	/	/
		20				
		60				
		100				

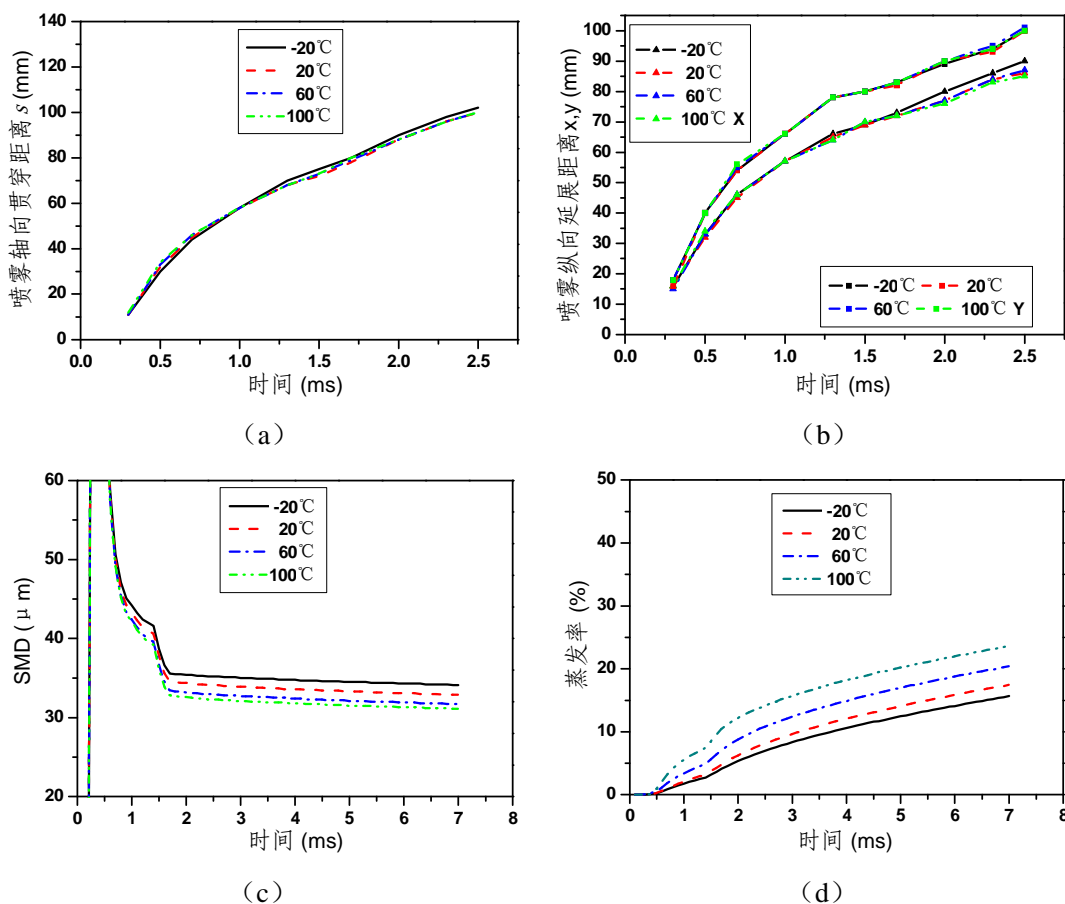


图 8 燃油温度对喷雾特性的影响

由上图 8 可知, 燃油喷雾的轴向贯穿距离、纵向延展距离随着初始喷射温度的提高变化很小; 索特平均数略有下降; 而蒸发率则显著提高。其中在喷射 2.5ms 时, 100°C 油温下的轴向贯穿距离、纵向延展距离与 -20°C 油温下的结果相差不到 2mm, SMD 下降了 7 μm , 而蒸发率上升了 7.2%。主要是由于燃油喷射时间比较短暂, 油温难以在如此短暂的时间内作用于周围的气体, 影响气体的密度, 从而导致阻力和剪切力的变化, 因此贯穿度变化并不明显。并且由于燃油温度较高, 分子运动比较活跃, 分裂、破碎更加容易, 粒径减小。另外, 蒸发过程需要吸热变小, 蒸发率也相应提高。

6 定容室气体温度对喷雾特性的影响

表 7 分析工况

燃油压力 (bar)	气体压力 (bar)	燃油温度 (°C)	气体温度 (°C)	喷射脉宽 (ms)	涡流 (ω)	滚流 (ω)
100	1	20	20	1	/	/
			200			
			400			

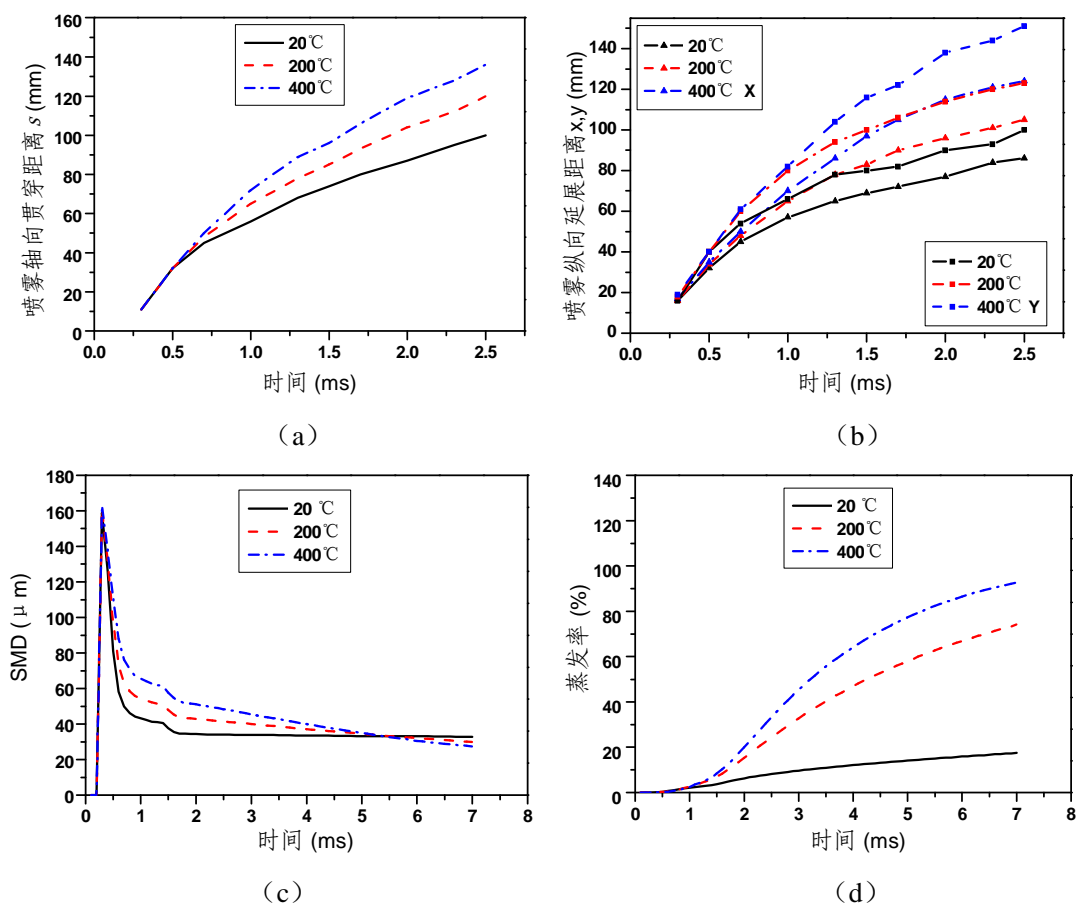


图 9 定容室气体温度对喷雾特性的影响

定容室气体温度对喷雾特性的影响如上图 9 所示,随着气体温度的提高,在相同的时间下喷雾的轴向贯穿距离和纵向延展距离均有十分明显的提高。主要是在较高的环境温度下,气体的黏度下降,阻力减小,贯穿距离有了明显的提高。在喷射初期,燃油粒子在高温下受到的剪切作用相对较弱,因此粒径较大。但是到了喷射的后期,粒子运动的速度变慢,这时燃油分子的运动受到环境温度影响加强,在一定程度上起主导作用,高温下的粒子分裂和破碎更快。另外,环境温度较高,喷雾发展过程中吸收的能量会增加,蒸发率也相应提高。

7 喷射脉宽对喷雾特性的影响

表 8 分析工况

燃油压力 (bar)	气体压力 (bar)	燃油温度 (°C)	气体温度 (°C)	喷射脉宽 (ms)	涡流 (ω)	滚流 (ω)
100	1	20	20	1	/	/
				1.5		
				2		

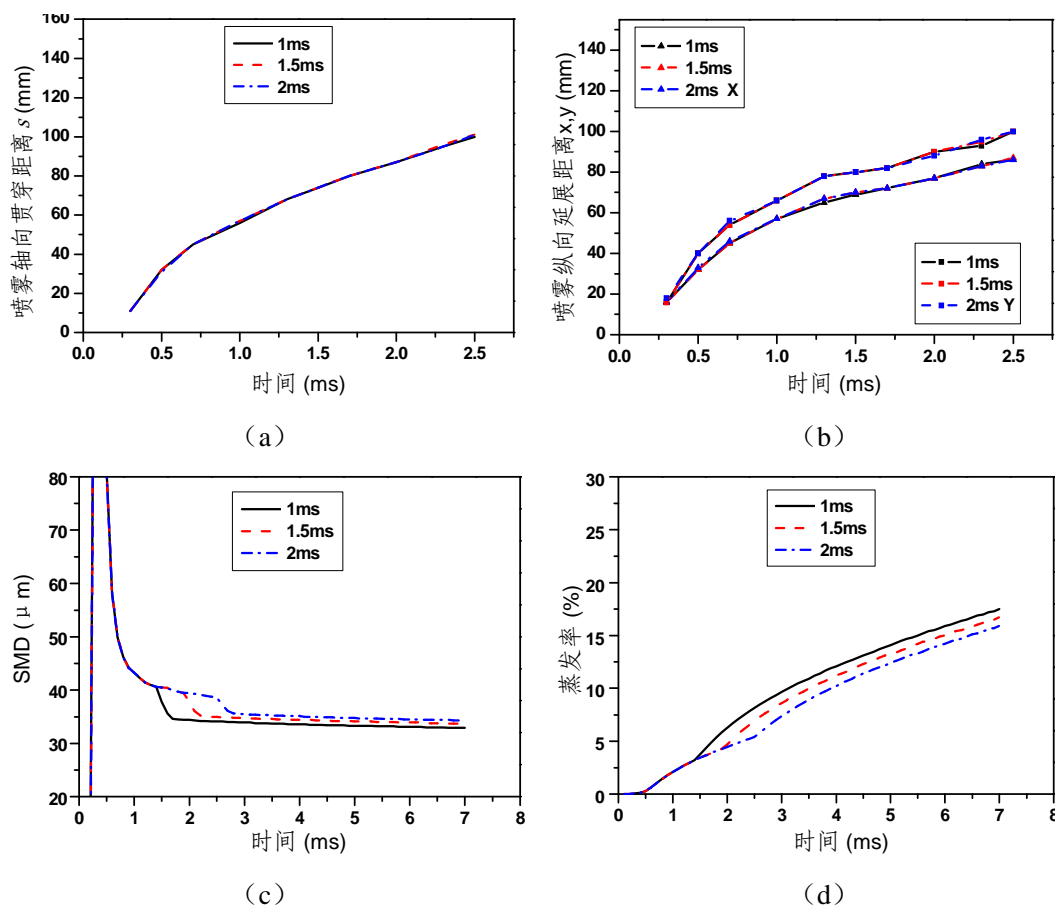


图 10 喷射脉宽对喷雾特性的影响

由上图 10 可知,燃油喷雾的喷射脉宽对于喷雾的轴向贯穿距离和纵向延展距离的影响很小。在喷射脉宽从 1ms 提高到 2ms 时,其各方向贯穿度几乎不变,而索特平均数 (SMD) 增加了 4.3%,蒸发率下降了 9.1%。主要原因是在喷射初始时,粒子的粒径比较大,蒸发率也比较低。因此当喷射时间延长之后,粒径平均下来就会比延长之前略大,而蒸发率相比就会有所降低。

8 滚流强度对喷雾特性的影响

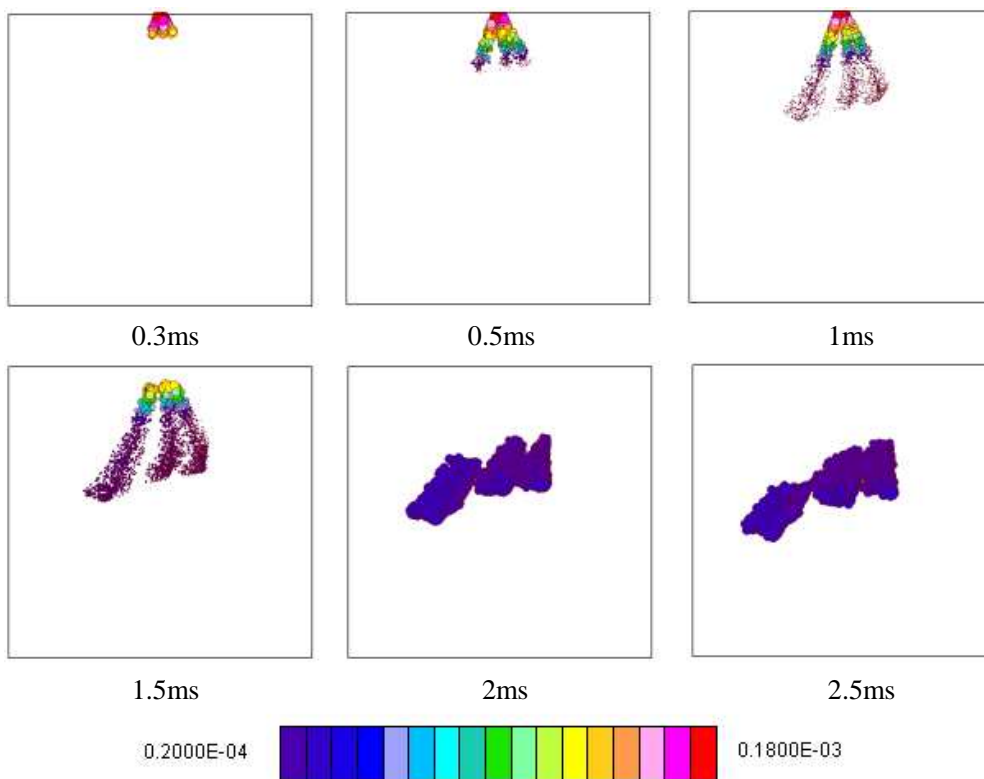
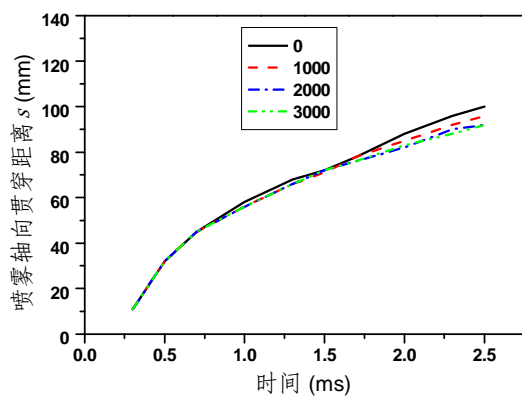


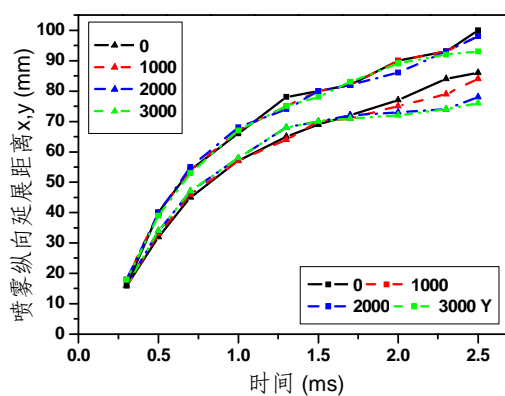
图 11 数值模拟得到的 0 度视角喷雾发展过程图 ($\omega=3000$)

表 10 分析工况

燃油压力 (bar)	气体压力 (bar)	燃油温度 ($^{\circ}\text{C}$)	气体温度 ($^{\circ}\text{C}$)	喷射脉宽 (ms)	涡流 (ω)	滚流 (ω)
100	1	20	20	1	/	0
						1000
						2000
						3000



(a)



(b)

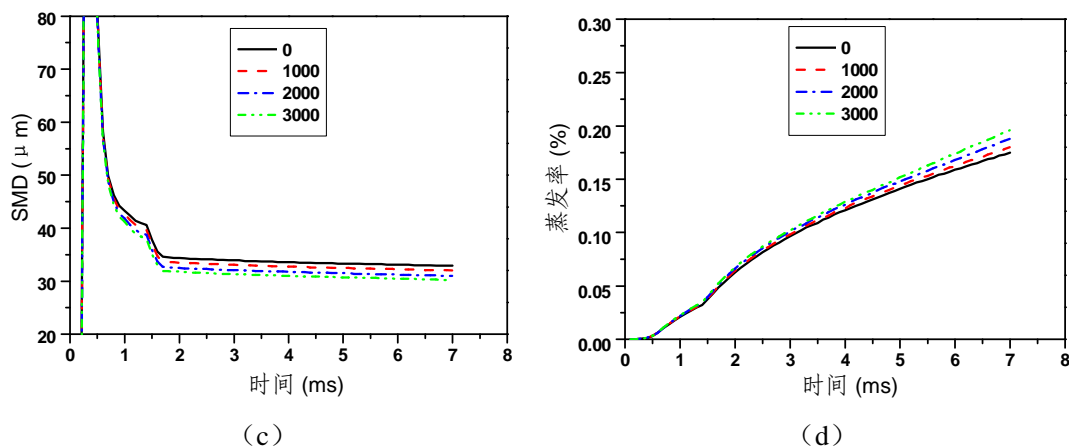


图 12 滚流强度对喷雾特性的影响

滚流强度对喷雾特性的影响如上图 12 所示。随着滚流强度的不断提高,在相同的时间下喷雾的轴向贯穿距离、纵向延展距离变化不大,索特平均数(SMD)略有下降,蒸发率有所提高。其中滚流强度为 3000 转时的粒径比没有滚流时降低了 8.2%,而蒸发率则提高了 12%。滚流强度对于发展后期的喷雾形状影响比较明显,如上图 15 所示,燃油粒子在离开喷嘴之后随着滚流发生垂直方向上的旋转运动。

10 结论

本章主要是对喷雾引导型缸内直喷汽油机的喷雾特性进行了研究。首先对高压油泵、高压油管、轨压传感器、燃油轨、喷油器的工作原理及其组成进行了探索。接着用三维数值模拟软件 STAR-CD 建立了三组网格模型,并且利用定容弹试验对于计算网格进行了标定。综合考虑了计算精度、计算时间与后处理难度等问题,挑选出了最优的网格模型。最终选择了细网格模型对于诸如燃油喷射压力、燃油温度、定容室气体压力、定容室气体温度、喷射脉宽、滚流强度等参数对喷雾特性的影响作了进一步详细的研究,为后面章节的发动机缸内计算打下了坚实的基础。

1) 考虑到汽油本身是一种多组份和构成极其复杂的物质,而且不同牌号、不同地区的油品亦存在着非常大的差别。因此本文按照 SAE 的标准,选择了正庚烷(n-Heptane)作为燃料对三组网格模型进行了网格依赖性的研究。认为由于差分方法的存在,网格尺寸对于计算结果有一定的影响。其中在喷雾的轴向贯穿距离、纵向延展距离等方面应用细网格和精细网格计算,其结果与定容弹试验更加接近,曲线有良好的拟合度;应用粗网格计算的结果比试验值平均小 5%左右。在对索特平均数(SMD)的比较当中,三者平均相差在 $1\mu\text{m}$,而不同的网格尺寸对于蒸发率的计算影响很小。

2) 燃油喷射压力对于喷雾特性有着十分显著的影响。随着喷射压力的提高,在相同的时间下喷雾的轴向贯穿距离和纵向延展距离均有十分明显的提高,而索特平均数显著下降,蒸发作用加强。

3) 定容室压力对于喷雾特性也有着明显的影响。随着喷射背压的提高,燃油喷雾的轴向贯穿距离、纵向延展距离和索特平均数均呈显著降低的趋势。其中在 2.5ms 时,10bar 比 1bar 背压下的轴向贯穿距离减小了 60mm,0 度与 90 度视角下的纵向延展距离也小了 57%和 59%,而 SMD 减小了 $16\mu\text{m}$ 。蒸发作用在背压为 4bar 左右最为强烈。

4)燃油喷雾的喷射脉宽对于喷雾的轴向贯穿距离和纵向延展距离的影响很小。在喷射脉宽从 1ms 提高到 2ms 时,其各方向贯穿度几乎不变,而索特平均数(SMD)增加了 4.3%,蒸发率下降了 9.1%。

5)滚流强度对于喷雾特性的影响并不明显,只是在蒸发作用上有所提高。但是流场强度对于发展后期的喷雾形状影响比较明显,燃油粒子在离开喷嘴之后会随着气流发生垂直方向上的旋转运动。

11 参考文献

- [1] 杨世春,李君,李德刚.缸内直喷汽油机技术发展趋势分析[J].车用发动机,2007,171(5):8-13.
- [2] 杨嘉林.车用汽油发动机燃烧系统的开发[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [3] 倪计民.汽车内燃机原理[M].上海:同济大学出版社,1996.
- [4] 周龙保,刘巽俊,高宗英.内燃机学[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [5] 解茂昭.内燃机计算燃烧学(第二版)[M].大连:大连理工大学出版社,2005.
- [6] Dr.Ing. Carsten Baumgarten. Mixture Formation in Internal Combustion Engines[M]. Berlin:Springer, 2006.
- [7] Mike Fry, Jason King, Carl White. A Comparison of Gasoline Direct Injection Systems and Discussion of Development Technique [C]. SAE Paper. 1999-01-0171.
- [8] F Zhao, M-C Lai, D. L Harrington. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines [J].Progress in Energy and Combustion Science. 1999, 437-450.