

GDI 发动机喷雾破碎模型参数敏感性分析研究

Sensitive Analysis and Research for Spray Breakup Model Parameters of GDI Engine

杨洋 张小矛 陈明 徐政 丁宁 陈曦 林长林 李相超

(上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海市汽车动力总成重点实验室, 上海 201804)

摘要: 喷雾破碎模型是影响喷雾 CFD 标定的重要因素。本文基于某款 GDI 发动机喷油器, 对 CONVERGE 中 KH-RT 破碎模型的关键参数进行敏感性分析研究, 并总结出影响喷雾形态、SMD 和喷雾贯穿距的规律, 为后续缸内油气混合计算和燃烧计算提供依据。

关键词: 喷雾模型; 敏感性分析; 喷雾标定; CONVERGE

Abstract: Spray breakup model is an important factor for spray CFD verification. This paper carries out a sensitive analysis and research for KH-RT spray model parameters in Converge based on a GDI engine, and get the regulation of effect on the spray shape, SMD and penetration which can provide a strong support for mixture and combustion simulation.

Key words: Spray model; Sensitive analysis; Spray calibration; CONVERGE

1 概述

近年来, CFD 仿真计算在发动机开发过程中得到了广泛而深入的应用, 已成为发动机开发不可或缺的工具。特别是对于 GDI 发动机的燃烧系统开发而言, 通过缸内流场、喷雾和油气混合仿真计算进行喷油器油束靶点方案的设计和优化是极为关键的技术之一。目前国内外各大汽车主机厂中应用较为广泛的缸内计算商用软件包括 CONVERGE、STAR-CD 和 AVL_FIRE 等, 但是这些商用软件中自带默认的喷雾破碎模型参数计算得到的结果往往与实际情况不符, 不能直接用于 GDI 发动机喷雾油束靶点方案的设计与优化工作中。因此, 喷雾破碎模型参数的标定就显得至关重要。通过喷雾破碎模型参数的标定, 可以使喷雾形态、喷雾贯穿距和喷雾粒径的 SMD 与喷雾定容弹试验的结果更为接近, 从而能比较真实的反应喷雾在缸内的状态, 为喷雾油束靶点方案的设计与优化提供理论保障, 同时也有利于提高后续燃烧计算和排放计算的准确性和可靠性^[1-3]。

GDI 发动机的喷雾是一个喷油压力发生变化的瞬态不稳定气液两相流动, 且涉及到燃油喷射、液滴破碎、蒸发、碰撞与聚合、气液两相相互作用、液滴与壁面相互作用及液滴的传热、传质等复杂的物理过程^[4], 本文仅研究喷雾破碎模型对整个喷雾过程的影响。大多数商业软件都提供了多种喷雾破碎子模型, 比如 CONVERGE 中就提供了 KH 模型、KH-ACT 模型、RT 模型、KH-RT 模型、Modified KH-RT 模型、LISA 模型和 TAB 模型^[5], 而对于多孔喷嘴, KH-RT 模型是目前公认的最适合 GDI 发动机的喷雾破碎模型。文献[1]和[3]对 KH-RT 破碎模型有详细的介绍, 这里不再赘述。本

文将利用 CONVERGE 中的 KH-RT 破碎模型进行某款 GDI 发动机喷油器的喷雾标定,对模型中的关键参数进行敏感性分析,找出不同参数变化对喷雾结果的影响,并总结规律,从而为 GDI 发动机燃烧系统的高效开发奠定一定的基础。

2 模型建立及边界条件设置

首先建立一个足够大的喷雾定容弹计算域,并避免喷雾油束直接喷射到壁面上,本文建立的是一个直径为 160mm,高度为 150mm 的圆柱体作为计算域。采用的网格控制策略是基础网格为 1mm,与缸内计算的策略一致;为保证计算网格的一致性,本文并未采用自适应网格加密 AMR,而是对喷嘴处的区域和各个油束进行了不同程度的 Fixed embedding 网格加密。所标定的喷油器为侧置式,喷孔数量为 6 孔,喷孔直径均为 0.143mm。喷雾定容弹的 CAD 模型如图 1 所示。

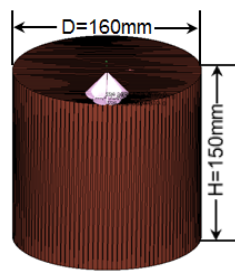


图 1 喷雾定容弹 CAD 模型

其次,保证喷油规律和各个物理边界条件与定容弹喷雾试验保持一致。本文中的喷油速率曲线按照试验的实际曲线设置,拟合为类似梯形波的曲线。喷射燃料为正庚烷 n-heptane,燃料温度为 20℃,燃料喷射压力为 35MPa,定容弹内温度为 20℃,背压为 1 个大气压,喷射脉宽为 2ms。喷雾物理模型的设置为:油滴在油束喷雾锥的空间分布为中心集中分布(Cluster Parcels Near Cone Center);湍流扩散模型为 O'Rourke 模型;蒸发模型采用 Frossling Model;液滴间的碰撞模型采用 NTC Collision;破碎模型为 KH-RT 模型。以下将对 KH-RT 破碎模型的关键参数进行敏感性分析研究。

3 计算结果及分析

KH-RT 破碎模型中的控制参数包括 KH 模型中的 Model size constant (KH-MSc)、Model velocity constant (KH-MVC)、Model breakup time constant (KH-MBTC) 和 RT 模型中的 Model breakup time constant (RT-MBTC)、Model size constant (RT-MSc)、Model breakup length constant (RT-MBLC) 六个参数,由于 KH-MSc 和 KH-MVC 两个参数有推荐值,分别为 0.61 和 0.188,因此这里不再展开研究,本文仅对其他四个参数进行敏感性分析,且通过喷雾破碎的粒子数、SMD、喷雾贯穿距和喷雾型态四个方面对参数的变化进行对比分析。具体的参数设置如表 1 所示。

表 1KH-RT 破碎模型参数列表

KH 模型			RT 模型		
MSc	MVC	MBTC	MBTC	MSc	MBLC
0.61	0.188	5/7/10/20/30/60/100	0.1/0.4/0.7/1.0	0.1/0.2/0.4/0.7/0.9/1.0	0/5/10/30/50

3.1 KH 模型 Model breakup time constant 敏感性分析

该参数是 KH 模型中表征破碎特征时间的系数，软件中默认设置为 7，推荐的范围为 5~100，理论上该值越小，破碎时间越少，破碎速度越快，得到的 SMD 越小，贯穿距也越小。然而实际计算结果与理论有所偏差，图 2 为不同 KH-MBTC 参数设置下不同时刻的喷雾形态图，图 3 为不同 KH-MBTC 参数设置下 2.0ms 时刻喷雾的粒子数、SMD 和贯穿距。由图可知，随着 MBTC 的增大，喷雾的 SMD 和贯穿距并没有明显的增加，2.0ms 时刻的 SMD 几乎相同，贯穿距均在 85mm 左右；但是油束的形态明显由粗变细，粒子数也从 55 万左右逐渐降至 11 万左右并稳定。说明该参数对喷雾的 SMD 和贯穿距不敏感，但在一定范围内（5~20）对喷雾的破碎粒子数极为敏感。该结果与文献[3]基本一致，究其原因 KH 模型与 RT 模型之间的参数会相互影响，文献[3]的结果表明不开 RT 模型后得到的结果与理论相符，因此进行参数的敏感性分析时应综合考虑不同模型之间参数的影响。

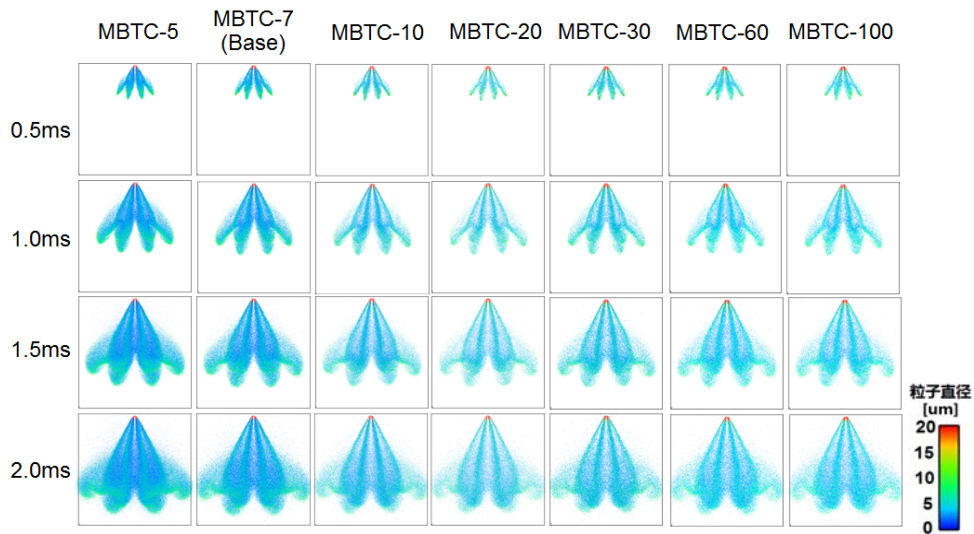


图 2 不同 KH-MBTC 参数设置下的喷雾形态图

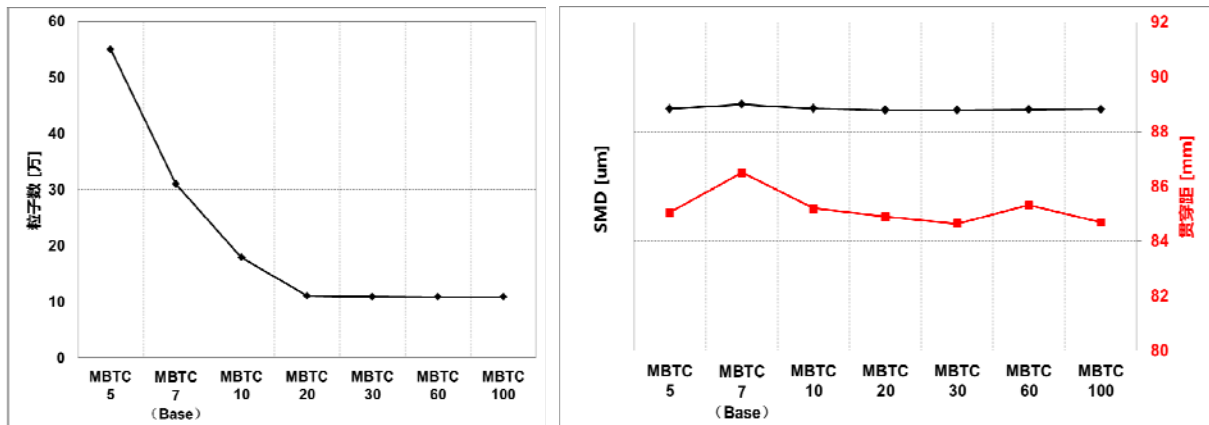


图 3 不同 KH-MBTC 参数设置下 2.0ms 时刻喷雾的粒子数、SMD 和贯穿距

3.2 RT 模型 Model breakup time constant 敏感性分析

该参数是 RT 模型中表征破碎特征时间的系数，软件中默认设置为 1，推荐的范围为 0.1~1，该值越大，RT 控制破碎越慢，该值越小，RT 控制破碎越快。图 4 为不同 RT-MBTC 参数设置下不同时刻

刻的喷雾型态图，图 5 为不同 RT-MBTC 参数设置下 2.0ms 时刻喷雾的粒子数、SMD 和贯穿距。图中显示，随着 MBTC 的增大，喷雾的 SMD 没有明显的变化，在 2.0ms 时刻几乎相同；但喷雾破碎的粒子数逐渐增多，油束的形态明显由细变粗；喷雾贯穿距逐渐减小。说明该参数对喷雾的 SMD 不敏感，但对喷雾的破碎粒子数和喷雾贯穿距较为敏感。

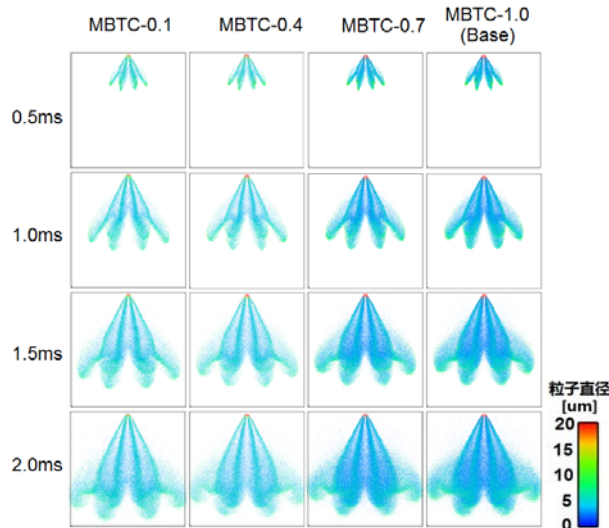


图 4 不同 RT-MBTC 参数设置下的喷雾形态图

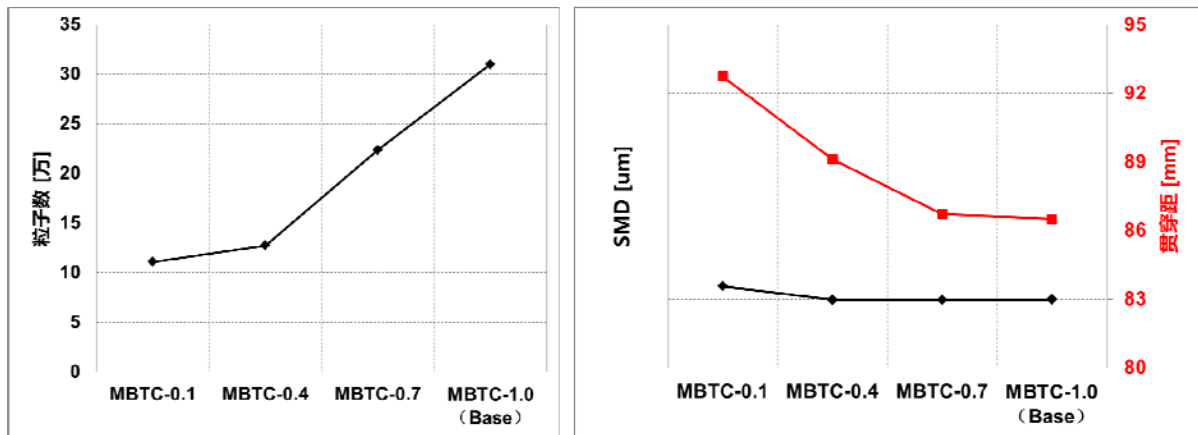


图 5 不同 RT-MBTC 参数设置下 2.0ms 时刻喷雾的粒子数、SMD 和贯穿距

3.3 RT 模型 Model size constant 敏感性分析

该参数是 RT 模型中表征尺寸的系数，软件中默认设置为 0.1，推荐的范围为 0.1~1，理论上该值越大，喷雾破碎后液滴的直径越大，该值越小，喷雾破碎后液滴的直径越小。图 6 为不同 RT-MSC 参数设置下不同时刻的喷雾型态图，图 7 为不同 RT-MSC 参数设置下 2.0ms 时刻喷雾的粒子数、SMD 和贯穿距。由图可知，随着 MSC 的增大，喷雾破碎的粒子数明显逐渐增加，由参数设置为最小（0.1）时 3.5 万增加到参数设置为最大（1.0）时的 135 万，油束的形态也明显由细变粗；喷雾的 SMD 在一定范围内逐渐增加，参数设置在 0.1~0.7 范围内时，2.0ms 时刻的 SMD 急速增大，当该参数大于 0.7 后，2.0ms 时刻的喷雾的 SMD 逐渐稳定，这与理论基本一致；喷雾的贯穿距在参数范围 0.4~1.0 内的趋势与 SMD 的趋势基本一致，总体来说维持在 86mm~92mm 之间。不同的是在参数范围 0.1~0.4

内，喷雾贯穿距随该参数的增大而逐渐减小，但是值得注意的是图 6 中的红框部分：当 RT-MSC 设置较小时（0.1 和 0.2），喷雾的粒子分布相当稀疏，粒子数也很少，这已经不能正确表征真实的喷雾形态，因此建议该值不能设置得太小。以上分析表明该参数对喷雾的破碎粒子数、喷雾形态和 SMD 极为敏感，对喷雾的贯穿距较为敏感。

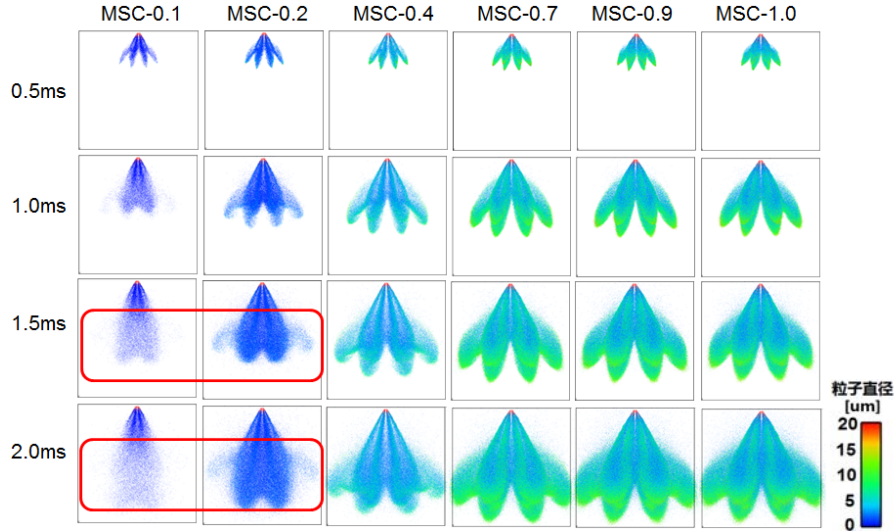


图 6 不同 RT-MSC 参数设置下的喷雾形态图

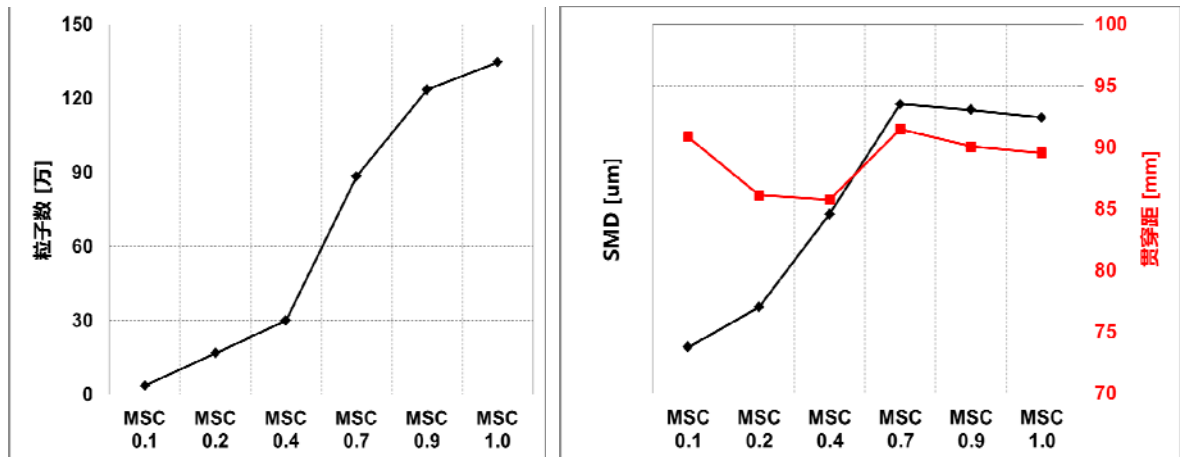


图 7 不同 RT-MSC 参数设置下 2.0ms 时刻喷雾的粒子数、SMD 和贯穿距

3.4 RT 模型 Model breakup length constant 敏感性分析

该参数是 RT 模型中表征破碎长度的系数，软件中默认设置为 0，推荐的范围为 0~50，理论上该值越小二次破碎的液柱越短，破碎进行得越早，得到的 SMD 越小，对应的贯穿距也越小。图 8 为不同 RT-MBLC 参数设置下不同时刻的喷雾型态图，图 9 为不同 RT-MBLC 参数设置下 2.0ms 时刻喷雾的粒子数、SMD 和贯穿距。图中显示，随着 MBLC 的增大，参数取值 0~10 内，喷雾破碎的粒子数增加明显，油束的形态也明显由细变粗，当参数取值大于 10 之后，喷雾破碎的粒子数稳定在 150 万左右，喷雾的形态也十分接近；SMD 和喷雾贯穿距的变化趋势基本一致，均是先增大后保持稳定，这与理论基本一致。以上分析表明该参数在一定范围内对喷雾的破碎粒子数、喷雾形态和 SMD 极为敏感，对喷雾的贯穿距较为敏感。

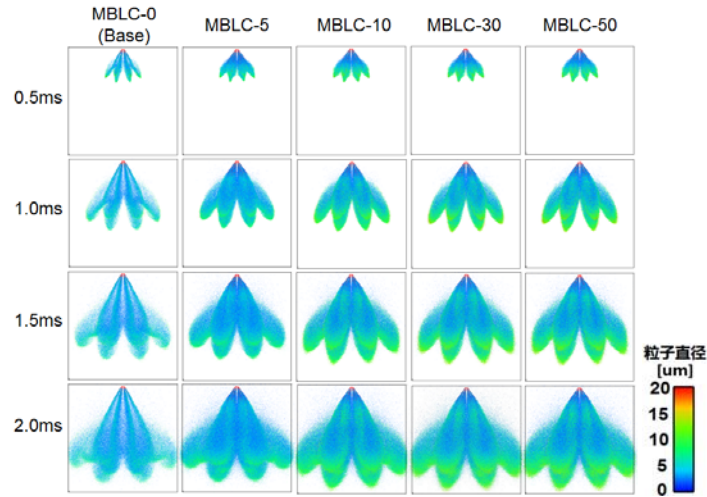


图 8 不同 RT-MBLC 参数设置下的喷雾形态图

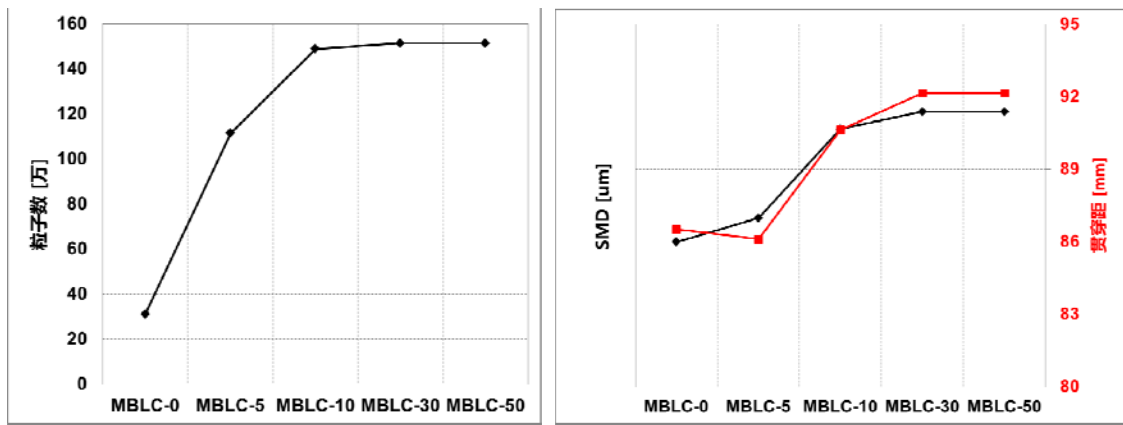


图 9 不同 RT-MBLC 参数设置下 2.0ms 时刻喷雾的粒子数、SMD 和贯穿距

3.5 精确标定结果分析

除了以上参数之外，流量系数和喷雾锥角对喷雾形态、SMD 和喷雾贯穿距都有较大的影响，文献[3]有相关结论，本文不再赘述。基于以上参数敏感性分析结论，任何一款 GDI 喷油器均能找到一组合适的破碎模型参数来与实测结果相吻合。图 10 和图 11 是 CFD 和实测的喷雾形态和贯穿距对比图，由图表明，不论是喷雾形态还是喷雾贯穿距，CFD 喷雾标定的结果与实验结果十分吻合，且喷嘴下 50mm 平面处的 SMD 值也十分吻合。基于高度吻合的 CFD 标定结果，可用于后续的缸内油气混合计算和燃烧计算。

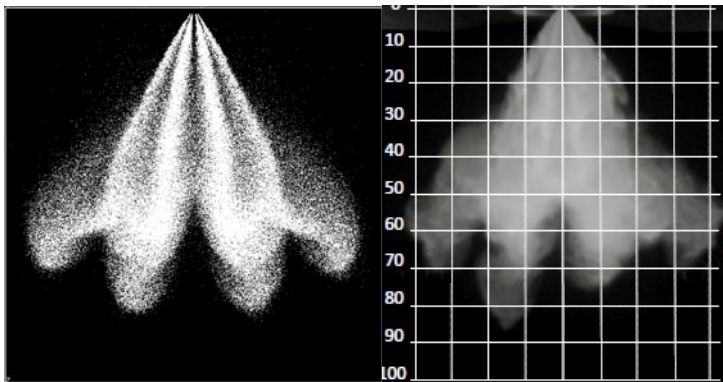


图 10 1.5ms 时刻 CFD 和实测喷雾形态图

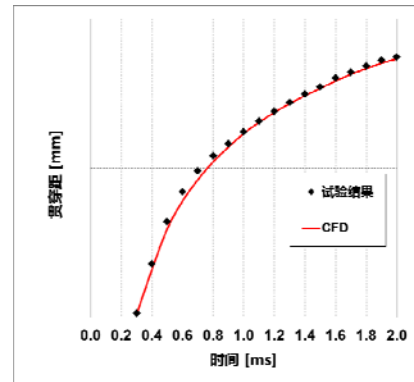


图 11 CFD 和实测贯穿距对比

4 结论

(1) KH 模型的 Model breakup time constant 参数对喷雾的 SMD 和贯穿距不敏感,但在一定范围内(5~20)对喷雾的破碎粒子数极为敏感。

(2) RT 模型的 Model breakup time constant 参数对喷雾的 SMD 不敏感,但对喷雾的破碎粒子数和喷雾贯穿距较为敏感。

(3) RT 模型的 Model size constant 参数对喷雾的破碎粒子数、喷雾形态和 SMD 极为敏感,对喷雾的贯穿距较为敏感。

(4) RT 模型的 Model breakup length constant 参数在一定范围内对喷雾的破碎粒子数、喷雾形态和 SMD 极为敏感,对喷雾的贯穿距较为敏感。

5 参考文献

- [1] 耿超, 张玉银, 徐斌 等. 如何提高发动机喷雾数值模拟的准确性与效率. IDAJ-China 中国用户论文集, 2013.
- [2] 郑建军, 陈小东, 沈惠贤 等. 基于 Converge 进行某增压直喷发动机喷雾模型标定. IDAJ-China 中国用户论文集, 2014, 310-317.
- [3] 李春芳, 张德胜. 喷雾模型参数对喷雾仿真结果影响分析. IDAJ-China 中国用户论文集, 2016.
- [4] 解茂昭. 《内燃机计算燃烧学》. 大连理工大学出版社, 2005.
- [5] CONVERGE Theory Manual v2.3.