

基于 STAR-CD 的喷油器内部流动模拟计算

Simulation on Internal Flow of Injector by STAR-CD

钟博 杨海涛 傅立运 郭立新

(无锡油泵油嘴研究所)

摘要: 为详细了解喷油内部湍流和空化现象, 利用 STAR-CD 建立了基于针阀运动的喷油器内部流动计算模型。利用此模型分析了不同喷油压力和喷油背压对喷油器内部流动特性的影响规律。结果表明, 喷油器内空化现象主要形成于针阀开启过程, 而针阀在最大位置时空化现象基本保持稳定; 随着喷油压力的增大, 喷油器内空化区域和气相质量增大, 喷油器流量系数减小, 湍动能增大; 随着喷油背压的增大, 喷油器内空化区域和气相质量减小, 喷油器流量系数增大, 湍动能减小。

关键词: STAR-CD; 空化; 数值模拟; 喷油器

Abstract: In order to learn the turbulence and cavitations in injector, a simulation model which based on the movement of needle valve was established by using STAR-CD. The effects of the injection pressure and the injection back pressure on the flow characteristic in injector were investigate, the result indicate that the cavitations forming in the needle valve opening process, and keep stable during the needle valve at the maximum lift. With the injection pressure increase, the cavitations and the turbulence kinetic energy increased, the flow coefficient decreased; With the injection back pressure increase, the cavitations and the turbulence kinetic energy decreased, the flow coefficient increased.

Key words: STAR-CD; Cavitations; Simulation; Injector

内燃机的喷雾涉及到湍流、多相流动等流动形式, 在喷雾过程中喷油器起着将高压燃油喷入缸内的作用, 同时喷油器内燃油的流动对燃油的破碎、燃气混合有重要影响, 最终影响到内燃机的燃烧过程。因此对喷油器内燃油流动, 特别是湍流和空化现象的研究一直是研究热点。

由于喷油器尺寸较小, 对喷油器内流动的可视化实验研究较难实现, 因此本文通过三维模拟技术对喷油器内部流动进行计算。在计算过程中加入相应的空穴和湍流模型。通过对喷油器内流场和空化现象的计算, 表明所建模型可以很好的分析喷油压力和喷油背压对喷油器内流动的影响规律, 为详细了解油嘴内部流动、喷油器结构优化和研究喷雾过程的影响机理提供参考。

1 计算模型

1.1 计算网格

本文所使用模型为 8 孔轴对称喷油器, 为节省计算时间, 取喷油器的 1/8 作为计算模型。计算网格采用 ICEM CFD 软件划分, 图 1 所示为针阀在最大升程位置时的网格图。针阀在最小升程时网格数为 77635; 针阀在最大升程位置时网格数为 127985。

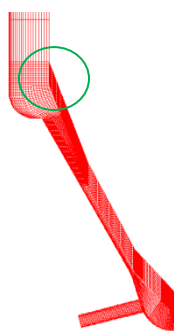


图 1 计算网格图

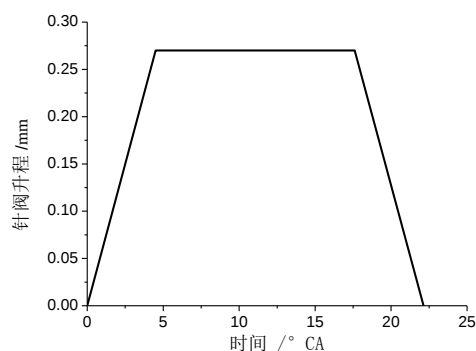


图 2 针阀升程曲线

1.2 边界条件

计算过程中定义油嘴进出口为压力边界。针阀运动通过自定义子程序实现，子程序是基于网格的增减和点移动原理编写。针阀升程曲线如图 2 所示，针阀最大升程为 0.27mm；记针阀开始开启时刻为 0 °CA，在 4.5 °CA 时针阀达到最大升程，在 17.5 °CA 时针阀开始关闭，在 22 °CA 针阀完全关闭。针阀运动过程网格图如图 3 所示，由于油嘴网格较密，为能够清晰的展示针阀运动过程网格的变化，图 3 列出了图 1 圈选部分网格随时间的变化图。计算过程中选用 C12H26 作为替代燃料；计算中湍流模型为 k-Epsilon / High Reynolds Number；空化模型为 Rayleigh 模型^[1]。

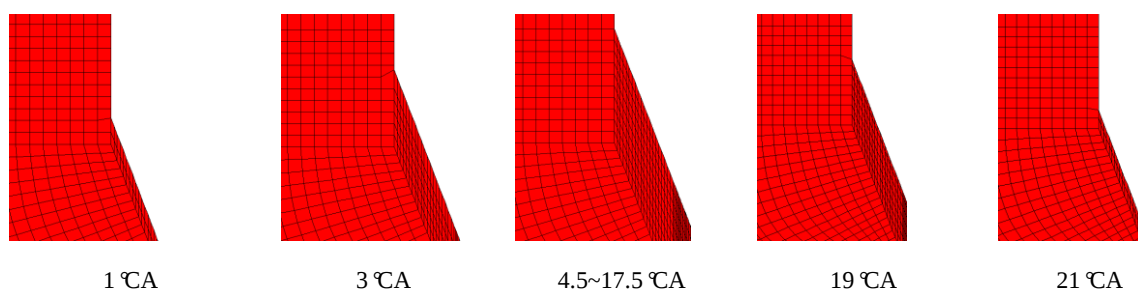


图 3 针阀运动过程网格图

2 计算结果分析

2.1 喷油器工作过程中内部流动的变化

为详细了解喷油器在工作过程中内部流动的变化，文中对进口压力为 150MPa、出口压力为 5MPa 时喷油器内部流动进行计算，主要对喷油器的出口质量流量和喷孔内空化现象随时间的变化进行分析。

2.1.1 喷油规律的变化

计算所得喷油速率变化曲线如图 4 所示，在针阀开启过程中，随着针阀升程的不断增大喷油器

出口流量迅速增大,在针阀升程达到最大升程的一半(2.25 °CA)时质量流量基本达到稳定值;针阀保持在最大升程位置(4.5~17.5 °CA)时,喷油器出口质量流量保持稳定;在 17.5~20 °CA,随着针阀升程的减小,使燃油流通面积减小,同时燃油流速变大,因而喷油器出口的质量流量没有降低;在 20 °CA 后,随着针阀升程的进一步减小,燃油流动阻力增大,喷孔内压力明显降低使喷油器质量流量逐渐降低。

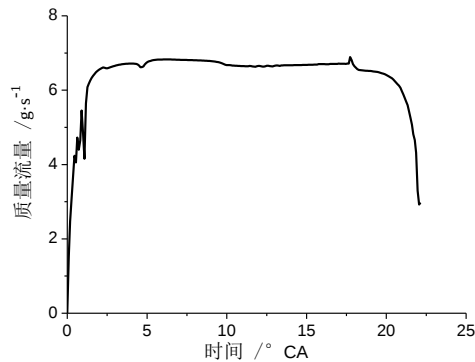


图 4 喷油器出口质量流量曲线

2.1.2 空化区域的变化

图 5 为不同时刻过喷孔轴线的垂直截面内空化气相浓度图。由图 5 可得到,在喷油器工作过程,空化现象最先出现在喷孔上拐角处,然后随着针阀升程的增大,燃油速度不断增大,在喷孔入口拐角处压力降低,空化区域也相应增大,即喷孔内空化现象主要形成于针阀开启阶段。在 4.5 °CA~17.5 °CA 时即针阀保持在最大升程位置不变,喷孔内空化区域基本稳定;在针阀关闭阶段,随着针阀升程的减小喷孔内压力迅速降低,空化区域又明显增大。

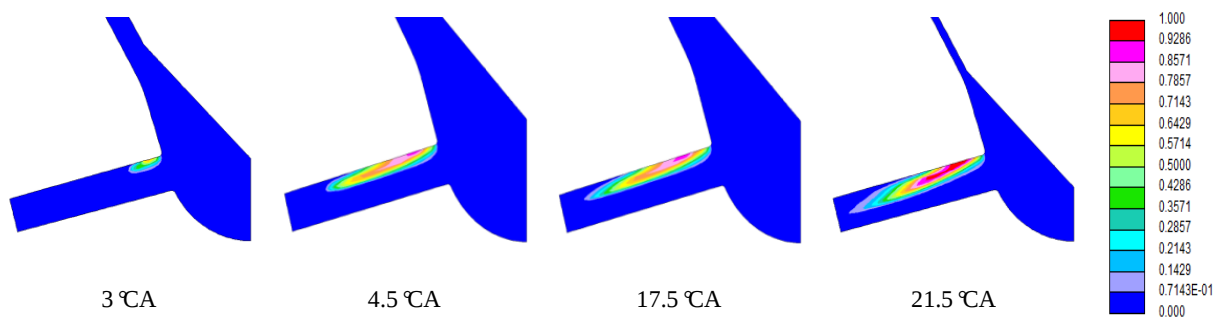


图 5 油嘴内部空化气相浓度分布图

2.2 喷油压力对油嘴内部流动的影响

为有效比较喷油压力对油嘴内部流动的影响,在计算中进口压力设置为恒压,即进口压力依次保持为 30MPa、100MPa、150MPa、180MPa、200MPa,无压力波动,同时保持喷油背压为 5MPa 不变。对不同进口压力下的空化、流量系数和湍动能进行比较。

2.2.1 喷油压力对空化的影响

文中以气相燃油的分布区域和质量的变化来评价空化的强度。图 6 为不同压力下过喷孔轴线的垂直截面内不同时刻的气相质量分数分布图。由于篇幅有限图 6 中只列出了喷油压力为 30MPa 和 200MPa 时的气相分布图。喷油压力为 150MPa 时的气相分布图见图 5。喷油压力为 30MPa 时, 由于喷油器进出口间压差小, 燃油流速较低, 不易产生空化现象, 因此喷油器内气相燃油的分布区域很小。在喷油压力为 150MPa 时, 喷孔内产生明显的空化现象; 随着喷油压力的大, 喷孔内空化区域增大, 如图 5 所示, 当喷油压力增大至 200MPa 时, 截面内发生空化的区域增大, 明显大于喷油压力为 150MPa 时。

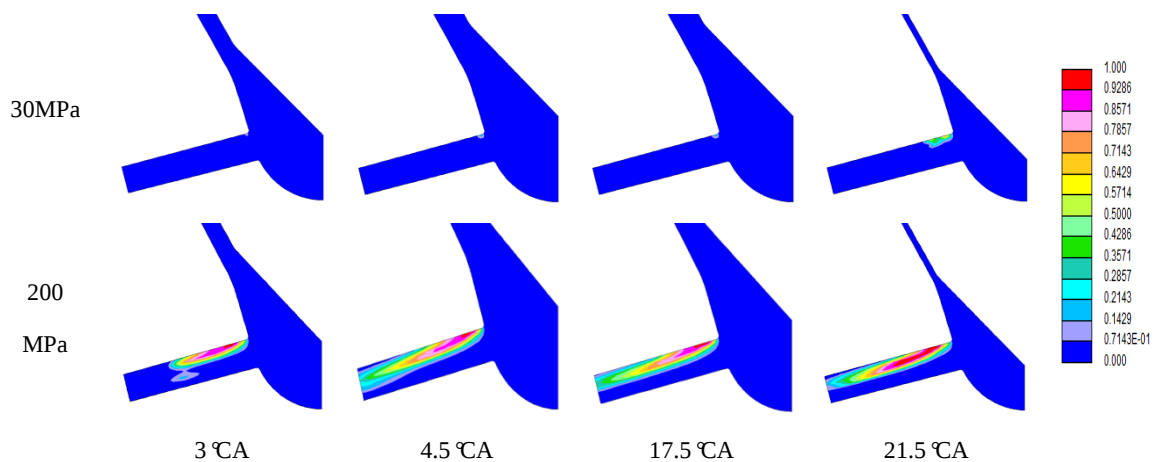


图 6 油嘴内部空化气相浓度分布图

图 7 所示为不同喷油压力下, 喷油器内气相质量随时间的变化曲线。图中 P_{in} 表示喷油压力。由图可知, 喷油压力为 30MPa 时, 喷油器内气相质量几乎为 0, 说明在喷油过程没有明显的空化现象产生, 这与图 6 所显示的规律基本一致。随着喷油压力的增大, 喷油器内气相质量也随之增大, 在喷油压力为 200MPa 时, 气相质量最大。同时由气相质量的变化曲线可知, 喷油器内气相的质量增加主要发生在针阀开启过程, 针阀处于最大位置时喷油器内气相质量基本稳定, 即喷油器内空化现象主要在针阀开启过程形成, 因此要对喷油器内空化现象进行研究, 就有必要对针阀开启过程进行分析。

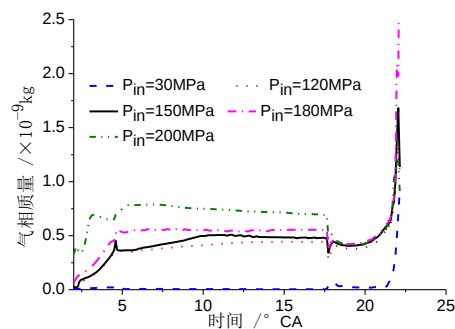


图 7 油嘴内气相质量变化曲线

2.2.2 喷油压力对油嘴喷油规律及流量系数的影响

图 8 为不同喷油压力下喷油器流量曲线。由图 8 可知，喷油压力由 30MPa 增大至 180MPa 时，喷油器出口质量流量随喷油压力的增大而增大，这主要是因为随着喷油压力的增大，进出口间压差增大，使燃油流速变高因而引起喷油器出口流量增大；但喷油压力为 200MPa 时，由于较强的空化现象产生，虽然燃油流速有所增高，但空化现象使喷孔内介质密度低，因而此时的喷油器出口流量较喷油压力为 180MPa 时的质量流量没有明显的增加。

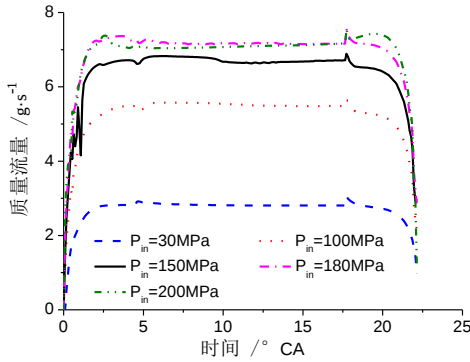


图 8 油嘴流量曲线

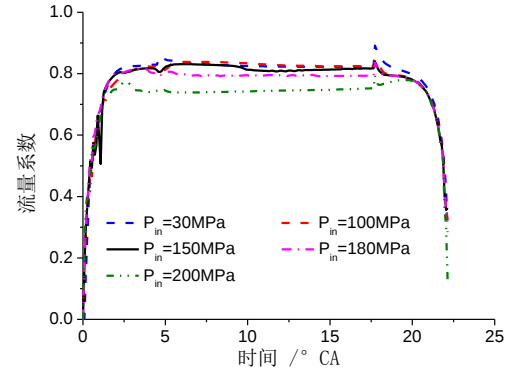


图 9 流量系数曲线

对于油嘴，流量系数的定义为实际流量与理论流量之比。文中流量系数的计算公式为：

$$C_F = \frac{Q}{AV_0\rho}$$

其中 Q 为计算所得质量流量 (kg/s)，面积 $A = \frac{\pi}{4} D^2$ (m^2)，理论速度 $V_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta P}{\rho}}$ (m/s)。

图 9 为不同喷油压力下油嘴喷油过程流量系数变化曲线。由图 9 可知，随着喷油压力的增大喷油器流量系数逐渐降低，尤其在喷油压力为 180MPa 和 200MPa 时，流量系数有明显的降低，这主要是因为高喷油压力下，喷孔内空化强度较大，导致了喷油器流量系数的降低。

2.2.3 喷油压力对湍动能的影响

喷孔内的湍流对喷雾过程有重要影响，特别是在喷孔出口截面上的湍动能的大小影响着液滴的初次破碎。喷油器内湍动能主要产生于燃油与壁面、液相与气相燃油间的作用^[2]。因此湍动能的大小主要与燃油速度和气相分布有关。

文中主要分析了不同喷油压力下喷孔出口截面内湍动能的分布情况。图 10 为不同喷油压力下喷孔出口截面湍动能分布图，由图 10 所示可知，在同一喷油压力下随着针阀的开启，喷孔内开始出现空化现象同时燃油速度不断增大，因而使湍动能增大；随后针阀保持在最大升程位置时，喷孔内空

化现象和燃油流速基本稳定，这一过程湍动能的分布和大小也基本稳定；在针阀关闭过程，由于燃油速度的降低使湍动能减小。

不同时刻下，比较不同喷油压力的喷孔出口截面的湍动能大小，发现随着喷油压力的增大，燃油速度和空化现象的增大，使喷孔出口截面的湍动能增大。图 10 所示，喷油压力为 200MPa 时喷孔出口截面的湍动能最大值约为喷油压力为 30MPa 时的 10 倍。

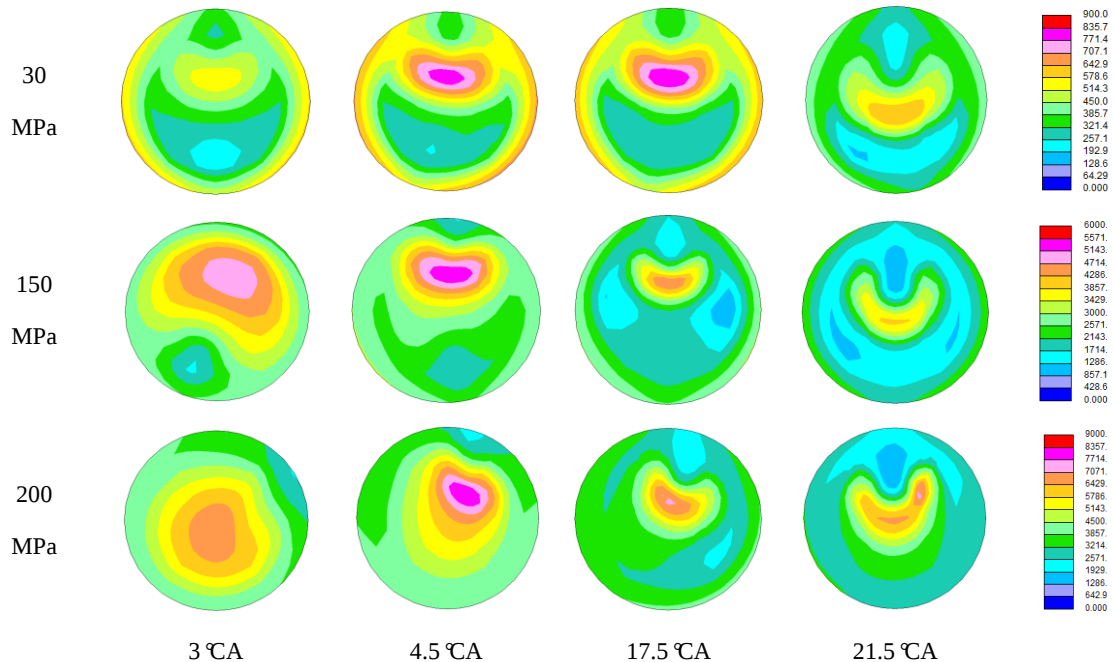


图 10 喷孔出口截面湍动能分布图

2.3 喷油背压对油嘴内部流动的影响

在进口压力为 150MPa 下，保持计算模型的其它参数不变，只改变出口压力。依次设置出口压力为 1MPa、3MPa、5MPa、8MPa、10MPa，计算各工况下的油嘴内流动。并对不同喷油背压下喷油器的空化、流量系数和湍流的变化进行分析。

2.3.1 喷油背压对空化的影响

图 11 为不同喷油背压下过喷孔轴线的垂直截面内不同时刻的气相质量分数分布图。文中给出了喷油背压分别为 1MPa、5MPa 和 10MPa 时的气相分布图。喷油背压为 1MPa 时，由于喷油器进出口间压差大，燃油流速高，因而易产生空化现象，喷油器内空化气相质量分数和分布区域大。随着喷油背压的增大，截面内空化区域和质量分数逐渐减小。如图 11 所示在喷油背压为 10MPa 时，截面内气相分布区域和质量分数明显减小。

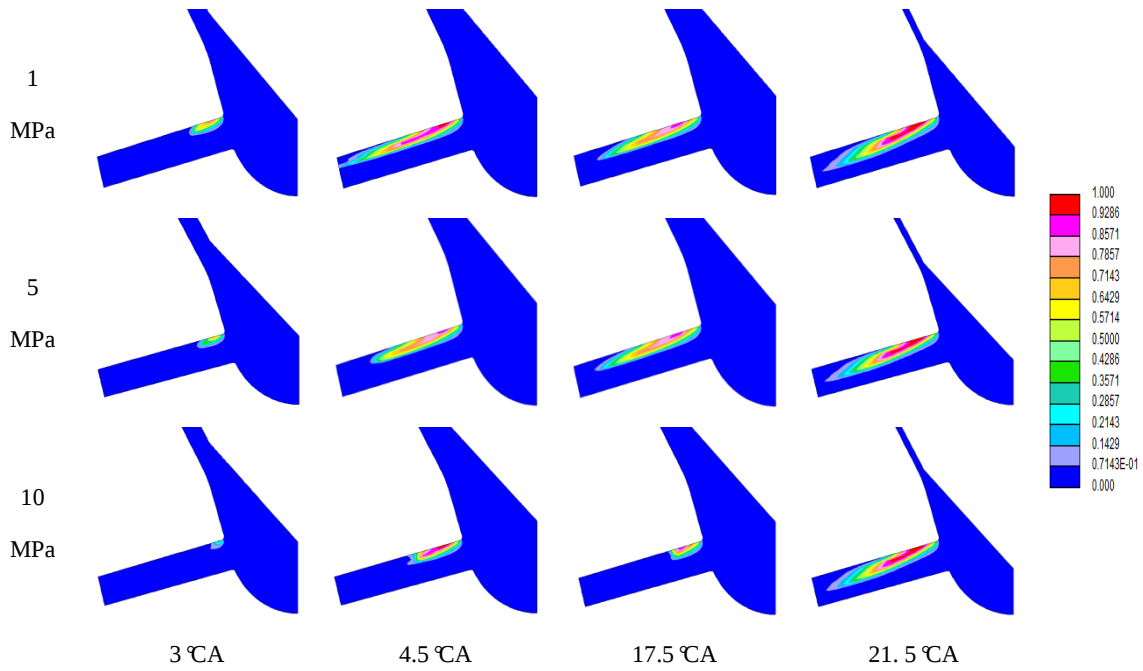


图 11 油嘴内部空化气相浓度分布图

图 12 所示为不同喷油背压下，喷油器内气相质量随时间的变化曲线。图中 P_{out} 表示喷油背压。由图可知，喷油背压为 1MPa 时，喷油器内气相质量最高，说明此时喷孔内空化现象强度最大，这与图 11 所显示的规律基本一致。随着喷油背压的增大，喷油器内气相质量随之减小，在喷油背压力为 10MPa 时，气相质量最小。

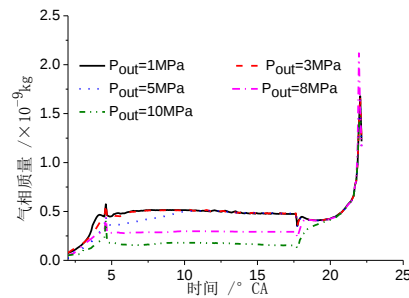


图 12 油嘴内气相质量变化曲线

2.3.2 喷油背压对喷油规律及流量系数的影响

图 13 为不同喷油背压下喷油器流量曲线，由图可知喷油背压在 1~10Mpa 范围内变化，由于变化范围较小对喷油器的流量影响不够明显，同时不同喷油背压下的一致。图 14 所示为不同喷油背压下流量系数变化曲线，图中喷油背压为 1MPa 时流量系数最低，喷油背压为 10MPa 时流量最大，即随着喷油背压的增大，喷油器流量系数增大。这主要是因为低喷油背压下喷油器内空化气相体积和质量大，因而使其流量系数降低。

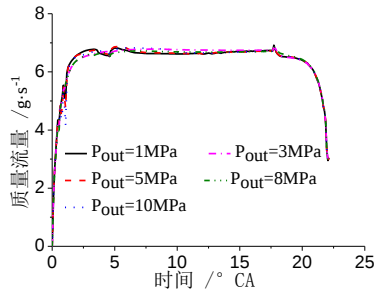


图 13 油嘴流量曲线

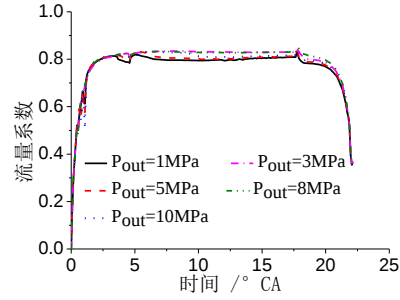


图 14 流量系数曲线

2.3.3 喷油背压对湍动能的影响

图 15 为不同喷油压力下喷孔出口截面湍动能分布图。在不同时刻, 比较不同喷油背压下喷孔出口截面的湍动能大小, 表明随着喷油背压的增大, 燃油速度和空化现象的减小, 使湍动随之降低。图 15 所示, 不同喷油背压下喷孔出口截面的湍动能的分布基本一致, 但随着喷油背压由 1MPa 增至 10MPa 时, 湍动能在数值上逐渐较小。

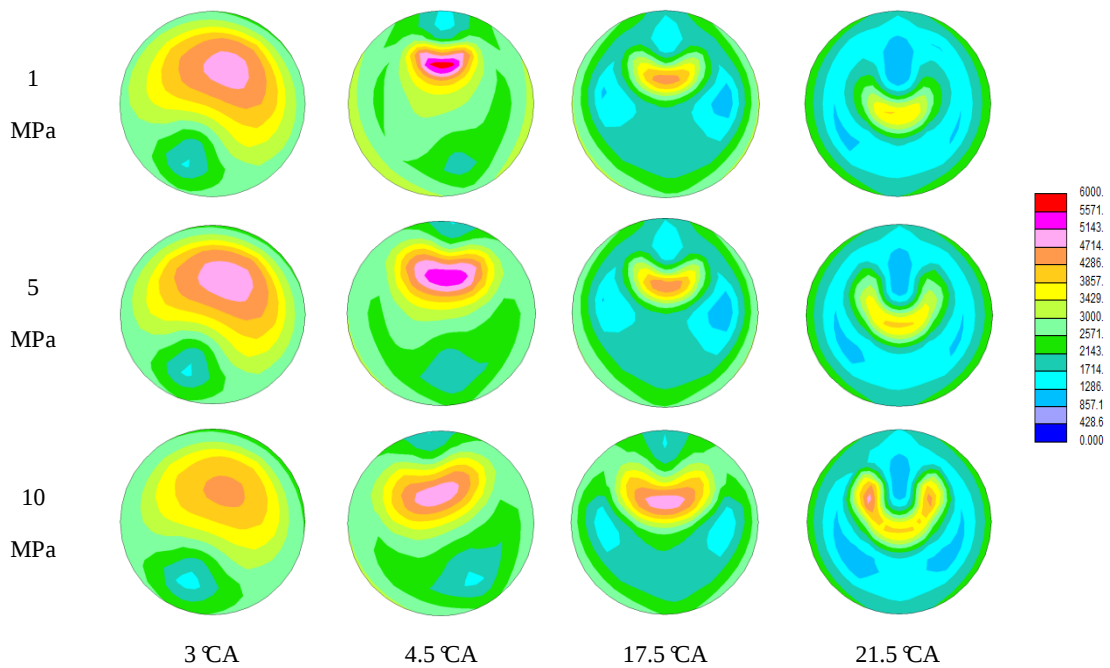


图 15 喷孔出口截面湍动能分布图

3 结论

- 1) 建立了基于针阀运动的喷油器瞬态计算模型, 并可以较好对喷油器内空化现象进行计算。
- 2) 喷油器内空化现象形成于针阀开启过程, 并在针阀位于最大位置时基本保持稳定。
- 3) 随着喷油压力的增大, 喷油器内空化气相质量和分布区域增大, 同时喷油孔出口截面的湍动增大; 而喷油器流量系数随着喷油压力的增大而减小。

4) 随着喷油背压的增大, 喷油器内空化气相质量和分布区域减小, 同时喷油孔出口截面的湍动降低; 而喷油器流量系数随着喷油背压的增大而增大。

4 参考文献

[1] STAR-CD Methodology, CD-adapco, 2011

[2] 李云青, 成传松, 赵立峰, 高压共轨喷嘴内部空化过程的两相流数值模拟[J], 农机化研究, 2010,1