

文章编号: 1000-8055(2009)08-1843-06

外涵引气双层壁喷油杆冷却特性数值模拟

李瑞明, 闫宝华, 樊未军, 杨茂林
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过数值模拟对新型加力用外涵引气双层壁喷油杆冷却性能进行了研究. 该喷油杆为双层壁结构, 从外涵引气冷却喷油杆. 首先对实验油杆冷却性能进行了计算, 并与油杆冷却性能模拟实验结果进行了对比, 两者变化规律基本符合, 表明该计算方法可用. 随后用该方法对真实加力室油杆冷却性能进行了计算, 得到该喷油杆在真实加力室 4 个工况下外套及油杆内壁温度分布及从外涵引气量. 数值模拟结果表明该双层壁喷油杆方案可以有效引气和降温, 使得喷油杆在高温的加力燃烧室内能正常工作.

关 键 词: 加力燃烧室; 喷油杆; 冷却; 数值模拟

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A

Numerical simulation on cooling characteristics of an afterburner fuel injector with double wall construction

LI Ruiming, YAN Baohua, FAN Weijun, YANG Maolin
(School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The performance of the cooling air flow extracted from the bypass duct to cool a new fuel injector with double wall construction for afterburner was simulated numerically. The results of the simulation and the experiment agree with each other very well. The temperature distribution of outer casing and inner pipe, and cooling air rate extracted from the bypass duct were obtained by calculations under four working conditions of the afterburner. It shows that the type of afterburner fuel injector can extract enough cooling air from the fan stream and can effectively decrease the temperature of the wall of fuel injector.

Key words: afterburner, injector, cooling, numerical simulation

在航空燃气涡轮发动机的发展过程中, 为提高发动机的热效率和推质比, 压气机的增压比和涡轮进口温度不断被提高. 随着高推质比的先进发动机的出现, 压气机增压比已经达到了 30 以上, 涡轮进口温度接近 2 000 K, 相应的加力燃烧室进口温度也较高. 高的加力燃烧室进口温度对组织燃烧有利, 但是在有利条件的背后也包含着新的问题, 首先普通材料的喷油杆有可能由于加力燃烧室进口气流温度太高而导致破坏; 其次, 在高温下燃油会分解并产生沉淀和结焦, 而且还有可能导致燃油沸腾^[1-2]. 因此, 必须控制喷油杆的

温度. 外涵引气双层壁喷油杆的设计方案就是针对这一要求而提出的.

闫宝华等^[3-4]通过实验对双层壁喷油杆的流动及冷却效果进行了初步的研究, 根据冷却套内流阻损失系数及冷却效率优化了喷油杆冷却套的结构尺寸, 优化方案在供冷气压差为 850 Pa、热流温度 773 K 时, 引气量为 9 g/s, 能够较大降低油杆内壁温度^[4].

由于条件的限制, 实验是在常压下进行, 冷流温度为常温, 热流温度最高 1 150 K, 没有模拟真实加力室飞行包线下内外涵工况, 并且冷流是采

用接连式主动进气(给定进气压力),而不是真实情况的从外涵冲压引气. 所以对于双层壁喷油杆安装在真实加力室内在真实工况下利用兜风口从外涵引冷却气的引气量和冷却效果并不清楚. 本文利用商业软件 FLUENT 通过数值计算对这种新型喷油杆在加力室中真实工况下引气量及冷却性能进行更进一步的研究. 首先根据实验建立了计算模型,与实验结果进行了对比,验证了计算方法. 随后计算了该喷油杆安装在某型加力室中,在飞行包线 4 个工况下其引气量及冷却效果,探讨了该喷油杆冷却方案的可行性,为实际应用提供参考依据.

1 外涵引气冷却双层壁喷油杆结构

外涵引气冷却双层壁喷油杆结构如图 1、图 2 所示. 该喷油杆采用双层管壁结构,外为冷却套,内为双油管,迎面尺寸略大于常规喷油杆. 冷却套横截面为椭圆形,可减少油杆外部流阻损失. 内管与冷却套间形成环形通道,冷却气流过,对油杆进行冷却. 油杆喷油孔处有空心隔块,冷却套上有相应的开孔,使冷却气不会影响燃油喷出. 冷却气是由外涵引入,总用气量控制在外涵气量的 1% 以内.

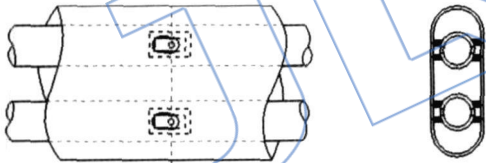


图 1 外涵引气双层壁双杆喷油杆截面图
Fig. 1 Sectional view of afterburner injector with double wall construction

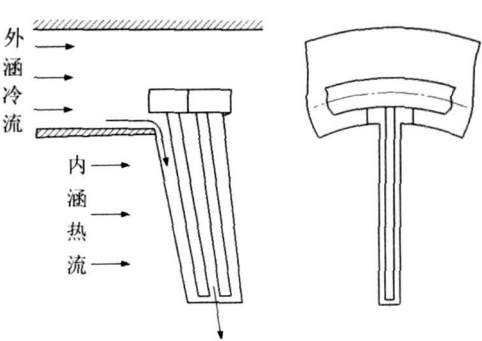


图 2 外涵引气双层壁喷油杆安装示意图
Fig. 2 Setting of afterburner injector with double wall construction

2 油杆冷却性能数值模拟方法的验证

本文采用商用软件 FLUENT 计算该喷油杆的引气量及冷却性能,为了验证计算方法,首先对实验油杆进行计算,并与油杆冷却性能模拟实验结果进行对比. 喷油杆换热过程分析见文献[5],本文计算中给定 FLUENT 中第三类换热边界条件,综合考虑了热传导与对流换热,没有考虑辐射换热.

2.1 实验油杆冷却性能计算模型

为了与实验结果对比,建立实验油杆的计算模型与冷却实验油杆结构一致. 图 3 所示为冷却实验中油杆的结构及杆内埋热电偶的位置. 图 4 为实验油杆的计算模型,包括集气箱、冷却套、油杆及热流. 图中 inlet 1 为热流进口, inlet 2 为冷流进口,均根据实验工况给定. outlet 1, outlet 2 为分别热、冷流的出口,按照实验它们直接排向大气,给定出口工况均为大气工况. 实验和计算中喷油杆结构如图 3 所示.

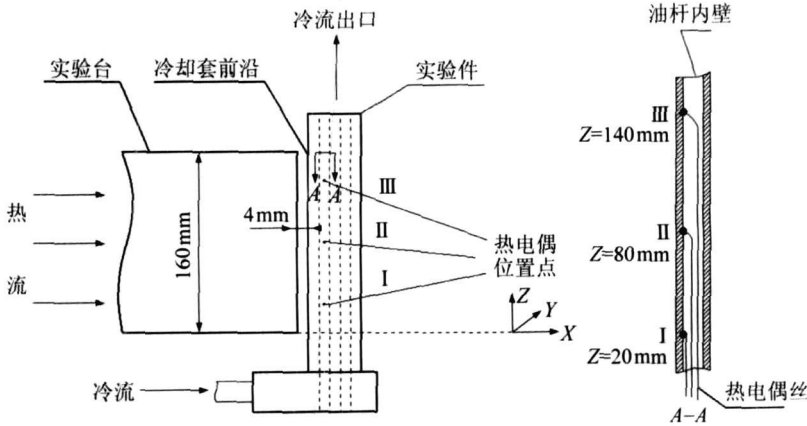


图 3 实验油杆结构图及杆内埋热电偶的位置

Fig 3 Positions of embedded thermocouple on the wall of fuel injector and arrangement of the tester

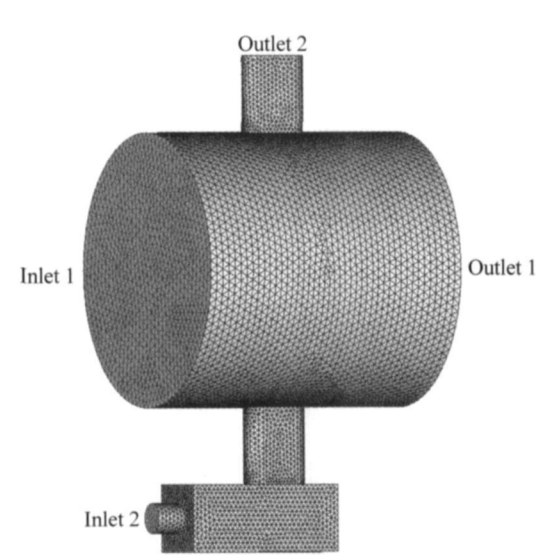


图 4 实验油杆计算模型

Fig 4 Calculation model of the tester

2.2 边界条件

进出口条件: 采用压力进口, 压力出口条件, 根据实验工况给定进、出口的压力、温度、湍流动能和湍流动能耗散率。湍流脉动速度取为平均速度的 5%, 设湍流各向同性, 湍流动能计算式为 $k_m = 1.5 \times (0.05V_m)^2$, 湍流动能耗散率的计算式为 $\varepsilon_m = \frac{C_D^{3/4} k_m^{3/2}}{0.014D}$, 其中 D 为进口管道的特征尺寸, 计算公式为 $D = \frac{4F}{U}$ (其中 F 为进口截面面积; U 为进口截面周长)。

壁面条件: 喷油杆壁面给定第三类换热边界条件, 综合考虑了热传导与对流换热, 没有考虑辐射换热。固定壁面处采用无滑移条件, 即 $u = 0, v = 0, \omega = 0$ 。近壁处的湍流动能 k 及其耗散率 ε 的值由壁面函数法确定。

2.3 实验油杆计算结果与实验对比

2.3.1 冷却气量对比分析

图 5 给出热流工况 773 K 下, 冷却气量的实验与数值计算结果对比图, 计算工况按实验工况给定。由图可见, 计算结果与实验结果吻合较好, 说明利用数值计算的方式所得冷却气量较为准确。

2.3.2 喷油杆内壁温度对比分析

图 6 为在相同冷热流进口工况下, 喷油杆内壁温度数值计算结果与实验结果的对比图。比较的位置为实验件中埋设在喷油杆内壁 3 个热电偶的位置, $Z = 20, 80, 140 \text{ mm}$ 。图中实线代表实验结

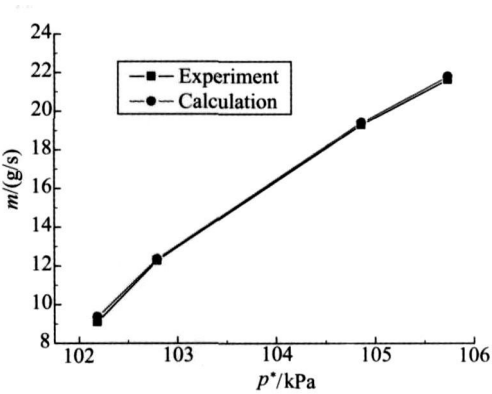


图 5 冷却气量数值计算与实验结果对比
(热流 $T = 773 \text{ K}$)

Fig 5 Cooling air rate comparison of numerical results with experimental data ($T = 773 \text{ K}$)

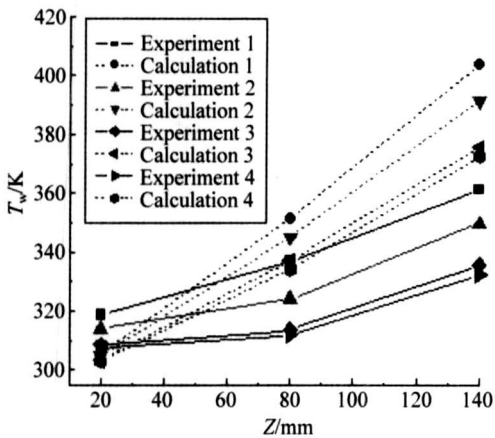
果, 虚线代表数值计算结果。数值计算结果和实验结果比较可以看出: ①实验与计算结果喷油杆内壁温度均随杆高增加而增加。图 6(a) 与图 6(b), (c) 实验结果变化趋势略有不同, 这是由于实验中, 实验件安装在二元试验台出口, 热流出口温度场及速度场不均匀, 热流出口中心温度高于顶部和底部温度, 实验件受热不均匀, 高温时更加明显, 导致在高温时 (1090 K 和 1150 K), 喷油杆内壁中心温度略高。而数值计算中采用了二元试验台温度和速度的平均值, 计算中的来流速度场和温度场是均匀的, 所以计算结果与实验结果在喷油杆顶部及底部相差略大。②3 个不同热流工况下喷油杆内壁温度图中, 数值计算和实验值的差值最大不超过 45 K (杆最高温度的 11%)。利用这种数值计算方法计算喷油杆内壁温度具有一定的可信度。

2.3.3 冷却套温度分布分析

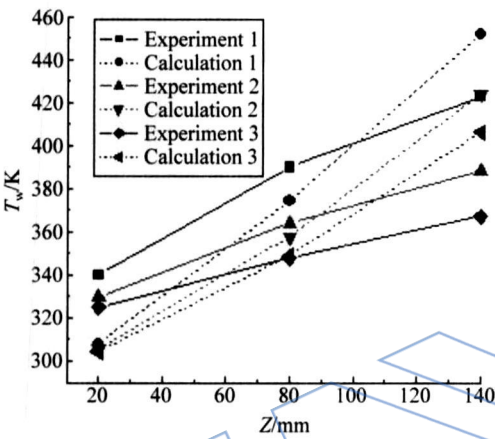
图 7 为选定工况下, 数值计算所得冷却套温度分布图。冷却套管左侧温度最高, 向右递减。套管左侧是迎热流的面, 直接受得热流冲击, 热流量大, 因而温度最高; 套管右侧为热流的绕流区, 气流速度小, 热流量小, 因而温度偏低。套管下方温度低于套管上方温度。这是由于冷却气流流向由下而上, 在此过程中冷却气不断带走套管热量, 其温度逐渐升高冷却性能逐渐下降, 所以套管温度上方高于下方温度。

2.4 小 结

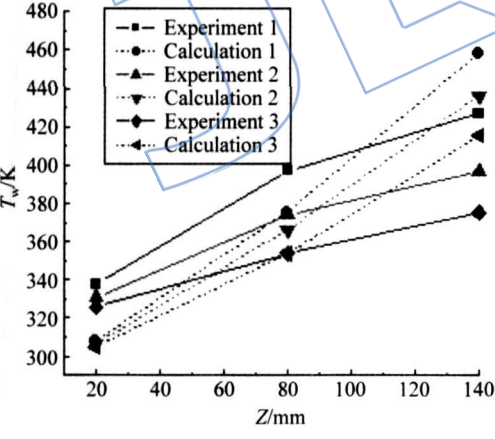
实验件冷却性能计算与模拟实验结果对比表明: ①喷油杆冷气量的计算与实验结果吻合较好; ②在喷油杆冷却特性计算中, 油杆内壁温度随杆



(a) 热流工况 773 K



(b) 热流工况 1090 K



(c) 热流工况 1150 K

图 6 喷油杆内壁温沿杆高分布计算与实验对比

Fig. 6 Temperature distribution of injector comparison of numerical results with experimental data

高的增长而增加, 计算与实验存在相近的趋势. 在实验工况范围内计算所得内壁温度值高出实验值最大不超过 45 K (油杆最高温度的 11%). 因而利用数值模拟求解新型双层壁喷油杆的冷却温度值具有一定的可信度.

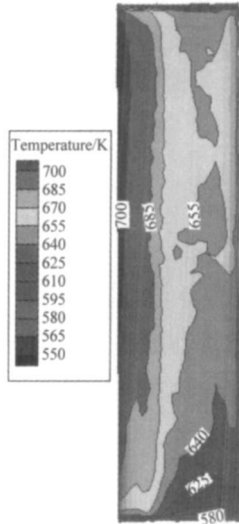


图 7 冷却套温度分布图(热流 $T = 773$ K)

Fig. 7 Temperature distribution of outer casing ($T = 773$ K)

3 真实加力室油杆冷却性能计算及结果分析

3.1 真实加力室油杆计算模型

为了贴近真实应用, 建立了喷油杆在某型加力燃烧室内的计算模型, 验证该喷油杆在真实飞行包线内特定工况下的引气量及冷却效果. 根据周期性, 计算域为绕喷油杆中心剖面旋转 $\pm 5^\circ$, 模型两侧面设为周期边界, 见图 8. 模型前方 inlet 1 为加力室外涵进口, 一小部分气流经兜风口流入冷却套作为冷流冷却喷油杆, inlet 2 为加力室内涵进口, outlet 是加力室出口, 压力、温度均根据加力室真实工况给定. 计算中油杆内未供油.

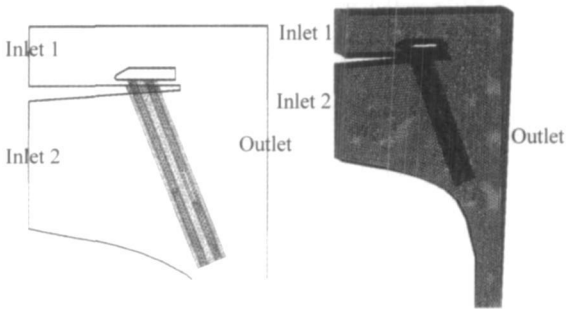


图 8 真实加力室油杆计算模型

Fig. 8 Calculation model of the injector in the afterburner

3.2 计算工况

表 1 给出了真实加力室油杆 4 个计算工况的内外涵进口总温、总压范围, 计算中进出口边界条件采用压力进出口, 根据真实工况给定.

表 1 真实加力室计算工况

Table 1 Calculation conditions in the afterburner

	总压/M Pa	总温/K	速度/(m/ s)
工况 1 外涵进口	> 0.4	< 500	> 20
1 内涵进口	> 0.4	> 1 100	> 150
工况 2 外涵进口	> 0.4	< 600	> 100
2 内涵进口	> 0.4	> 1 100	> 50
工况 3 外涵进口	> 0.06	< 400	> 40
3 内涵进口	> 0.06	> 900	> 100
工况 4 外涵进口	> 0.05	< 500	> 30
4 内涵进口	> 0.05	> 1 000	> 100

3.3 真实加力室油杆计算结果与分析

3.3.1 喷油杆外套壁温分布

图 9 给出喷油杆外套壁温分布, 由图可见, 迎风面壁温最高. 工况 1 冷却套管外壁温度范围:

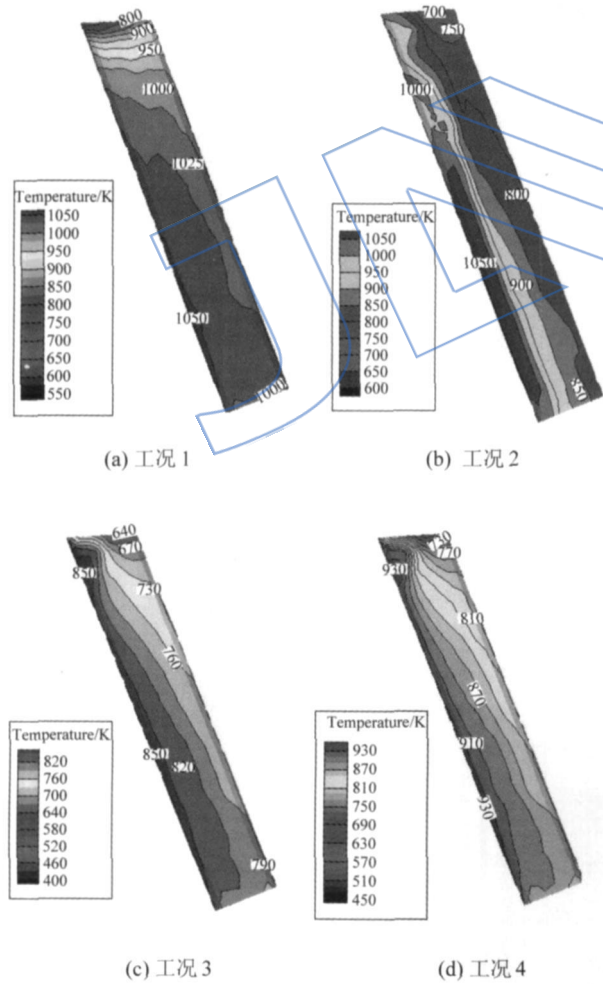


图 9 喷油杆外套壁面温度分布

800~ 1 050 K. 工况 2 冷却套管外壁温度范围: 700~ 1 050 K. 工况 3 冷却套管外壁温度范围: 640~ 850 K. 工况 4 冷却套管外壁温度范围: 730~ 930 K. 在这个范围内冷却套采用耐高温材料可以正常工作.

3.3.2 喷油杆内壁温度分布

为了更好的了解油杆温度分布情况, 取前方油杆的前沿测量线来研究油杆温度分布, 见图 10. 因为此处为迎风面, 是油杆壁温最高的地方. 线中 start dot 所示点是油杆内涵起始点, end dot 所示点为油杆最下端面的点.

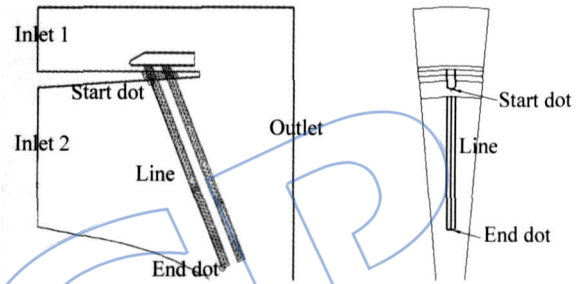


图 10 喷油杆前沿温度测量线位置图
Fig. 10 Positions of temperature measurement

图 11 所示为飞行包线内 4 个工况下喷油杆测量线的温度值, 其中 4 条线中温度最高没有超过 670 K. 在此温度下, 燃油结焦不明显, 喷油杆可以正常工作^[2]. 图中可见, 在喷油杆起点附近, 壁温先升高后下降, 然后随杆高不断上升. 这是因为气流由兜风口将外涵气流引入冷却套中时, 由于气流流向垂直变化, 在转向处套管左侧存在漩涡低速区, 冷流速度小带走热量少, 因此喷油杆温度出现暂时的峰值. 随着气流流入冷却套, 气流流场逐渐均匀, 冷却效果恢复常规情况.

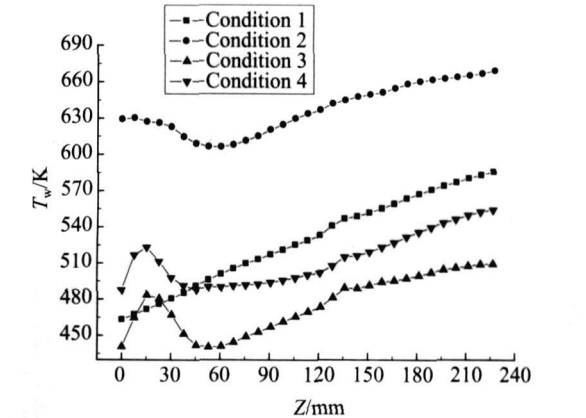


图 11 4 个特定工况下喷油杆测量线的温度

Fig. 11 Temperature distribution of injector under four calculation conditions

3 3 3 4 个工况引气量分析

设计要求双层壁喷油杆总的引气量不应超过外涵气量的 1%. 表 2 给出 4 个工况下双层壁喷油杆的引气量占外涵气量的百分比.

表 2 引冷气量占外涵气量的比例

Table 2 Cooling air rate extracted from the bypass duct

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
$(W_{冷}/W_{外})/\%$	0.69	0.21	0.34	0.35

可见 4 个工况下, 冷却气量均小于外涵气量的 1%, 达到设计要求.

4 结 论

本文对实验油杆冷却性能进行了数值计算, 并与油杆冷却性能模拟实验结果进行了对比, 表明所用数值模拟方法可行. 随后用该方法对新型外涵引气冷却双层壁喷油杆安装在真实加力室中、在飞行包线内 4 个特定工况下的引气量与冷却特性进行了数值模拟, 得到以下结论:

- 1) 在 4 个特定工况下, 油杆内壁温度范围: 420~ 670 K. 在此温度下, 燃油结焦应不明显, 喷油杆应可以长时间正常工作.
- 2) 在 4 个特定工况下, 冷却管外壁温度范围: 640~ 1 050 K. 冷却套采用耐高温材料应可以正常工作.
- 3) 在 4 个特定工况下, 冷却气量占外涵气量

比例的范围: 0. 21% ~ 0. 69%, 没有超过设计要求的上限 1%.

本计算结果为设计应用外涵引气冷却双层壁喷油杆提供了依据和参考.

参考文献:

[1] Marteney P J, Spadaccini L J. Thermal decomposition of aircraft fuel [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986, 108: 648-653

[2] 郭成富, 王勇, 曹康, 等. 加力燃烧室喷油杆结焦试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1997, 10(1): 30-31

[3] 闫宝华, 樊未军, 杨茂林. 加力燃烧室双层喷油杆内冷却气流动特性[J]. 航空动力学报, 2008, 23(7): 1182-1188
YAN Baohua, FAN Weijun, YANG Maolin. Cooling air flow performance of an afterburner fuel injector with double wall construction [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(7): 1182-1188. (in Chinese)

[4] 闫宝华, 樊未军, 李瑞明, 等. 外涵引气加力喷油杆冷却特性模拟实验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(10): 1788-1794
YAN Baohua, FAN Weijun, LI Ruiming, et al. Experimental research on the cooling characteristics of an afterburner fuel injector with double wall construction [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10): 1788-1794 (in Chinese)

[5] 李瑞明, 岳明, 樊未军, 等. 加力用气冷气动雾化喷油杆冷却性能数值模拟[J]. 航空发动机, 2005, 31(2): 38-41
LI Ruiming, YU E Ming, FAN Weijun, et al. Numerical simulation of the cooling performance of an afterburner air blast spraybar [J]. Aeroengine, 2005, 31(2): 38-41. (in Chinese)