

文章编号: 1672-8785(2022)01-0035-08

反舰导弹喷管流场及红外辐射特征研究

桑学仪^{1,2} 吉亚平^{1,2} 李 建^{1,2} 赵亚南^{1,2} 朱春艳^{1,2} 宋敏敏^{1,2}

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

2. 中国航天科技集团公司红外探测技术中心, 上海 201109)

摘 要: 为了评估反舰导弹喷管和尾流在超音速飞行状态下的流场特性和红外辐射特性, 以“雄风 3”反舰弹的尾喷管为研究对象, 建立了相应的二维仿真计算模型。流场计算结果表明, 凝相颗粒对尾喷流的流场特性有显著影响。相比于纯气相, 加入凝相颗粒后喷流轴向高温区长度明显增加, 马赫数下降更快。红外辐射特征计算结果表明, 喷管及尾流的红外辐射特征表现出强对称性, 最大辐射强度出现在偏航角 60°时, 辐射强度达到 103.68 W/sr。

关键词: 反舰弹; 喷管; 流场特性; 红外辐射特征; 凝相颗粒

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.01.006

Research on Flow Field and Infrared Radiation Characteristics of Anti-ship Missile Nozzle

SANG Xue-yi^{1,2}, JI Ya-ping^{1,2}, LI Jian^{1,2}, ZHAO Ya-nan^{1,2}, ZHU Chun-yan^{1,2}, SONG Min-min^{1,2}

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Infrared Detection Technology Research & Development Center of CASC, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to evaluate the flow field characteristics and infrared radiation characteristics of the anti-ship missile nozzle in supersonic flight state, the nozzle of “Xiongfeng-3” anti-ship missile is taken as the research object and the corresponding two-dimensional simulation model is established in this paper. The calculation results of the flow field show that the condensed phase particles have a significant effect on the flow field characteristics of the jet. Compared with the pure gas phase, the length of the axial high-temperature zone increases obviously with the addition of condensed particles, and the Mach number decreases faster. The calculation results of infrared radiation characteristics show that the infrared radiation characteristics of the nozzle and wake show strong symmetry. The maximum radiation intensity appears when the yaw angle is 60°, and the radiation intensity reaches 103.68 W/sr.

Key words: anti-ship missile; nozzle; flow field characteristics; infrared radiation characteristics; condensed phase particles

收稿日期: 2021-10-08

基金项目: 国家部委基金项目

作者简介: 桑学仪(1994-), 男, 安徽淮南人, 助理工程师, 主要从事仿真测试研究。

E-mail: 359896793@qq.com

0 引言

目前,各军事大国为了适应新形势下的要求,不断加强海军的现代化建设。作为现代海军中重要的武器装备,反舰导弹也在海战中发挥着越来越重要的作用,对水面舰艇的生存构成了重大威胁^[1-3]。因此,开展反舰弹类目标的红外特性研究对舰载红外探测设备预警、探测反舰弹以及舰空导弹红外导引头截获、跟踪反舰导弹均具有重要意义。而发动机喷管和尾流是反舰弹中波段主要的红外辐射来源^[4-8],且不同固态颗粒的红外辐射特性有显著区别,所以还需要考虑有无固态颗粒对发动机尾流红外辐射特性的影响。因此,本文以“雄风3”反舰导弹喷管作为研究对象,通过数值仿真的手段研究反舰弹的流场特性和红外辐射特征。

1 仿真计算模型

“雄风3”反舰导弹发动机喷管的几何形状是圆周对称的,因此可采用二维模型(见图1)对仿真模型进行简化。通过查阅相关文献资料,得到喷管的关键几何参数(见表1)。



图1 “雄风3”导弹喷管二维模型

表1 喷管的关键几何参数

喉部半径	出口半径	扩张比	扩张半角	入口半径	收敛半角
60 mm	120 mm	4	15°	100 mm	45°



图2 喷管流场计算域

2 流场计算

2.1 流场计算方法

本文采用商业 CFD 软件对喷管的流场特性进行计算,并选用隐式耦合求解器。湍流模型选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型,壁面函数模型选用增强型壁面函数。多组分模拟选用 Species Transport 组分输运模型,对 CO 、 H_2O 、 CO_2 、 O_2 等组分浓度进行计算。多相流模型选用 DPM 方法,并且考虑了气/固两相间的相互作用。对连续方程、动量方程和能量方程的离散采用 2 阶迎风差分格式。

2.2 计算域

本文选择远场大小轴向 3000 mm (喷管长度为 240 mm,约为喷管出口半径的 12 倍)、径向 500 mm (约为喷管出口半径的 5 倍)作为计算域(见图 2)。

2.3 网格划分

采用商用网格划分软件对计算模型进行网格划分(见图 3)。考虑到喷管内及出口附近流动较为复杂且马赫数普遍较高,故在该范围内进行了一定的网格加密,并经过了网格独立性验证(网格量为 203280 个)。

2.4 边界条件

通过查阅相关资料,确定马赫数为 2.5、飞行高度为 10~50 m,并将其作为导弹飞行工况条件进行计算。具体设置如表 2 所示。

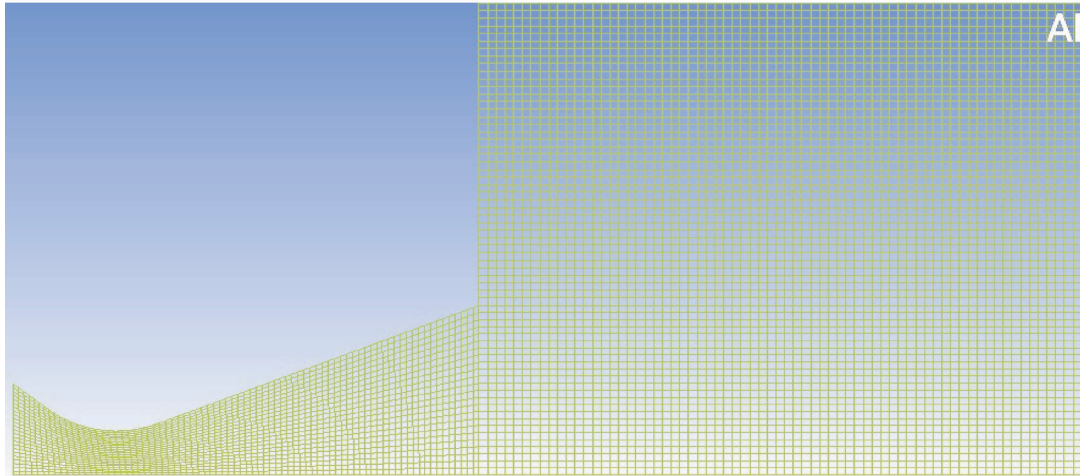


图 3 网格划分

表 2 喷管流场计算的边界条件设置

	边界设置	P_1/Pa	T_1/K	马赫数
喷管进口	压力进口	76000000	3371	—
外流场	压力远场	101325	288	2.8

表 3 燃气中的气相成分及其质量分数

成分	CO	HCl	H ₂ O	N ₂	H ₂	CO ₂	O ₂
质量分数	39.573%	28.559%	12.692%	12.416%	3.38%	3.194%	0.186%

2.5 组分浓度

为了使计算尽可能接近真实情况, 计算中考虑了凝相颗粒的作用, 认为燃气中有固定含量的 Al₂O₃ 固体颗粒。燃气组分按照 AP/HTPB 推进剂的燃烧产物并根据热力学计算得到, 且忽略了燃气中质量分数很低的组分。在最后得到的燃气组分中, 气相成分的质量分数约为 72.02%, 凝相成分 (Al₂O₃ 颗粒) 的质量分数约为 27.98%。表 3 列出了气相成分中各组分的质量分数。

2.6 计算结果与分析

在流场仿真计算中, 为了研究凝相颗粒对流场的影响, 分别计算了纯气相和考虑了凝相颗粒的两种流场状态, 并对其进行了对比分析。

2.6.1 轨迹与速度

图 4 所示为纯气相情况下流场中气相的速度分布以及考虑凝相颗粒作用后凝相颗粒的运动轨迹和速度分布。可以看出, 由喷管入口进入的凝相颗粒在收敛段内会产生向喷管轴线的

速度分量, 从而汇集于喷管轴线附近; 在喷管扩张段, 凝相颗粒在燃气的作用下产生了背离喷管轴线的速度, 因此径向活动范围有所扩大; 随燃气一起喷出喷管后, 凝相颗粒在径向上的活动范围继续扩大, 这些颗粒的轨迹呈放射状向后延伸。

通过将流场中凝相颗粒与气相的速度进行对比可以发现, 两种工况下凝相颗粒的速度都远低于气相的速度。在整个流场区域内, 各个位置气相成分的速度基本上都要比凝相颗粒大, 因此凝相颗粒大致上一一直处于加速状态。在整个流场的末端, 气相成分速度已经降至与凝相颗粒速度相当。可以推断, 不久之后凝相颗粒将失去气相成分的推动作用而逐渐减速。

2.6.2 马赫数分布

前面已经说明了凝相颗粒受到气相成分的加速效果。这必将对气相成分的马赫数分布带来影响。图 5(a) 和图 5(b) 分别给出了两种工况下纯气相以及考虑凝相成分后流场的马赫数分布云图。

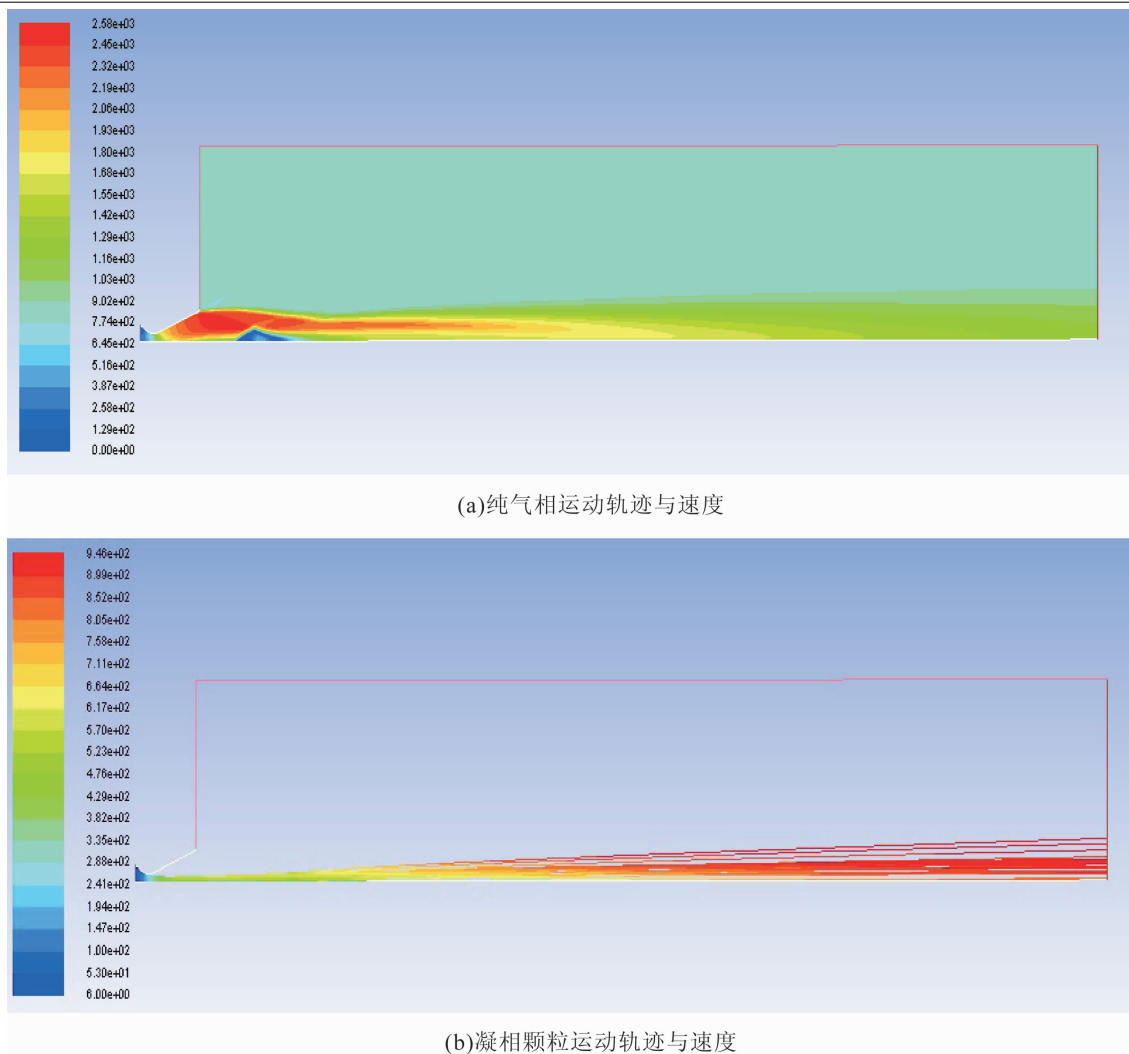


图4 运动轨迹与速度

2.6.3 温度分布

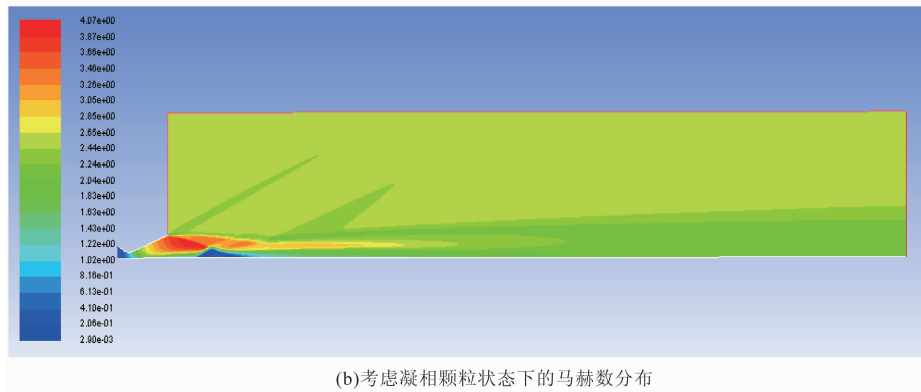
凝相颗粒与气相成分在热力学性质上有明显的不同，这也使得考虑凝相成分后流场的温度分布与只考虑纯气相成分时有显著差异。图6给出了两种工况下纯气相以及考虑凝相成分后流场的温度分布云图对比。可以看出，考虑凝相颗粒的作用后，由于凝相颗粒相对集中于喷管轴线位置，该位置的温度较高，且在喷管轴线向后的方向上，温度降得较慢。

为了更明确地说明图6中的现象，图7给出了轴线温度。可以看出，在喷管的喉部位置上，温度突然剧烈升高。此处也是出口斜激波与轴线的交点(定义为P点)。由于外界气压不同，斜激波强度不同，因此两种工况下P点的位置稍有不同。通过对比图7(a)与图7(b)可

以看出，只考虑气相时，轴线上的温度急速下降，且下降的趋势一直持续到P点；燃气通过激波时，温度有一次突升，之后再比较平稳地下降。由于该喷管为长尾喷管，考虑凝相颗粒的情况下，由喷管入口进入的粒子在经过喷管收敛段后有明显的向轴线运动的速度分量。经过平直段时，在气流的作用下很多粒子的速度方向发生明显变化，向轴线运动的速度分量变得很小。考虑到凝相颗粒时，出口斜激波的形式也明显不同于只考虑气相组分时，所以前者在P点处的温度上升也明显异于后者。不过在P点之后，考虑凝相颗粒时温度下降得更快，到流场尾部时两种情况的温度相差得已不甚明显。



(a)纯气相状态下的马赫数分布

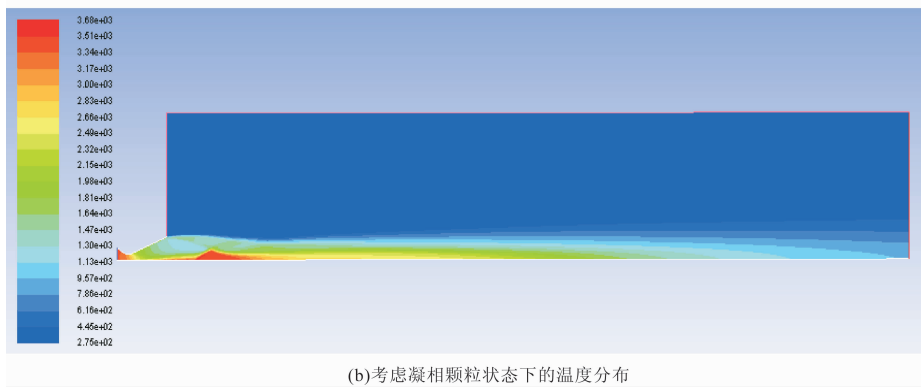


(b)考虑凝相颗粒状态下的马赫数分布

图 5 马赫数分布

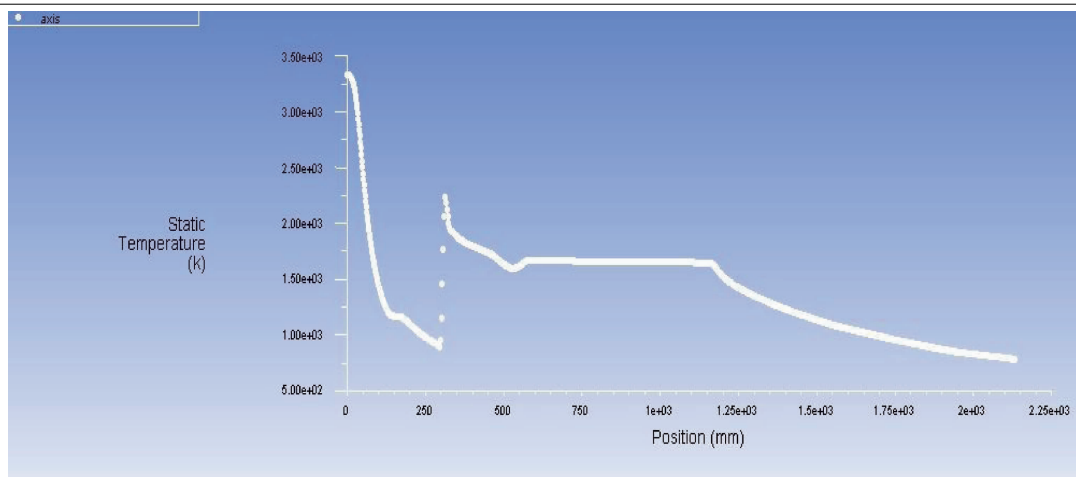


(a)纯气相状态下的温度分布

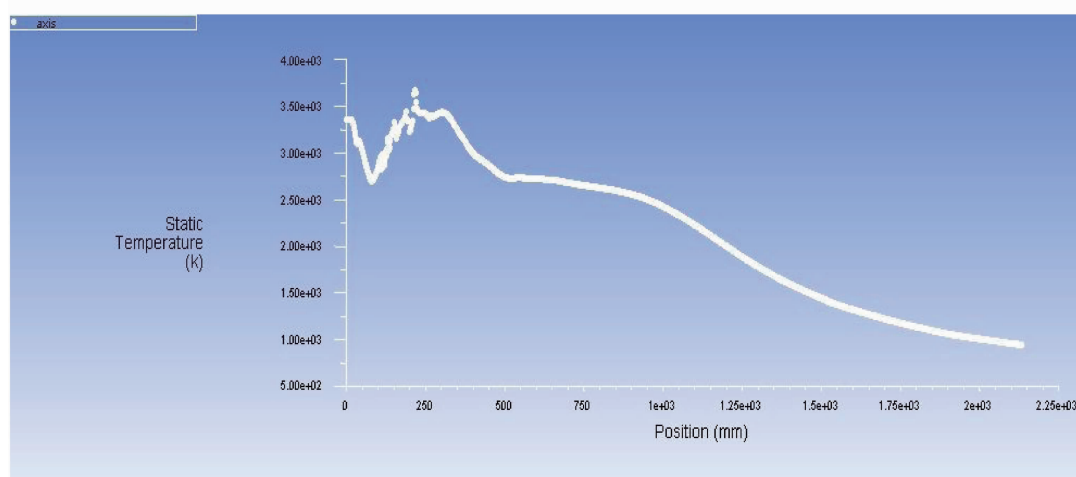


(b)考虑凝相颗粒状态下的温度分布

图 6 温度分布



(a) 纯气相状态下的轴线温度



(b) 考虑凝相颗粒状态下的轴线温度

图7 轴线温度

3 红外辐射特征计算

“雄风3”反舰弹目标在中波段(3~5 μm)的红外辐射主要来自喷口及尾焰辐射。本文在分析喷管和尾焰温度场耦合传热的基础上,采用数值方法分析机体外的气动对流换热和热传导,并利用光线追迹^[9-11]方法计算“雄风3”的红外辐射特征。

3.1 辐射强度计算方法

辐射照度是指单位面积上能接收到的辐射功率。辐射照度方程描述了辐射亮度与辐射照度之间的转换关系^[9-11],即发射微元面在被照微元面上产生的辐射照度等于发射微元面的辐射亮度、发射微元面对被照微元面所张的立体角、被照微元面与两个微元面连线夹角余弦三

者的乘积:

$$H = L\Delta\Omega\cos\theta \quad (1)$$

将式(1)写成包含角系数关系的形式:

$$H = L\pi \frac{\Delta A_1 \cos\theta_1 \cos\theta}{\pi l^2} = L\pi F_{\Delta A-\Delta A_1} \quad (2)$$

式中,角系数 $F_{\Delta A-\Delta A_1}$ 的物理意义如下:从微元面 ΔA 发出并投射到微元面 ΔA_1 的辐射功率与微元面 ΔA 发出的总有效辐射功率的比值。

空间范围的光谱形式为

$$H_\lambda = \int_{\Omega} L_\lambda(\vec{S}) \cos\theta d\Omega \quad (3)$$

目标辐射强度 I 与被照面辐射照度 H 之间的关系为

$$I = Hl^2/\cos\theta \quad (4)$$

式中, θ 为目标与探测器之间的夹角。

表 4 辐射强度计算结果

偏航角/ $^{\circ}$	俯仰角/ $^{\circ}$	强度值/ (W/sr)	偏航角/ $^{\circ}$	俯仰角/ $^{\circ}$	强度值/ (W/sr)	偏航角/ $^{\circ}$	俯仰角/ $^{\circ}$	强度值/ (W/sr)
0	0	60.18129	125	0	66.81965	250	0	72.33646
5	0	66.85102	130	0	67.68624	255	0	72.61246
10	0	74.93078	135	0	62.96749	260	0	82.3203
15	0	79.47853	140	0	60.34031	265	0	85.06522
20	0	92.52677	145	0	54.91595	270	0	75.56023
25	0	91.17189	150	0	50.99056	275	0	83.10621
30	0	98.24168	155	0	40.25024	280	0	89.06573
35	0	100.6384	160	0	35.85605	285	0	91.11828
40	0	98.62196	165	0	26.49249	290	0	93.29309
45	0	105.0467	170	0	18.89525	295	0	99.49801
50	0	101.34	175	0	11.94876	300	0	103.6817
55	0	103.6019	180	0	0.143637	305	0	103.6019
60	0	103.6817	185	0	11.94876	310	0	101.34
65	0	99.49801	190	0	18.89525	315	0	105.0467
70	0	93.29309	195	0	26.49249	320	0	98.62196
75	0	91.11828	200	0	35.85605	325	0	100.6384
80	0	89.06573	205	0	40.25024	330	0	98.24168
85	0	83.10621	210	0	50.99056	335	0	91.17189
90	0	75.56023	215	0	54.91595	340	0	92.52677
95	0	85.06522	220	0	60.34031	345	0	79.47853
100	0	82.3203	225	0	62.96749	350	0	74.93078
105	0	72.61246	230	0	67.68624	355	0	66.85102
110	0	72.33646	235	0	66.81965	360	0	60.18129
115	0	79.31869	240	0	69.21616			
120	0	69.21616	245	0	79.31869			

3.2 红外辐射强度计算结果

为了使计算结果更加真实可信,选择考虑了凝相颗粒的流场计算结果作为红外辐射特征计算的输入量。在计算红外辐射时,以喷管正尾向为 0° 角,水平偏航角每隔 5° 设置一个计算点。在该状态下最终得到的辐射强度计算结果如表 4 和图 8 所示。

从结果中可以看出,“雄风 3”导弹喷管及尾焰的最大红外辐射强度出现在偏航角 60° 和 300° 位置,达到了 103.68 W/sr ;在 180° 方向上最小,几乎为零。喷管及尾焰的红外辐射特征还表现出强对称性,这与喷管的轴对称结构特性是吻合的。此外,探测角从正尾到迎头方向转动的过程中,红外辐射强度出现先增后

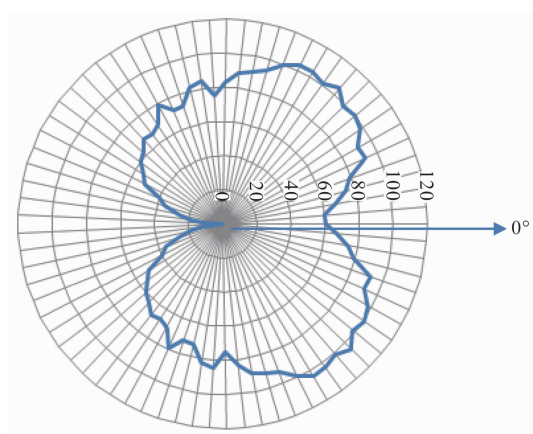


图 8 红外辐射强度分布

降的变化趋势。这是喷管壁面和尾焰可探测投影面积之和随着探测角的变化先增后减共同导致的。

4 结论

本文采用 CFD 流体仿真软件对“雄风 3”反舰弹喷管及尾流进行了仿真, 获取了其在超音速巡航状态下的流场分布, 并对比了凝相颗粒对尾喷流流场的影响。通过光线追迹方法, 在数值上模拟计算出不同探测角度下的“雄风 3”反舰弹喷管及尾流的红外辐射特性。最终结果表明, 凝相颗粒对尾流的流场有显著影响; 相比于纯气相, 加入凝相颗粒后喷流轴向高温区长度明显增加, 马赫数下降更快。红外辐射特征计算结果表明, 喷管及尾流的红外辐射特征表现出强对称性, 最大辐射强度出现在偏航角 60° 时, 辐射强度达到 103.68 W/sr 。

为充分论证反舰导弹在不同工况下的流场和红外辐射特征, 后续将继续开展多型反舰导弹在典型飞行工况下的仿真计算工作。

参考文献

- [1] 刘勇, 杨健, 朱剑, 等. 反舰导弹制导技术发展综述 [J]. *计算机仿真*, 2016, **33**(2): 10-16.
- [2] 卢毅, 姜永华. 反舰导弹对目标选择的一种新方法 [J]. *航空学报*, 2010, **31**(4): 778-784.
- [3] 刘滨, 洪文鹏, 王瑞芬, 等. 红外成像系统中带有距离修正的目标能量预测方法 [J]. *飞控与探测*, 2020, **3**(2): 59-63.
- [4] 臧海飞, 刘栗, 田义, 等. 射频/光学复合制导仿真实现形式及发展 [J]. *飞控与探测*, 2020, **3**(3): 16-23.
- [5] 廖华琳, 张勃, 邓庆晃, 等. 不同形式喷管流动与红外抑制特性数值分析 [J]. *红外技术*, 2017, **39**(10): 42-47.
- [6] 杨栋, 高德亮, 曹耀心, 等. 红外导引头抗诱饵干扰研究 [J]. *飞控与探测*, 2020, **3**(3): 80-85.
- [7] Liu L H. Backward Monte Carlo method based on radiation distribution factor [J]. *AIAA Journal of Thermo Physics and Heat Transfer*, 2004, **18**(1): 151-153.
- [8] Lee C, Boedicker C. Subsonic diffuser design and performance for advanced fighter aircraft [C]. San Diego: Aircraft Design Systems and Operations Meeting, 1985.
- [9] 郭聚光, 马勇辉, 杨智慧, 等. 基于微分光线追迹的内外辐射传递算法研究 [J]. *光学与光电技术*, 2017, **15**(3): 35-38.
- [10] 丁宣浩, 蔡如华. 光线方程的数值解与光线追迹 [J]. *西南师范大学学报*, 2005, **30**(4): 667-671.
- [11] 李飞, 王铎. 大气传输对红外导引头性能影响研究 [J]. *光电技术应用*, 2019, **30**(1): 21-24.