

基于 Fluent 的仿形气囊热辐射特性数值模拟计算

舒君玲^{1,3} 于俊香² 毛 龙^{1,3} 陈淑娟^{1,3} 杨 威^{1,3} 张文龙^{1,3}

(1. 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441003)

(2. 湖北三沃力源航天科技有限公司, 湖北 襄阳 441003)

(3. 安全防护与应急救援湖北省重点实验室, 湖北 襄阳 441003)

摘 要: 基于 Fluent 仿真软件对仿形气囊辐射换热过程的温度场进行仿真计算, 并利用集总参数法计算不同环境温度和气囊初始温度下气囊温度随时间的变化; 利用黑体辐射定律及贝兰特定律计算仿形气囊模拟人体温度在中波 3~5μm 辐射亮度值为 2.77W/m²·sr 和长波 8~14μm 波段的辐射亮度值为 63.70W/m²·sr, 利用红外摄像机测试了大气环境下仿形气囊模拟人体温度在中波 3~5μm 辐射亮度实际值为 1.80W/m²·sr 和长波 8~14μm 波段的辐射亮度实际值为 64.06W/m²·sr。研究结果对仿形气囊辐射特性设计具有一定价值。

关键词: 仿形气囊; 热辐射; 数值计算; 气体发生器

1 引言

本文研究了一种气体发生器充气式仿形气囊, 仿人红外气囊模拟红外辐射特性值应大于人体 310K 体温对应的中波 3~5μm 下辐射亮度值 1.13W/m²·sr, 长波 8~14μm 下辐射亮度值 24.95W/m²·sr。基于 Fluent 的数值模拟, 计算红外仿形气囊温度场分布, 及不同温度对应的长波和中波气囊辐射亮度值, 利用红外摄像机对气囊实际辐射亮度值进行测量。

2 理论计算

2.1 气体热力学参数数值计算

考虑对流换热及辐射热损失, 计算气囊充气状态 1min 后达到的温度 T₂。气体发生器充气式气囊采用叠氮类气体发生剂, 具有小型轻便、快速产气、洁净无毒的特点。点火燃烧产生高温纯净氮气, 产气量 65g, 气囊可用体积 V 为 37L, 环境温度为 T_a, 氮气密度 ρ=1.13kg/m³, 氮气定压比热容 c_p=1.04kJ/(kg·K)。

假设气袋成柱状, 尺寸为 φ450mm×800mm, 则表面积 F:

$$F = 2 \times \frac{1}{4} \times 3.14 \times (0.45)^2 + 3.14 \times 0.45 \times 0.8 = 1.448 \text{ m}^2 \quad (1)$$

根据气袋表面积计算气袋 1min 钟时间对流热损失量为:

$$Q_1 = h \Delta T F = 0.42 \text{ W}/(\text{°C} \cdot \text{m}^2) \times (T - T_a) \times 1.448 \text{ m}^2 \quad (2)$$

气囊材料为聚氨酯, 橡胶材料发射率为 0.8~0.95, 热辐射损失:

$$Q_2 = F \sigma T^4 = 1.448 \text{ m}^2 \times 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times T^4 \quad (3)$$

将气囊看成一个等温体, 利用集总参数法及能量平衡:

$$\rho c_p V \frac{dT}{d\tau} = -(Q_1 + Q_2) = -h(T - T_a)F - F\sigma T^4 \quad (4)$$

化简为:

$$43.4824 \frac{dT}{d\tau} + 0.60816T + 7.8 \times 10^{-8} \times T^4 = 178.19 \quad (5)$$

初始条件: τ=0 时, T=T₁。

2.2 气囊辐射特性理论计算

根据实际物体辐射定律, 可以计算气囊温度为 T₂ 时, 其中波与长波范围下的半球辐射力分别为:

中波 (3~5μm):

$$E_{b, 3-5\mu m}(T_2) = (F_{b(0-\lambda_2)}(\lambda_2 T_2) - F_{b(0-\lambda_1)}(\lambda_1 T_2)) \times \sigma T_2^4 \quad (6)$$

长波 (8~14μm):

$$E_{b, 8-14\mu m}(T_2) = (F_{b(0-\lambda_4)}(\lambda_4 T_2) - F_{b(0-\lambda_3)}(\lambda_3 T_2)) \times \sigma T_2^4 \quad (7)$$

由贝兰特定律: E₀=πI₀

中波 (3~5μm) 范围, 定向辐射强度即辐射亮度为:

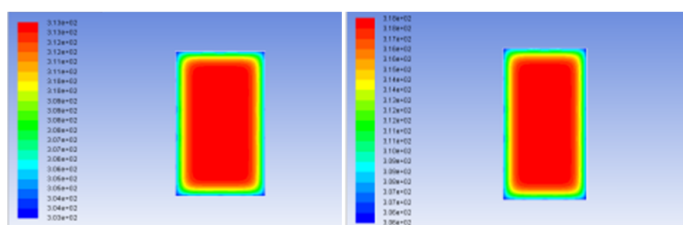
$$I_1 = \frac{E_{b, 3-5\mu m}(T_2)}{\pi} \quad (8)$$

长波 (8~14μm) 范围, 定向辐射强度即辐射亮度为:

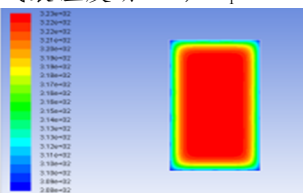
$$I_2 = \frac{E_{b, 8-14\mu m}(T_2)}{\pi} \quad (9)$$

3 计算结果

3.1 热力学计算结果



a) T₁=313K 气囊温度场 b) T₁=318K 气囊温度场



c) T₁=323K 气囊温度场

图 1 气囊 1min 时气囊温度场分布图

根据公式(1)~(5),将仿形气囊简化为圆柱状,进行网格划分及边界条件设定,利用Fluent有限体积法求解环境温度为 $T_a=20^{\circ}\text{C}$,不同初始温度 T_1 分别为313K、318K、323K时温度场。1min时气囊温度场分布图,结果如图1。

环境温度为 $T_a=20^{\circ}\text{C}$ 时,通过计算可得初始温度为 T_1 时,气囊1min钟后气囊温度的 T_2 ,则气囊初始温度越高,辐射热损失越大,温度下降幅值越大。

初始温度 $T_1=313\text{K}$,计算不同环境温度 T_a 下1min后气囊温度 T_2 ,仿真结果如图2所示:

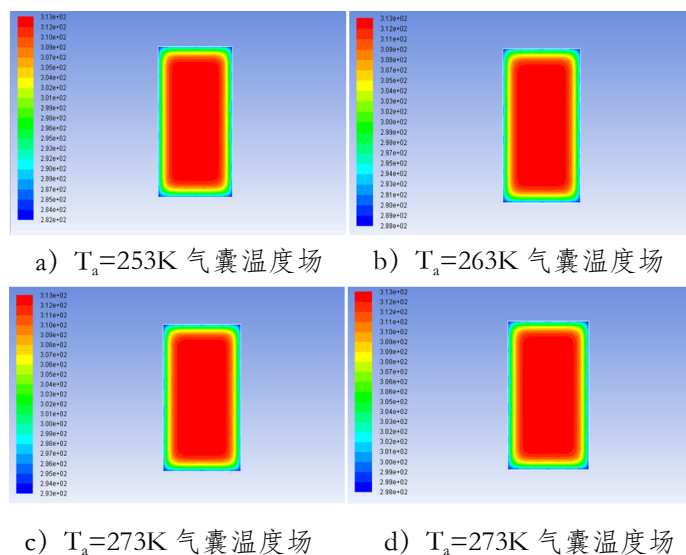


图2 气囊1min时气囊温度分布图

初始温度为 $T_1=313\text{K}$ 时,通过仿真计算得环境温度为 $T_a=20^{\circ}\text{C}$ 时,气囊1min钟后气囊温度的 T_2 。可以得出,环境温度越低,气囊辐射热损失越大。

3.2 热辐射计算结果

根据公式(6)~(9),计算其他不同初始温度下气囊热辐射亮度值,结果如表1:

表1 不同初始温度下气囊热辐射值

初始温度 T_1 , K	最终温度 T_2 , K	辐射力 $E_{b,\lambda}$, W/m^2		辐射亮度 I , $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$	
		中波	长波	中波	长波
313	304	6.82	183.21	2.17	58.34
318	307	7.58	191.69	2.41	61.05
323	310	8.70	200.02	2.77	63.70

根据公式(6)~(9),计算不同环境温度下气囊热辐射亮度值,结果如表2:

表2 不同环境温度下气囊热辐射值

环境温度 T_a , K	最终温度 T_2 , K	辐射力 $E_{b,\lambda}$, W/m^2		辐射亮度 I_0 , $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$	
		中波	长波	中波	长波
252	287	3.64	140.04	1.16	44.60
263	291	4.25	149.78	1.35	47.70
273	296	5.09	162.15	1.62	51.64
283	300	5.82	172.57	1.85	54.96
293	304	6.82	183.21	2.17	58.34

由计算结果可以分析出,气囊初始温度为 T_1 ,由理论计算与Fluent仿真结果得气囊1min钟后温度为 T_2 。由实际物体辐射定律与贝兰特定律可得,气囊在最低温度时中波段和长波段的辐射亮度。对比表2中计算结果

可知,气囊在不同初温下,对应最低温度时中波段和长波段的辐射亮度均高于人体温度对应的中波、长波辐射亮度值,可以达到气囊有效时间内隐蔽真目标的目的。与人体中波 $3\sim 5\mu\text{m}$ 下辐射亮度值 $1.13\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$,长波 $8\sim 14\mu\text{m}$ 下辐射亮度值 $24.95\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 相比,仿形气囊模拟人体温度310K在中波 $3\sim 5\mu\text{m}$ 辐射亮度值为 $2.77\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 长段的辐射亮度值为 $63.70\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。

3.3 试验测试数据

利用FLIR SC7000红外摄像机测试气囊不同温度下中波与长波的辐射亮度值,测试结果如表3:

表3 外红摄像机测试结果

气囊温度, K	中波辐射亮度, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$	长波辐射亮度, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$
323	2.22	58.93
318	2.11	57.66
315	1.95	55.83
312	1.87	54.91
310	1.80	54.06
307	1.77	53.77
301	1.59	51.28

根据红外摄像机测试结果,相同温度下中波与长波辐射亮度值,理论计算值比试验测试值高,分析因为实际测量中存在大气衰减,导致实际测量值偏小。与人体中波 $3\sim 5\mu\text{m}$ 下辐射亮度值 $1.13\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$,长波 $8\sim 14\mu\text{m}$ 下辐射亮度值 $24.95\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 相比,大气环境下仿形气囊模拟人体温度310K在中波 $3\sim 5\mu\text{m}$ 辐射亮度实际值为 $1.80\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的辐射亮度实际值 $54.06\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。

4 结论

基于Fluent软件及利用集总参数法对仿形气囊温度场进行动态仿真。仿形气囊模拟人体温度310K数值计算在中波 $3\sim 5\mu\text{m}$ 辐射亮度值为 $2.77\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 长段的辐射亮度值为 $63.70\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。大气环境下仿形气囊模拟人体温度310K在中波 $3\sim 5\mu\text{m}$ 辐射亮度实际值为 $1.80\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的辐射亮度实际值 $54.06\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。数值模拟计算及红外摄像机测量值气囊中波和长波辐射亮度值均大于人体实际辐射亮度值,仿形气囊能够达到对真目标的隐蔽效果,对气囊红外辐射特性的研究及为仿形气囊设计可提供一定理论基础。

参考文献:

- [1] 张鹏. 仿形诱饵体相关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [2] 赵亮, 巨秀芝. 烟火型红外药剂的改进[J]. 航天电子对抗, 2019(03):50-52.
- [3] 刘星. 红外诱饵弹辐射特性与目标成像仿真技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

作者简介:

舒君玲(1993-), 女, 汉族, 硕士学历, 工程师, 航空宇航科学与技术专业。