# 集成中冷器式进气歧管热固耦合仿真分析

# Intake manifold with integrated WCAC Thermal-structural Coupling Simulation

廖淑华
（ 马瑞利（中国）有限公司　 上海　201208 ）

**摘　要：**通过 Fluent 分析软件对某款集成式中冷器进气歧管进行温度场分析，在 Ansys 进行结构强度分析，同时通过 Ansys workbench 将温度场成功映射到歧管结构上，实现集成式中冷器歧管热固双向耦合分析。通过试验对比验证，仿真结果能够很好对应实验结果。通过本文的研究，对于集成式中冷器歧管热固耦合分析有指导性意义。

**关键词：**集成式中冷器　 进气歧管　 热固耦合分析

**Abstract:** Temperature field simulation of intake manifold with integrated WCAC was performed by Fluent, and using Ansys to perform structural simulation. Meanwhile, use workbench to map the temperature field to intake manifold, realized thermal-structural two-way coupling simulation. Compared with real test results, the simulation results was very close to test results. The study plays an important role in research on thermal-structural coupling simulation for intake manifold with integrated WCAC.

**Key words:** Integrated WCAC ， Intake manifold, Thermal-structural coupling simulation

## 1. 引言

进气歧管是内燃机发动机的关键部件之一。伴随着我国汽车行业的发展，其排放法规、燃油经济性及舒适性越来越受到重视，为此增压、缸内直喷等技术在汽油机上的应用越来越广泛，当空气经压气机增压后其温度会大幅升高，为进一步提高增压后的空气密度，同时抑制爆震的发生，需要冷却设备，对空气进行冷却降温，因此合理组织发动机进气、提高发动机各缸进气均匀性和空气密度便显得尤为重要。集成中冷器 WCAC(water charge air cooler)式进气歧管，使各出气道及发动机的各个缸体进气均匀，对空气的冷却效果好，利于增大空气密度，提高发动机的有效输出功率及扭矩，避免造成发动机工作粗暴、工作噪音大、各缸工作不均匀、发动机寿命缩短的问题[1]。

本文通过 CFD 的方法，采用 Fluent 分析软件对某发动机集成中冷器式进气歧管的初始设计进行温度场数值计算，保证温度场均匀性，同时采用 Ansys 进行进气歧管结构强度分析，应用 Ansys workbench 将温度场映射到歧管上，实现热固双向耦合分析。通过仿真结果与实际实验数据的比较，验证了计算机仿真分析的可行性与试验的准确性，为进一步工作打下了基础。

## 2. 集成中冷器式进气歧管结构及 CFD 数值计算方法

### 2.1 集成中冷器式进气歧管结构

一种集成中冷器的发动机进气歧管，其特征主要包括两个部分，一是进气歧管本体，二是中冷器 WCAC (water charge air cooler)。其结构如图 1 所示：

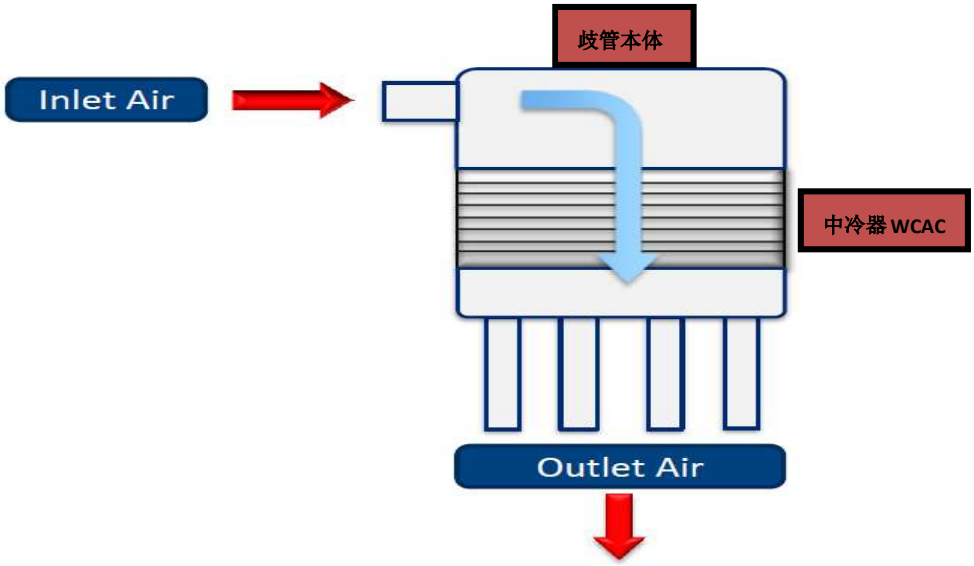



图 1： 集成中冷器进气歧管结构

## 2.2 CFD 方法

CFD。CFD 是近代流体力学，数值数学和计算机科学结合的产物，是一门具有强大生命力的边缘科 CFD， (Computational Fluid Dynamics），即计算流体动力学，是流体力学的一个分支，简称学[2]。它以电子计算机为工具，应用各种离散化的数学方法，对流体力学的各类问题进行数值实验、计算机模拟和分析研究，以解决各种实际问题。

进气歧管中流动是可压，粘性，非定常的三维湍流流动，满足通用的 Navier Stokes 方程，矢量方程表示如下[2]：

$$\rho \frac{du}{dt} = -\nabla P + PF + \mu \nabla \mu$$

直接坐标表示如下：

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho x + \mu \nabla \mu$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho y + \mu \nabla v$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho z + \mu \nabla w$$

## 2.3 CFD 模型建立

在 CFD 模型的建立过程中， 我们把中冷器作为一个多孔介质处理，如图 2 所示：

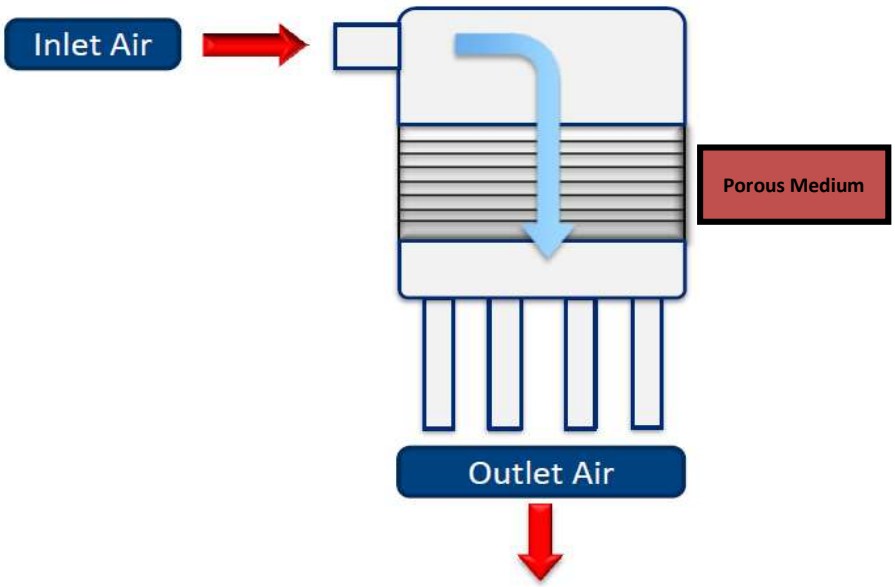



图 2： 集成中冷器进气歧管多孔介质结构

在求解过程中，多孔介质满足以下公式：

$$\frac{\partial P}{\partial X_i} = -\frac{\mu}{K_{perm}} * ui + Kloss * \frac{P}{2} * |u| * u_i$$

Q: Flow Rate [m3/s]
Kperm: Instrinsic permeability [m2]
μ: Dynamic viscosity [Pa.s]
ui: Velocity in the direction [1/m]
|u|: velocity magnitude [m/s]
$\frac{\partial P}{\partial Xi}$: Pressure Gradient [Pa/m]

歧管模型在 Spaceclaim 中以 stp 格式导出，导入到 Fluent Meshing 中。利用 Fluent meshing 丰富的前处理工具对歧管进行网格划分。Fluent meshing 中采用 size function 来控制网格大小，不仅可以通过全局对网格进行控制， 同时也可以对局部网格进行定义。利用多孔介质模型代替冷却水管之间的翅片，依次绘制多孔介质域与空气域模型，最终得到中冷器换热模型，如图 3 所示。CFD 模型如图 4 所示。

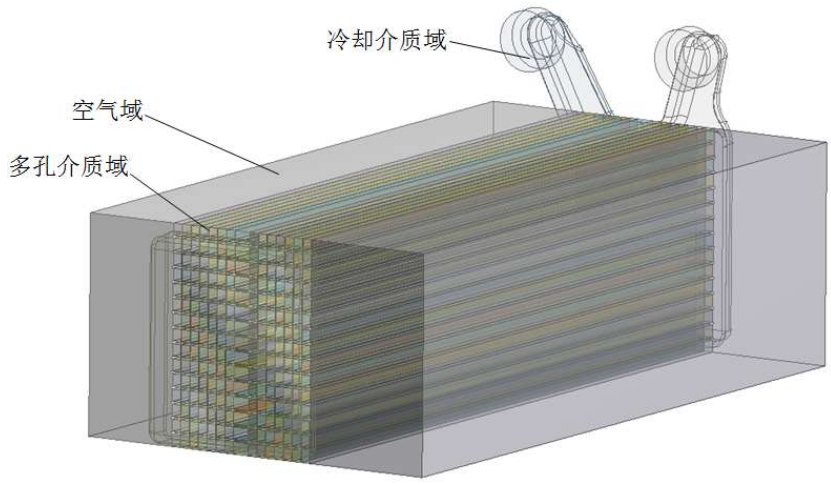



图 3:　中冷器换热模型

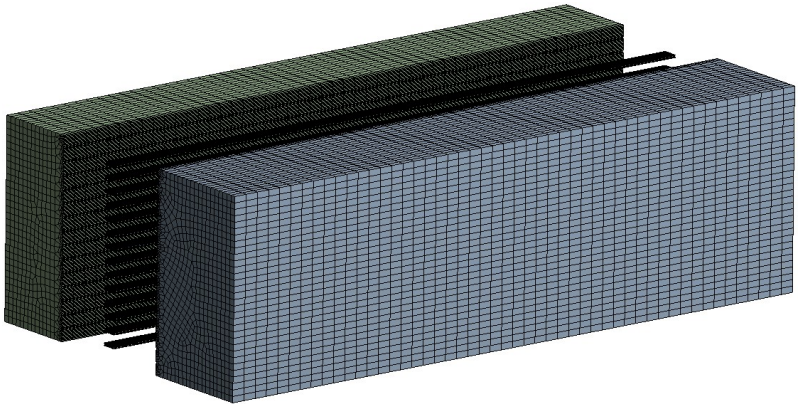
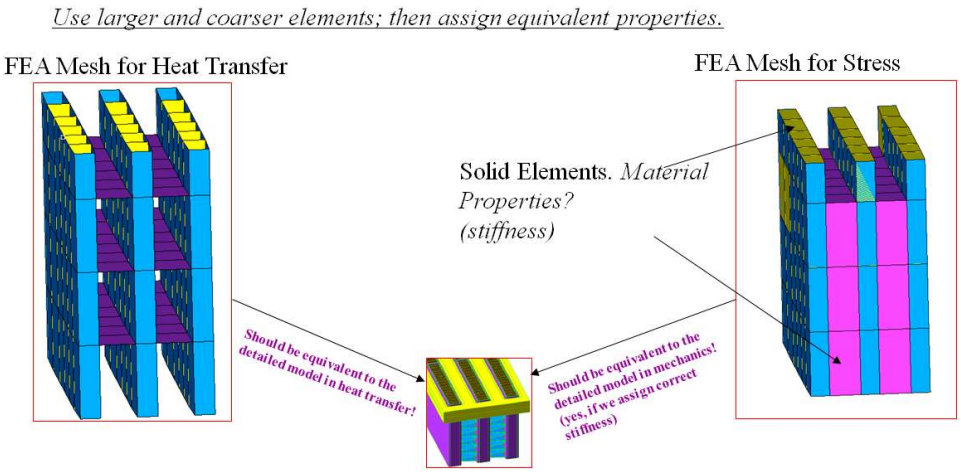


图 4:　CFD 网格模型

## 2.4 FEA 模型建立

对于集成中冷器进气歧管的 FEA 模型的建立，主要在于中冷器中鳍片模型的建立，对于鳍片，我们用等效的各向异性材料来定义。如图 5 所示：



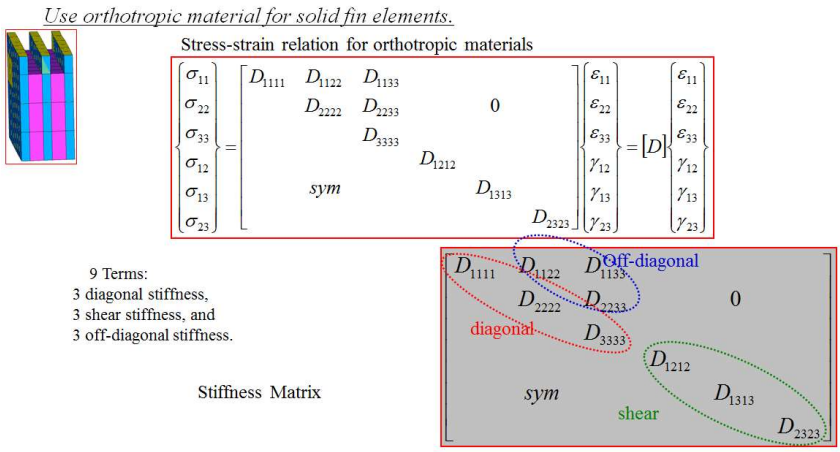



图 5:　鳍片各向异性材料定义

# 3. 数值映射与计算结果

## 3.1 中冷器计算结果分析

计算采用稳态计算模式，连续性方程采用中心差分格式，压力和速度算法选择 SIMPLE，湍流模型采用 K－ε 湍流模型。中冷器温度场结果如图 6 所示，

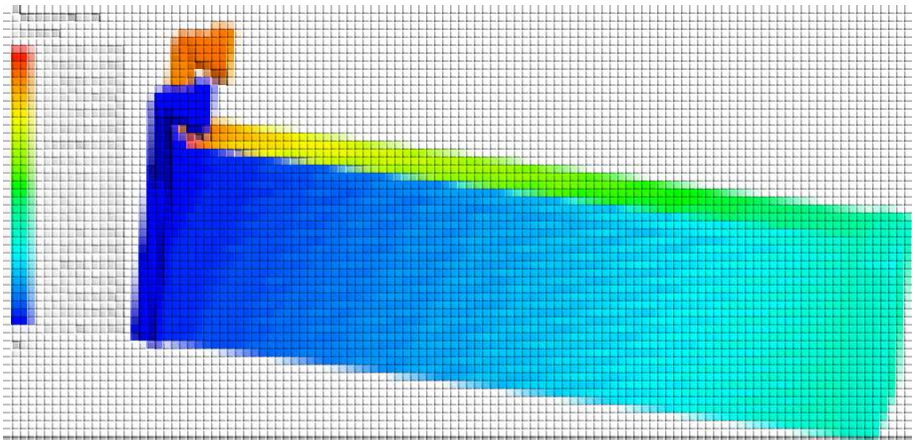


图 6:　中冷器温度场

定义中冷器中心纵截面为 Z=0 的平面，不同截面空气流域温度场分布云图如图 7~9 所示。由图中可以看出，远离水室进出口一侧的空气出口温度明显低于靠近水室进出口一侧，流经中冷器芯体中心的空气温度减小值较上下两侧更大，而随着出口处空气沿 Z 轴的进一步流动，冷热空气逐渐交汇混合，气侧温度分布趋于均匀。

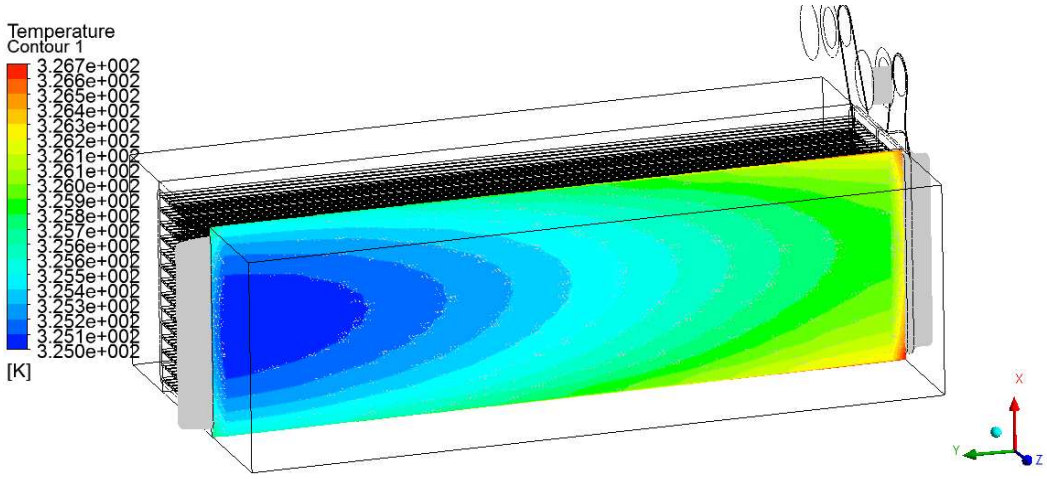



图 7： Z=35mm 温度场分布

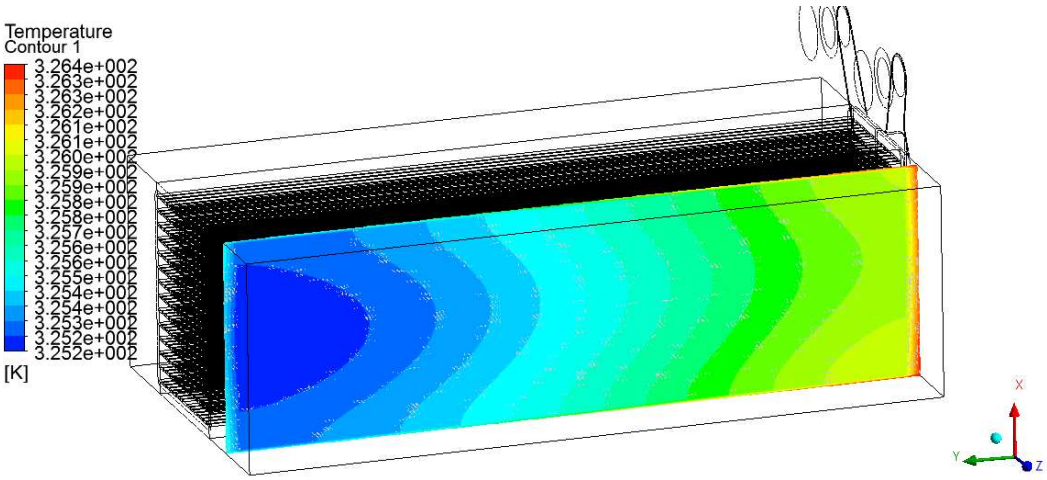



图 8： Z=55mm 温度场分布

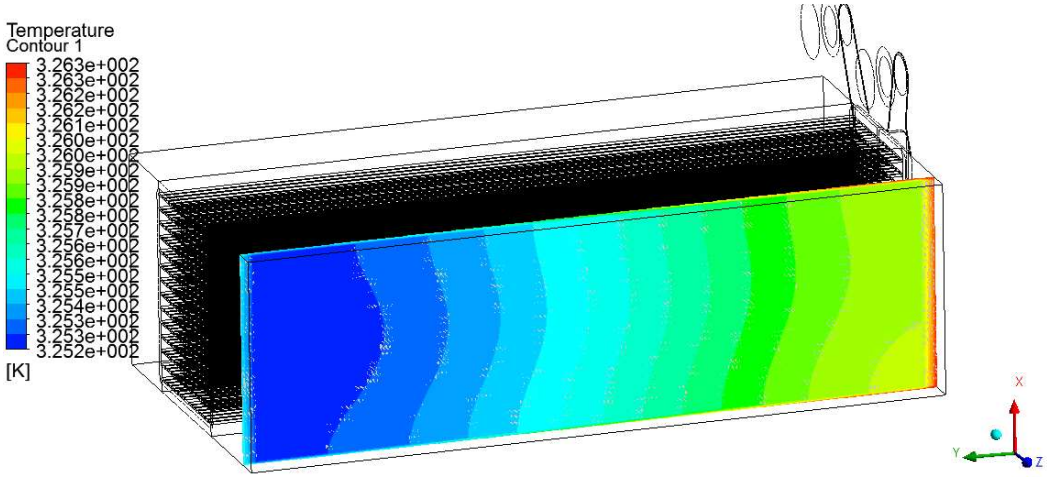



图 9： Z=75mm 温度场分布

## 3.2 CFD 温度场映射到歧管

CFD 温度场映射到歧管上， 同时 system coupling 来实现热固双向耦合分析。如图 10 所示：

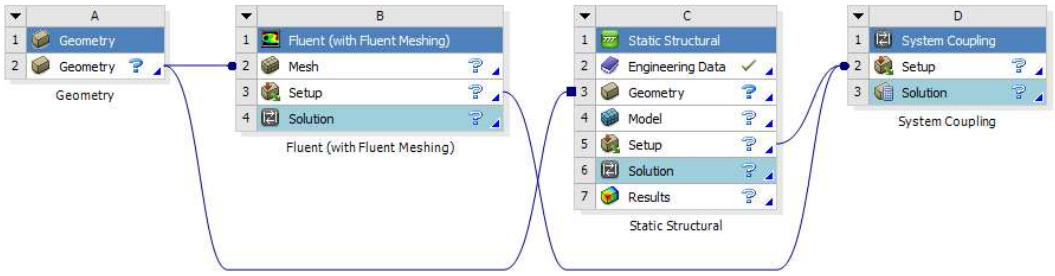



图 10： 温度场映射及热固耦合

通过温度场映射和热固耦合计算后，歧管温度场如图 11，

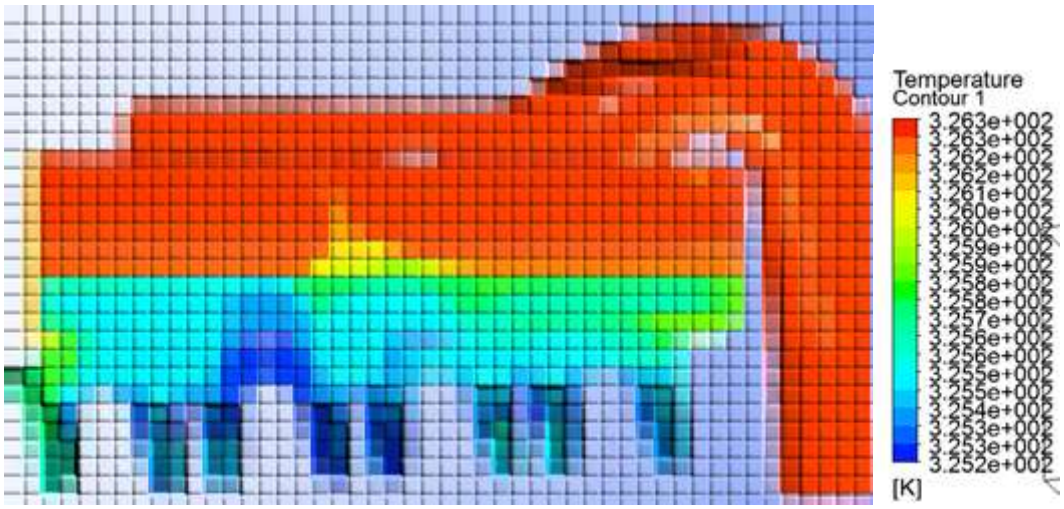



图 11： 歧管内部温度场分布

歧管出口温度场分布如表 1 所示：

| Runner | Average temperature （° c） |
|---|---|
| Runner-1 | 55.40 |
| Runner-2 | 55.14 |
| Runner-3 | 55.31 |
| Runner-4 | 55.76 |
| Temperature distribution | 1.1% |

表 1：歧管出口温度场分布

温度场均匀性计算：TD= (max Cyl - Min Cyl)/Average， 按客户要求温度场均匀性需要小于 3%， 仿真结果满足要求。

歧管结构强度分析如图 12 所示：

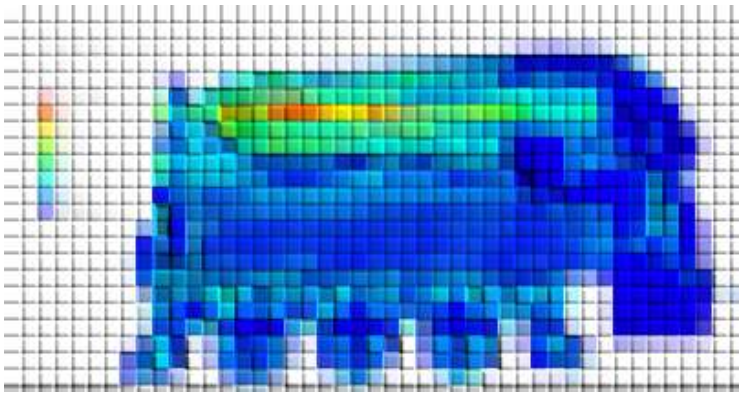


图 12： 歧管最大等效应力

歧管最大等效应力 40MPa, 小于材料许用应力 90MPa， 歧管强度满足材料要求。

## 4. 实验结果验证

通过实验测试得到歧管出口温度如表 2 所示， 从中我们可以看出，仿真和实验高度吻合。仿真方法具有一定代表性。

| Runner | Average temperature （° c） |
|---|---|
| Runner-1 | 58.13 |
| Runner-2 | 57.54 |
| Runner-3 | 58.42 |
| Runner-4 | 58.12 |
| Temperature distribution | 1.5% |

表 2：实验测试歧管出口温度

实验测试结果小于 3%，满足产品设计要求。 与仿真对比，结果非常接近。

同时通过对歧管的强度寿命实验测试， 歧管没有发现破裂，泄露等问题 ，歧管强度完全满足设计要求。也验证了仿真对歧管在温度场下强度分析准确性。

## 5. 结语

本文通过对集成式中冷器进气歧管进行热固耦合分析， 通过与实验测试对比，仿真不仅减少工作量，而且较为准确地计算出温度均匀性，验证了歧管强度性能，为工程设计缩短了周期，节约成本。

## 6. 参考文献

[1] 孙青山著 《一种集成中冷器的增压发动机进气歧管》CN-2013
[2] 王福军编 《计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用》清华大学出版社 2004-9-1