

瓦块式迷宫复合冷却结构的三维热-应力耦合场数值模拟

金涛, 吕智慧, 何立明, 蒋永健

(空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038)

**摘要:** 针对燃烧室新型迷宫复合冷却结构, 采用三维数值模拟方法研究了该冷却结构单片瓦块的热-应力耦合场, 获得其温度场、位移场和应力场的分布规律。研究表明, 采用的瓦块热-应力耦合场数值计算方法具有较高的准确性, 能接近真实地反映该冷却结构瓦块的热应力情况。计算结果表明, 模拟试验环境条件下的迷宫冷却结构强度符合要求, 能满足试验的需要, 且设计较为合理。

**关键词:** 燃烧室; 迷宫冷却结构; 瓦块; 热应力; 耦合场

**中图分类号:** V23      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-3516(2007)02-0004-03

为了提高我国航空发动机燃烧室的冷却技术, 提出了一种燃烧室新型迷宫复合冷却结构, 该冷却结构构思新颖, 集冲击、对流、近似发散冷却技术于一身, 兼具冲击冷却结构, 多层壁冷却结构和席壁冷却结构的优点, 充分利用了冷却空气的潜在冷却能力, 预期可较大地提高冷却效率和降低冷却空气量<sup>[1-3]</sup>。因此, 进行燃烧室迷宫复合冷却结构的结构与强度分析, 研究该冷却结构设计的合理性和可靠性, 并校核其强度, 这对于该冷却结构的研究及其应用是极其重要的, 并可以为我国高效燃气轮机燃烧室冷却技术水平的提高和发展提供技术储备。

迷宫复合冷却结构由3层组成, 参见文献[4]。该结构的冷却概况是2股通道的冷却空气首先流经瓦块式迷宫复合冷却结构的第1层上壁面, 对其进行对流换热, 再从瓦块第1层后部的进气孔进入上冷却通道, 直接冲击到中间承力层上, 对中间承力层有很强的冲击冷却换热作用; 然后该冷却空气沿着上冷却通道向前流动, 与中间层上壁面和第1层下壁面进行对流换热; 其后通过中间层前部的槽缝向下流入下冷却通道, 对席壁的前部有冲击换热作用; 最后沿下冷却通道向后流动, 一方面与席壁上壁面和中间层下壁面进行对流换热, 另一方面冷却空气经席壁编织过程中形成的小孔流出并带走热量, 同时在席壁的下壁面形成1层均匀的气膜, 对席壁外壁面进行冷却保护。瓦块3层总厚度为4.6 mm, 上下2个冷却通道高度都很小, 一般在1.5 mm左右, 因此, 如果受热后变形太大使非常容易堵塞通道, 因而影响冷却效果, 甚至会导致瓦块被烧毁, 所以很有必要对燃烧室迷宫复合冷却结构的单片瓦块进行热-应力耦合场分析, 对瓦块受热后的变形及应力分布有个定量的分析和认识。

## 1 热-应力耦合场的数值计算

由于结构体的不同部分的形状、热膨胀系数不匹配, 在加热时彼此的膨胀程度不一致, 从而会导致热应力的产生。热应力问题实际上是热和应力两个物理场之间的相互作用, 故属于耦合场分析问题。本文运用有限元分析程序 ANSYS, 对瓦块式迷宫复合冷却结构进行了热-应力耦合场分析。ANSYS 提供了2种分析热应力的方法<sup>[5]</sup>: 直接法和间接法。本文采用的是间接法, 将通过 FLUENT 软件计算得到的温度场和压力场分布结果导入 ANSYS 中进行热应力分析, 得到瓦块的应力场和位移场分布。

### 1.1 计算网格

采用非结构化网格来划分整个瓦块的计算域, 以四棱柱网格作为基本单元。为了使数值模拟的计算域

收稿日期: 2005-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276070)

作者简介: 金涛(1979-), 男, 湖北武汉人, 博士, 主要从事飞机推进系统气动热力理论与工程研究。



与实际实验情况相一致并方便与之比较,数值模拟中的计算域与试验件的几何尺寸保持一致,并在 FLUENT 软件进行传热流场模拟中,将该冷却结构置于燃烧室火焰筒的实际流场中,在迷宫复合冷却结构瓦块的外层上壁面二次流通道和内壁面主流通道分别加上进口段和出口段,以便接近于实际情况。FLUENT 软件和 ANSYS 软件划分的网格可以通用,网格划分工作是整个数值计算中的核心部分,网格划分的好坏将直接影响计算的精度好坏和速度的快慢。因此在瓦块划分网格过程中,采取有开孔的位置网格较密,在远离气孔部分网格较粗的生成方法,分区类型生成网格可在不影响准确模拟人流和出流效应的同时能有效地减少网格数目。瓦块的 3 层结构中,主要是席壁层开孔数目多,大约有 2 000 多个孔,主要的网格数目集中在此处,划分的计算网格数为 9 000 000 左右。

### 1.2 边界条件

在瓦块热 - 应力耦合场分析中采用第 3 类边界条件,即在 FLUENT 软件对瓦块进行传热流场分析时,给定的边界条件和实验条件基本相同:外侧壁 2 股通道和内侧壁主流通道进口为速度进口边界,速度分别为 39.5 m/s 和 20.9 m/s。进口紊流度设为 1%。2 股气流和主流温度分别为 340℃ 和 500℃。瓦块式迷宫复合冷却结构内侧主流通道出口设定为压力出口边界条件。进口段壁面以及内部流动通道壁面均设定为无滑移和无渗透的物面边界条件,近壁区网格采用壁面函数法,对称壁面处定为对称边界条件。用 ANSYS 软件来进行热应力分析时,其边界条件采用求得的节点温度、换热系数和压力作为体载荷施加到结构应力分析中来进行耦合的,也属于第 3 类边界条件。

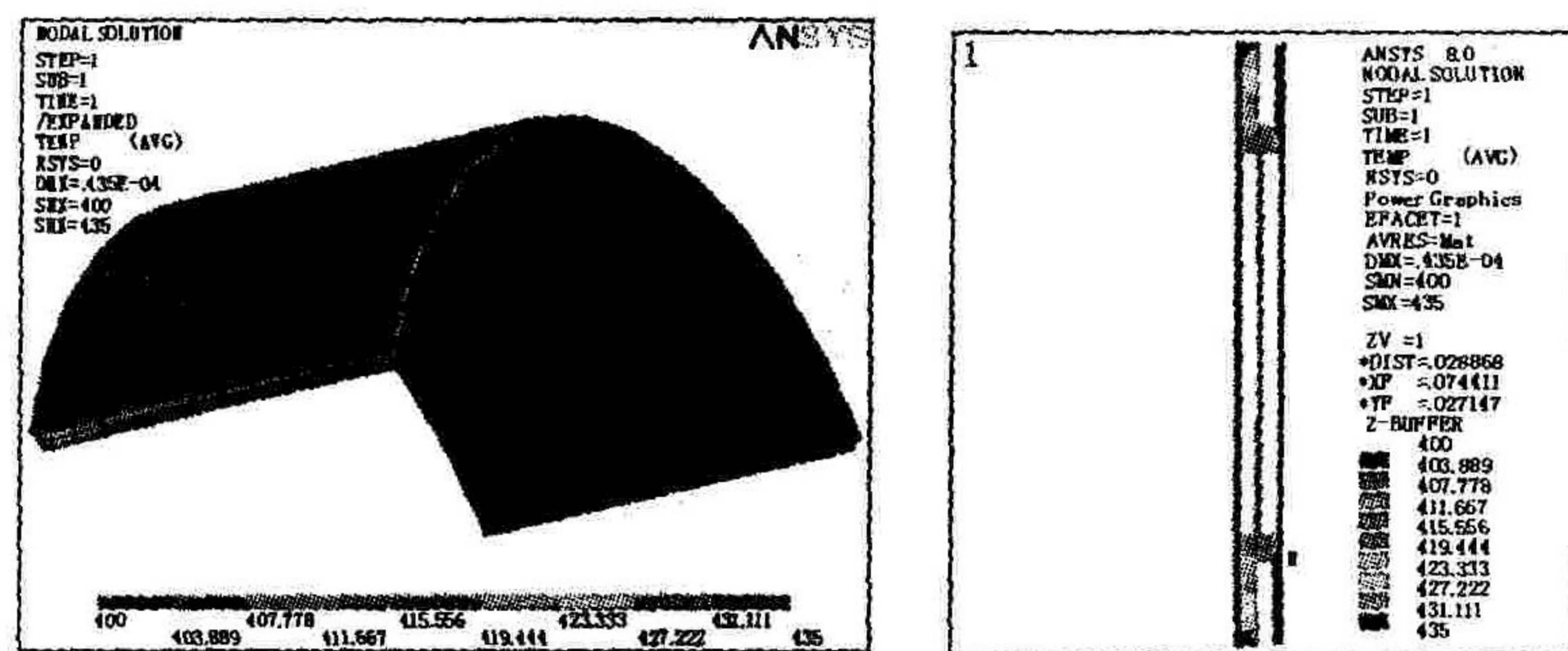
### 1.3 换热分析

该迷宫复合冷却与冷却空气和高温燃气的换热主要有以下 4 类:①热传导<sup>[6]</sup>;②热对流,热对流用牛顿冷却过程来描述<sup>[6]</sup>;③热辐射,系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬 - 波尔兹曼方程来计算<sup>[7]</sup>;④冲击换热<sup>[7]</sup>。

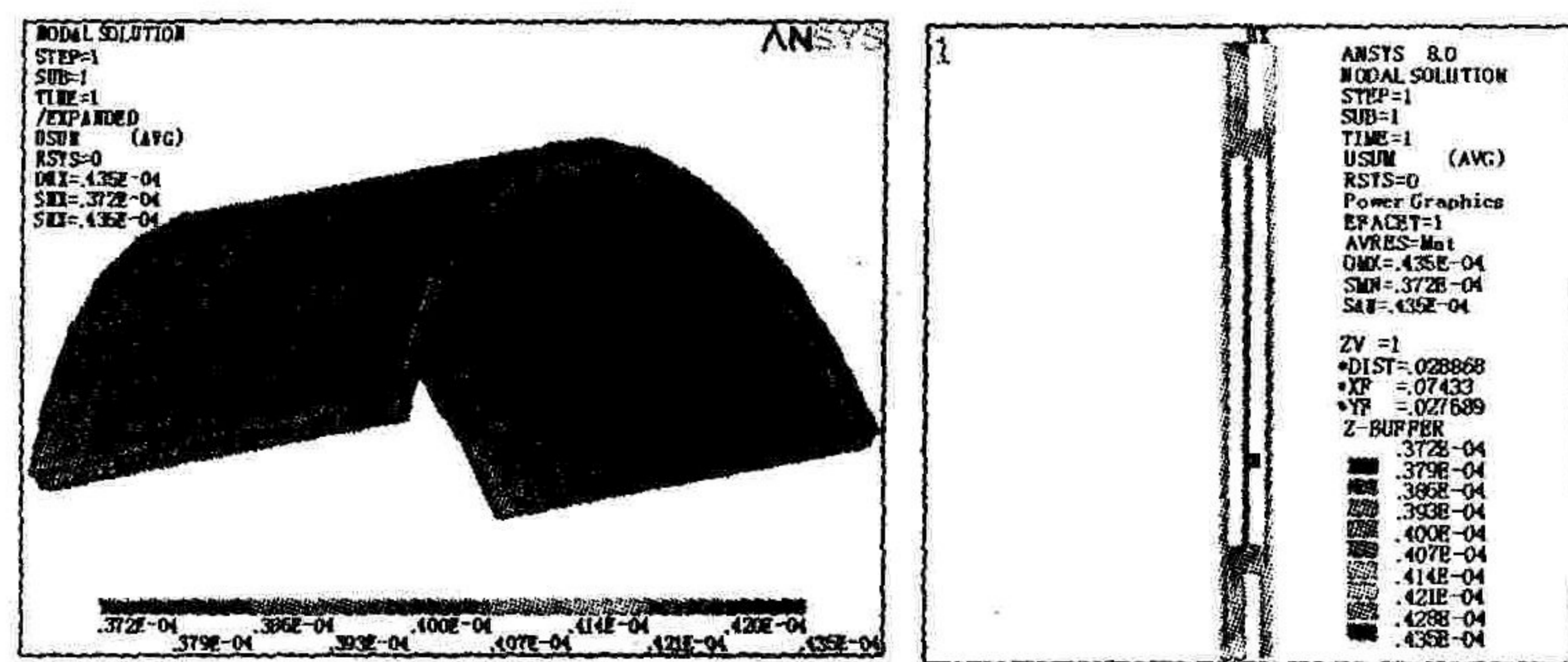
## 2 计算结果与分析

根据上述方法,对新型迷宫复合冷却结构的一个瓦块进行了热 - 应力耦合场分析,瓦块热 - 应力耦合场计算的材料性能参数为:弹性模量为 220 GPa,泊松比为 0.28,线膨胀系数为  $1.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,导热系数为 30 W/(m · °C)。计算模型的尺寸均采用国际单位制,其计算所得结果见图 1、图 2、图 3。

从图 1 可以看出,在中间层与席壁层相连处的部位温度梯度较大,在此区域温度变化了 28℃ 左右,由此可预测此处变形将会较大。从图 2 可以验证上述预测,从瓦块合位移场分布等值线图可以看到,正是在中间层与席壁层相连接部位的合位移相对较大,但都没有超出允许范围。图 3 是瓦块的等效应力场等值线图,从图中可以看到,在瓦块的 3 层之间的连接处的 3 个方向的应力值都较大,这与



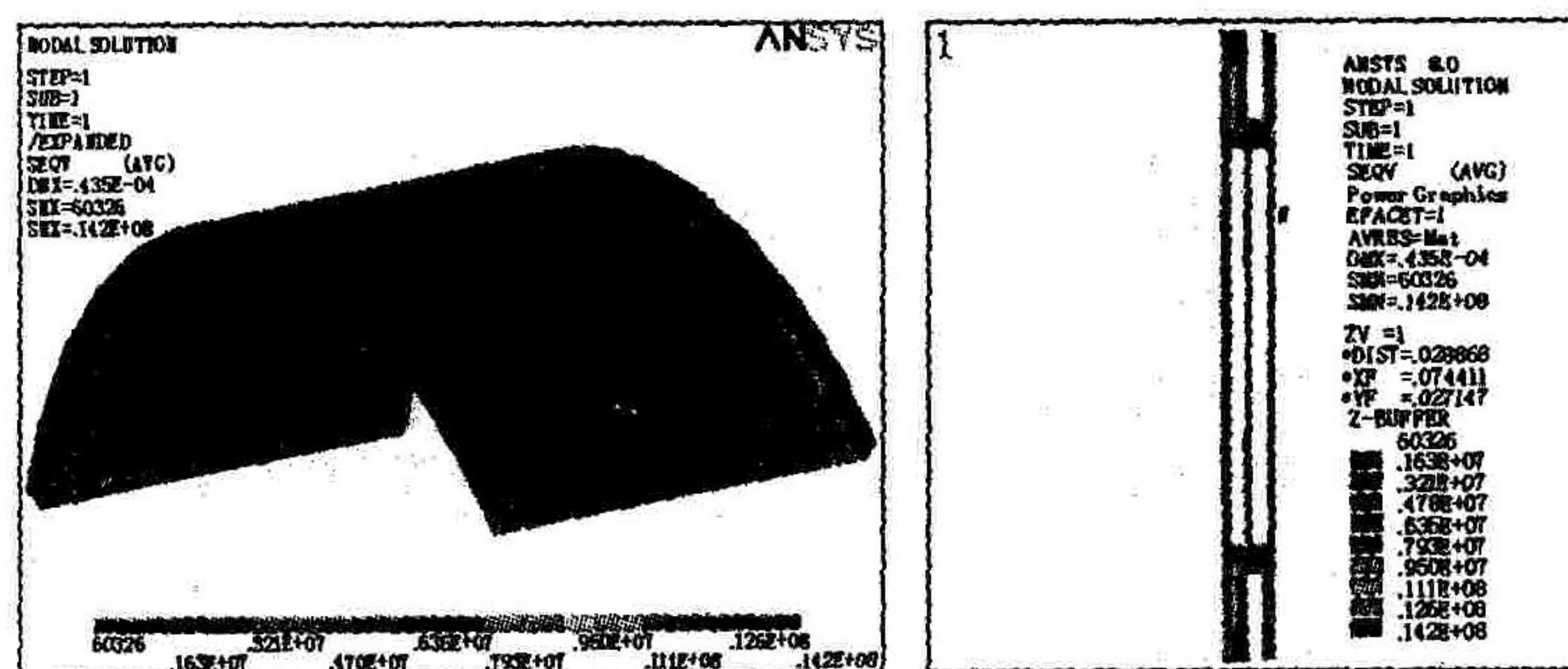
(a) 三维温度场分布等值线图 (b) 截面温度场分布等值线图  
图 1 瓦块温度场分布等值线图



(a) 三维合位移场分布等值线图 (b) 截面合位移场分布等值线图  
图 2 瓦块合位移场分布等值线图



实际情况相一致,但都没有超出结构强度允许的数值,说明该冷却结构瓦块在与试验环境相近的模拟环境条件下的结构强度符合要求,能满足试验的需要,结构较为合理。从图1-图3所示的数值计算结果可以看出模拟瓦块的热-应力耦合场得到的各等值线分布规律与真实情况相符合,说明用这种数值模拟方法研究该冷却结构瓦块的热-应力耦合场准确性高,能较真实地反应该结构瓦块的热-应力情况,具有较高的实验参考性,可以为燃烧室新型迷宫复合冷却结构的设计和试验研究提供依据。



(a) 三维等效力场等值线图 (b) 截面等效力场等值线图

图3 瓦块等效力场等值线图

### 3 结论

1) 在与真实试验条件相近的模拟环境条件下,通过计算所得到的该新型迷宫复合冷却结构瓦块的位移量最大值为0.0435 mm、应力最大值为 $1.42 \times 10^7$  Pa,均在试验环境条件下的结构强度允许范围之内,说明该冷却结构瓦块的结构合理,能满足试验的需要。

2) 用本文介绍的方法进行瓦块式燃烧室新型迷宫复合冷却结构的热-应力耦合场数值计算具有较高的准确性,能真实地反应该结构瓦块的热-应力情况。

3) 模拟的情况与实际情况不可避免地存在一定的差异,因此该瓦块式迷宫复合冷却结构的结构强度和可靠性需要在今后的试验中进行进一步的验证。

#### 参考文献:

- [1] 何立明,张立志,原和朋,等. 燃烧室新型迷宫复合冷却结构的设计与换热分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005,6(5):1-4.
- [2] 李名魁,何立明,蒋永健,等. 燃烧室新型迷宫复合冷却结构冷流入射角对冷却性能影响的数值研究[J]. 机械科学与技术, 2006,25(5):539-541.
- [3] 李名魁,何立明,原和朋. 燃烧室新型迷宫复合冷却结构的壁温计算[J]. 机械科学与技术, 2006,25(10):1194-1197.
- [4] 蒋永健,何立明,李名魁,等. 燃烧室新型迷宫复合冷却结构冷却比较[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006,7(3):10-12.
- [5] 张朝晖. ANSYS8.0热分析教程与实例解析[M]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [7] 陈大光. 航空发动机设计手册(第一册)[M]. 北京:航空工业出版社,2000.

(编辑:姚树峰)

Three- Dimensional Thermal- Stress Coupled Field's Numerical

Simulation of the Maze Composite Cooling Structure Tile

JIN Tao, LV Zhi -hui, HE Li -ruing, JIANG Yong- jian

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China)

Abstract : In view of the maze composite cooling structure tile of combustor, a three - dimensional numerical simulation program is adopted to gain the distribution law of temperature field, displacement field and stress field. The research shows that the numerical simulation method adopted has better veracity and can reflect the the's thermal - stress coupled field factually. The calculation result shows that the design of this cooling structure is reasonable, the structural strength can accord with the demands under the condition of simulation experiment environment and meet the experiment's demands.

Key words: combustor; maze cooling structure; tile ; thermal stress; coupled field