



CSTAM 2008-0025

**超燃冲压发动机燃烧室典型异质材料
连接结构的有限元分析**

吴臣武，黄晨光，张坤

中国科学院力学研究所
中国科学院高超声速科技中心

第一届高超声速科技学术会议

2008年12月28-30日 云南·丽江

超燃冲压发动机燃烧室典型异质材料连接结构的有限元分析

吴臣武, 黄晨光, 张坤

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要 针对带主动冷却措施的薄板-热障涂层结构, 求解温度场和应力场。通过比较几个典型的制造参数下的温度和应力特征, 试图给出涂层设计和制造的一些参考依据。结构设计中广泛存在 L-型结构往往导致应力集中和应力奇异性, 有限元离散过程很大程度上影响了 L-型结构角点附件的位移和应力数值解精度。针对圆角结构和异质材料垂直连接的 L-型结构, 开展了系列参数化有限元分析, 给出这类 L-型结构数值计算网格处理的实用化建议和参考。

关键字 涂层, L-型结构, 温度, 热应力, 有限元分析

1 引言

随着计算机技术的普及和计算速度的不断提高, 有限元分析在工程设计和分析中得到了越来越广泛的重视, 已经成为解决复杂的工程分析计算问题的有效途径, 现在从汽车到航天飞机几乎所有的设计制造都已离不开有限元分析计算。有限元分析在机械制造、材料加工、航空航天、汽车、土木建筑、电子电器, 国防军工, 船舶, 铁道, 石化, 能源, 科学研究等各个领域的广泛使用已使设计水平发生了质的飞跃, 主要表现在这样几个方面: 1) 增加产品和工程的可靠性; 2) 在产品的设计阶段发现潜在问题; 3) 经过分析计算, 采用优化设计方案, 降低原材料成本; 4) 缩短产品投向市场的时间; 5) 模拟试验方案, 减少试验次数, 从而减少试验经费等等。在现代飞行器等新型复杂系统工程的热-结构设计中, 同样倚重有限元等数值计算方法来对结构进行温度、位移和应力分析, 为设计提供有力的参考。

燃烧室是冲压发动机核心部件之一。燃料与获得减速增压的来流空气进入燃烧室后混合和燃烧, 要求能最有效地把燃料中的化学能释放出来, 转化为高温燃气的热能, 以提高气流的作功能力。一般来说, 燃气温度越高, 单位质量工质作功的

能力就越大。为了提高发动机的推力和效率, 必然要提高燃烧室的燃气温度。现在的冲压发动机燃烧室温度已达2500K左右^{[1][2]}, 现有的材料还不能承受如此高的温度; 现在冲压发动机工作时间的大幅增加, 冲压发动机燃烧室的工作环境越来越恶劣, 给现有的耐热材料和传统的冷却技术提出了挑战, 这就要求对燃烧室进行更为可靠的热防护。因此, 燃烧室热防护技术成为冲压发动机的关键技术之一^[2]。

结合了主动冷却和热障涂层的双重热防护设计思想^[3,4,5], 可望在很大程度上降低结构热破坏的风险。但是薄板厚度方向较高的温度梯度可能对热障涂层的可靠性提出新的要求。本文将针对这种结构特点, 以有限元法对热障涂层的温度场和变形、应力场进行分析。

有限元计算所给出的数值解, 是对实际物理过程或现象的一种近似描述(逼近), 换句话说, 数值解必然会存在误差。

有限元计算误差主要包括离散误差和计算机舍入、截断误差^[6,7,8]。其中, 计算机舍入、截断误差是计算机有限的有效位数(字长)所引起的, 其中舍入误差具有随机性, 主要靠增加有效位数(如采用双精度计算)和减少运算次数(如采用有效

的计算方法和合理的程序结构)来控制。这种误差除与有效位数直接有关外,还与结构(最终表现为刚度矩阵)的性质有密切的关系。例如结构在不同方向的刚度相差过于悬殊,可能使最后的代数方程组成为病态,从而使解答的误差很大,甚至导致求解失败。

离散误差是指一个连续的求解域被划分成有限个子域(单元),由单元的试探函数近似整体域的场函数所引起的误差。

在有限元计算中,若单元的插值函数是完备而协调的,当单元尺寸不断缩小而趋于零时,有限元解将趋于真正解。在有些情况下,如果用于有限元场函数近似解的多项式展开能精确地拟合真正解,则在有限数目的单元划分(甚至仅仅是一个单元)的条件下,也能得到精确的解答。例如真正解是二次函数,若有限元的插值函数也包括了二次的完全多项式,则有限元解就能得到精确的解答。

以上论述可以帮助我们决定有限元解的收敛速度。因为精确解总可以在域内一点*i*的邻域内展开为一个多项式,例如平面问题中的位移*u*可以展开为^[6]

$$u = u_i + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i \Delta x + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_i \Delta y + \dots \quad (1)$$

如果在尺寸为*h*的单元内,有限元解采用*p*阶完全多项式,则它能局部地拟合上述Taylor展开式直到*p*阶。由于 $\Delta x, \Delta y$ 是*h*的量级,所以位移解*u*的误差是 $O(h^{p+1})$ 。例如平面问题采用3结点三角形单元,插值函数是线性的,即*p*=1,所以*u*的误差是 $O(h^2)$,并可预计收敛速度也是 $O(h^2)$ 的量级,也就是说将有限元网格进一步细分,使所有单元尺寸减半,则*u*的误差是前一次网格划分误差的 $(1/2)^2=1/4$ 。

类似的论证可以用于应变,应力以及应变能等误差和收敛速度的估计。例如应变是由位移的*m*阶导数给出的,则它的误差是 $O(h^{p-m+1})$,当平面问题采用3结点三角形单元时,*p*=*m*=1,则应变的误差估计是 $O(h)$ 。

由上述误差分析可知,应力的误差与单元的尺寸成正比,位移的误差与单元的

平方成正比。由此可见,单元划分得越小,计算结果精度越高;但另一方面,单元数越多,计算工作量也就越大。因此,必须根据精度要求确定网格的疏密。一般来说,在边界曲率较大的部位,单元应该小些,在边界曲率比较平缓的部位,单元可大些。而对于广泛存在的L-型结构而言,带圆角的结构将带来局部应力集中,理想的无圆角的L-型结构将导致应力奇异性。对于这类结构的有限元分析,网格划分往往凭经验或简单尝试,并没有一些规律性的阐述作为参考。本文将针对这种结构特征进行相关分析,试图给出其有限元离散的参考依据,提高计算性能和分析质量。

2 涂层热-结构分析

2.1 薄板-隔热涂层结构及分析

如图1所示,热障涂层包含NiCrAlY粘结层(约0.06-0.1mm)和ZrO₂面层(约0.25-0.35mm);薄板厚度约1mm。本文研究结构取面内尺寸(板宽度×长度)为4.5mm×45mm,并建立坐标系OXYZ如图1所示。

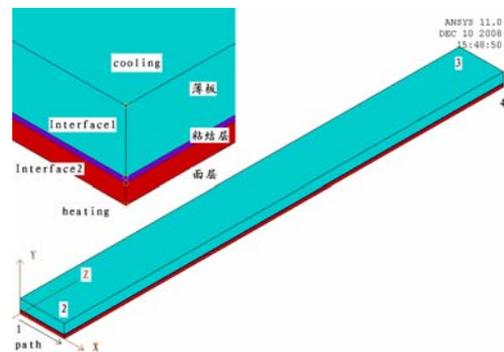


图1 薄板-热障涂层结构示意图

薄板涂层体系在热障涂层面层表面受到燃气的加热,其边界条件为:

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_1 (T - T_{gas}) \Big|_{y=0} \quad (2)$$

薄板表面受到燃油的冷却,其边界条件为:

$$-k_3 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_2 (T - T_{fuel}) \Big|_{y=0} \quad (3)$$

其中, k_1 和 k_3 分布表示面层ZrO2 和薄板材料的热传导系数; $h_1 = h_1(z)$ 表示面层与燃气的对流换热系数(本文约 816-838Wm⁻²K⁻¹), $h_2 = h_2(z)$ 表示薄板与燃油的对流换热系数(本文约 1315-1465Wm⁻²K⁻¹), $T_{gas} = T_{gas}(z)$ 表示燃气温度沿Z向的变化(约 1800K), $T_{fuel} = T_{fuel}(z)$ 表示燃油温度沿Z向的变化(约 406-423K), 这些参数沿X方向的变化暂未考虑。因此, 在结构垂直于X方向的两个断面作绝热处理。

在薄板、粘结层和面层内部的热传导过程遵循控制方程

$$\rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = k_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial^2 y_i} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial^2 z_i} \right) \quad (4)$$

其中, $i = 1, 2, 3$ 分别表示涂层面层、粘结层和薄板。面层-粘结层, 粘结层-薄板之间的界面满足温度和热流连续条件^[5], 即在界面处:

$$T|_{y \rightarrow y^-} = T|_{y \rightarrow y^+} \quad (5)$$

$$k_i \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y \rightarrow y^-} = k_{i+1} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y \rightarrow y^+} \quad (6)$$

本文的计算中考虑了薄板材料及面层热-物性参数随温度的变化, 而粘结层材料常数随温度的变化暂未考虑。常温下的部分材料常数如表 1 所列。

表 1 部分材料常数^[4 etc]

	薄板	粘结层	面层
C/J (kg°C) ⁻¹	440	440	467
ρ /Kg (m) ⁻³	8440	7000	5730
K /W (m°C) ⁻¹	10.1	10.1	2
α / (°C × 10 ⁶) ⁻¹	11.27	11.27	7.59
E/GPa	224	124	117
ν	0.3	0.23	0.33
σ _s /MPa	700	700	—

2.2 有限元模型及计算结果

在以有限元法求解了温度场之后, 薄板-涂层体系的热应力分析模型如图2所示。为了研究一些部位的自由端的影响, 模型中给定两个正交的侧面以位移对称约束, 另两个侧面作为自由面。

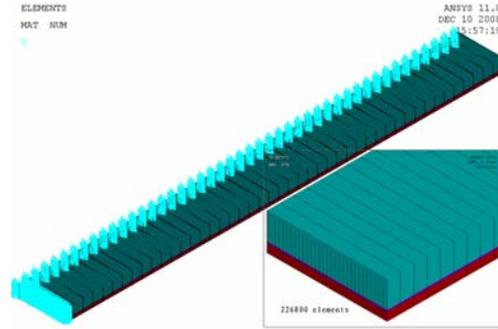


图2 结构有限元网格及位移约束

有限元求解的温度场如图3所示。可见, 温度场沿Z向的变化非常缓慢; 沿Y向的温度梯度为温度梯度的主方向。

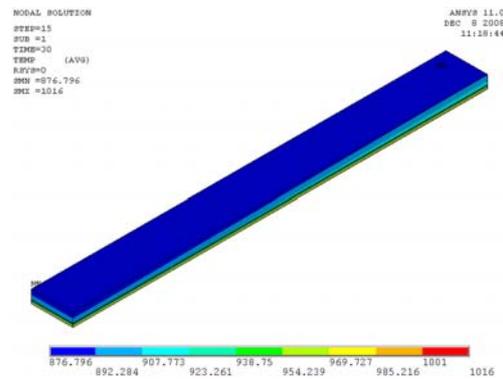


图3 time=30s时刻结构温度场

选取粘结层-薄板界面、面层-粘结层界面温度在Y方向的梯度随时间变化的值, 做变化曲线如图4所示。可见, Y方向的界面温度梯度在初始受热时最高, 并随着时间的推移而逐渐减小。

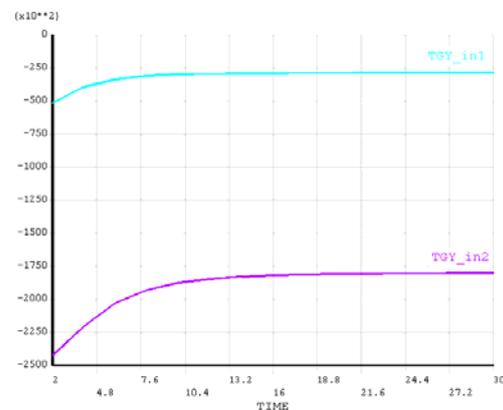


图4 界面1、2温度梯度随时间变化曲线

因此，可取时间为10s时刻的界面应力的典型路径投映如图5所示，其中(a)图表示粘结层-薄板界面应力沿路径path（如图1所示）的投映，(b)图表示面层-粘结层界面应力沿路径path的投映。

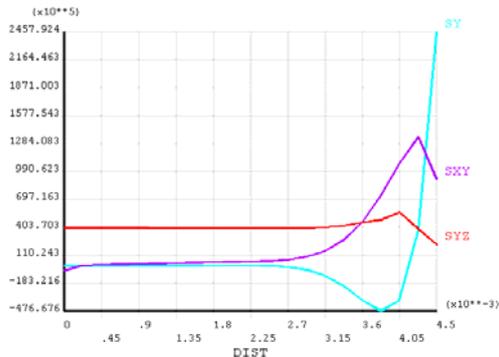


图5 (a) 界面1应力分量在path上的投映 (t=10s)

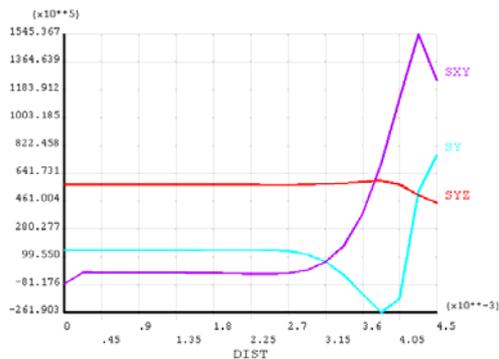


图5 (b) 界面2应力分量在path上的投映 (t=10s)

从图(5)中可以看出，在靠近对称约束端面的界面上界面应力比较均匀，在靠近自由端面的界面上由于边缘效应的影响，界面应力出现峰值区域。且边缘处的界面剪应力分量SKY和界面正应力分量SY表现的应力峰值现象尤其显著。

为了比较不同的面层厚度对结构温度场和应力场的影响，通过分别改变面层厚度到极小值和极大值，计算得到结构特征点温度和界面法向应力SY，如图6、7所示。

图6(a)、(b)和(c)分别给出了面层厚度为0.35mm、0.3mm和0.25mm时的结构特征点温度变化历程，Temp_1表示冷却 (cooling) 面温度，Temp_2和Temp_3分别

表示界面1和界面2温度，Temp_4表示受热 (heating) 面温度。

从图6中的温度对比可以看出，当面层厚度减小时，面层表面温度略有降低，薄板表面温度及界面温度也略有升高。

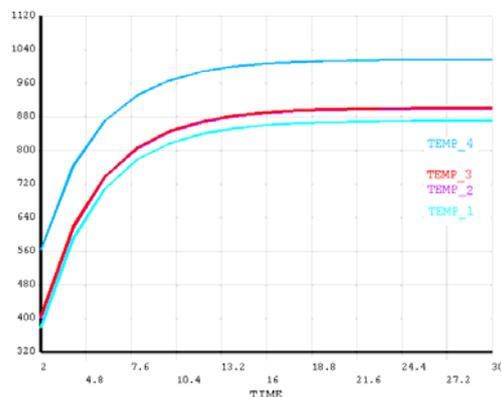


图6 (a) 特征点温度随时间变化 (tc=0.35mm)

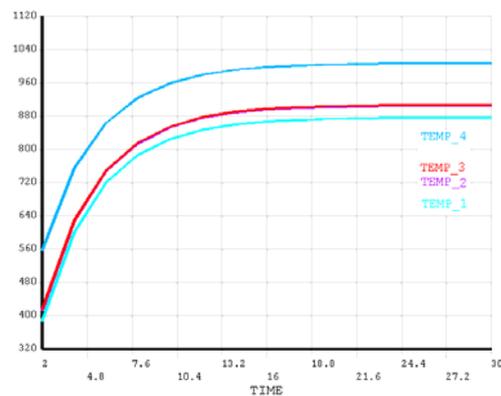


图6 (b) 特征点温度随时间变化 (tc=0.30mm)

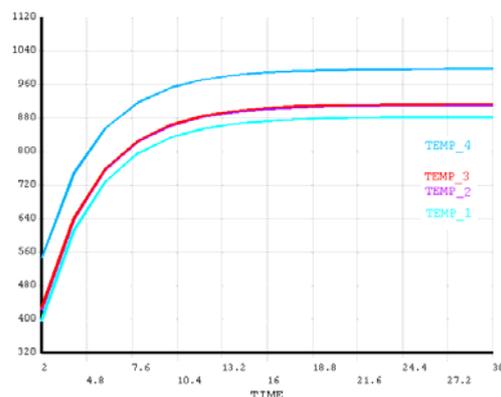


图6 (c) 特征点温度随时间变化 (tc=0.25mm)

图7(a)、(b)和(c)分别给出了面层厚度为0.35mm、0.3mm和0.25mm时的界面法向应力变化历程，interface1表示粘结层-薄板界面，interface2表示面层-粘结

层界面；根据后文将要提到的一个原则，项目名称的最末尾的数字1、2、3、4与图1所示的位置对应，取远离角点2个单元的节点应力值。

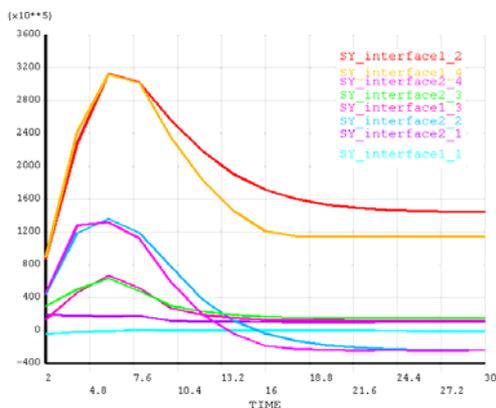


图7(a) 界面特征点法向应力随时间变化($t_c=0.35\text{mm}$)

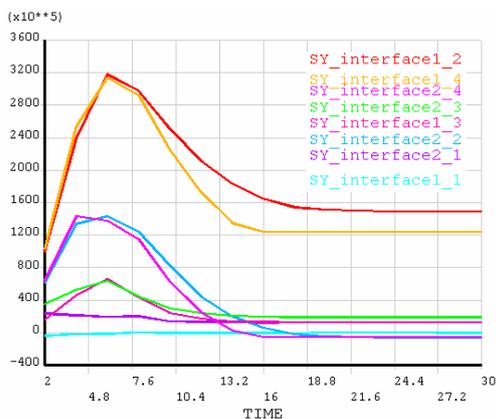


图7(b) 界面特征点法向应力随时间变化($t_c=0.30\text{mm}$)

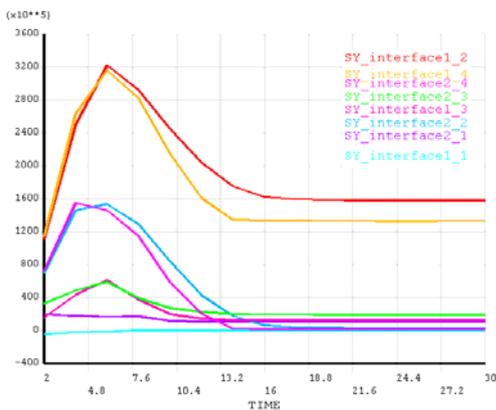


图7(c) 界面特征点法向应力随时间变化($t_c=0.25\text{mm}$)

图7所示的法向应力结果显示，当面层厚度从0.35mm减小到0.25mm时，法向

应力峰值增大约20Mpa，次峰值增大约30Mpa。

但是值得说明的时，由于源数据有限，模型中没能考虑粘结层及面层随温度变化的力学性能参数，所以本文计算得到的应力绝对值，可能并不具备足够的参考意义。

3 L-型结构的网格处理与有限元计算

3.1 带圆角L-型结构

本文针对某系统中L-型结构特征(如图1所示)的热应力问题，采用3种尺度的圆角，进行系列尺度的网格离散，比较、研究其局部应力的收敛特性。

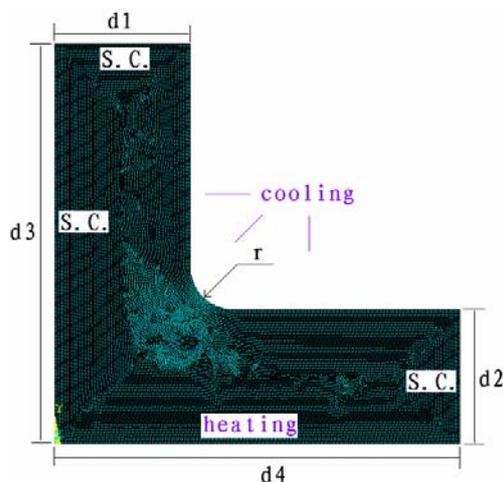


图8 带圆角L-型结构有限元离散及边界条件图示

作为数值算例，图8中 $d_1=d_2=1.5e-3\text{m}$, $d_3=d_4=4.5e-3\text{m}$, r 为圆角半径，系列取值为 $r=0.5e-3\text{m}$, $1e-3\text{m}$, $1.5e-3\text{m}$ 。其中 S.C. 表示施加对称位移约束，以消除圆角之外的其它区域的应力集中特性；这种对称约束位置对应的热边界条件设置为绝热边界条件。

简单起见，引入平面应变假设，这种假设，对于大部分狭长的槽道结构来说有较大的吻合程度。材料弹性模量为200GPa，泊松比为0.3，热膨胀系数为 $13.5e-6$ ，热传导系数为 17.5 W/mK 。对图8中的冷却壁施加 500°C 的温度边界条件，加热壁施加 1000°C 的温度边界条件。通过有限元法求解结构温度分布，然

后求解结构变形-位移场，可以求得结构应力场如图9所示；可见峰值应力出现在圆角与垂直平面的过渡节点上。

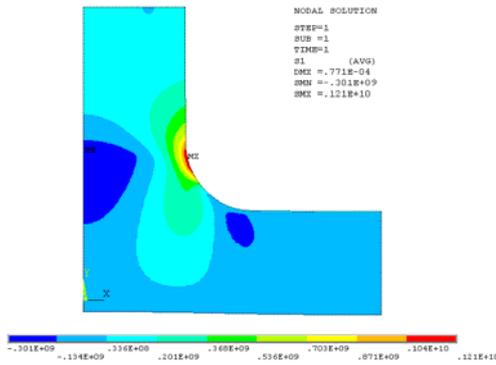


图9 结构第一主应力图示

针对3种不同尺度的圆角及系列网格尺度的模型，计算可得峰值应力随网格尺度的变化趋势如图10(a)所示，可见峰值应力随网格尺度的减小而增大，但是当网格尺度小于圆角半径的10%时，变化区域平缓；并且，圆角半径越大，峰值应力越小。

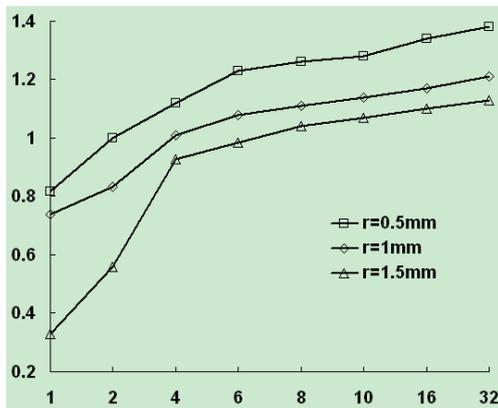


图10(a) 峰值应力随网格尺度的变化趋势图示

对图10(a)所示的峰值应力求解其相对误差，可得相对误差随网格尺度的变化规律如图10(b)所示。可见，当网格尺度小于圆角半径的10%时，峰值应力的相对误差趋于稳定。这意味着，对于圆角附件局部应力的描述，要求该区域的单元尺度尽可能不大于圆角半径的10%。

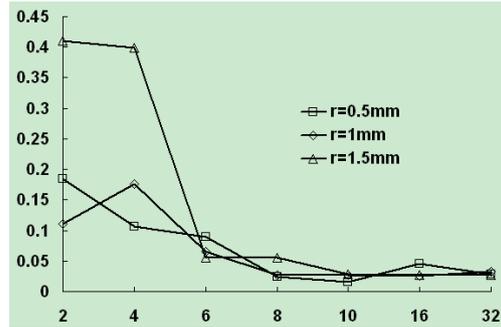


图10(b) 峰值应力相对误差随网格尺度的变化趋势图示

3.2 理想L-型结构

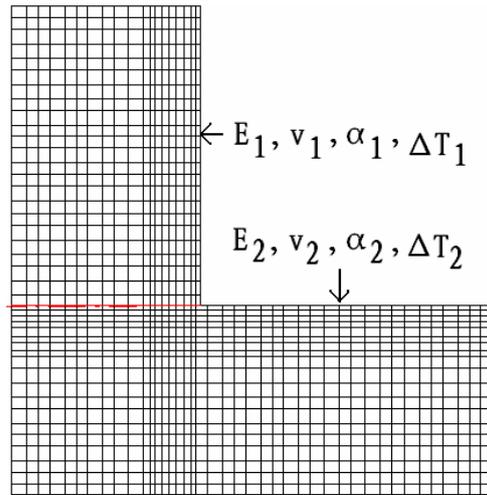


图11 理想L-型结构图示

对于如图11所示的理想L-型结构（垂直连接、无圆角倒角等过渡措施），若连接界面两侧的材料存在差异，则界面应力在界面角点处出现振荡奇异性^{[9][10]}，且近似有 $\sigma_{ij} = \overline{K}_{ij} r^{-s}$ ，其中 r 表示关注点到裂纹尖端的距离； \overline{K}_{ij} 称为等效应力强度因子，量纲为 $[N][m]^{s-2}$ ； s 表示奇异阶次，满足方程

$$\cos(s\pi) - 2 \frac{\alpha - \beta}{1 - \beta} (1 - s)^2 + \frac{\alpha - \beta^2}{1 - \beta^2} = 0 \quad (7)$$

这里 α ， β 为Dundurs参数，对于平面应变问题有

$$\alpha = \frac{E_c(1 - \nu_s^2) - E_s(1 - \nu_c^2)}{E_c(1 - \nu_s^2) + E_s(1 - \nu_c^2)} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{\frac{E_c}{1 - \nu_c^2} \frac{1 - 2\nu_s}{1 - \nu_s} - \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \frac{1 - 2\nu_c}{1 - \nu_c}}{\frac{E_c}{1 - \nu_c^2} + \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}} \quad (9)$$

当界面两侧的材料相同时，以上两个 Dundurs 参数都为 0，从而应力奇异指数为 1/2，等同于单一材料裂纹尖端奇异性指数。当考虑界面两侧材料互异时，由于奇异阶次与涂层-基体弹性失配参数有关，构造奇异元的过程过于复杂。而使用非奇异单元时，界面角点处应力随着网格尺度的减小而升高，一直不收敛。然而，当网格足够精细之后，奇异性只影响包含角点在的 2 个单元的节点应力^[10]。所以

在保证网格足够精细（除角点附近 2 个单元的节点以外的节点应力值收敛）的前提下，可以取从端部开始的第 3 个节点的界面应力作为该点处的应力值。

取材料弹性模量 $E=300\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu_1=0.2$ ； $E_2=200\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu_2=0.255$ 。当界面两侧存在均匀应变差 ($\alpha_1\Delta T_1 - \alpha_2\Delta T_2 = 1\%$) 时，界面法向应力结果如图 12(a) 所示，界面切向应力如图 12(b) 所示。

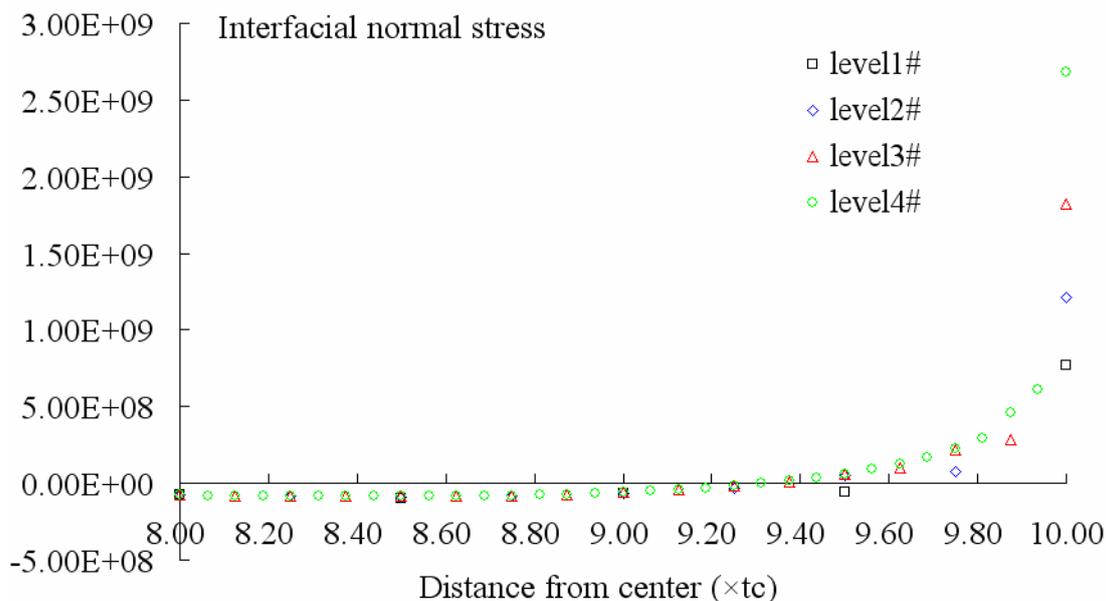


图 12(a) 法向应力收敛趋势示意图

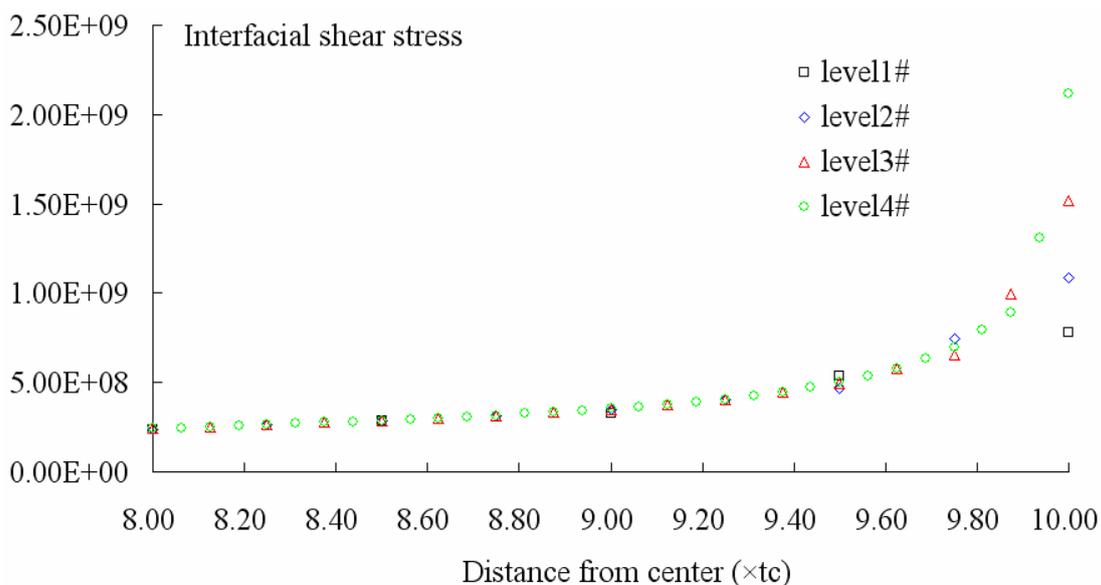


图 12(b) 切向应力收敛趋势示意图

分析结果显示，四级单元尺度都能使远离角点的应力结果收敛（远场解收

敛）。若以 level1# 的单元尺度为单位 1，则 level2#、3# 和 4# 分别为 0.5、

0.25 和 0.125。可见 level1#的结果中，从角点开始的往远处的第 3 个节点的应力值已经收敛（level2#、3#和 4#的结果与其一致），level2#、3#的结果类似。

这表明，虽然界面角点导致了角点应力奇异性，但当网格足够细（满足远场应力、位移结果收敛）时，可以采用倒数第 3 个节点的应力来比较界面角点附近的应力水平，并可以用第 3 个单元及其以外的单元应力值进行插值求解等效应力强度因子等参量，描述角点附近的应力状态。

4 结论

针对 $ZrO_2+NiCrAlY$ 隔热涂层的温度场和应力场分析结果表明，涂层的两个界面在自由端附近，由于边缘效应将出现界面应力峰值区域；当面层厚度在加工误差的极限尺寸内变化时，结构温度场将略有差异，界面应力峰值变化约在 20-30MPa 左右。

针对圆角结构和异质材料垂直连接的 L-型结构的有限元分析结果表明：对于带圆角的 L-型结构而言，当网格尺度小于圆角半径的 10%时，节点峰值应力相对误差基本上趋于稳定值；对于理想 L-型结构而言，角点处的应力随着网格尺度的减小而无限增大，但是当远场解收敛时，远离角点 2 个单元以外的节点满足收敛条件。

参考文献

- 1 任加万, 谭永华, 冲压发动机燃烧室热防护技术, 火箭推进, 2006, 32(4): 38-43.
- 2 贺武生, 超燃冲压发动机研究综述, 火箭推进, 2005, 31(1): 29-32.
- 3 隆永胜, 刘初平, 白菌尘, 陈德江, 超燃冲压发动机燃烧室冷却结构研制, 首届全国航空航天领域中的力学问题学术研讨会论文集(下册), 2004-09-18~20, 成都, 2004.119-121.
- 4 D.R. Clarke and C.G. Levi, MATERIALS DESIGN FOR THE NEXT GENERATION THERMAL BARRIER COATINGS, Annu. Rev. Mater. Res., 2003, 33: 383 - 417.
- 5 TANIGAWA Y., AKAI T., KAWAMURA R., OKA N, Transient heat conduction and thermal stress problems of a nonhomogeneous plate with temperature-dependent material properties, Journal of thermal stresses, 1996, 19: 77-102.
- 6 O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, *The Finite Element Method. Fifth edition. Volume 1: The Basis.*, Butterworth-Heinemann, 2000
- 7 Pearce B F. Johnson W A and Siskind. Analytical Study of Approximate Longitudinal Transfer Functions for a Flexible Airframe. AD-283978. 1962
- 8 IBABUSKA, A feedback finite element method with a posteriori error estimation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1987, 61: 1-40.
- 9 王建华, 杨磊, 沈为平, 有限元后验误差估计方法的研究进展, 力学进展, 2000, 30:175-190.
- 10 J.W. Hutchinson, and Z. SUO. Mixed Mode Cracking in Layered Materials. Advances in Applied Mechanics, 1992, 29:63-191.
- 11 Iancu, O.T., Non-singular wedge combinations at the free edge of a brazed ceramic-metal joint, Computers & Structures, 1989, 33 (3): 873-878.

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON THE JOINTED STRUCTURES OF HETEROGENEOUS MATERIALS USED IN SCRAMJET COMBUSTOR

Wu ChenWu, Huang ChenGuang, Zhang Kun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: Aimed at the TBC on the thin plate cooled with fuel, the transient temperature and thermal stress are calculated. By comparing the stress pattern under some typical structural parameters, references are provided for designing and fabricating such structure. There are a great many L-shape structures in modern designing, which induce stress concentration and singularity. The dependence of the discretization error on the mesh refinement of such structures of fillet and connection point is of

particular evidence. Aimed at such L-shape structures, a series of parametrical Finite Element Analyses have been done to obtain some knowledge of utility.

Keywords: coating, L-shape structures, temperature, thermal stresses, FEA