

文章编号:1007-4708(2009)05-0653-06

自适应无网格热弹塑性接触模型研究

张 征, 刘 更*, 刘天祥, 佟瑞庭

(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘 要:提出一种自适应无网格热弹塑性接触求解模型,求解接触问题的线性规划-增量初应力法与基于应变能梯度的自适应无网格法相结合,给出了模型计算理论和算法实现。通过圆柱体与弹塑性平面热弹塑性接触算例对模型进行验证。对是否考虑材料应变硬化,是否考虑摩擦力和热输入,是否考虑材料屈服强度温度相关等情况的两种算例进行了讨论。结果表明,该模型能有效地求解考虑不同情况下的热弹塑性接触问题,在较真实地模拟接触状况的同时,具有较高的计算精度和计算效率。

关键词:热弹塑性接触;自适应无网格法;屈服强度温度相关

中图分类号:TP311 **文献标识码:**A

1 引 言

在接触摩擦过程中,会产生摩擦热^[1]。在热力载荷、相对滑动速度、摩擦系数及接触表面形貌等因素作用下,模型局部可能产生表面闪温而出现热软化现象^[2],材料属性包括弹性模量、屈服强度、热膨胀系数、热传导率和泊松比因温度升高而变化,产生塑性变形和软化,其中屈服强度和弹性模量受热影响最大^[3]。材料屈服强度往往因接触体温度的升高而降低,从而较早出现塑性变形,这就是工程材料的屈服强度温度相关特性^[4]。早先对热接触力学的研究仅局限在热弹性^[5]或热弹性-理想塑性^[4]的领域,Liu等^[6]利用有限元法提出了考虑热力耦合应力场屈服的粗糙表面热弹塑性接触模型。而无网格法^[7]免除了定义在求解区域上的网格结构,仅需结点信息,采用结点权函数表征结点及其影响域内的物理和力学量,易于结点的添加和删除,便于自适应分析^[8-12],并在接触力学计算中体现出比有限元法更佳的计算特性^[13]。

因此,本文运用较成熟的无网格伽辽金-有限元耦合方法(EFG-FECouplingMethod)^[14],建

立了自适应无网格热弹塑性接触计算模型,并考虑到材料屈服强度温度相关的影响,使计算模型更加准确地预测真实热弹塑性接触力学行为。以圆柱体与弹塑性平面的热弹塑性接触为例进行分析,并对自适应加密前后与整体加密接触压力分布、应力分布、温升分布和计算时间进行了对比。

2 模型求解

2.1 热弹塑性接触问题

图1给出了热力耦合表面接触的变形关系。图中 O 为初始轮廓, M 为机械力 P 作用下变形后的轮廓, T 为摩擦热作用变形后的轮廓,为最终轮廓, α 为刚体平动位移, s_0 为表面初始间隙。

采用求解弹塑性接触问题的线性规划-增量初应力法^[14],并引入热效应的影响,对于任意载荷增量 ΔR^m ,热弹塑性问题的离散化系统方程:

$$(K_e - K_p) \cdot \Delta u = \Delta R^m - \Delta R^t \quad (1)$$

式中 Δu 是位移向量, K_e 是弹性刚阵, K_p 是塑性刚阵, ΔR^t 是热载荷增量。由于塑性刚阵 K_p 随着材料

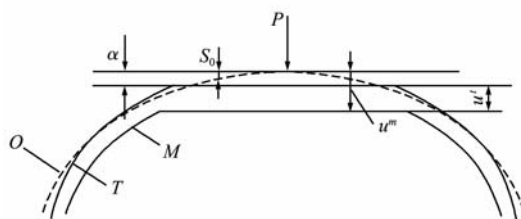


图1 热力接触变形关系

Fig. 1 Thermomechanics contact deformations

收稿日期:2007-04-19;修改稿收到日期:2007-08-20.

基金项目:国家自然科学基金(50475146);教育部高等学校
博士学科点专项科研基金(20030699035);陕西省
自然科学基金(2004E25,2005E26)资助项目.

作者简介:张 征(1979-),男,博士生;

刘 更*(1961-),男,博士,教授,博士生导师
(E-mail:npuliug@nwpu.edu.cn).

塑性变形不断变化,上式不能直接求解,式(1)可改写为增量初应力法的基本迭代形式为

$$\mathbf{K}_e \cdot \Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{R}^m - \Delta \mathbf{R}' + \Delta \mathbf{R}_\sigma \quad (2)$$

式中 $\Delta \mathbf{R}_\sigma = \mathbf{K}_p \cdot \Delta \mathbf{u}$ 称为初应力向量,有

$$\Delta \mathbf{R}_\sigma = \sum \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \cdot \Delta \boldsymbol{\sigma}_0 d\Omega$$

式中

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}_0 = \mathbf{D}_p \cdot (\Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_0)$$

式中 $\mathbf{D}_p$ 是塑性矩阵, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_0$ 分别是屈服高斯点增量形式的应变向量和自由热应变向量。

热弹塑性变形的增量表达式为

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{K}_e^{-1} \cdot \Delta \mathbf{R}^m - \mathbf{K}_e^{-1} \cdot \Delta \mathbf{R}' + \mathbf{K}_e^{-1} \cdot \Delta \mathbf{R}_\sigma = \Delta \mathbf{u}_e^m - \Delta \mathbf{u}_e' + \Delta \mathbf{u}_p \quad (3)$$

式中 $\Delta \mathbf{u}_p$ 是塑性位移增量, $\Delta \mathbf{u}_e^m$ 和 $\Delta \mathbf{u}_e'$ 分别是弹性机械位移增量和由热效应引起的弹性位移增量,有

$$\Delta \mathbf{u}_e^m = \mathbf{K}_e^{-1} \cdot \Delta \mathbf{R}^m = \mathbf{A}^m \cdot \Delta \mathbf{R}^m \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{u}_e' = \mathbf{K}_e^{-1} \cdot \Delta \mathbf{R}' = \mathbf{K}_e^{-1} \cdot \mathcal{H} \cdot \Delta \mathbf{R}^m = \mathbf{A}' \cdot \Delta \mathbf{R}^m \quad (5)$$

式中 $\mathbf{A}^m$ 是机械变形的影响函数矩阵^[14], $\mathbf{H}$ 是与等效热结点力与表面结点力相关的函数, $\mathbf{A}'$ 是热影响函数矩阵^[4]。

在载荷增量 ΔP_j 作用下,第 j 增量步的位移平衡方程和力平衡方程可写成:

$$\begin{cases} -(\Delta \mathbf{u}_{ej}^m - \Delta \mathbf{u}_{ej}') + \Delta \alpha_j \cdot \mathbf{e} + \mathbf{y}_j \cdot \mathbf{I} = \mathbf{s}_{j-1} + \Delta \mathbf{u}_{lj} \\ \Delta \mathbf{R}_j^T \mathbf{e} = \Delta P_j \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\Delta \alpha_j$ 是刚体平动位移, $\mathbf{y}_j$ 是变形后的表面间隙向量, $\Delta \mathbf{R}_j^m$ 是第 j 增量段的结点接触压力, $\mathbf{s}_{j-1}$ 是第 $(j-1)$ 增量段迭代结束时的表面间隙,在第 j 增量段作为初始间隙, $\mathbf{e}$ 是单位向量, $\mathbf{I}$ 是单位矩阵。

接触条件:

$$\begin{cases} \text{当 } y_i = 0, R_i \geq 0 & \text{在接触区域内} \\ \text{当 } y_i > 0, R_i = 0 & \text{在接触区域外} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

式中 N 是表面上可能接触结点的数目。

对平面应变热接触问题,应力向量为

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_e(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) = \mathbf{D}_e \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{D}_e \boldsymbol{\varepsilon}_0 \quad (8)$$

式中 $\mathbf{D}_e$ 是弹性矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是应变向量, $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 称为自由热应变向量。对于平面应力问题, $\mathbf{D}_e \boldsymbol{\varepsilon}_0$ 的求解:

$$\mathbf{D}_e \boldsymbol{\varepsilon}_0 = \frac{E\theta T_a}{1-\nu} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中 θ 是热膨胀系数, E 和 ν 分别是杨氏模量和泊松比。对于平面应变问题,式(9)中的 E, ν 和 θ 可分别用 $E/(1-\nu^2), \nu/(1-\nu)$ 和 $(1+\nu)\theta$ 代替, T_a 指无网格法背景网格高斯积分点的平均温升为

$$T_a = \sum_{i=1}^{N_p} \Phi_i T_i \quad (10)$$

式中 Φ_i 为权函数影响域内的无网格结点形函数, N_p 为权函数影响域内的结点总数。

对于弹塑性计算引入热效应后,对于每一载荷增量产生的应力增量可得

$$\Delta \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_{ep} \cdot (\Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_0) \quad (11)$$

式中 $\Delta \boldsymbol{\sigma}$ 是应力增量, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 是应变增量, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_0$ 是自由热应变向量的增量形式, $\mathbf{D}_{ep}$ 是弹塑性矩阵。

对应的应变增量为

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{total} = \Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_0 = \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^m + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}' - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_0 \quad (12)$$

式中 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{total}$ 是总应变增量, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^m$ 是机械应变增量,包括弹性和塑性应变增量, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}'$ 为热应变增量。

2.2 自适应无网格模型

自适应分析包括误差估计和结点密化,对比文献[9-12]的自适应方法,基于应变能梯度的自适应无网格法在实际计算中不需求解二阶导数和易于程序化等优点,本文采用此后续、 h 型自适应方法求解热弹塑性接触问题。基本思路如下:

(1) 在求出结点位移、应变和应力后,应变能为

$$U = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} \quad (13)$$

式中 U 是应变能,为坐标的函数。对于二维情况,应变能梯度 G^U 为

$$G_x^U = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad G_y^U = \frac{\partial U}{\partial y}$$

(2) 由于二维无网格计算影响域一般为圆形区域,在边界处不易处理,所以在实际计算中采用背景网格进行误差分析,对于背景网格单元 k ,首先找到单元内所有结点 N_k ,单元 k 的平均应变能梯度为

$$G_k^U = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=i+1}^{N_k} |U_i - U_j|}{N_k!} \quad (14)$$

式中 U_i 和 U_j 分别是结点 i, j 的应变能,对应的两结点距离为 l_{ij} 。

(3) 网格密度 D^M 为单位区域内的结点数目:

$$D^M = \frac{N}{A}$$

(15)

N 为背景网格内结点数目, A 为背景网格的面积。

(4) 网格强度 r_d 的求解是自适应计算的关键, 定义为应变能梯度对网格密度的比率, 有

$$r_d = \frac{G^U}{D^M}$$

(16)

将式(15)代入上式, 背景网格单元 k 的平均网格强度为

$$r_d^k = \frac{G_k^U}{N_k/A_k}$$

(17)

遍历所有的背景网格单元, 可获得各单元网格强度及网格强度最大值、最小值:

$$R_{\max} = \max(r_d), \quad R_{\min} = \min(r_d)$$

在 $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 间选择两个约束分界点, 满足式:

$$R_{\min} \leq R_m^2 < R_m^1 \leq R_{\max}$$

约束分界点 R_m^1 和 R_m^2 的选取, 对模型自适应收敛速度影响较大, 对含应力集中区域的模型, 可取较小的 R_m^1 。文中取求解域网格强度最大值 $R_{\max}$ 的 15% 作为加密分界线 R_m^1 ; 不进行稀疏化处理, 故不需选取 R_m^2 。

(5) 对于每个背景网格, 加密准则为

$$\begin{cases} r_d \geq R_m^1 & \text{加密} \\ r_d \leq R_m^2 & \text{稀疏化} \end{cases}$$

(18)

由加密准则, 判断加密区域内的结点, 位于加密背景网格内的结点, 认为是高阶结点; 否则定为一般结点。此时可基于背景网格或者结点分布进行结点加密或者稀疏化处理。

综上所述, 采用自适应无网格法和线性规划 - 增量初应力法^[13] 结合求解考虑屈服强度温度相关热弹塑性接触问题的流程为: 考虑屈服强度温度相关时在每个载荷增量段取出接触体的温升分布, 计算出相应的屈服极限, 判断高斯点应力是否屈服进入塑性变形并进行迭代直至收敛, 得到相应增量段的塑性变形增量, 叠加总量, 直至所有增量段计算完毕。得出接触模型无网格区域各结点的位移、应变和应力后, 采用基于应变能梯度的自适应无网格法对无网格区域进行结点加密, 加密后由程序自动

重新生成输入数据, 对模型进行重新计算, 直至判断条件满足给定的网格强度阈值, 输出结果。

3 算 例

3.1 模型描述

采用自适应无网格法对刚性圆柱体与弹塑性平面热弹塑性接触问题进行计算, 平面应变问题。圆柱体半径 $R = 0.5 \text{ mm}$, 材料为 52100 钢, 材料参数为: 杨氏模量 $E = 200 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$, 热传导率 $k = 50.2 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$, 热膨胀系数 $\theta = 11.7 \times 10^{-6} \text{ (1/K)}$, 屈服应力 $\sigma_Y = 600 \text{ MPa}$ 。在数值计算中采用 EFG-FE 耦合方法, 无网格区域选取幂权函数, 初始权函数半径 $d_m = 2c$, c 是一个控制常量, 在此为背景网格的特征长度。 2×2 高斯积分, 1008 个无网格结点, 背景网格数 65×16 , 330 个有限元结点, 288 个有限元单元。研究弹性 - 理想塑性(弹塑性剪切模量 $E_T = 0$) 和有应变硬化的弹塑性($E_T = 0.1E$) 模型的接触性能。

大部分工程材料的屈服强度都会随着温度的升高而降低, Yu 等^[4] 给出了 52100 钢的材料屈服强度随温升变化的数值拟合公式:

$$H(\Delta T) = 3\sigma_Y(\Delta T) = 1819.34494 - 1.77287\Delta T$$

(19)

式中 H 表示材料硬度, 即为 3 倍屈服应力, $\Delta T = T - T_0$, 参考温度 $T_0 = 27^\circ\text{C}$ 。

3.2 结果与讨论

表 1 所示, 研究两种不同输入参数的自适应无网格热弹塑性接触求解模型算例, 讨论不同摩擦系数和热输入和不同外载荷下两种自适应加密与整体加密的接触压力分布、von Mises 应力分布和计算时间。

表 1 两种自适应热弹塑性接触模型算例输入参数

Tab. 1 The input parameters of two different adaptive thermo-elasto-plastic contact examples

输入参数	摩擦系数	热输入 (m/s)	是否考虑材料屈服 强度温度相关	外载荷(N)
算例 1	0.0	0.0	—	15
算例 2	0.2	0.2	是	20

算例 1

算例 1 摩擦系数 $f = 0.0$, 热输入 $f_v = 0.0$

m/s 表示不考虑剪切摩擦力作用和热输入,当然也不存在考虑屈服强度温度相关,则问题简化为弹塑性接触问题^[14]。由模型程序计算得到无网格区域网格强度,根据加密准则,弹性 - 理想塑性和弹塑性两种情况下均加密了 104 个新结点。

图 2 为无网格区域自适应加密前后和整体加密(结点密度和背景网格密度为加密前模型的一倍)弹性 - 理想塑性和弹塑性接触压力比较,本文中 P_0 为最大赫兹接触压力, a_c 为接触半带宽。可见,自适应加密后接触压力与整体加密接触压力接近,比加密前得到明显改善。图 3 为加密前后与整体加密接触区域对称轴上随深度变化的 von Mises 应力, σ_{vm} 的分布比较。可见,自适应加密后的 von Mises 应力趋近于整体加密解,计算精度与整体加密相当,弹性 - 理想塑性的最大应力值由于不能超过屈服强度被“压平”,如图 3(a) 所示,弹塑性情况下由于含应变硬化最大应力值可高于屈服强度,如图 3(b) 所示。同等条件下的 CPU 计算时间见表 2,弹性 - 理想塑性、弹塑性自适应加密计算的总耗时分别为整体加密计算的 7.6% 和 7.1%。

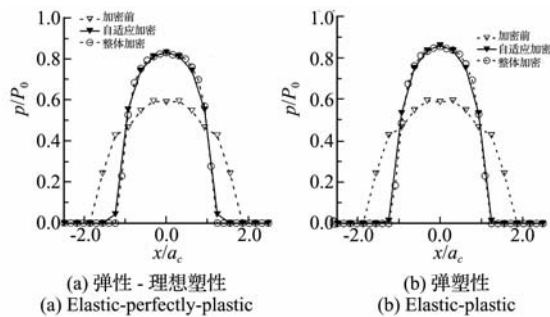


图 2 自适应加密前后与整体加密接触压力比较
Fig. 2 Comparison of contact pressures at each refinement stage compared with that from the uniform refinement model

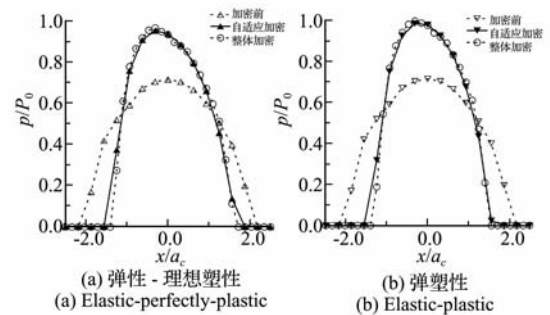


图 4 自适应加密前后与整体加密接触压力比较
Fig. 2 Comparison of contact pressures at each refinement stage compared with that from the uniform refinement model

表 2 算例 1 自适应加密与整体加密计算时间比较

Tab. 2 Comparison of the calculation time of the example 2

计算时间	自适应加密(s)	整体加密(s)	自适应 / 整体加密(%)
弹性 - 理想塑性	483.3	6393.7	7.6
弹塑性	436.3	6137.3	7.1

算例 2

算例 2 考虑剪切摩擦力作用和热输入,并考虑到屈服强度温度相关,弹性 - 理想塑性和弹塑性两种情况下均加密 95 个新结点。图 4 给出了弹性 - 理想塑性和弹塑性接触压力比较,自适应加密后接触压力同样取得了较好的计算精度。图 5 为加密前后和整体加密沿接触域对称轴 von Mises 应力与温升分布比较,并给出了考虑温度相关材料的屈服强度曲线。可见,在考虑屈服强度温度相关的情况下自适应加密后的 von Mises 应力、温升分布同样趋近于整体加密解。表 3 为弹性 - 理想塑性、弹塑性自适应加密计算时间比较。

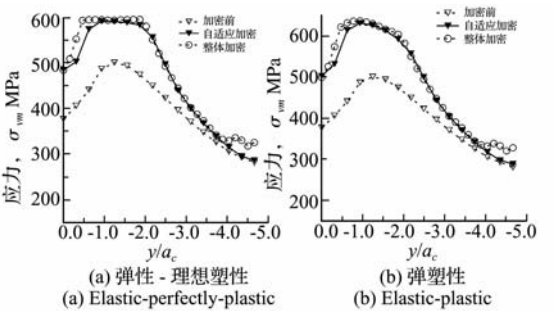


图 3 加密前后沿接触域对称轴的 von Mises 应力
Fig. 3 Von Mises stress distributions along the depth of the centerline of the cylinder at each refinement stage compared with that from the uniform refinement model

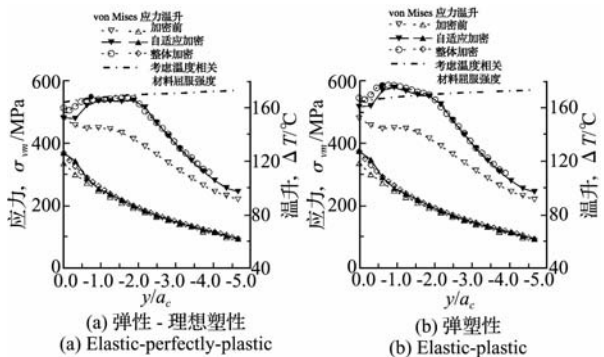


图 5 加密前后沿接触域对称轴的 von Mises 应力和温升分布
Fig. 5 Von Mises stress and temperature rise distributions along the depth of the centerline of the cylinder at each refinement stage compared with that from the uniform refinement model

表 3 算例 2 自适应加密与整体加密
计算时间比较

Tab. 3 Comparison of the calculation time
of the example 2

计算时间	自适应加密(s)	整体加密(s)	自适应 / 整体加密(%)
弹性 - 理想塑性	580.8	6216.3	9.3
弹塑性	553.8	5742.3	9.6

4 结 论

本文采用基于应变能梯度的自适应无网格法与线性规划-增量初应力法相结合求解考虑屈服强度温度相关热弹塑性接触问题,研究表明:

(1) 该自适应无网格模型能较好地求解考虑屈服强度温度相关影响的热弹塑性接触问题,可灵活考虑不同模型参数;

(2) 自适应模型计算精度与整体加密计算精度相当,而计算时间约为整体加密的 7%~10%,大大提高了计算效率,适合于求解大规模计算模型。

在以后的研究中,可扩展至真实粗糙表面自适应热弹塑性接触模型,并考虑弹性模量、热膨胀系数等材料属性温度相关的影响,以更真实地模拟接触力学行为。

参考文献(References):

[1] CRCAN Y, ERASLAN A N. Thermal stresses in e-
lastic-plastic tubes with temperature dependent me-
chanical and thermal properties [J]. *Journal of
Thermal Stresses*, 2001,**24**:1097-1113.

[2] ERASLAN A N, CRCAN Y. Computation of transi-
ent thermal stresses in elastic-plastic tubes; Effect of
coupling and temperature dependent physical proper-
ties[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2002,**25**:559-
572.

[3] ARGESO H, ERASLAN A N. On the use of tem-
perature-dependent physical properties in thermome-
chanical calculations for solid and hollow cylinders
[J]. *International Journal of Thermal Sciences*,
2007.

[4] YU H, LIU S, WANG Q J, et al. Influence of tem-
perature-dependent yield strength on thermomechanical
asperity contacts[J]. *Tribology Letters*, 2004,
17:155-163.

[5] WANG Q, LIU G. A thermoelastic asperity contact

model considering steady-state heat transfer [J].
STLE Tribol Trans, 1999,**42**:763-770.

[6] LIU G, LIU T, XIE Q, et al. Thermal elasto-plastic
contact of rough surfaces [C]. Proceedings of the
World Tribology Congress III (WTC2005), Wash-
ington, D. C., USA, 2005:353-354.

[7] 刘 更,刘天祥,谢 琴.无网格法及其应用[M].西
安.西北工业大学出版社,2005. (LIU Geng, LIU
Tian-xiang, XIE Qin. *Meshfree Methods and Their
Applications*[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical
University Press, 2005. (in Chinese))

[8] 刘 欣,朱德懋,陆明万,等.平面裂纹问题的 h,p,hp
型自适应无网格方法的研究[J].力学学报,2000,**32**
(3):308-318. (LIU Xin, ZHU De-mao, LU Ming-
wan, et al. H, p, hp adaptive meshless method for
plane crack problem[J]. *ACTA Mechanica Sinica*,
2000,**32**(3):308-318. (in Chinese))

[9] LIU G R, TU Z H. An adaptive procedure based on
background cells for meshless methods[J]. *Comput
Methods Appl Mech Engrg*, 2002,**191**:1923-1943.

[10] COMBE U. Haussleri, Korn C. An adaptive ap-
proach with the Element-Free-Galerkin method[J].
Comput Methods Appl Mech Engrg, 1998,**162**:203-
222.

[11] LUO Y H, COMBE U. Haussleri, An adaptivity
procedure based on the gradient of strain energy den-
sity and its application in meshless methods [A].
Meshfree Methods for Partial Differential Equations
[C]. Springer, 2003:267-279.

[12] LEE C K, ZHOU C E. On error estimation and a-
daptive refinement for element free Galerkin method
Part I: stress recovery and a posteriori error estima-
tion[J]. *Computers and Structures*, 2004,**82**:413-
428.

[13] 刘天祥.宏观-微观热弹塑性粗糙表面接触问题的
EFG-FE 耦合方法[D].西安:西北工业大学,2006.
(LIU Tian-xiang. An EFG-FE coupling method for
macro-micro thermal elasto-plastic contact of rough
surfaces[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical U-
niversity, 2006. (in Chinese))

[14] LIU T, LIU G, WANG Q. An element-free gale-
kin-finite element coupling method for elasto-plastic
contact problems[J]. *ASME Journal of Tribology*,
2006,**128**:1-9.

Research on an adaptive meshless thermo-elasto-plastic contact model

ZHANG Zheng, LIU Geng*, LIU Tian-xiang*, TONG Rui-ting

(School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An adaptive meshless model is proposed to solve two-dimensional thermo-elasto-plastic contact problems. The strain energy gradient-based error estimation and the local adaptive refinement strategy for the adaptive meshless element-free Galerkin-finite element (EFG-FE) coupling method are combined with linear programming technique-initial stiffness method for contact problem. The model's principle explanation, arithmetic analysis and numerical implementation are given. The example of rigid cylinder contacting with an elasto-plastic plane is analyzed to validate the adaptive meshless model. The thermal effects on the contact pressure, stresses distributions with different input parameters under the thermo-elasto-plastic contact conditions are discussed. The examples, which have considered the different conditions such as strain-hardening property of the materials, the frictional force and the frictional heat inputs and temperature-dependent yield strength, are also computed. According the two examples, the results of the contact pressures and the stresses distributions obtained from the last refinement stage nearly approach those from the uniformly refined solutions, while the cost of the CPU time for the adaptive refinement model is only about 7%-10% of that for the uniform refinement model. The results indicate that the adaptive refinement model is accuracy and efficient.

Key words: thermo-elasto-plastic contact; adaptive meshless method; temperature-dependent yield strength



(上接第 637 页)

Seismic response of offshore platform with H_∞ controllers

ZHANG Wen-shou*, ZHANG Li, YUE Qian-jin, ZHANG Xiang-feng

(State Key Laboratory of Structure Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new method of active structural control which combines H_∞ controllers with balanced reduction method is presented in this paper. The model reduction is first carried out by balanced reduction method, then H_∞ controllers and H_∞ observers are used for structural control. An effective analysis approach is given in terms of complex modal superposition method and pseudo-excitation method. The method is validated by an example of ATMD active control of seismic responses of offshore platform.

Key words: balanced reduction method; H_∞ control; seismic response; offshore platform