

·研究简报·

②5 双相钢有限元解的等值线处理方法

137-141

A Treatment to the Isoline for Finite Element Solution
to Ferrite-Martensite Microstructure

谢晓佳

Xie Xiaojia

(重庆大学资源及环境工程系)

刘天模

Liu Tianmo

(重庆大学冶金及材料工程系)

TG142.2

摘 要 鉴于 F+M 双相钢金相有限元网格在有限变形的情况下,数值解的抽样点应力场具有高梯度分布的特征,提出了按单元逐个进行抽样点插值的方法绘制双相钢金相组织微观应力分布场的等值线图以保证高梯度离散点应力场的后处理具有更好的保真度,同时也能解决双相钢变形后任意边界的问题。

关键词 等值线; 双相钢; 有限变形

中国图书资料分类法分类号 TG113.14; TG113.25

ABSTRACT The numerical solution of sample point stress field in finite element network of ferrite-martensite microstructure under finite deformation has a high-gradient distributive characteristic whose stress gradient between ferrite and martensite crystalline element is very high. If the interpolation method is used in the whole region, the isogram will be seriously smooth so that the original high-gradient sample point stress field will become untrue. This paper presents a new method for drawing isogram of ferrite-martensite microstructure stress field by interpolating sample points in an element one by one. This method can make the post-treatment of high-gradient discrete stress field in crystalline network approach to a truer condition and solve the problem of arbitrary curve boundary of the deformed two phase steel.

KEY WORDS isoline; dual-phase steel; finite deformation

0 引 言

F+M 双相钢在外加载荷作用下发生有限变形时,由于两相组织分布形成的不同,会出现显著的微观结构应力集中的现象。软相组织在应力水平较低时首先进入塑性屈服状态,其变形增加而应力维持在较低水平。团状硬相晶粒由于能随周围软相组织产生整体移动,因此也处于较低应力水平,其应力值与周围软相组织能保持平滑过渡。而对于条岛状和网状分布

* 收文日期 1992-03-21

国家自然科学基金青年基金资助项目 0188313

的硬相组织,在周围软相组织进入深度屈服后仍处于弹性状态或小应变塑性状态,故这些硬相晶粒内部出现较高应力水平,硬软相之间出现高梯度应力场。这种现象正反映了双相钢微观组织应力场非均匀分布的特点。

金相单元网格的直线边界在发生有限变形后成为不光滑的曲线边界,因此采用矩形网点全域插值绘制等值线的方法不用于解决这类问题,而必须针对高梯度离散点应力场的保真和任意曲线边界的处理这两个要求,采用更合适的方法来绘制双相钢金相单元网格域上的等值线图。

1 等值线绘制原理

1.1 任意曲线边界的处理

在纵向拉伸载荷作用下,F+M双相钢金相单元网格的变形过程如图1所示。

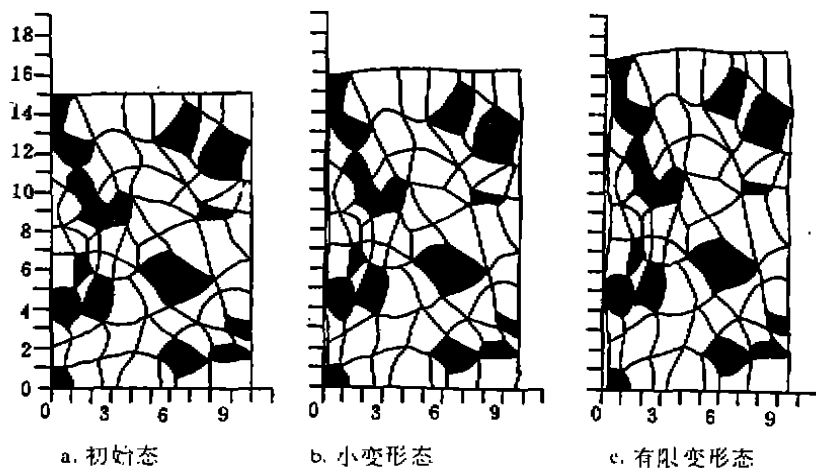


图1 双相钢金相网格变形过程图

金相网格的载荷作用边和两侧自由边在变形后,由初始态的直线边界变为有限变形态的曲线边界。为了解决等值线任意边界的判断问题,本文提出按单元逐个插值绘制等值线的方法来解决边界判断问题。

首先将发生有限变形后的金相网格中的任意形状的单、元变换为规则的单位正方形基元,然后采用矩形网格插值法在基元上进行加密插值,得出矩形网格化数据点阵,再将该点阵反演到原始单元上,获得曲边四边形网格化数据点阵。变形后的金相网格单元节点坐标为:

$$\begin{cases} x_i = a_i + u_i \\ y_i = b_i + v_i \end{cases} \quad (1)$$

其中 (a_i, b_i) 为初始态单元节点坐标, (u_i, v_i) 为节点位移, i 为单元节点号。

设基元坐标为 (ξ, η) ,如图2所示。基元插值函数为:

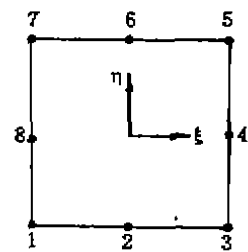


图2 基元节点图

$$\begin{cases} N_j(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_j)(1 + \eta\eta_j)(\xi\xi_j + \eta\eta_j - 1) & j = 1, 3, 5, 7 \\ N_j(\xi, \eta) = \frac{1}{2}\xi\xi_j(1 + \xi\xi_j)(1 - \eta^2) + \frac{1}{2}\eta\eta_j(1 + \eta\eta_j)(1 - \xi^2) & j = 2, 4, 6, 8 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\xi_j = \pm 1, \eta_j = \pm 1$ 。

选用基元插值函数作为坐标变换函数, 故金相网格中任意单元的形状可由该单元节点坐标和坐标变换函数来描述, 得

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^n N(\xi, \eta) x_i \\ y = \sum_{i=1}^n N(\xi, \eta) y_i \end{cases} \quad (3)$$

其中 n 为单元节点数。

在基元上进行抽样点应力矩形网格化插值后, 通过(3)式便可得到原单元上曲边四边形网格化插值数据点阵, 如图3所示。

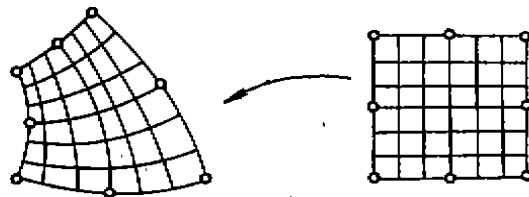


图3 晶粒单元的插值数据网格化

用曲边四边形网格交点坐标和交点插值应力值, 便可绘制该单元的等值线图。逐个对每一单元进行上述步骤, 就能得到金相网格变形后任意曲线边界的等值线图。采用这种方法, 还可以按需要绘制指定金相区域的局部等值线图。

1.2 高梯度应力场的保真处理

有限变形有限元程序是按单元中抽样点位置计算和输出单元应力值的。为了在绘制等值线过程中保持硬相晶粒单元与软相晶粒单元之间应力场的高梯度分布特征, 本文采用的单元抽样点数据进行单元域内插值和单元公共边界等效插值的方法。

对于单元域内, 采用距离加权法计算插值网格交点 P 上的应力值, 其关系式为:

$$\sigma(p) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n (d_i)^{-\alpha} \cdot \sigma_i}{\sum_{i=1}^n (d_i)^{-\alpha}} & (d_i \neq 0) \\ \sigma_i & (d_i = 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中 σ_i 为该单元中第 i 个抽样点的应力值, d_i 为第 i 个抽样点距插值网格交点 P 的距离, n 为单元中的抽样点数; α 为某一正数, 它可以通过试验选定, 对于应力梯度较高和金相网格较细密的情况 α 应选择较大值, 反之应当选择较小值。

对于单元边界上的插值点, 不能以某一单元的贡献值而确定, 应当以公共边界或公共边界点的相邻单元所计算的对这些边界插入点的贡献值, 按总贡献点数 M 进行加权平均而获得, 故边界插入点 P' 的等效应力值用下式计算

$$\sigma(P') = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sigma(P'_i) \quad (5)$$

有了单元内和单元边界上的网格化数据点后, 便可按单元逐个绘制等值线图了。用这个方法

绘制的全域等值线图既保持了金相组织微观应力场高梯度分布的原貌,又保证了等值线在穿越单元边界时的连续性。

2 等值线的绘制

在金相网格全域上绘制某一条等值线,首先须按晶粒单元秩序判断该等值线与哪些单元相关,其相关判断条件为:

$$\text{Min}(\sigma)_i \leq \sigma_z \leq \text{Max}(\sigma)_i \quad (6)$$

式中 σ_z 为等值线的应力值, $\text{Min}(\sigma)_i$ 和 $\text{Max}(\sigma)_i$ 为第 i 个单元上数据点的最小和最大应力值。

若寻找到某单元与 σ_z 相关,则以该单元上加密插值的网格数据追踪单元内的等值线。由于等值线的连续性,只要加密插值的网格步长足够小,等值线必定与某一网格棱边相交,而在一个细分的网格内, $\sigma_z(x, y)$ 可被视为一个线性函数处理,如图 4 所示。

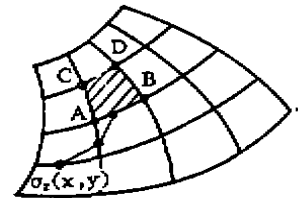


图 4 晶粒单元内等值线的追踪

设 A, B 两点为与等值线 σ_z 相交的某一棱边的两个端点,其相交条件为

$$[\sigma(A) - \sigma_z][\sigma(B) - \sigma_z] \leq 0 \quad (7)$$

上式若为等式,即交点在端点上,称这类点为退化点。对于退化点的处理,可将退化点的值加一个微小量修正值,使(7)式始终为不等式。找到相关棱边后,用线性插值法求出等值线与网格棱边交点的坐标。

$$\begin{cases} x = x_A + \frac{\sigma_z - \sigma(A)}{\sigma(B) - \sigma(A)}(x_B - x_A) \\ y = y_A + \frac{\sigma_z - \sigma(A)}{\sigma(B) - \sigma(A)}(y_B - y_A) \end{cases} \quad (8)$$

用上述方法寻找到等值线的一个起始点后,就可以顺着该点进行追踪。当追踪到单元边界时,等值线就停下来。若追踪回到起始点,说明等值线在该单元内是闭合的。

在一个单元可能出现多条等值线的情况,为了识别等值线的分枝,可设置一个数组记录网格棱边与等值线的相关的状态。对已经绘过等值线的棱边,将数组记录改为不相关状态,追踪完一条等值线后,扫描剩余记录,若还有相关记录,说明还有分枝,再按上述方法追踪,直到数组记录全部成为不相关状态。

3 计算程序的控制参数

针对金相组织微观力学数值解设计的等值线程序采用 FORTRAN 语言编制,调用 GRACE IV 绘图软件包,在 M340 型计算机上调试通过。该程序的输入控制参数包括两部分内容。一种是原始数据读取格式控制参数,由这些格式参数,可以使该程序从 SAP、ADINA 或自编程序计算的结果直接读取原始

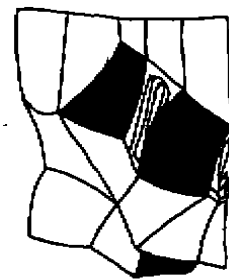


图 5 在有限变形 20% 状态下,小于 350 MPa 的纵向应力值区域

数据。另一种是绘制等值图的控制参数,它包括以下内容:

1. 金相组织染色控制参数,可输出金相网格两相组织图,如图1所示。

2. 金相区域选择控制参数,用于输出指定区域中指定等值域的局部状态图。如图5所示在有限变形屈服深度达20%时,团状分布的硬相组织间嵌夹的软相组织仍处于低应力状态,其值远低于外加纵向拉伸载荷。

3. 等值域的色谱显示控制参数。在彩色屏幕上用等值线色谱可以直观地显示出高、低应力区的分布位置和应力梯度等级。如图6所示,由于两相组织结构形态引起的组织微观应力集中,硬相晶位和其紧接软相组织的周边区域上出现高于外加载荷的等效应力区域。

4. 应力或应变等值图输出选择码及标值选择控制参数。改变原始数据读取格式控制参数,可对应变值进行等值图绘制,其标值显示格式也为相应的应变值显示格式。

5. 图形缩放控制参数,坐标架显示控制参数可根据需要对全国或局部区域进行缩小或放大,在绘局部图时,可不显示坐标架。

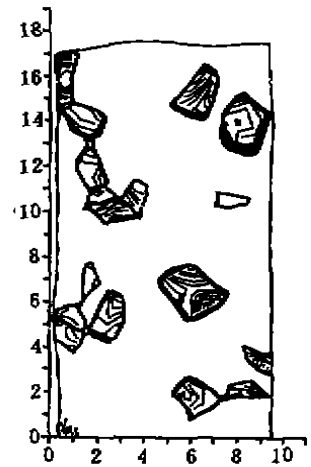


图6 高于外加载荷的等效应力域的色谱输出显示

4 结束语

本文所提出的等值线处理方法是针对金相组织微观力学分析有限变形数值解而设计的,主要用于解决具有高梯度分布特性的稀疏抽样点场的等值图绘制问题。对于一般线弹性结构分析的有限元解,由于网度细密、抽样点场应力梯度较平缓,可不必进行保真插值处理。

参 考 文 献

- 1 李中华等《12CrMo 钢 F+M 双相组织对两相内应力应变分布影响的有限元分析》《金属学报》1987,23(2);
- 2 D. R. J. Owen, E. Hinton. Finite Elements in Plasticity,