



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109946006 B

(45)授权公告日 2019.09.24

(21)申请号 201910045197.3

审查员 张鲁鲁

(22)申请日 2019.01.17

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109946006 A

(43)申请公布日 2019.06.28

(73)专利权人 中国石油大学(华东)

地址 257045 山东省东营市北二路271号

(72)发明人 周凡 蒋文春 杜洋

(74)专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司  
33200

代理人 邱启旺

(51)Int.Cl.

G01L 5/00(2006.01)

G01N 3/30(2006.01)

G06F 17/50(2006.01)

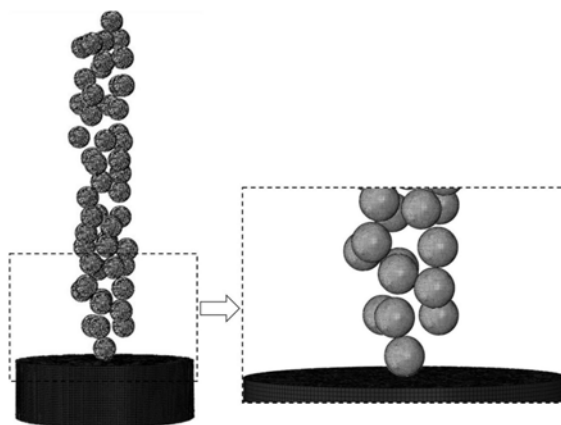
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

### (54)发明名称

基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法

### (57)摘要

本发明公开了一种基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法,包括以下步骤:(1)构建微粒位置在空间随机分布的微粒流冲击金属材料的有限元模型;(2)建立综合考虑应变强化、应变率强化、相变强化以及随动硬化效应的材料率相关混合硬化弹塑性本构模型;(3)编写ABAQUS-VUMAT用户动态材料子程序,运用应力补偿更新算法实现提出的本构模型;(4)将子程序嵌入到ABAQUS中,对微粒流冲击金属构件的过程进行计算,进一步预测金属材料的力学行为。本发明可以用于模拟在空间随机分布的任意数量的微粒、对任意形式的金属结构进行冲击的力学行为预测。



1. 一种基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤(1) 构建微粒位置在空间随机分布的微粒流冲击金属材料的有限元模型;所述步骤(1) 具体为:

首先,创建微粒和金属构件的有限元模型;其次,分别设置微粒和金属构件的材料属性,最后,设置分析步和通用接触属性,并且在微粒球心施加初始速度、划分网格;

在创建微粒和金属构件的有限元模型过程中,通过Python语言对空间分布的球形微粒进行参数化建模,过程如下:

步骤(a) 在ABAQUS的部件模块创建第一个球形微粒模型,直径为d;

步骤(b) 利用Python提供的随机函数Random.Uniform() 在指定区间内随机产生第m个空间点坐标(x,y,z);

步骤(c) 若第m个空间点坐标与第k个微粒的球心之间的距离小于直径d,表明若以该点为球心、直径为d的微粒将与其它微粒在空间发生重叠,不满足要求,返回步骤(b) 重新产生一个空间点坐标,反之,进入步骤(d);其中,k=1~m-1;

步骤(d) 计算以第m个空间点为球心、直径为d的微粒与第k个微粒冲击金属表面形成凹坑的中心位置之间的距离l,带入到Avrami 方程 $P(l) = 100\%(1 - \exp(-\varepsilon * l/\phi))$ ,P(l) 表示两个凹坑相距为l的概率, $\phi$ 为凹坑的直径, $\varepsilon$ 为常参数;

步骤(e) 利用Python提供的随机函数Random.Uniform(0,1) 产生一个随机参数h,若P(l) < h,返回步骤(b) 重新产生一个空间点坐标;若P(l) > h,则在ABAQUS的Assembly模块中以第一个微粒为目标对象创建一个相同的微粒实体,并移动该实体,移动后的球心坐标为空间点(x,y,z),至此,完成第m个球形微粒的创建;

步骤(2) 建立综合考虑应变强化、应变率强化、相变强化以及随动硬化效应的材料率相关混合硬化弹塑性本构模型;

步骤(3) 编写ABAQUS-VUMAT用户动态材料子程序,运用应力补偿更新算法实现提出的本构模型;

步骤(4) 将子程序嵌入到ABAQUS中,对微粒流冲击金属构件的过程进行计算,进一步预测金属材料的力学行为。

2. 根据权利要求1所述的基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法,其特征在于,所述步骤(2) 具体包括下述步骤:

考虑塑性应变硬化、应变率硬化和马氏体相变硬化,并引入背应力后金属材料的屈服准则为:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{S} - \boldsymbol{\alpha}) : (\mathbf{S} - \boldsymbol{\alpha})} - K \quad (1)$$

其中,f为屈服方程,S为偏应力张量, $\boldsymbol{\alpha}$ 为背应力张量,K表示屈服面的大小,p为等效塑性应变;

随动硬化规律采用Armstrong-Frederick非线性随动硬化法则:

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \frac{2}{3}r\theta\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \theta\boldsymbol{\alpha}\dot{p} \quad (2)$$

其中, $\dot{\boldsymbol{\alpha}}$ 表示背应力对时间的导数,r和 $\theta$ 为材料参数, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ 为塑性应变率; $\dot{p}$ 为等效塑性应

变率；

在塑性应变硬化、应变率硬化和马氏体相变硬化影响下屈服应力的演化规律为：

$$K = (k_\varepsilon + k_w)[1 + C \ln(\dot{p}/\dot{\varepsilon}_0)] \quad (3)$$

$$k_\varepsilon = \sigma_0 + h_\varepsilon [1 - \exp(-a p)] \quad (4)$$

$$k_w = h_w w^n \quad (5)$$

其中,  $k_\varepsilon$  为塑性应变硬化应力,  $k_w$  为马氏体相变硬化应力,  $C$  为材料参数,  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率,  $\sigma_0$  为初始屈服应力,  $h_\varepsilon$  为应变强化系数,  $a$  为材料参数,  $h_w$  为相变强化模量,  $n$  为强化指数,  $w$  为马氏体的百分比含量; 其增量方程由Santacreu模型给出:

$$\dot{w} = (w_{max} - w)mD(Dp)^{m-1}\dot{p} \quad (6)$$

$$D = D_0 + D_1\varphi \quad (7)$$

其中,  $\dot{w}$  为马氏体相含量变化率,  $w_{max}$  为马氏体相的最大含量,  $D$ 、 $D_0$ 、 $D_1$  和  $m$  为材料参数,  $\varphi$  为应力三轴度。

3. 根据权利要求2所述的基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法, 其特征在于, 所述步骤(3) 具体包括下述步骤:

步骤(3.1): 通过用户子程序VUMAT读取第 $n+1$ 增量步开始时的应变张量、应力张量、背应力张量的各个分量、马氏体相含量、等效塑性应变以及屈服应力, 其中的状态变量通过SDV定义;

步骤(3.2): VUMAT由应变增量驱动, 首先假设应变增量全为弹性, 由广义胡克定律:  $\Delta \sigma = D_e: \Delta \varepsilon^e$  计算第 $n+1$ 步的试探应力:  $\sigma_{n+1}^{trial} = \sigma_n + \Delta \sigma_{n+1}$

其中,  $\Delta \sigma$  为应力增量张量,  $D_e$  为弹性模量张量,  $\Delta \varepsilon^e$  为弹性应变增量张量;  $\sigma_{n+1}^{trial}$  为试探应力,  $\sigma_n$  为第 $n$ 增量步结束时的应力值,  $\Delta \sigma_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步的应力增量张量;

将试探应力代入到屈服准则中:

$$f_{n+1} = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{S}_{n+1} - \alpha_{n+1}):(\mathbf{S}_{n+1} - \alpha_{n+1})} - K_{n+1} \quad (8)$$

其中,  $f_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的屈服方程,  $\mathbf{S}_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的偏应力张量,  $\alpha_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的背应力张量,  $K_{n+1}$  表示第 $n+1$ 增量步对应的屈服面的大小;

如果  $f_{n+1} \leq 0$ , 则材料尚处于弹性变形阶段, 将试探应力更新为第 $n+1$ 增量步应力, 各状态变量更新为 $n+1$ 增量步的状态变量;

如果  $f_{n+1} > 0$ , 则材料屈服, 根据应力补偿显式算法更新增量步结束时的应力, 即在试探应力的基础上减去多算的塑性应变增量对应的应力增量部分, 对试探应力进行负补偿。

4. 根据权利要求3所述的基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法, 其特征在于, 所述塑性应变增量需要先求得等效塑性应变增量, 第 $n+1$ 增量步的等效塑性应变增量运用牛顿迭代法求解, 方法如下:

第 $n+1$ 增量步的背应力张量为:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \frac{2}{3} r \theta \Delta \varepsilon_{n+1}^p - \theta \alpha_{n+1} \Delta p_{n+1} \quad (9)$$

其中,  $\alpha_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的背应力张量,  $\alpha_n$  为第 $n$ 增量步对应的背应力张量,  $\Delta \varepsilon_{n+1}^p$  为第 $n+1$ 增量步对应的塑性应变增量,  $\Delta p_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的等效塑性应变增量;

偏应力张量 $S_{n+1}$ 为:

$$S_{n+1} = S_{n+1}^* - 2G\Delta\varepsilon_{n+1}^p \quad (10)$$

$$\alpha_{n+1} = \left( \alpha_n + \frac{2}{3}r\theta\Delta\varepsilon_{n+1}^p \right) / (1 + \theta\Delta p_{n+1}) \quad (11)$$

$$\Delta\varepsilon_{n+1}^p = \frac{3}{2}\Delta p_{n+1} \frac{S_{n+1} - \alpha_{n+1}}{K_{n+1}} \quad (12)$$

其中, $S_{n+1}^*$ 表示第 $n+1$ 增量步对应的试探应力的偏应力, $G$ 为材料性能参数;

由公式(10) (11) (12) 可得:

$$S_{n+1} - \alpha_{n+1} = \frac{K_{n+1}(S_{n+1}^* - \frac{\alpha_n}{(1+\theta\Delta p_{n+1})})}{K_{n+1} + (3G + \frac{r\theta}{(1+\theta\Delta p_{n+1})})\Delta p_{n+1}} \quad (13)$$

将 $S_{n+1} - \alpha_{n+1}$ 代入到屈服准则 $f_{n+1} = 0$ 中,得到:

$$\sqrt{\frac{3}{2}(S_{n+1}^* - \mu):(S_{n+1}^* - \mu) - (3G + \varphi)\Delta p_{n+1} - K_{n+1}} = 0 \quad (14)$$

$$\text{式中, } \mu = \frac{\alpha_n}{(1+\theta\Delta p_{n+1})}; \varphi = \frac{r\theta}{(1+\theta\Delta p_{n+1})};$$

$$\text{令 } F = \sqrt{\frac{3}{2}(S_{n+1}^* - \mu):(S_{n+1}^* - \mu) - (3G + \varphi)\Delta p_{n+1} - K_{n+1}}, \text{则:}$$

$$F' = -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{(S_{n+1}^* - \mu):\mu'}{\sqrt{(S_{n+1}^* - \mu):(S_{n+1}^* - \mu)}} - 3G - \varphi - \Delta p_{n+1}\varphi' - K'_{n+1} \quad (15)$$

$$K'_{n+1} = \frac{\partial K_{n+1}}{\partial p_{n+1}} + \frac{\partial K_{n+1}}{\partial \Delta p_{n+1}} = (k'_\varepsilon + k'_w) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\Delta p_{n+1}}{\Delta t} \right) \right] + (k_\varepsilon + k_w) \frac{c}{\Delta p_{n+1}} \quad (16)$$

式中, $F'$ 为 $F$ 的导数, $\mu' = \frac{-\theta\alpha_n}{(1+\theta\Delta p_{n+1})^2}$ ,  $\varphi' = \frac{-r\theta*\theta}{(1+\theta\Delta p_{n+1})^2}$ ,  $K'_{n+1}$ 为屈服面大小 $K_{n+1}$ 的导数,  
 $k'_\varepsilon$ 为塑性应变硬化应力的导数, $k'_w$ 为马氏体相变硬化应力的导数;

因此,第 $n+1$ 增量步的等效塑性应变增量为:

$$\Delta p_{n+1} = \Delta p_i = \Delta p_{i-1} - \frac{F(\Delta p_{i-1})}{F'(\Delta p_{i-1})} \quad (17)$$

其中,所述 $i$ 表示第 $i$ 次迭代, $\Delta p_i$ 表示第 $i$ 次迭代所得的等效塑性应变增量;所述 $i-1$ 表示第 $i-1$ 次迭代, $\Delta p_{i-1}$ 表示第 $i-1$ 次迭代所得的等效塑性应变增量;更新等效塑性应变增量,直至满足精度要求,更新第 $n+1$ 增量步应力,更新内能,塑性功。

5. 根据权利要求4所述的基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法,其特征在于,所述步骤(4)具体为:

将步骤(1)建立的模型主文件和步骤(3)建立的ABAQUS-VUMAT用户子程序联合,使用ABAQUS/EXPLICIT方法对微粒流高速冲击金属构件进行计算;将ABAQUS/EXPLICIT中得到的动态应力状态导入到ABAQUS/STANDARD模块中进行隐式分析,确定静态平衡下的残余应力场,即完成金属材料在微粒流冲击下力学行为的有限元预测。

## 基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及金属表面强化处理领域,尤其涉及一种基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法。

### 背景技术

[0002] 微粒流冲击技术是一项先进的金属表面处理技术,相比喷丸处理技术,其微粒直径更小,而冲击速度却更高。微粒流冲击金属构件的过程,诱导表层组织发生塑性变形,引起晶粒细化、并且引入有益的残余压应力,因此,能够提高金属构件表面强度和硬度、抗疲劳性能以及抗应力腐蚀性能。由于实验研究耗时长、成本高,目前有限元法成为力学行为预测的主要研究手段。

[0003] 在实际的工程中,大量微粒喷出后是随机撞击到待处理的金属表面上的。之前研究中的数值模型主要有单个微粒模型、多个微粒模型等形式,其冲击位置是固定的,忽略了真实过程中冲击凹坑位置的随机性。近几年,有学者[1]采用有限元计算软件ABAQUS提供的python 语言开发一种弹丸在空间位置随机分布的喷丸模型,可以更加真实地模拟喷丸冲击过程。为金属材料在微粒流冲击下力学行为的有限元预测提高很好的借鉴。

[0004] 准确描述材料的本构关系是预测金属构件在微粒流冲击下力学行为的前提。在目前的研究中材料的本构关系多采用Johnson-Cook模型[2],该模型反映了材料的应变硬化和应变率硬化。但是在大量微粒反复冲击金属构件的过程中,金属表面承受非线性弹塑性循环载荷的作用,会产生包申格效应。随动硬化模型能够考虑包申格效应的存在,即认为材料在拉伸方向强化,而在压缩方向同等地软化。而且,微粒流冲击金属构件引起表层组织发生塑性变形,塑性应变诱导金属组织发生相变,因此还需要考虑材料的相变硬化的影响。Sanjurjo[3]等提出的本构方程考虑了应变率硬化和随动硬化效应,但是没有考虑相变硬化。凌祥等[4]的研究中关注了马氏体相变强化的影响,然而屈服强度的提高仅依据经验公式进行推算,缺乏可靠性。综上所述,需要提出一种综合考虑应变硬化、应变率硬化、相变硬化以及随动硬化的材料本构模型。

[0005] 参考文献:

[0006] [1]李源,雷丽萍,曾攀.弹丸束喷丸有限元模型数值模拟及试验研究[J].机械工程学报,2011,47(22):43-48.

[0007] [2]李雁淮,王飞,吕坚,等.单丸粒喷丸模型和多丸粒喷丸模型的有限元模拟[J].西安交通大学学报,2007,41(3):348-352.

[0008] [3]Sanjurjo P.,et al.Influence of the target material constitutive model on the numerical simulation of a shot peening process[J].Surface and Coatings Technology,2014,258:822-831.

[0009] [4]凌祥,彭薇薇,倪红芳.喷丸三维残余应力场的有限元模拟[J].机械工程学报,2006,42(8):182-189.

## 发明内容

[0010] 本发明的主要目的在于克服现有技术中的不足,提供一种基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法。

[0011] 为解决上述技术问题,本发明的解决方案是:一种基于混合硬化模型的微粒流冲击金属材料力学行为预测方法,包括以下步骤:

[0012] (1) 构建微粒位置在空间随机分布的微粒流冲击金属材料的有限元模型;

[0013] (2) 建立综合考虑应变强化、应变率强化、相变强化以及随动硬化效应的材料率相关混合硬化弹塑性本构模型;

[0014] (3) 编写ABAQUS-VUMAT用户动态材料子程序,运用应力补偿更新算法实现提出的本构模型;

[0015] (4) 将子程序嵌入到ABAQUS中,对微粒流冲击金属构件的过程进行计算,进一步预测金属材料的力学行为。

[0016] 进一步的,所述步骤(1)具体为:

[0017] 首先,创建微粒和金属构件的有限元模型;其次,分别设置微粒和金属构件的材料属性,在设置分析步和通用接触属性之后在微粒球心施加初始速度、划分网格。

[0018] 进一步的,在创建微粒和金属构件的有限元模型过程中,通过Python语言对空间分布的球形微粒进行参数化建模,过程如下:

[0019] (a) 在ABAQUS的部件模块创建第一个球形微粒模型,直径为d;

[0020] (b) 利用Python提供的随机函数Random.Uniform()在指定区间内随机产生第m个空间点坐标(x,y,z);

[0021] (c) 若第m个空间点坐标与第k(k=1~m-1)个微粒的球心之间的距离小于直径d,表明若以该点为球心、直径为d的微粒将与其它微粒在空间发生重叠,不满足要求,返回步骤(b)重新产生一个空间点坐标,反之,进入步骤(d);

[0022] (d) 计算以第m个空间点为球心、直径为d的微粒与第k(k=1~m-1)个微粒冲击金属表面形成凹坑的中心位置之间的距离l,带入到Avrami方程 $P(l) = 100\%(1 - \exp(-\varepsilon * l/\phi))$ ,P(l)表示两个凹坑相距为l的概率, $\phi$ 为凹坑的直径, $\varepsilon$ 为常参数;

[0023] (e) 利用Python提供的随机函数Random.Uniform(0,1)产生一个随机参数h,若P(l)<h,返回步骤(b)重新产生一个空间点坐标;若P(l)>h,则在ABAQUS的Assembly模块中以第一个微粒为目标对象创建一个相同的微粒实体,并移动该实体,移动后的球心坐标为空间点(x,y,z),至此,完成第m个球形微粒的创建。

[0024] 进一步的,所述步骤(2)具体包括下述步骤:

[0025] 考虑塑性应变硬化、应变率硬化和马氏体相变硬化,并引入背应力后金属材料的屈服准则为:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(S - \alpha) : (S - \alpha)} - K \quad (1)$$

[0027] 其中,f为屈服方程,S为偏应力张量, $\alpha$ 为背应力张量,K表示屈服面的大小,p为等效塑性应变;

[0028] 随动硬化规律采用Armstrong-Frederick非线性随动硬化法则:

$$[0029] \quad \dot{\alpha} = \frac{2}{3} r \theta \dot{\epsilon}^p - \theta \alpha \dot{p} \quad (2)$$

[0030] 其中,  $\dot{\alpha}$  表示背应力对时间的导数,  $r$  和  $\theta$  为材料参数,  $\dot{\epsilon}^p$  为塑性应变率;  $\dot{p}$  为等效塑性应变率;

[0031] 在塑性应变硬化、应变率硬化和马氏体相变硬化影响下屈服应力的演化规律为:

$$[0032] \quad K(p) = (k_{\epsilon} + k_w)[1 + C \ln(\dot{p}/\dot{\epsilon}_0)] \quad (3)$$

$$[0033] \quad k_{\epsilon} = \sigma_0 + h_{\epsilon} [1 - \exp(-a p)] \quad (4)$$

$$[0034] \quad k_w = h_w w^n \quad (5)$$

[0035] 其中,  $k_{\epsilon}$  为塑性应变硬化应力,  $k_w$  为马氏体相变硬化应力,  $C$  为材料参数,  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率,  $\sigma_0$  为初始屈服应力,  $h_{\epsilon}$  为应变强化系数,  $a$  为材料参数,  $h_w$  为相变强化模量,  $n$  为强化指数,  $w$  为马氏体的百分比含量; 其增量方程由Santacreu模型给出:

$$[0036] \quad \dot{w} = (w_{\max} - w) m D (D p)^{m-1} \dot{p} \quad (6)$$

$$[0037] \quad D = D_0 + D_1 \varphi \quad (7)$$

[0038] 其中,  $\dot{w}$  为马氏体相含量变化率,  $w_{\max}$  为马氏体相的最大含量,  $D$ 、 $D_0$ 、 $D_1$  和  $m$  为材料参数,  $\varphi$  为应力三轴度。

[0039] 进一步的, 所述步骤 (3) 具体包括下述步骤:

[0040] 步骤 (3.1): 通过用户子程序VUMAT读取第 $n+1$ 增量步开始时的应变张量、应力张量、背应力张量的各个分量、马氏体相含量、等效塑性应变以及屈服应力, 其中的状态变量通过 SDV定义;

[0041] 步骤 (3.2): VUMAT由应变增量驱动, 首先假设应变增量全为弹性, 由广义胡克定律:  $\Delta \sigma = D_e : \Delta \epsilon^e$  计算第 $n+1$ 步的试探应力:  $\sigma_{n+1}^{trial} = \sigma_n + \Delta \sigma_{n+1}$

[0042] 其中,  $\Delta \sigma$  为应力增量张量,  $D_e$  为弹性模量张量,  $\Delta \epsilon^e$  为弹性应变增量张量;  $\sigma_{n+1}^{trial}$  为试探应力,  $\sigma_n$  为第 $n$ 增量步结束时的应力值,  $\Delta \sigma_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步的应力增量张量;

[0043] 将试探应力代入到屈服准则中:

$$[0044] \quad f_{n+1} = \sqrt{\frac{3}{2} (S_{n+1} - \alpha_{n+1}) : (S_{n+1} - \alpha_{n+1})} - K_{n+1} \quad (8)$$

[0045] 其中,  $f_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的屈服方程,  $S_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的偏应力张量,  $\alpha_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的背应力张量,  $K_{n+1}$  表示第 $n+1$ 增量步对应的屈服面的大小;

[0046] 如果  $f_{n+1} \leq 0$ , 则材料尚处于弹性变形阶段, 将试探应力更新为第 $n+1$ 增量步应力, 各状态变量更新为 $n+1$ 增量步的状态变量;

[0047] 如果  $f_{n+1} > 0$ , 则材料屈服, 根据应力补偿显式算法更新增量步结束时的应力, 即在试探应力的基础上减去多算的塑性应变增量对应的应力增量部分, 对试探应力进行负补偿。

[0048] 进一步的, 所述塑性应变增量需要先求得等效塑性应变增量, 第 $n+1$ 增量步的等效塑性应变增量运用牛顿迭代法求解, 方法如下:

[0049] 第 $n+1$ 增量步的背应力张量为:

$$[0050] \quad \alpha_{n+1} = \alpha_n + \frac{2}{3} r \theta \Delta \epsilon_{n+1}^p - \theta \alpha_{n+1} \Delta p_{n+1} \quad (9)$$

[0051] 其中,  $\alpha_{n+1}$  为第  $n+1$  增量步对应的背应力张量,  $\alpha_n$  为第  $n$  增量步对应的背应力张量,  $\Delta \varepsilon_{n+1}^p$  为第  $n+1$  增量步对应的塑性应变增量,  $\Delta p_{n+1}$  为第  $n+1$  增量步对应的等效塑性应变增量;

[0052] 偏应力张量  $S_{n+1}$  为:

$$[0053] \quad S_{n+1} = S_{n+1}^* - 2G\Delta \varepsilon_{n+1}^p \quad (10)$$

$$[0054] \quad \alpha_{n+1} = \left( \alpha_n + \frac{2}{3} r \theta \Delta \varepsilon_{n+1}^p \right) / (1 + \theta \Delta p_{n+1}) \quad (11)$$

$$[0055] \quad \Delta \varepsilon_{n+1}^p = \frac{3}{2} \Delta p_{n+1} \frac{S_{n+1} - \alpha_{n+1}}{K_{n+1}} \quad (12)$$

[0056] 其中,  $S_{n+1}^*$  表示第  $n+1$  增量步对应的试探应力的偏应力,  $G$  为材料性能参数;

[0057] 由公式 (10) (11) (12) 可得:

$$[0058] \quad S_{n+1} - \alpha_{n+1} = \frac{K_{n+1} \left( S_{n+1}^* - \frac{\alpha_n}{(1+\theta \Delta p_{n+1})} \right)}{K_{n+1} + \left( 3G + \frac{r\theta}{(1+\theta \Delta p_{n+1})} \right) \Delta p_{n+1}} \quad (13)$$

[0059] 将  $S_{n+1} - \alpha_{n+1}$  代入到屈服准则  $f_{n+1} = 0$  中, 得到:

$$[0060] \quad \sqrt{\frac{3}{2} (S_{n+1}^* - \mu) : (S_{n+1}^* - \mu)} - (3G + \varphi) \Delta p_{n+1} - K_{n+1} = 0 \quad (14)$$

$$[0061] \quad \text{式中, } \mu = \frac{\alpha_n}{(1+\theta \Delta p_{n+1})}; \varphi = \frac{r\theta}{(1+\theta \Delta p_{n+1})};$$

$$[0062] \quad \text{令 } F = \sqrt{\frac{3}{2} (S_{n+1}^* - \mu) : (S_{n+1}^* - \mu)} - (3G + \varphi) \Delta p_{n+1} - K_{n+1}, \text{ 则:}$$

$$[0063] \quad F' = -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{(S_{n+1}^* - \mu) : \mu'}{\sqrt{(S_{n+1}^* - \mu) : (S_{n+1}^* - \mu)}} - 3G - \varphi - \Delta p_{n+1} \varphi' - K'_{n+1} \quad (15)$$

[0064]

$$K'_{n+1} = \frac{\partial K_{n+1}}{\partial p_{n+1}} + \frac{\partial K_{n+1}}{\partial \Delta p_{n+1}} = (k'_\varepsilon + k'_w) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\Delta p_{n+1}}{\Delta t} \right) \right] + (k_\varepsilon + k_w) \frac{C}{\Delta p_{n+1}} \quad (16)$$

[0065] 式中,  $F'$  为  $F$  的导数,  $\mu' = \frac{-\theta \alpha_n}{(1+\theta \Delta p_{n+1})^2}$ ,  $\varphi' = \frac{-r\theta * \theta}{(1+\theta \Delta p_{n+1})^2}$ ,  $K'_{n+1}$  为屈服面大小  $K_{n+1}$  的导数,  $k'_\varepsilon$  为塑性应变硬化应力的导数,  $k'_w$  为马氏体相变硬化应力的导数;

[0066] 因此, 第  $n+1$  增量步的等效塑性应变增量为:

$$[0067] \quad \Delta p_{n+1} = \Delta p_i = \Delta p_{i-1} - \frac{F(\Delta p_{i-1})}{F'(\Delta p_{i-1})} \quad (17)$$

[0068] 其中, 所述  $i$  表示第  $i$  次迭代,  $\Delta p_i$  表示第  $i$  次迭代所得的等效塑性应变增量; 所述  $i-1$  表示第  $i-1$  次迭代,  $\Delta p_{i-1}$  表示第  $i-1$  次迭代所得的等效塑性应变增量; 更新等效塑性应变增量, 直至满足精度要求, 更新第  $n+1$  增量步应力, 更新内能, 塑性功。

[0069] 进一步的, 所述步骤 (4) 具体为:

[0070] 将步骤 (1) 建立的模型主文件和步骤 (3) 建立的 ABAQUS-VUMAT 用户子程序联合, 使用 ABAQUS/EXPLICIT 方法对微粒流高速冲击金属构件进行计算; 将 ABAQUS/EXPLICIT 中得到的动态应力状态导入到 ABAQUS/STANDARD 模块中进行隐式分析, 确定静态平衡下的残余应



力场,即完成金属材料在微粒流冲击下力学行为的有限元预测。

[0071] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0072] (1) 建立了率相关混合硬化弹塑性本构模型,能够反映材料在高速反复冲击的载荷作用下的应变硬化、应变率硬化、相变硬化以及非线性随动硬化效应。

[0073] (2) 利用ABAQUS-VUMAT用户子程序来数值实现所建立的材料本构模型,能准确预测微粒高速冲击下金属材料的屈服应力等力学行为。

[0074] (3) 本发明可以用于模拟在空间随机分布的任意数量的微粒、对任意形式的金属结构进行冲击的力学行为预测。

## 附图说明

[0075] 图1为本发明对某一具体实例所采用的有限元模型;

[0076] 图2为本发明对所提出的率相关混合硬化弹塑性本构模型的VUMAT数值实现流程图;

[0077] 图3为对图1中实例进行预测得到的不同本构模型下的屈服应力随时间变化的结果图;

[0078] 图4为对图1中实例进行预测得到的金属板某点的等效塑性应变随时间变化的结果图;

[0079] 图5为对图1中实例进行预测得到的沿金属板厚度方向的残余应力分布图。

## 具体实施方式

[0080] 首先需要说明的是,本发明是计算机技术在金属表面强化领域的一种应用。在本发明的实现过程中,会涉及到多个软件功能模块的应用。申请人认为,如在仔细阅读申请文件、准确理解本发明的实现原理和发明目的以后,在结合现有公知技术的情况下,本领域技术人员完全可以运用其掌握的软件编程技能实现本发明。凡本发明申请文件提及的均属此范畴,申请人不再一一列举。

[0081] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述:

[0082] 如图1所示,在ABAQUS中创建第一个球形微粒模型,其直径为0.5mm,球心坐标为(0, 0, 0);利用Python提供的随机函数Random.Uniform()随机产生第m个空间点坐标为(x, y, z);若第m个空间点坐标与第k(k=1~m-1)个微粒的球心之间的距离小于0.5mm,表明若以该点为球心、直径为d的微粒将与其它微粒在空间发生重叠,不满足要求,重新产生一个空间点坐标;计算以第m个空间点为球心、直径为d的微粒与第k(k=1~m-1)个微粒冲击金属表面形成凹坑的中心位置之间的距离l,带入到Avrami方程 $P(l) = 100\%(1 - \exp(-\varepsilon * l/\phi))$ , (1)表示两个凹坑相距为l的概率,  $\phi = 0.2\text{mm}$ ,  $\varepsilon = 2.5$ ;利用Python提供的随机函数Random.Uniform(0, 1)产生一个随机参数h;若 $P(l) < h$ ,返回步骤(b)重新产生一个空间点坐标;若 $P(l) > h$ ,则在ABAQUS的Assembly模块中以第一个微粒为目标对象创建一个相同的微粒实体,并移动该实体,移动后的球心坐标为空间点(x, y, z),即完成第m个球形微粒的创建;本实例共创建微粒50个。

[0083] 金属板材的大小为16.0×16.0×6mm,固定其底面。微粒和金属面之间设置库伦摩擦,摩擦系数为0.2。金属材料为AISI348,密度为7800kg/m<sup>3</sup>,弹性模量E=210GPa,泊松比μ

=0.3。采用减缩积分三维八节点实体单元C3D8R对金属板材和微粒进行离散,金属板材的单元尺寸为0.08mm,微粒的单元尺寸为0.05mm。微粒材料为二氧化硅,将其模拟成刚体,参考点位于其球心,施加初始速度 $v=120\text{m/s}$ 在参考点上。本实例中所用材料参数如表1所示。

[0084] 表1实例中所用的材料参数

[0085]

$r/\text{MPa}$	$\theta$	$\sigma_0/\text{MPa}$	$h_\varepsilon/\text{MPa}$	$C$	$a$	$h_w/\text{MPa}$	$n$	$D_0$	$D_1$	$w_{\max}$	$m$
2.5	300	310	301	0.013	8.37	470	0.97	2.62	0.6	0.8	2.22

[0086] 考虑考虑塑性应变强化和马氏体相变强化,并引入背应力后金属材料的屈服准则为:

$$[0087] \quad f = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{S} - \boldsymbol{\alpha}) : (\mathbf{S} - \boldsymbol{\alpha})} - K$$

[0088] 其中, $f$ 为屈服方程, $\mathbf{S}$ 为偏应力张量, $\boldsymbol{\alpha}$ 为背应力张量, $K$ 表示屈服面的大小, $p$ 为等效塑性应变。

[0089] 各向同性硬化应力的演化规律为:

$$[0090] \quad K(\bar{\varepsilon}^p) = (k_\varepsilon + k_w)[1 + 0.013 * \ln(1 + \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)]$$

$$[0091] \quad k_\varepsilon = 310 + 301 * [1 - \exp(-8.37 * \bar{\varepsilon}^p)]$$

$$[0092] \quad k_w = 470 * w^{0.97}$$

[0093] 其中, $k_\varepsilon$ 为塑性应变硬化应力, $k_w$ 为马氏体相变硬化应力, $C$ 为材料参数, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, $\sigma_0$ 为初始屈服应力, $h_\varepsilon$ 为应变强化系数, $a$ 为材料参数, $h_w$ 为相变强化模量, $n$ 为强化指数, $w$ 为马氏体的百分比含量,其增量方程由Santacreu模型给出:

$$[0094] \quad \dot{w} = (0.8 - w) * 2.22 * D(D\bar{\varepsilon}^p)^{1.22} \dot{\varepsilon}^p$$

$$[0095] \quad D = 2.62 + 0.6 * \varphi$$

[0096] 其中, $\dot{w}$ 为马氏体相含量变化率, $w_{\max}$ 为马氏体相的最大含量, $D$ 、 $D_0$ 、 $D_1$ 和 $m$ 为材料参数, $\varphi$ 为应力三轴度。

[0097] 随动硬化规律采用Armstrong-Frederick非线性随动硬化法则:

$$[0098] \quad \dot{\boldsymbol{\alpha}} = \frac{2}{3}r\theta\dot{\varepsilon}^p - \theta\boldsymbol{\alpha}\dot{p} = \frac{2}{3} * 750 * \dot{\varepsilon}^p - 300 * \boldsymbol{\alpha}\dot{p}$$

[0099] 其中, $\dot{\boldsymbol{\alpha}}$ 表示背应力对时间的导数, $r$ 和 $\theta$ 为材料参数, $\dot{\varepsilon}^p$ 为塑性应变率; $\dot{p}$ 为等效塑性应变率。

[0100] 利用ABAQUS/EXPLICIT计算模拟微粒冲击金属板材的过程,如图2利用用户子程序VUMAT判断材料点是否进入塑性,运用应力补偿更新算法实现提出的率相关混合硬化弹塑性本构模型。具体过程如下:

[0101] 通过用户子程序VUMAT读取第 $n+1$ 增量步开始时的应变张量、应力张量、背应力张量的各个分量、马氏体相含量、等效塑性应变以及屈服应力,其中的状态变量通过SDV定义,见下表:

[0102] 表2实例中各状态变量物理意义

[0103]

STATEV	1~6	7	8	9
变量意义	背应力张量 $\alpha$	等效塑性应变 $p$	马氏体相含量 $w$	屈服应力 $K(p)$

[0104] 首先假设应变增量全为弹性,通过广义胡克定律:  $\Delta \sigma = D_e: \Delta \varepsilon^e$  计算第 $n+1$ 步的试探应力:  $\sigma_{n+1}^{trial} = \sigma_n + \Delta \sigma_{n+1}$ , 其中,  $\Delta \sigma$  为应力增量张量,  $D_e$  为弹性模量张量,  $\Delta \varepsilon^e$  为弹性应变增量张量;  $\sigma_{n+1}^{trial}$  为试探应力,  $\sigma_n$  为第 $n$ 增量步结束时的应力值,  $\Delta \sigma_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步的应力增量张量;

[0105] 将试探应力代入到屈服准则  $f_{n+1} = \sqrt{\frac{3}{2}}(S_{n+1} - \alpha_{n+1}): (S_{n+1} - \alpha_{n+1}) - K_{n+1}$  中;

[0106] 其中,  $f_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的屈服方程,  $S_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的偏应力张量,  $\alpha_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的背应力张量,  $K_{n+1}$  表示第 $n+1$ 增量步对应的屈服面的大小;

[0107] 如果  $f_{n+1} \leq 0$ , 则材料尚处于弹性变形阶段, 将试探应力更新为第 $n+1$ 增量步应力, 各状态变量更新为 $n+1$ 增量步的状态变量;

[0108] 如果  $f_{n+1} > 0$ , 则材料屈服, 根据应力补偿显式算法更新增量步结束时的应力, 即在试探应力的基础上减去多算的塑性应变增量对应的应力增量部分, 对试探应力进行负补偿, 所述塑性应变增量需要先求得等效塑性应变增量; 而第 $n+1$ 增量步的等效塑性应变增量运用牛顿迭代法求解, 具体包括下述步骤:

[0109] 第 $n+1$ 增量步的背应力张量为:

$$[0110] \quad \alpha_{n+1} = \alpha_n + \frac{2}{3} r \theta \Delta \varepsilon_{n+1}^p - \theta \alpha_{n+1} \Delta p_{n+1} \quad (1)$$

[0111] 其中,  $\alpha_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的背应力张量,  $\alpha_n$  为第 $n$ 增量步对应的背应力张量,  $\Delta \varepsilon_{n+1}^p$  为第 $n+1$ 增量步对应的塑性应变增量,  $\Delta p_{n+1}$  为第 $n+1$ 增量步对应的等效塑性应变增量;

[0112] 偏应力张量  $S_{n+1}$  为:

$$[0113] \quad S_{n+1} = S_{n+1}^* - 2G \Delta \varepsilon_{n+1}^p \quad (2)$$

$$[0114] \quad \alpha_{n+1} = \left( \alpha_n + \frac{2}{3} r \theta \Delta \varepsilon_{n+1}^p \right) / (1 + \theta \Delta p_{n+1}) \quad (3)$$

$$[0115] \quad \Delta \varepsilon_{n+1}^p = \frac{3}{2} \Delta p_{n+1} \frac{S_{n+1} - \alpha_{n+1}}{K_{n+1}} \quad (4)$$

[0116] 其中,  $S_{n+1}^*$  表示第 $n+1$ 增量步对应的试探应力的偏应力,  $G$  为材料性能参数;

[0117] 由公式 (2) (3) (4) 可得:

$$[0118] \quad S_{n+1} - \alpha_{n+1} = \frac{K_{n+1} \left( S_{n+1}^* - \frac{\alpha_n}{(1 + \theta \Delta p_{n+1})} \right)}{K_{n+1} + \left( 3G + \frac{r\theta}{(1 + \theta \Delta p_{n+1})} \right) \Delta p_{n+1}} \quad (5)$$

[0119] 将  $S_{n+1} - \alpha_{n+1}$  代入到屈服准则  $f_{n+1} = 0$  中, 得到:

$$[0120] \quad \sqrt{\frac{3}{2}} (S_{n+1}^* - \mu): (S_{n+1}^* - \mu) - (3G + \varphi) \Delta p_{n+1} - K_{n+1} = 0 \quad (6)$$

[0121] 式中,  $\mu = \frac{\alpha_n}{(1+\theta\Delta p_{n+1})}$ ;  $\varphi = \frac{r\theta}{(1+\theta\Delta p_{n+1})}$ ;

[0122] 令  $F = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{S}_{n+1}^* - \mu):(\mathbf{S}_{n+1}^* - \mu) - (3G + \varphi)\Delta p_{n+1} - K_{n+1}}$ , 则:

[0123]  $F' = -\sqrt{\frac{3}{2} \frac{(\mathbf{S}_{n+1}^* - \mu):\mu'}{\sqrt{(\mathbf{S}_{n+1}^* - \mu):(\mathbf{S}_{n+1}^* - \mu)}}} - 3G - \varphi - \Delta p_{n+1}\varphi' - K'_{n+1}$

[0124]  $K'_{n+1} = \frac{\partial K_{n+1}}{\partial p_{n+1}} + \frac{\partial K_{n+1}}{\partial \Delta p_{n+1}} = (k'_\varepsilon + k'_w) \left[ 1 + 0.013 * \ln \left( \frac{\Delta p_{n+1}}{\Delta t} \right) \right] + (k_\varepsilon + k_w) \frac{0.013}{\Delta p_{n+1}}$

[0125] 式中,  $\mu = \frac{\alpha_n}{(1+300*\Delta p_{n+1})}$ ,  $\varphi = \frac{750}{(1+300*\Delta p_{n+1})}$ ,  $\mu' = \frac{-300*\alpha_n}{(1+300*\Delta p_{n+1})^2}$ ,  $\varphi' = \frac{-225000}{(1+300*\Delta p_{n+1})^2}$

[0126]  $\Delta p_{n+1} = \Delta p_i = \Delta p_{i-1} - \frac{F(\Delta p_{i-1})}{F'(\Delta p_{i-1})}$

[0127] 其中, 所述i表示第i次迭代,  $\Delta p_i$ 表示第i次迭代所得的等效塑性应变增量; 所述i-1表示第i-1次迭代,  $\Delta p_{i-1}$ 表示第i-1次迭代所得的等效塑性应变增量; 更新等效塑性应变增量, 直至满足精度要求, 更新第n+1增量步应力, 更新内能, 塑性功。

[0128] 进一步的, 所述步骤(4)具体为:

[0129] 将步骤(1)建立的模型主文件和步骤(3)建立的ABAQUS-VUMAT用户子程序联合, 使用ABAQUS/EXPLICIT方法对微粒流高速冲击金属构件进行计算。最后, 将ABAQUS/EXPLICIT中得到的动态应力状态导入到ABAQUS/STANDARD模块中进行隐式分析, 确定静态平衡下金属材料的力学行为。

[0130] 图3为本发明中的屈服应力随时间(冲击次数)变化的曲线, 可见, 随着时间(冲击次数)的增加, 屈服应力提高。在与未考虑硬化效应、未考虑随动硬化以及Johnson-Cook模型比较中可见, 本发明预测的屈服应力高于Johnson-Cook模型和未考虑硬化效应的结果, 而且由于考虑了随动硬化, 因此屈服应力略高于未考虑随动硬化效应的屈服应力。图4为金属板材表面某点的等效塑性应变随时间的变化, 可见等效塑性应变随着冲击次数的增加而增加。图5为沿金属板厚度方向的残余应力分布, 从曲线可知, 微粒流冲击可在金属板表层产生一定的残余压应力, 因此可提高金属构件的抗疲劳性能。所以, 本发明提出的率相关混合硬化弹塑性本构模型可以预测微粒流高速冲击下金属构件内部的屈服应力等力学行为。

[0131] 本发明建立的率相关混合硬化弹塑性本构模型能够反映材料在高速反复冲击的载荷作用下的应变硬化、应变率硬化、相变硬化以及非线性随动硬化效应, 结合该本构模型, 利用FORTRAN语言编写子程序并嵌入到ABAQUS中。采用ABAQUS提供的python编程语言进行参数化建模, 能够预测在空间随机分布的任意数量的微粒、对任意形式的金属结构进行冲击的力学行为。

[0132] 最后, 需要注意的是, 以上列举的仅是本发明的具体实施例。显然, 本发明不限于以上实施例, 还可以有很多变形。本领域的普通技术人员能从本发明公开的内容中直接导出或联想到的所有变形, 均应认为是本发明的保护范围。

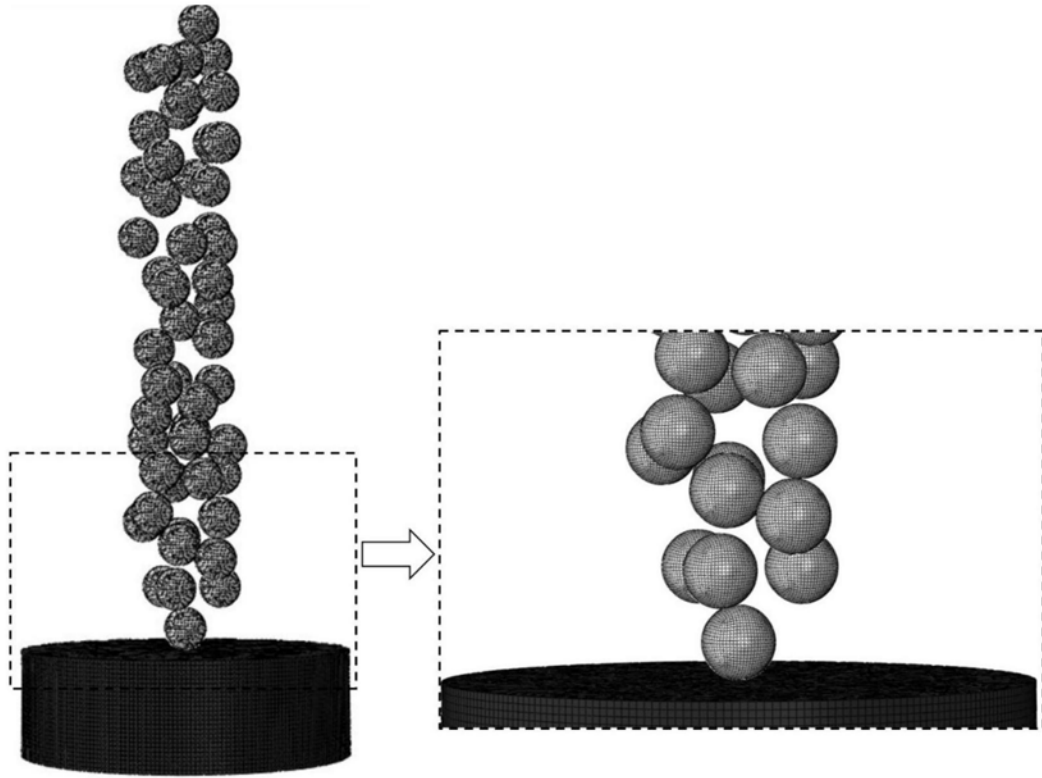


图1

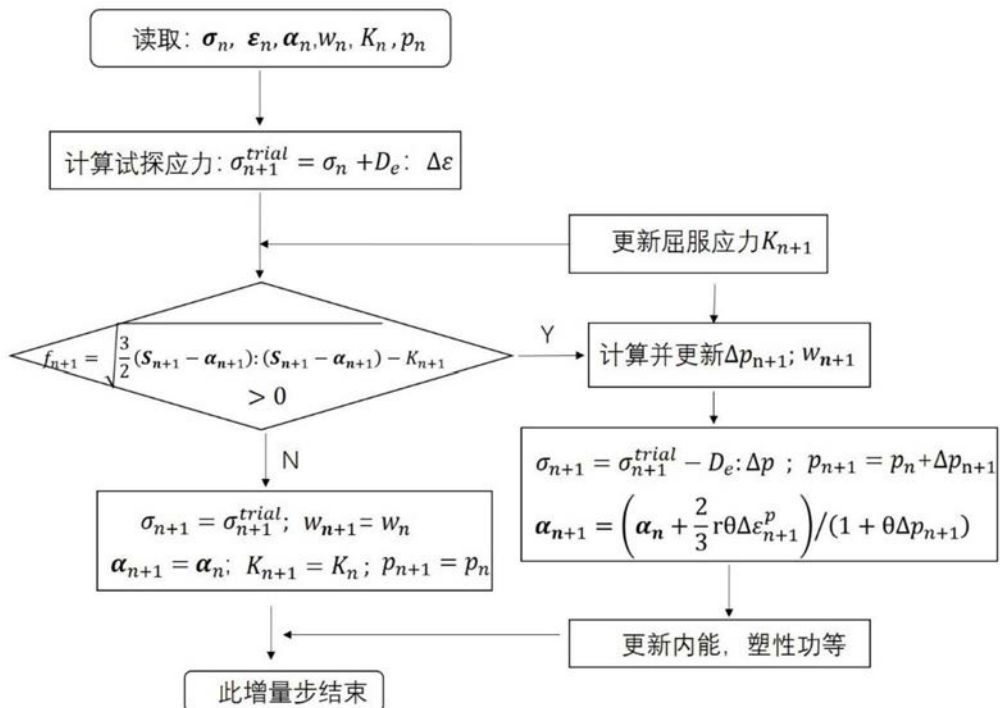


图2

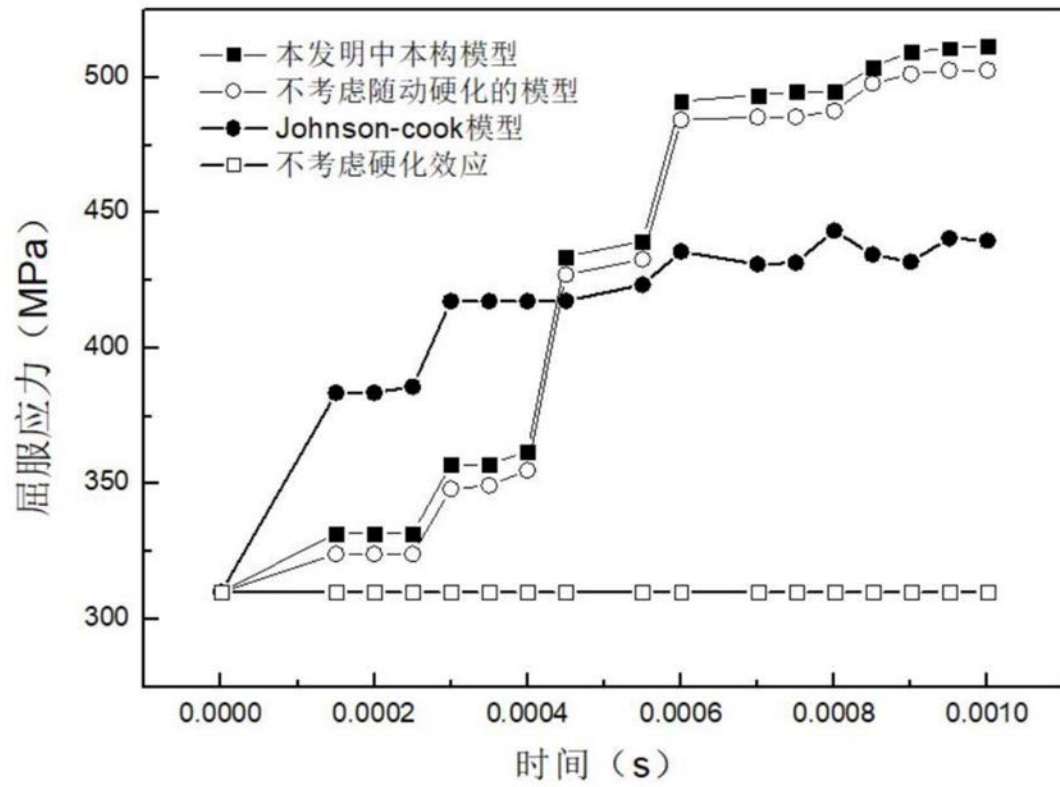


图3

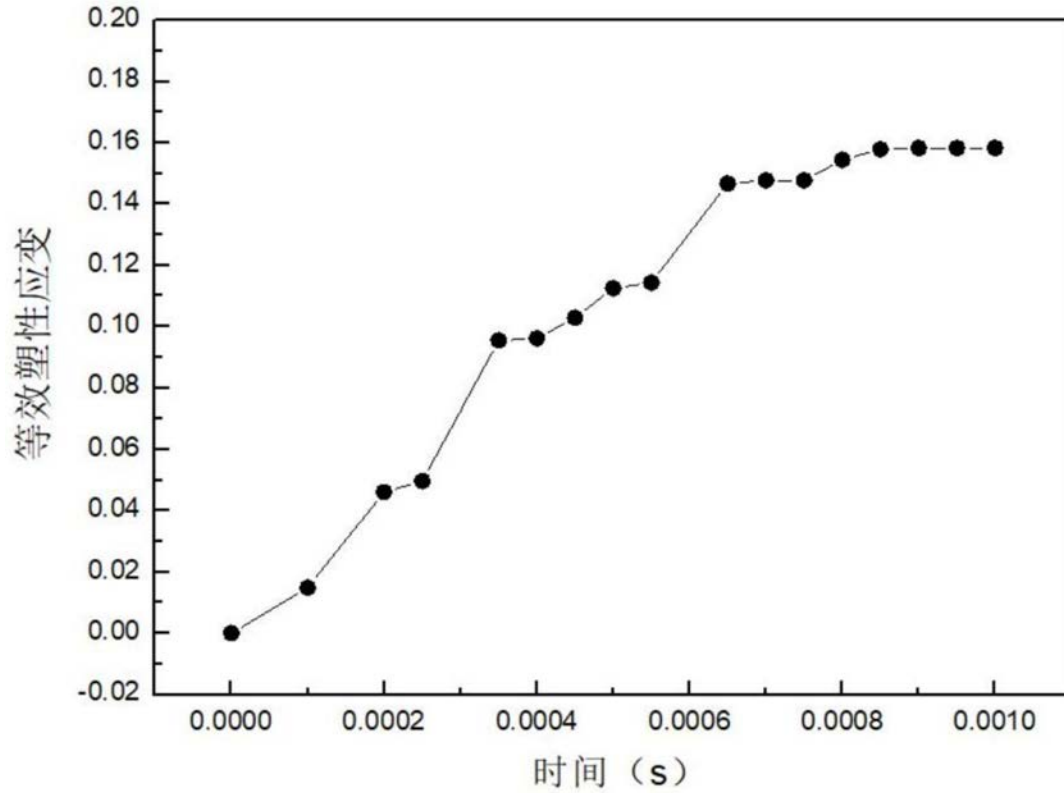


图4

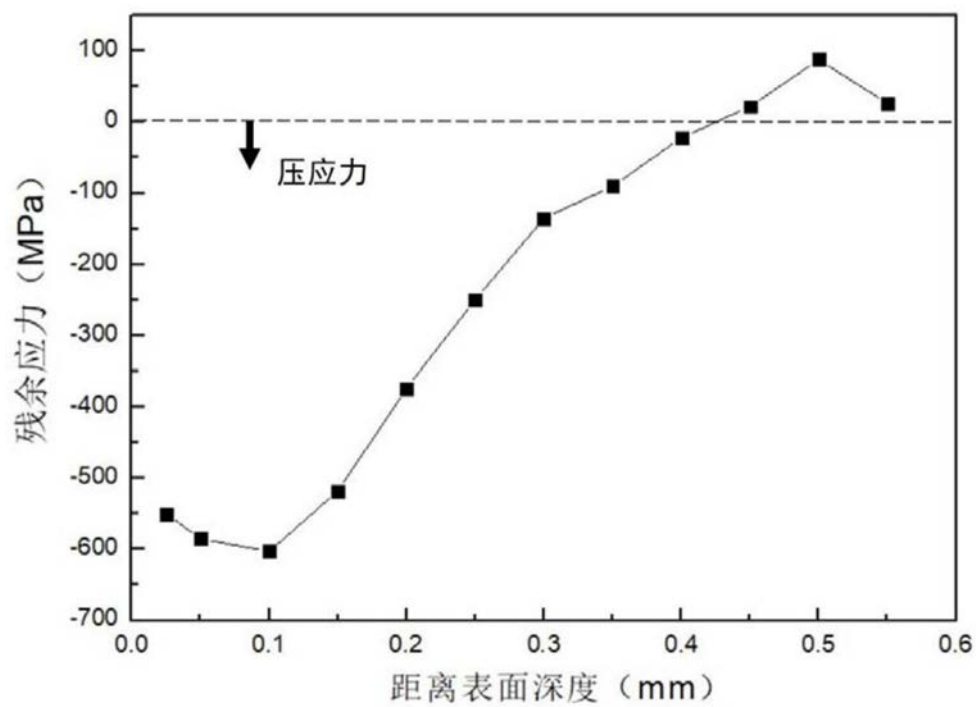


图5