



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106334970 A

(43)申请公布日 2017.01.18

(21)申请号 201610966431.2

(22)申请日 2016.10.28

(71)申请人 哈尔滨理工大学

地址 150080 黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路52号

(72)发明人 姜彬 何田田 张明慧

(74)专利代理机构 哈尔滨市伟晨专利代理事务所(普通合伙) 23209

代理人 张月

(51)Int.Cl.

B23Q 17/09(2006.01)

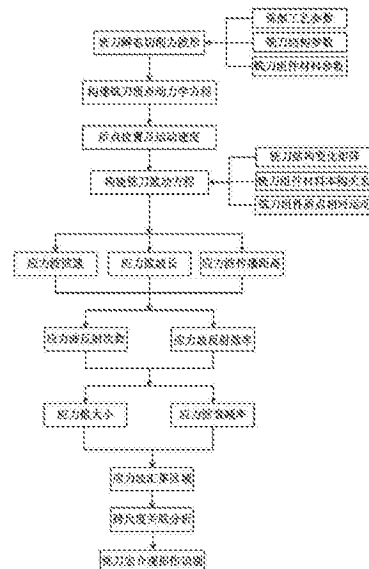
权利要求书2页 说明书7页 附图7页

(54)发明名称

一种断续冲击载荷作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法

(57)摘要

本发明公开了一种断续冲击载荷作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法,其技术要点在于由以下步骤构成:一、建立高速铣刀瞬态切削力模型和质点动力学方程;二、建立高速铣刀应力波的波动方程;三、求解高速铣刀应力波衰减应力值和衰减率;四、识别高速铣刀波动力学损伤。本发明可揭示出高速铣刀宏观结构域之间的内在联系,识别出铣刀局部宏观损伤,可确定高速铣刀的高频应力波汇集区域,并对其进行跨尺度关联分析,结合分子动力学仿真,识别出高速铣刀易发生损伤部位及介观尺度下损伤的类型,重点解决了高速、断续冲击载荷作用下铣刀组件潜在的损伤位置与损伤类型识别问题,同时也解决了高速铣刀波动力学损伤多尺度演变问题。



1. 一种断续冲击作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法,其特征在于由以下步骤构成:

一、建立高速铣刀瞬态切削力模型和质点动力学方程

根据铣刀切削工艺参数、铣刀结构参数、铣刀组件材料参数,获取铣刀瞬态切削力波形满足式(1):

$$F(t) = \sum_{i=1}^m F_i(t) = \sum_{i=1}^m p \cdot f_z \cdot a_p \cdot \cos \varphi_i(t) \quad (1)$$

式中, p 为作用于刀齿的单位切削层面积上的切削力, f_z 为每齿进给量, a_p 为轴向铣削深度, $F_i(t)$ 为第*i*个刀齿瞬态切削力, $\varphi_i(t)$ 为随时间变化的刀齿瞬时位置角, m 为参与切削的刀齿数量, $F(t)$ 为*m*个刀齿的瞬态切削力, t 为时间,

利用铣刀质点运动微分方程表征其局部结构的动力响应,质点动力学方程满足式(2):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{F_i(x,t)}{\rho} \quad (2)$$

式中, u 为组件内质点相对位移, T 为弦内张力, ρ 为弦线密度, x 为波阵面随时间变化的空间位置, $F_i(x,t)$ 为刀齿瞬态切削力在该横向振动的激励;式(2)中,质点运动特征值为质点的位置 $u(x,t)$ 和质点运动速度 v 的方程为:

$$v = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (3)$$

二、建立高速铣刀应力波的波动方程

利用铣刀结构变化矩阵、铣刀组件材料本构关系、铣刀组件质点相对运动,构建铣刀组件内应力波的波动方程,

首先根据铣刀结构将其简化为轴对称结构,获得运动平衡方程为:

$$\rho_0 A(x) \frac{\partial v}{\partial t} - A(x) \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \sigma \frac{dA(x)}{dx} \quad (4)$$

将材料本构关系定义为:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (5)$$

采用式(5)、式(6),并根据牛顿第二定律,建立高速铣刀波动方程为

$$c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{1}{A(x)} \frac{dA(x)}{dx} c_0^2 \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \zeta c_0^2 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

$$c_0^2 = E/\rho_0, \zeta = -dA(x)/A(x) dx \quad (7)$$

波速是描述铣刀应力波的重要参数满足式(8):

$$C = \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

上述各式中: ρ_0 为材料密度, $A(x)$ 为刀具结构变化矩阵, v 为刀具内的质点运动速度, σ 为应力值; E 为弹性模量, ε 为应变; C 为应力波的波速, x 为波阵面随时间变化的空间位置; c_0^2 为材料内部应力波的传播速度, ζ 为铣刀组件结构的修正系数;

三、求解高速铣刀应力波衰减应力值和衰减率

定义衰减率 η 为单位应力经过单位位移的衰减数值:

$$\eta = -(1/\sigma_x) d\sigma_x/dx \quad (9)$$

对式(10)两边积分可得:

$$\sigma_x = \sigma_0 e^{-\eta x} \quad (10)$$

应力波在铣刀内部经过多次反射后的波速C与初始波速c有如下关系:

$$\tau = 1/C = \lambda/c \quad N = (C/c) (\lambda/l) \quad (11)$$

高速面铣刀切削时承受的切削力冲击载荷所形成的冲击波长为冲击传递距离L的2倍,因此,上式可改写为下式:

$$N = 2CL/(c1) \quad (12)$$

对上式两边做偏微分变化,其中等式右端对L与1进行偏微分变化,得出下公式(13):

$$q = 2\rho_2 C / (\rho_1 c + \rho_2 C) \quad (13)$$

瞬态切削力载荷作用下,高速铣刀内部形成的应力波反射次数趋于无穷大的时候,铣刀刀齿区域内应力波衰减后的应力值 σ_x 为:

$$\sigma_x = \frac{q \left[e^{-\eta x_{AB}} + e^{\eta x_{AB}} (1-q) e^{-m \eta x_{AB}} \right]}{1 - (1-q)^2 e^{-m \eta x_{AB}}} \sigma_i \quad (14)$$

对上式进行整理得衰减率的求解方程为:

$$\eta = \frac{1}{x} \ln \left[q^2 (2-q)^2 + 4B^2 (1-q)^2 + q(2-q) \right] \quad B = \sigma_x / \sigma_i \quad (15)$$

上式中, η 为衰减率, σ_x 为衰减后应力值, σ_0 为 $x=0$ 处的应力值(Mpa), x 为应力波传播距离; τ 为冲击作用时间, λ 为波长, c 为应力波初始速度, N 为反射次数, L 为应力波传播距离, l 为应力波在铣刀中传播的长度, q 为应力波的反射效率, ρ_1 和 ρ_2 分别为应力波传播时所经过的不同介质材料密度, B 为应力传递比, σ_i 为应力波单次反射后的应力, η_{xAB} 为应力波单次反射的衰减率;

四、识别高速铣刀波动力学损伤

依据高速铣刀应力波的传播特性,确定应力波汇集区域,利用铣刀该区域跨尺度关联分析结果,结合分子动力学仿真,识别出铣刀局部宏观和介观损伤。

一种断续冲击载荷作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法

技术领域：

[0001] 本发明涉及一种高速铣刀损伤的识别方法，具体涉及一种断续冲击载荷作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法。

背景技术：

[0002] 在高速、断续切削条件下，随着铣刀结构、材料和切削参数的改变，铣刀内部的能量和质量分布也随之发生改变，在获得高切削效率的同时，铣刀应力场分布的不均匀性显著增加，其内部能量不断积聚。在此条件下，铣刀一旦发生损伤或存在潜在缺陷，其破坏程度将迅速发展，若不能及时发现，产生的多是不可修复的严重事故。

[0003] 在高速铣刀安全性研究中发现，采用铣刀强度失效判据和铣刀整体振动失稳判据，无法正确描述和评定铣刀损伤的产生和发展，铣刀最先发生的局部性损伤和破坏与作用在刀齿上的切削力冲击所引起的应力脉冲密切相关。分析发现，切削力冲击引起的应力脉冲，不会立即引起铣刀结构内所有质点的振动，而是按照组件介质的波速在铣刀内传播，形成具有不同速率过程的应力波。进一步研究距离切削力作用点不同位置处的应力波波形，发现铣刀内部的应力波具有衰减特性和在不同铣刀组件介质内传播时的折射、反射等波动特性。

[0004] 该结果表明，在ISO15641标准和铣刀安全性判据的双重约束下，尽管切削力引起的应力波不会使高速铣刀产生整体性破坏，但因高速切削冲击产生的诸如刀片破损、刀体及联接元件结合面微小破坏等铣刀局部性的波动力学损伤现象却经常发生，使得铣刀实际失效寿命值远小于预先规定的最小失效寿命值。受此问题影响，相关企业高速加工设备的利用率仅为40%左右，波动力学损伤引发的高速铣刀局部破坏性失效问题，已成为制约高速铣削加工能效大幅度提高的瓶颈。基于此，提出了一种断续冲击载荷作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法是非常必要的。

[0005] 已有的铣刀损伤识别的方法主要有损伤力学和分子动力学。连续损伤力学忽略了介观和微观上的控制机制，因而不能合理地处理分布式微损伤非平衡演化导致的失效问题。分子运动学能够刻画出微损伤形成细节，但微损伤演变过程中的微裂纹、微孔洞等特征，都很难在这种计算方法中体现出来，从而难以推导出宏观材料真实物理特征。因此，上述方法均无法单独用于解决高速铣刀波动力学损伤多尺度演变问题。

发明内容：

[0006] 本发明针对波动力学损伤引发的高速铣刀局部破坏性失效问题，提供了一种断续冲击载荷作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法。通过本发明可确定高速铣刀的高频应力波汇集区域，并对其进行跨尺度关联分析，结合分子动力学仿真，识别出高速铣刀易发生损伤部位及介观尺度下损伤的类型，重点解决了高速、断续冲击载荷作用下铣刀组件潜在的损伤位置与损伤类型识别问题，同时也解决了高速铣刀波动力学损伤多尺度演变问题。

[0007] 本发明的断续冲击作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法，为实现上述目的所

采用的技术方案由以下步骤构成：

[0008] 一、建立高速铣刀瞬态切削力模型和质点动力学方程

[0009] 根据铣刀切削工艺参数、铣刀结构参数、铣刀组件材料参数，获取铣刀瞬态切削力波形满足式(1)：

$$[0010] \quad F(t) = \sum_{i=1}^m F_i(t) = \sum_{i=1}^m p \cdot f_z \cdot a_p \cdot \cos \varphi_i(t) \quad (1)$$

[0011] 式中， p 为作用于刀齿的单位切削层面积上的切削力， f_z 为每齿进给量， a_p 为轴向铣削深度， $F_i(t)$ 为第 i 个刀齿瞬态切削力， $\varphi_i(t)$ 为随时间变化的刀齿瞬时位置角， m 为参与切削的刀齿数量， $F(t)$ 为 m 个刀齿的瞬态切削力， t 为时间，

[0012] 利用铣刀质点运动微分方程表征其局部结构的动力响应，质点动力学方程满足式(2)：

$$[0013] \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{F_i(x,t)}{\rho} \quad (2)$$

[0014] 式中， u 为组件内质点相对位移， T 为弦内张力， ρ 为弦线密度， x 为波阵面随时间变化的空间位置， $F_i(x,t)$ 为刀齿瞬态切削力在该横向振动的激励；式(2)中，质点运动特征值为质点的位置 $u(x,t)$ 和质点运动速度 v 的方程为：

$$[0015] \quad v = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (3)$$

[0016] 二、建立高速铣刀应力波的波动方程

[0017] 利用铣刀结构变化矩阵、铣刀组件材料本构关系、铣刀组件质点相对运动，构建铣刀组件内应力波的波动方程，

[0018] 首先根据铣刀结构将其简化为轴对称结构，获得运动平衡方程为：

$$[0019] \quad \rho_0 A(x) \frac{\partial v}{\partial t} - A(x) \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \sigma \frac{dA(x)}{dx} \quad (4)$$

[0020] 为了方便表明高速铣刀波动方程的推导过程，将材料本构关系定义为最简单的形式：

$$[0021] \quad \sigma = E \varepsilon \quad (5)$$

采用式(4)、式(5)，并根据牛顿第二定律，建立高速铣刀波动方程为

$$[0022] \quad c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{1}{A(x)} \frac{dA(x)}{dx} c_0^2 \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \zeta c_0^2 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

$$[0023] \quad c_0^2 = E/\rho_0, \zeta = -dA(x)/A(x) dx \quad (7)$$

[0024] 波速是描述铣刀应力波的重要参数满足式(8)：

$$[0025] \quad C = \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

[0026] 上述各式中： ρ_0 为材料密度， $A(x)$ 为刀具结构变化矩阵， v 为刀具内的质点运动速度， σ 为应力值； E 为弹性模量， ε 为应变； C 为应力波的波速， x 为波阵面随时间变化的空间位置； c_0^2 为材料内部应力波的传播速度， ζ 为铣刀组件结构的修正系数；

[0027] 三、求解高速铣刀应力波衰减应力值和衰减率

[0028] 定义衰减率 η 为单位应力经过单位位移的衰减数值：

[0029] $\eta = -(1/\sigma_x) d\sigma_x/dx$ (9)

[0030] 对式(9)两边积分可得:

[0031] $\sigma_x = \sigma_0 e^{-\eta x}$ (10)

[0032] 应力波在铣刀内部经过多次反射后的波速C与初始波速c有如下关系:

[0033] $\tau = 1/C = \lambda/c$ $N = (C/c) (\lambda/l)$ (11)

[0034] 高速面铣刀切削时承受的切削力冲击载荷所形成的冲击波长为冲击传递距离L的2倍,因此,上式可改写为下式:

[0035] $N = 2CL/(c1)$ (12)

[0036] 对上式两边做偏微分变化,其中等式右端对L与1进行偏微分变化,得出下公式(13):

[0037] $q = 2\rho_2 C / (\rho_1 c + \rho_2 C)$ (13)

[0038] 瞬态切削力载荷作用下,高速铣刀内部形成的应力波反射次数趋于无穷大的时候,铣刀刀齿区域内应力波衰减后的应力值 σ_x 为:

[0039]
$$\sigma_x = \frac{q [e^{-\eta x_{AB}} + e^{\eta x_{AB}} (1-q) e^{-\eta \eta x_{AB}}]}{1 - (1-q)^2 e^{-\eta \eta x_{AB}}} \sigma_i$$
 (14)

[0040] 对上式进行整理得衰减率的求解方程为:

[0041]
$$\eta = \frac{1}{x} \ln [q^2 (2-q)^2 + 4B^2 (1-q)^2 + q(2-q)]$$
 $B = \sigma_x / \sigma_i$ (15)

[0042] 上式中, η 为衰减率, σ_x 为衰减后应力值, σ_0 为 $x=0$ 处的应力值(Mpa), x 为应力波传播距离; τ 为冲击作用时间, λ 为波长, c 为应力波初始速度, N 为反射次数, L 为应力波传播距离, l 为应力波在铣刀中传播的长度, q 为应力波的反射效率, ρ_1 和 ρ_2 分别为应力波传播时所经过的不同介质材料密度, B 为应力传递比, σ_i 为应力波单次反射后的应力, η_{xAB} 为应力波单次反射的衰减率;

[0043] 四、识别高速铣刀波动力学损伤

[0044] 依据高速铣刀应力波的传播特性,确定应力波汇集区域,利用铣刀该区域跨尺度关联分析结果,结合分子动力学仿真,识别出铣刀局部宏观和介观损伤。

[0045] 本发明的有益效果:本发明首先根据铣刀切削工艺参数、铣刀结构参数、铣刀组件材料参数来获取铣刀瞬态切削力波形,推导出反映铣刀局部结构响应的动力学方程,该方程的初始条件为质点位置与质点运动速度;再依据铣刀结构变化矩阵、铣刀组件材料本构关系和质点相对运动,构建铣刀应力波的波动方程,定量描述瞬态切削力激励下铣刀内部应力应变变化的波动性;之后推导出铣刀应力波衰减后的应力值和衰减率的求解方程,铣刀内部应力波的衰减会改变应力场分布状态,造成局部应力累积,进而引发细微小尺度损伤萌发;最后依据高速铣刀应力波的传播特性,确定应力波汇集区域,利用铣刀该区域跨尺度关联分析结果,结合分子动力学仿真,识别出铣刀局部宏介观损伤。

[0046] 与现有铣刀损伤识别的方法相比,本发明可揭示出高速铣刀宏介观结构域之间的内在联系,有效解决了高速铣刀波动力学损伤多尺度演变问题,识别出铣刀局部宏介观损伤,为后续跨尺度设计更为高效和稳定的高能铣刀提供理论依据。采用本发明的方法,可确定高速铣刀的高频应力波汇集区域,并对其跨尺度关联分析,结合分子动力学仿真,识别出高速铣刀易发生损伤部位及介观尺度下损伤的类型,重点解决了高速、断续冲击载

荷作用下铣刀组件潜在的损伤位置与损伤类型识别问题。

附图说明：

- [0047] 图1为高速铣刀波动力学损伤识别方法的流程图；
- [0048] 图2为高速铣刀铣削过程图；
- [0049] 图3为多齿瞬态切削力波形图；
- [0050] 图4为霍普金森压杆实验中35CrMo的应力-应变关系的实验结果图；
- [0051] 图5为霍普金森压杆实验中42CrMo的应力-应变关系的实验结果图；
- [0052] 图6为冲击载荷0.4MPa下铣刀组件材料35CrMo的试件在超景深显微镜下的试件表面变形图；
- [0053] 图7为冲击载荷0.8MPa下铣刀组件材料35CrMo的试件在超景深显微镜下的试件表面变形图；
- [0054] 图8为冲击载荷0.4MPa下铣刀组件材料35CrMo的试件在金相显微镜下的试件表面变形图；
- [0055] 图9为冲击载荷0.8MPa下铣刀组件材料35CrMo的试件在金相显微镜下的试件表面变形图；
- [0056] 图10为冲击载荷0.4MPa下铣刀组件材料42CrMo的试件在超景深显微镜下的试件表面变形图；
- [0057] 图11为冲击载荷0.8MPa下铣刀组件材料42CrMo的试件在超景深显微镜下的试件表面变形图；
- [0058] 图12为冲击载荷0.4MPa下铣刀组件材料42CrMo的试件在金相显微镜下的试件表面变形图；
- [0059] 图13为冲击载荷0.8MPa下铣刀组件材料42CrMo的试件在金相显微镜下的试件表面变形图；
- [0060] 图14为42CrMo原子群运动图；
- [0061] 图15为晶格尺寸仿真结果图；
- [0062] 图16为原子群能量仿真结果图；
- [0063] 图17为高速铣刀损伤跨尺度分析流程图；
- [0064] 图18为刀体齿根损伤位置图；
- [0065] 图19为螺钉与刀片定位面损伤位置图；
- [0066] 图20为刀体齿根处损伤中位错运动的介观分析图；
- [0067] 图21为刀体齿根处损伤中位错塞积的介观分析图；
- [0068] 图22为刀体齿根处损伤中晶界迁移和微裂纹扩展的介观分析图；
- [0069] 图23为螺钉与刀片定位面损伤中位错运动的介观分析图；
- [0070] 图24为螺钉与刀片定位面损伤中位错塞积和微裂纹扩展的介观分析图；
- [0071] 图25为螺钉与刀片定位面损伤中晶界迁移和晶面解理的介观分析图。

具体实施方式：

- [0072] 以下结合各附图对本发明的具体实施方式进行说明：

[0073] 参照图1,本发明的断续冲击载荷作用下的高速铣刀波动力学损伤识别方法由以下步骤构成:

[0074] 一、建立高速铣刀瞬态切削力模型和质点动力学方程

[0075] 高速铣刀切削时,由于其刀齿切削的断续性和切削厚度的变化,使得波形呈周期性变化的切削力成为引起刀具系统振动的主要激振力之一,其铣削过程及瞬态切削力波形如图2、图3所示,图2中, v_f 为铣刀进给速度, n 为铣刀转速, $k_{c,x}$ 、 $k_{c,y}$ 、 $k_{c,z}$ 分别为沿三个方向的模态刚度, $c_{c,x}$ 、 $c_{c,y}$ 、 $c_{c,z}$ 分别为三个方向的模态阻尼,图3中, t_{m-2} 、 t_{m-1} 、 t_m 分别为第 $m-2$ 、第 $m-1$ 、第 m 个刀齿的切削时间。

[0076] 多个刀齿同时参与切削时,高速铣刀瞬态切削力为:

$$[0077] \quad F(t) = \sum_{i=1}^m F_i(t) = \sum_{i=1}^m p \cdot f_z \cdot a_p \cdot \cos \varphi_i(t) \quad (1)$$

[0078] 式中, p 为作用于刀齿的单位切削层面积上的切削力, f_z 为每齿进给量, a_p 为轴向铣削深度, $F_i(t)$ 为第 i 个刀齿瞬时切削力, $\varphi_i(t)$ 为随时间变化的刀齿瞬时位置角, m 为参与切削的刀齿数量, $F(t)$ 为 m 个刀齿的瞬态切削力, t 为时间。

[0079] 高速铣刀瞬态切削力的冲击不仅引起铣刀整体振动,而且会引起铣刀局部振动,为揭示铣刀局部结构变形和损伤,利用铣刀质点运动微分方程表征其局部结构的动力响应。质点动力学方程满足式(2):

$$[0080] \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{F_i(x,t)}{\rho} \quad (2)$$

[0081] 式中, u 为组件内质点相对位移, T 为弦内张力, ρ 为弦线密度, x 为波阵面随时间变化的空间位置, $F_i(x,t)$ 为刀齿瞬态切削力在该横向振动的激励;式(2)即为刀齿瞬态切削力激励下的铣刀质点受迫振动方程。其中,质点运动特征值为质点的位置 $u(x,t)$ 和质点运动速度 v

$$[0082] \quad v = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (3)$$

[0083] 由此可见,利用铣刀质点运动特征值可以推导出反映铣刀局部结构响应的动力学方程,质点位置与质点运动速度为该动力学方程的初始条件。

[0084] 二、建立高速铣刀应力波的波动方程

[0085] 应力波作为铣刀内部应力载荷的一种扰动形式和质点的运动结果,有着特定特征参数对其描述,波动方程是研究应力波问题的关键控制方程,为此,考虑高速铣刀应力波的特点,对其波动方程进行简单推导,

[0086] 根据铣刀结构将其简化为轴对称结构,运动平衡方程满足式(4):

$$[0087] \quad \rho_0 A(x) \frac{\partial v}{\partial t} - A(x) \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \sigma \frac{dA(x)}{dx} \quad (4)$$

[0088] 将铣刀组件材料的本构关系定义为最简单的形式如式(5):

$$[0089] \quad \sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

[0090] 采用式(5)、式(6),根据牛顿第二定律,建立高速铣刀波动方程如式(6):

$$[0091] \quad c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{1}{A(x)} \frac{dA(x)}{dx} c_0^2 \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \zeta c_0^2 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

[0092] $c_0^2 = E/\rho_0, \zeta = -dA(x)/A(x) dx$ (7)

[0093] 波速是描述铣刀应力波的重要参数,在忽略介质转变效应的前提下,应力波的波速可以利用波阵面空间位置对时间的微商来获得,

[0094] $C = \frac{dx}{dt}$ (8)

[0095] 上述各式中: ρ_0 为材料密度, $A(x)$ 为刀具结构变化矩阵, v 为刀具内的质点运动速度, σ 为应力值, E 为弹性模量, ε 为应变, u 为组件内质点的相对位移, C 为应力波的波速, x 为波阵面随时间变化的空间位置; c_0^2 为材料内部应力波的传播速度, ζ 为铣刀组件结构的修正系数。

[0096] 三、求解高速铣刀应力波衰减率和衰减应力值

[0097] 定义衰减率 η 为单位应力经过单位位移的衰减数值如式(9):

[0098] $\eta = -(1/\sigma_x) d\sigma_x/dx$ (9)

[0099] 对式(9)两边积分可得式(10):

[0100] $\sigma_x = \sigma_0 e^{-\eta x}$ (10)

[0101] 将应力波近似为矩形波,则应力波在铣刀内部经过多次反射次后的波速 C 与初始波速 c 关系如式(11):

[0102] $\tau = 1/C = \lambda/c, N = (C/c)(\lambda/l)$ (11)

[0103] 高速面铣刀切削时承受的切削力冲击载荷所形成的冲击波长为冲击传递距离 L 的2倍,因此,式(11)可改写为式(12):

[0104] $N = 2CL/(c_1 l)$ (12)

[0105] 对式(12)两边做偏微分变化,其中等式右端对 L 与 l 进行偏微分变化,如式(13):

[0106] $q = 2\rho_2 C / (\rho_1 c + \rho_2 C)$ (13)

[0107] 瞬态切削力载荷作用下,高速铣刀内部形成的应力波反射次数趋于无穷大的时候,铣刀刀齿区域内应力波衰减后的应力值 σ_x 为:

[0108]
$$\sigma_x = \frac{q \left[e^{-\eta x_{AB}} + e^{\eta x_{AB}} (1-q) e^{-\eta x_{AB}} \right]}{1 - (1-q)^2 e^{-\eta x_{AB}}} \sigma_i$$
 (14)

[0109] 对式(14)整理得衰减率的求解方程为:

[0110]
$$\eta = \frac{1}{x} \ln \left[q^2 (2-q)^2 + 4B^2 (1-q)^2 + q(2-q) \right], \quad B = \sigma_i / \sigma_0$$
 (15)

[0111] 上述各式中, η 为衰减率, σ_x 为衰减后应力值, σ_0 为 $x=0$ 处的应力值(Mpa), x 为应力波传播距离, τ 为冲击作用时间, λ 为波长, c 初始速度, N 为反射次数, L 为应力波传播距离, l 为应力波在铣刀中传播的长度, q 为应力波的反射效率, ρ_1 和 ρ_2 分别为应力波传播时所经过的不同介质材料密度, B 为应力传递比, σ_i 为应力波单次反射后的应力, $\eta_{x_{AB}}$ 为应力波单次反射的衰减率。

[0112] 四、识别高速铣刀波动力学损伤

[0113] 选取高速铣刀组件材料35CrMo、42CrMo,进行霍普金森压杆实验,获得铣刀组件材料在高速冲击载荷作用下的应力-应变关系和试件变形检测结果,如图4至图13所示。

[0114] 实验结果表明,冲击载荷加载后试件呈波状界面,这是冲击加载后的铣刀组件材料的基本组织特征,高速、断续冲击载荷作用并没有使铣刀组件材料发生大规模的结构变

化,但在一定程度上引起其内部结构变形和合并。

[0115] 提出高速铣刀介观损伤分析方法,首先利用铣刀组件能谱分析结果,构建高速铣刀刀体原子群模型,然后采用第一性原理求解原子群能量最低的稳定构型,利用力连接方法进行铣刀组件分子动力学仿真,结果如图14至图16所示。图中,铣刀组件材料为42CrMo,加载应力0.97GPa。

[0116] 由图14至图16可知,铣刀组件材料42CrMo在加载应力作用下,晶格结构尺寸呈现出波动性的变化,总体能量也呈现出明显的周期性波动。原子群构型受力中央有较为明显的位错带出现,发生了的位错滑移与位错攀移运动;在受力部位的两端交界带处由于位错密度的不断增加,位错间的相互作用力增大,发生严重的位错塞积,引起了应力集中。

[0117] 依据上述分析结果,高速铣刀波动力学损伤识别首先根据铣刀切削工艺参数、铣刀结构参数、铣刀组件材料参数,获取铣刀瞬态切削力波形,推导出反映铣刀局部结构响应的动力学方程;依据铣刀结构变化矩阵、铣刀组件材料本构关系和质点相对运动,构建铣刀应力波的波动方程,定量描述瞬态切削力激励下铣刀内部应力应变变化的波动性;推导出铣刀应力波衰减后的应力值和衰减率的求解方程;依据高速铣刀应力波的传播特性,确定应力波汇集区域,利用铣刀该区域跨尺度关联分析结果,结合分子动力学仿真,识别出铣刀局部宏介观损伤,如图17所示。图中, F_{G1} 为铣削工艺参数, F_{G2} 为铣刀结构参数, F_{G2} 为铣刀组件材料参数, $S(x, \epsilon)$ 为铣刀原子群能量, $f(x, \epsilon)$ 为铣刀原子群运动特征, M_t 为铣刀原子群构型, W_t 为元素数百分比, A_t 为元素质量百分比, FR_m 为介观损伤特征, FR_s 为宏观损伤特征。

[0118] 采用上述方法分析直径63mm四齿高速铣刀的高频应力波汇集区域,并对其进行跨尺度关联分析,结果如图18至图25所示。图中,铣刀刀体材料为42CrMo,螺钉材料为35CrMo,刀片材料为硬质合金。

[0119] 结果表明,根据铣刀组件内部应力波传递特点,其能量主要集中在刀体的齿根处,宏观上损伤主要表现形式是以剪切断裂为主的组合型损伤,螺钉与刀片定位面组合变形和螺钉头上下部分均受到不同程度的拉伸作用,沿轴向切削力方向受到剪切载荷。介观上刀体齿根处的损伤类型为位错滑移、位错攀移、位错塞积、微裂纹扩展、晶界迁移,螺钉与刀片定位面的损伤类型分为位错滑移、位错攀移、位错塞积、微裂纹扩展、晶界迁移、晶面解理。

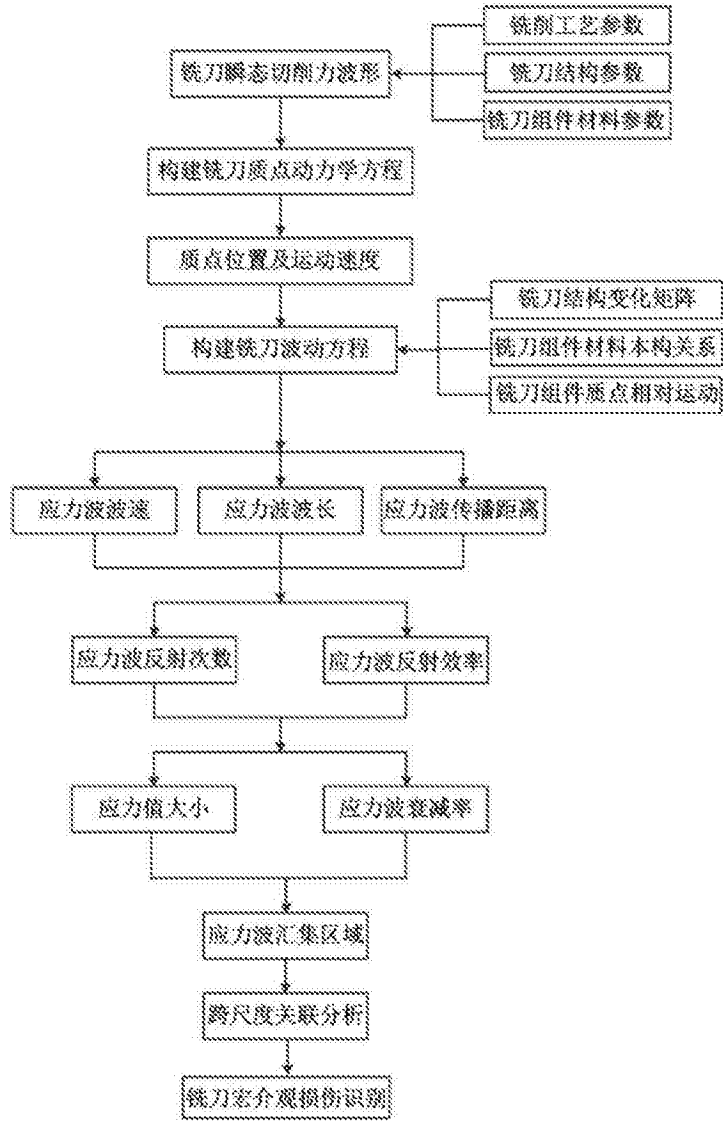


图1

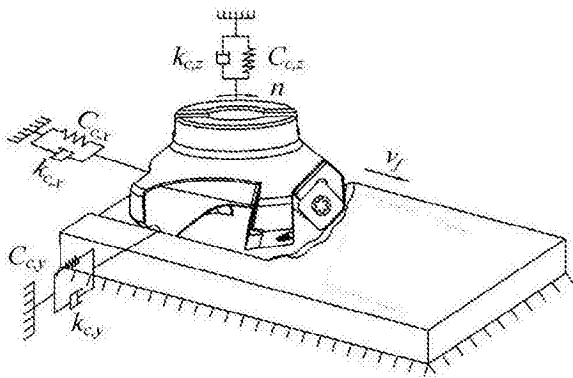


图2

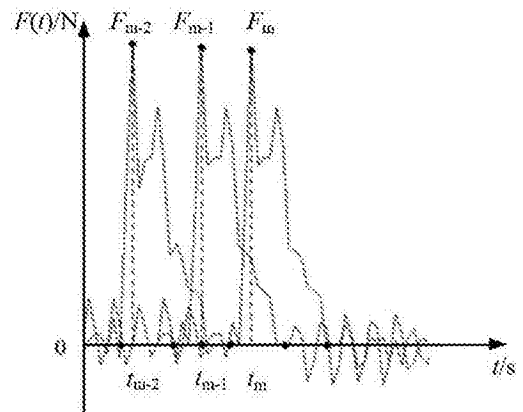


图3

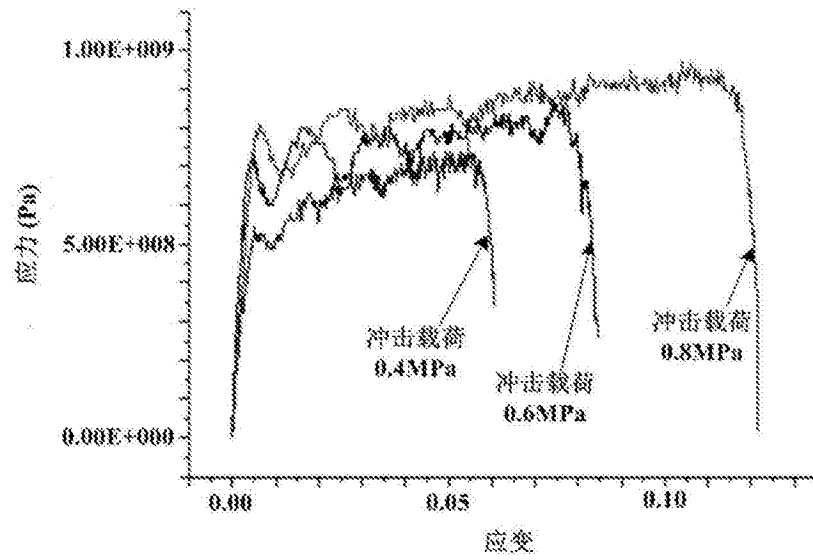


图4

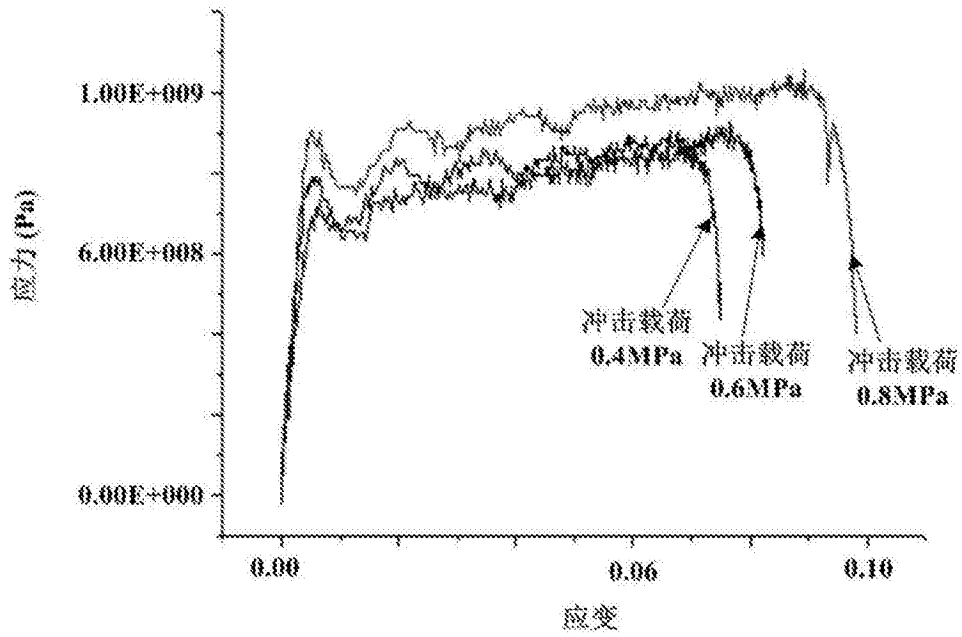


图5

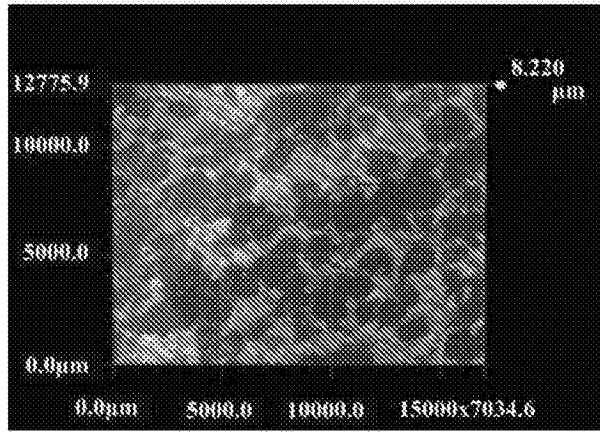


图6

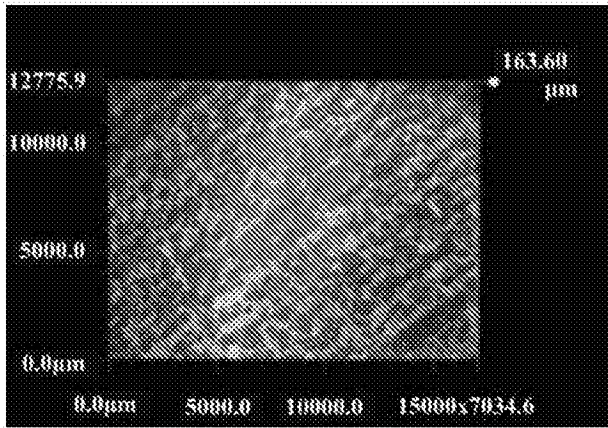


图7

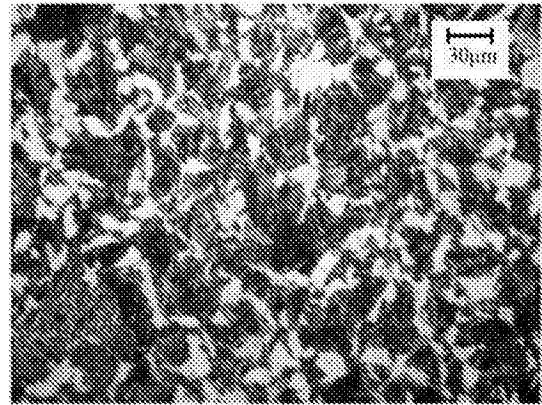


图8

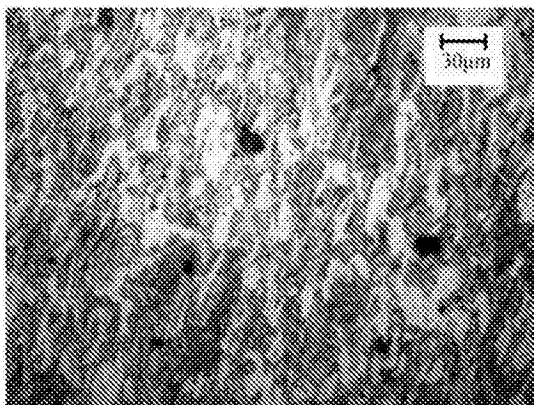


图9

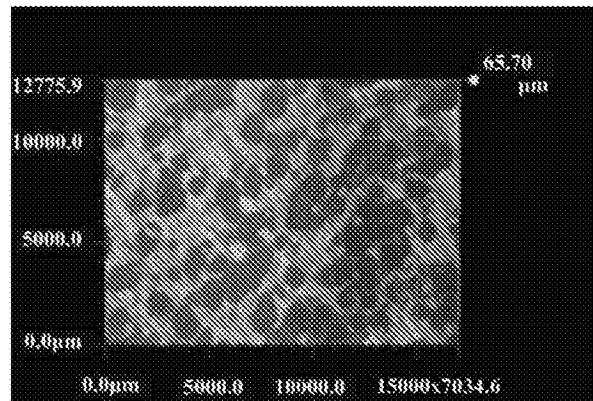


图10

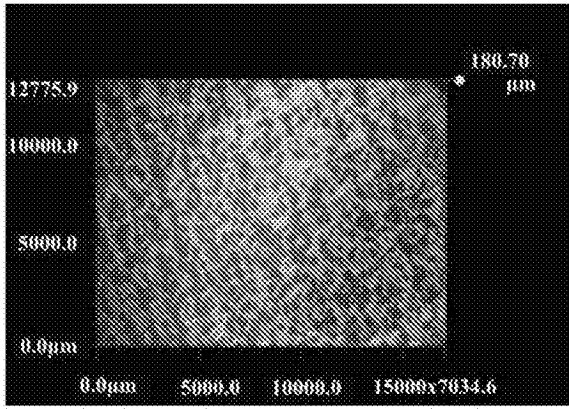


图11

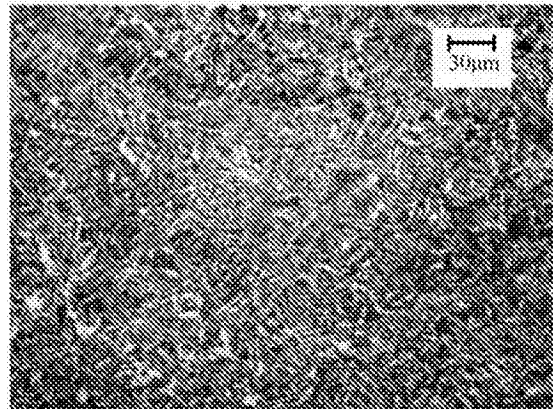


图12

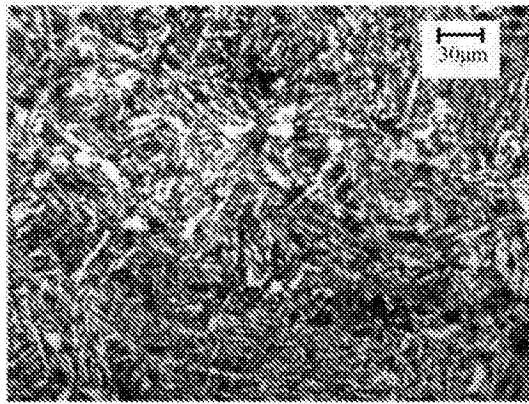


图13

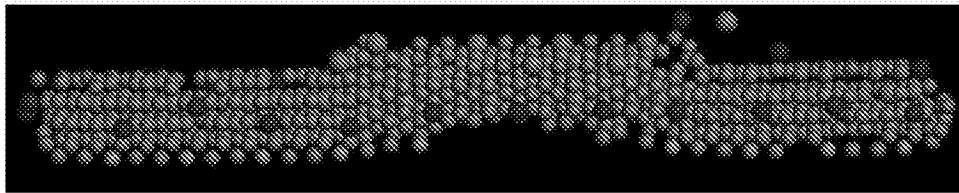


图14

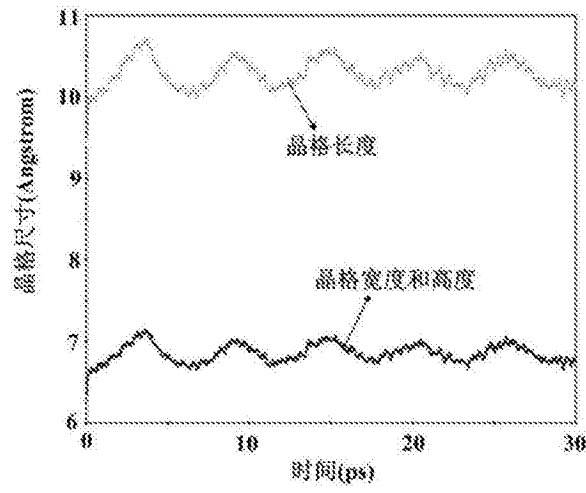


图15

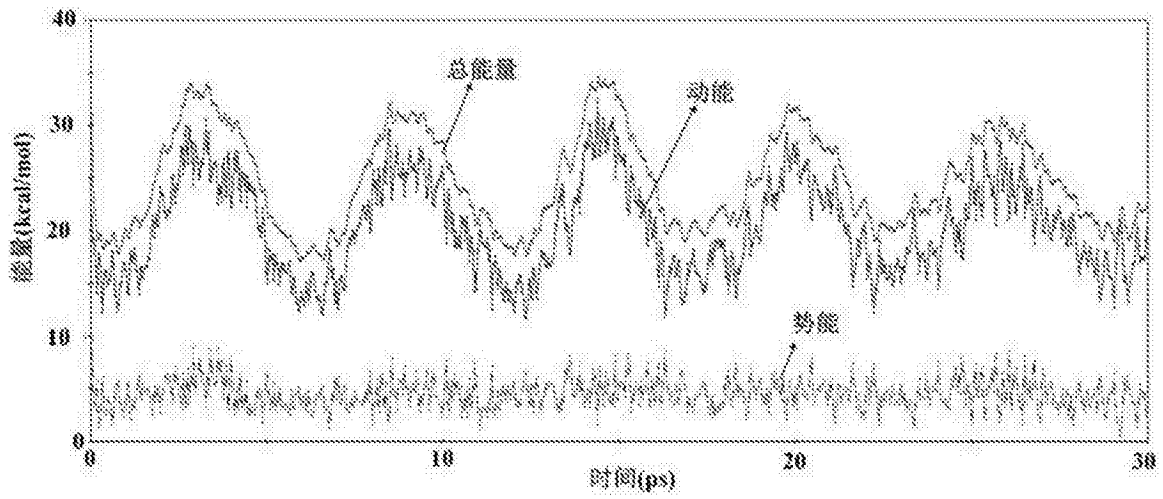


图16

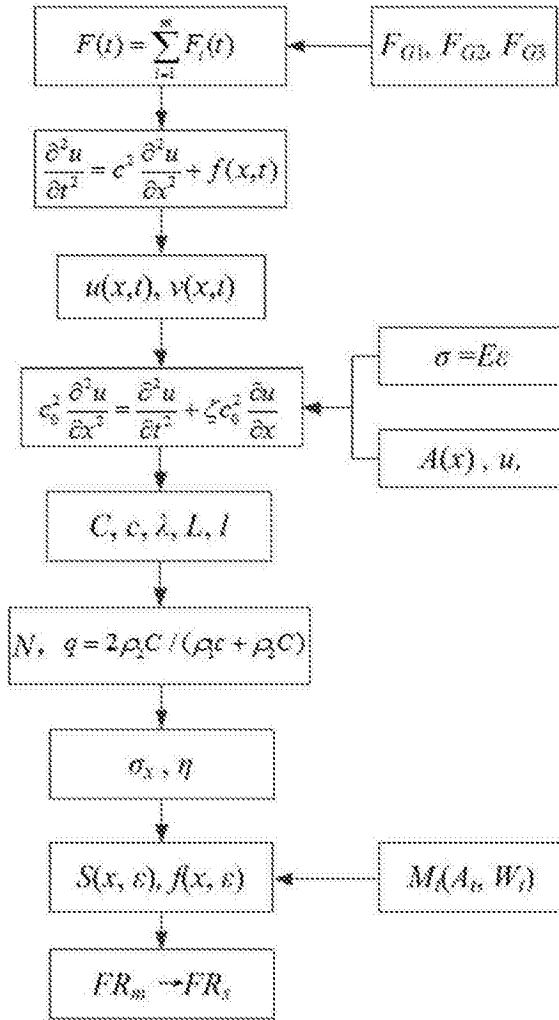


图17

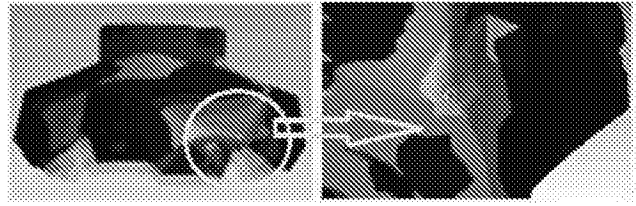


图18

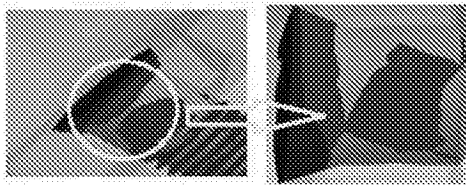


图19

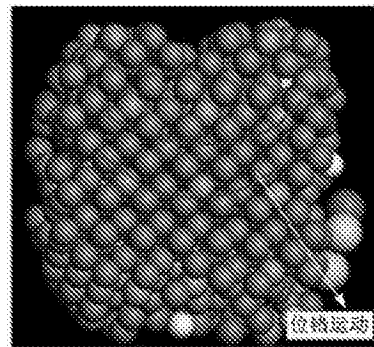


图20

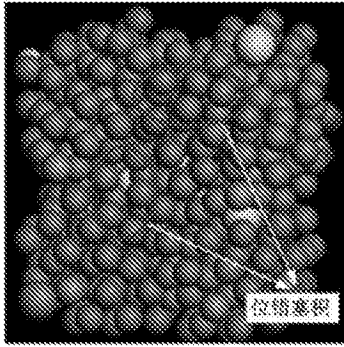


图21

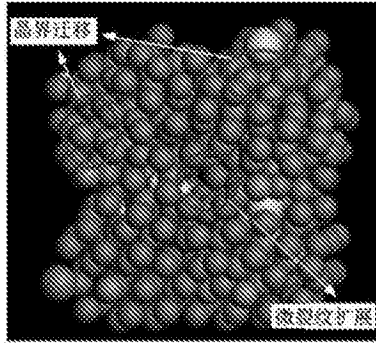


图22

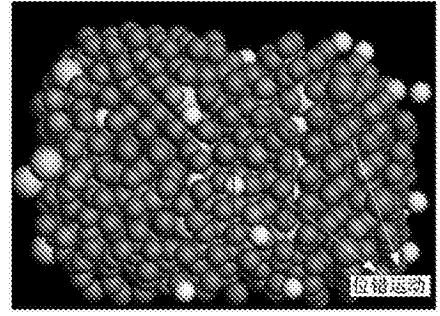


图23

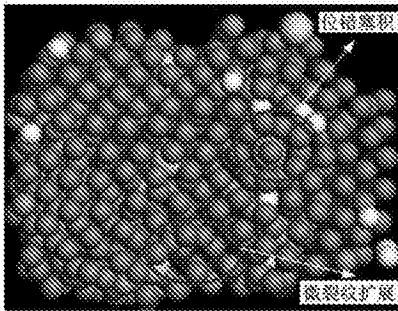


图24

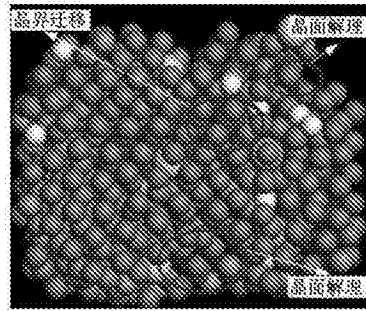


图25