DOI: 10.3901/JME.2014.02.062

基于序列图像重构的 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料抗弯强度预测^{*}

林晨黄明李跃明

(西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室 西安 710049)

摘要:针对考虑细观构造特性的纳米复合陶瓷材料宏观强度预测问题,开发基于序列图像的多相材料细观构造有限元重构方法,建立可以准确反映 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料细观构造的三维有限元模型,并且利用统一强度理论建立可考虑线性硬化的弹塑性本构模型,编写用于强度预测的有限元程序。假设各组分相均为刚塑性材料,考虑统一强度理论各种退化模型(*b*=0,*b*=0.5,*b*=1.0)数值预测材料宏观抗弯强度的上下限,并且发现计算模型参数*b*=0.5 时所得结果与试验结果吻合很好。 假设材料增强相具有硬化效应,研究它对材料宏观抗弯强度的影响。研究材料组分相体积分数比与 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料宏观抗弯强度之间的关系,为今后材料设计、优化提供参考。

关键词:序列图像;重构方法;纳米复合陶瓷材料;统一强度理论;抗弯强度 中图分类号:TB321

Bending Strength Prediction of Al₂O₃/(W,Ti)C Ceramic Nanocomposite Based on Sequence Image Reconstruction Method

LIN Chen HUANG Ming LI Yueming (State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: To consider the influence of material's microstructure on macro-bending strength of $Al_2O_3/(W,Ti)C$ ceramic composite, a method for automatically reconstruct FE mesh models of materials is developed based on X-ray tomography image, and a calculation program considering the material's strain-hardening for strength prediction is complied by using unified strength theory(UST). Then the upper and lower limit of the bending strength of $Al_2O_3/(W,Ti)C$ ceramic composite is forecasted based on the rigid-plastic assumption with UST. The predicted strength is proved to be accurate compared with the experimental result when the parameter *b*, in UST, is chosen to be 0.5. Utilizing linear-hardening elastic-plastic constitutive model based on UST, the relationship between hardening effect of reinforcing phase and macro-bending strength of $Al_2O_3/(W,Ti)C$ ceramic composite is studied. Considering different volume fraction of compositions in $Al_2O_3/(W,Ti)C$, bending strength of $Al_2O_3/(W,Ti)C$ ceramic nano-composite is forecast, which can be used for reference of research and development of $Al_2O_3/(W,Ti)C$ ceramic composite.

Key words: sequence image; reconstruction method; ceramic nanocomposite; unified strength theory; bending strength

0 前言

Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料以其高硬度、 高耐磨、耐热性等优点,在工程领域发挥重要作 用^[1]。抗弯强度是其力学性能重要指标,在材料组 成成分一定、工艺条件不变的情况下,其显微结构 的变化不大,陶瓷材料的抗弯强度主要由其成分体 积分数决定^[2]。但由于 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷 材料的抗弯强度对各组分体积分数极为敏感,且组 分之间有时存在复杂的交互作用,材料的研制一般 都要经过大量繁琐的试验来逐渐摸索,因此,准确 把握材料组分与强度性能之间的关系一直是材料研 究领域的一个难点,阻碍了材料设计工作的发展。

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2009CB724402)和国家自然科学 基金(11072187)资助项目。20130316 收到初稿, 20130909 收到修改稿

在通常的复合陶瓷材料抗弯强度研究中,往往 是利用单一变量因素试验法,即改变一种添加相体 积分数,而保持其他添加相的比例不变,从中找出 抗弯强度同该添加相成分比的关系,用同样的方法 再研究抗弯强度与其他添加相的关系。其缺点在于 只反映出材料抗弯强度随某一种添加相与基体成分 比例的变化趋势,不能反映几种添加相同时变化时 的规律。这是因为抗弯强度与各添加相体积分数之 间,不是一种简单的线性叠加关系,而是一种十分 复杂的非线性的映射关系。要表达这种关系,必须 依据大量的试验数据,需要漫长的时间去积累,严 重阻碍了陶瓷材料的研究进程。

为了缩短材料设计中繁琐的试验过程,许多学 者采用数值预测的方法。目前复合材料力学有效性 能预测的数值方法主要有两类,一类是宏观力学方 法,将复合材料当作宏观均匀介质,不考虑各组分 之间的相互影响, 仅考虑复合材料的平均物理力学 响应,各种材料参量都是靠宏观力学试验或经验公 式得到。由于宏观力学方法忽略了材料的细观结构 特点,因此无法反映材料性能与各组分相体积分数 之间的关系。另一类是细观力学方法,它考虑了复 合材料内部的微观结构特性,如增强相、夹杂、孔 洞、微裂纹等的形状、种类、几何尺寸、取向、在 基体中的分布特征等,建立复合材料宏观性能同组 分性能及细观结构之间的定量关系,并揭示复合材 料结构在一定工况下的响应规律及其本质[2-4]。但如 何建立可以精确反映材料真实细观结构的网格模 型,成为了制约数值预测方法的瓶颈。

本文构建了一种基于序列图相重构的数值方 法对材料抗弯强度进行直接预测。首先,开发了一 种基于序列图像的多相材料细观构造有限元重构方 法。该方法将材料序列图像中的信息映射到重构的 有限元模型中,使得材料中的任何细节结构信息都 可以在有限元模型中得到重现。另外,通过设定阈 值,该方法能够建立各相材料体积分数各异、微观 构造相似的有限元网格模型,借此考虑各组分体积 分数比变化后材料的细观结构。

在此基础上,考虑复杂应力状态下中间主应力 对材料强度的影响,以及材料的拉伸、抗压强度不 等特性,使用了可以充分反映材料强度特性的统一 强度理论^[5],并建立虚拟三点弯曲试验,预测 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的抗弯强度。经典 强度理论由于各自缺陷无法全面考虑这些影响。

预测结果不仅与现有各种型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的试验抗弯强度相吻合,证实了 本文所用抗弯强度预测方法的正确性。通过改变材 料各组分的体积分数比,还得到了众多新组分配比下的抗弯强度预测结果,为快捷、经济地设计研制新的 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料提供了新的思路和有效手段。

1 有限元网格重构

为准确预测 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料 的强度,须首先建立能够反映其真实微观构造的有 限元模型。然而,由于陶瓷复合材料各组分相形状 的不规则性,及其分布形式的复杂性,建立反映材 料真实微观构造信息的网格模型是数值计算领域的 一大难题。本文提出了一种直接基于材料序列截面 图像重构反映其真实微观构造的有限元网格模型的 方法,该方法在利用 X 射线断层摄影术^[6]采集材料 序列图像的基础上,通过分别引入灰度直方图和累 积分布函数来对图像进行阈值分割和确定各组分材 料的体积分数。通过与单层图像或序列图像的像素 数据阵列建立一一映射,该方法重构出了由矩形单 元或长方体单元组成的有限元网格模型。在建立的 网格模型中,利用图像阈值分割得到的各相分别由 不同的单元材料属性来表征。为了提高重构的精确 性,该方法对序列图像进行了对比度受限自适应直 方图均衡[7]、中值滤波[8]和图像层间插值处理,分 别用于增强对比度、降低噪声及重建 z 方向的微结 构。此外,本研究提出了图像切割和像素点合并方 法,用以平衡重构精度和计算量之间的矛盾。

对于 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料,利用 X 射线断层摄影术采集其序列图像如图 1 所示,该序 列图像的灰度直方图和累积分布函数示于图 2 中, 由图 2 可知,材料序列图像的灰度阈值(g)为 139, 且基体相 Al₂O₃的体积分数为 54.66%。试验测量表 明,该材料中 Al₂O₃的体积分数为 55.00%,故而重 构结果与试验值之间的相对误差只有 0.62%。



图 1 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的断层序列图像



对 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料重构出来 的三维有限元网格模型如图 3 所示。实例分析表明, 该方法能够有效地重构材料的微观构造,并且与材 料截面图像分辨率相同尺寸量级的微构造特征都可 以精确地重构出来。另外,通过设定阈值,该方法 能够建立各相材料体积分数各异、微观构造相似的 有限元网格模型,借此考虑各组分体积分数比变化 后材料的细观结构。



图 3 Al₂O₃/(W,Ti)C 复合陶瓷材料重构 3D 有限元网格

由于建立了上述基于序列图像的多相材料细 观构造有限元重构方法,因此可采用有限元法对 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的力学性能进行 直接预测。抗弯强度是 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷 材料的重要力学指标,本文以下部分将通过选取能 客观描述细观材料强度特性的强度理论,建立三点 弯曲虚拟试验方法,对 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷 材料进行宏观抗弯强度预测。

2 强度理论的选取

对材料进行强度预测,须选取合适的强度理 论。许多试验结果表明,复杂应力状态下中间主应 力对材料强度的影响不容忽视;同时许多材料显现 出拉伸、抗压强度不等的特性。然而众多经典强度 理论,如 Mises 屈服准则、Mohr-Coulomb 强度理论 等,无法全面考虑这些因素,使得基于经典理论的 强度预测存在不精确性。

为准确预测 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料 的宏观抗弯强度,本文采用即可考虑中间主应力影 响,又能描述材料拉压强度特性不等的统一强度理 论,其数学表达式如式(1)所示^[5]

$$\begin{cases} F_1 \equiv \sigma_1 - \frac{a}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_b & \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + a\sigma_3}{1+a} \\ F_2 \equiv \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - a\sigma_3 = \sigma_b & \sigma_2 > \frac{\sigma_1 + a\sigma_3}{1+a} \end{cases}$$
(1)

式中, *a* 为材料拉压强度特性比,可用于考虑拉压 异性对材料强度的影响; *b* 为材料拉剪特性比, 反映中间主应力对材料强度的影响; *o*_b为材料抗拉 强度。

图 4 所示为统一强度理论在 π 平面上的极限 线。可见,统一强度理论可依据参数 b 的取值(0<b<1) 而退化为己有的线性强度理论,如 Tresca 屈服准则、 Mohr-Coulomb 屈服准则和双剪强度准则^[5]等,同时 又可线性逼近其他非线性,如 Mises、强度理论。 许多学者开展了相关研究,如潘晓明等^[9]利用商用 软件 ABAQUS 开发了基于统一强度理论的有限元 程序,马宗源等^[10]建立了基于拉格朗日有限差分方 法的统一弹塑性有限差分格式。以上研究大多忽略 了材料的变形硬化效应,而本文研究对象是多相复 合材料,其中材料的增强相(W,Ti)C 具有变形硬化效 应,因此必须建立考虑硬化效应的弹塑性模型。



图 4 统一强度理论在 π 平面上的极限线

利用有限元法进行弹塑性分析,须建立 Gauss 积分点处的增量形式本构关系。本文根据式(1)给出 的统一强度理论屈服函数表达式,采用相关联塑性 流动法则,考虑等向硬化效应,建立基于统一强度 理论的增量形式弹塑性本构关系。

依据增量理论,一个增量步内的应变增量 $\Delta \epsilon$ 可以被分解为弹性应变增量 $\Delta \epsilon^{e}$ 和塑性应变增量 $\Delta \epsilon^{o}$ 两部分

 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^e + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^\mu$

64

(2)

65

依据胡克定律,可得应力增量 $\Delta \sigma$ 与应变增量 的关系

$$\Delta \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{D}^{e} : (\Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{p}) \tag{3}$$

式中, D^e为材料的弹性刚度矩阵。

以式(1)中统一强度理论屈服条件表达式 F₁为例(F₂同样满足以下推导,在此略去),相关联流动法则下塑性应变增量

$$\Delta \varepsilon^{p} = \Delta \lambda q \qquad q = \frac{\partial F_{1}}{\partial \sigma} \tag{4}$$

式中, Δλ 为表征塑性应变大小的塑性流动乘子; q 为塑性应变方向矢量。

依据塑性一致性条件,当材料发生塑性屈服 时,有Δλ>0,且

$$\Delta F_1(\boldsymbol{\sigma}, \overline{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\,p}) \equiv \frac{\partial F_1}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \Delta \boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F_1}{\partial \overline{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\,p}} \Delta \overline{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\,p} = 0 \qquad (5)$$

式中, $\bar{\epsilon}^{p}$ 为等效塑性应变,在线性工作硬化假设 下有

$$\frac{\partial F_1}{\partial \overline{\varepsilon}^p} = -H \qquad \Delta \overline{\varepsilon}^p = \Delta \lambda \tag{6}$$

式中, H为线性硬化模量, 将式(3)、(4)、(6)代入式 (5)中, 可得

$$\Delta \lambda = \frac{\boldsymbol{q} : \boldsymbol{D}^e : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}}{\boldsymbol{q} : \boldsymbol{D}^e : \boldsymbol{q} + H}$$
(7)

结合式(3)、(4)、(7),得到增量形式的弹塑性 本构关系

$$\Delta \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{D}^{ep} : \Delta \boldsymbol{\varepsilon} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{D}^{ep} = \boldsymbol{D}^{e} - \frac{(\boldsymbol{D}^{e}:\boldsymbol{q}) \otimes (\boldsymbol{D}^{e}:\boldsymbol{q})}{\boldsymbol{q}: \boldsymbol{D}^{e}:\boldsymbol{q} + H}$$
(9)

式中, Dep 为材料的弹塑性刚度矩阵。

由式(9)知,弹塑性刚度矩阵中存在考虑变形硬 化的硬化模量 H,因此上述本构关系不仅可以描述 理想弹塑性条件下(H=0)材料的应力变形关系,也可 描述线性硬化条件下材料的应力变形关系。

3 抗弯强度预测

3.1 三点弯曲试验模拟

三点弯曲试验是测试材料抗弯强度的主要方法^[11]。本文使用基于序列图像的多相材料细观构造 有限元重构方法,生成可反映 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复 合陶瓷微观结构的网格模型,以及基于统一强度理 论的弹塑性本构模型编制的程序,进行三点弯曲数 值试验,预测材料抗弯强度。

图 5 为计算所用的网格模型,黑色为 Al₂O₃基体,白色为(W,Ti)C 增强相。几何尺寸为 50:5:4; 网格规模为 34.3 万单元,可精确反映 Al₂O₃/(W,Ti)C



纳米复合陶瓷刀具材料的微观构造。

图 5 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的有限元网格模型

为模拟真实三点弯曲试验,施加如图 6 所示的 边界条件,即模型一端简支,另一端固支,模型对 称中线仅可上下滑动,施加垂直向下的强制位移 U, 直至加载位置的塑性区贯通(图 7),绘出应力转角曲 线,得到数值预测的最终结果。



图 7 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的等效塑性应变分布

3.2 刚塑性假设下的抗弯强度预测

以现有型号为 AWT10^{[11}的 Al₂O₃/(W,Ti)C 陶瓷 材料为研究对象。其材料组分比如下: 增强相体积 分数为 45%, 基体体积分数为 55%(其中纳米 Al₂O₃ 占基体百分比为 20%)。假设各相材料均为刚塑性材 料,统一强度理论参数 b 分别取 0、0.5、1.0,进行 抗弯强度预测。计算所需力学参数详见表 1。

表1 组分相力学性能参数

相	弹性模量 E/GPa	泊松 比 <i>レ</i>	拉压强度 比 a	抗拉强度 o _b / MPa	硬化模量 H/MPa
基体 Al ₂ O ₃	400	0.26	0.088 6	265	0
增强相 (W,Ti)C	570	0.20	0.367 0	1 790	0

图 8 为刚塑性假设,参数 b 取 0、0.5、1.0 时, Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料——AWT10 的应 力转角曲线。



由图 8 可知, 取参数 b=0, 即统一强度理论退 化为 Mohr-Coulomb 强度理论, 得到 AWT10 的抗弯 强度预测值为 826 MPa, 一般表现为忽略中间主应 力对材料强度影响,所得预测结果小于实际值,是 抗弯强度预测下限。

取参数 b=1,即统一强度理论退化为双剪强度 理论,AWT10 的抗弯强度预测值为 894 MPa,一般 认为高估中间主应力对材料强度的影响,所得的预 测结果大于实际值,是抗弯强度预测上限。

试验测得抗弯刚度为 850 MPa^[12],落于上述预 测范围之间。取参数 b=0.5,AWT10 的抗弯强度预 测值为 853 MPa,与试验结果吻合很好,说明预测 的方法和结果都是可信的。

3.3 增强相硬化效应对宏观抗弯强度的影响

假设增强相(W,Ti)C 具有变形硬化效应,即硬 化模量 H 不为 0,基体 Al₂O₃材料无硬化(硬化模量 H=0),同时取参数 b=0,通过改变弹塑性计算模型 中增强相(W,Ti)C 硬化模量的取值,研究它对宏观 抗弯强度预测结果影响。计算过程中增强相(W,Ti)C 硬化模量的取值为 0、0.5、1.0、1.5、2.0(其他力学 参数参见表 1)。

图 9 所示为不同硬化模量下, Al₂O₃/(W,Ti)C 纳 米复合陶瓷材料——AWT10 的应力转角曲线。



由图 9 可见, AWT10 宏观抗弯强度的预测结果 随增强相(W,Ti)C 的硬化模量取值增加而提高。硬 化模量取值 0~2 GPa, 相应 AWT10 抗弯强度预测 范围在 826~921 GPa。由图 9 中 H=0 的曲线与 H 不为 0 的曲线进行比较,可见考虑增强相(W,Ti)C 的变性硬化效应后, Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材 料在宏观上也体现出了硬化现象。

3.4 增强相体积分数不同,材料抗弯强度预测

前文考虑增强相体积分数为45%的实际情况, 这里改变增强相(W,Ti)C体积分数,同时保持基体 中纳米 Al₂O₃的百分比不变,预测材料的抗弯强度。

假设各组分相材为刚塑性材料,取 b=0.5,材 料中组分相体积分数取值如表 2 所示。

	表 2	材料组分的体	本积分数 %
编号	增强相(W,Ti)C	基体 Al ₂ O ₃	纳米 Al ₂ O ₃ 占基体百分比
1	15	85	20
2	30	70	20
3	45	55	20
4	60	40	20
5	75	25	20

图 10 给出了增强相(W,Ti)体积分数不同时材料的应力转角曲线。



由图 10 可见,预测的 Al₂O₃/(W,Ti)C 抗弯强度 随(W,Ti)C 体积分数增加而提高。增强相体积分数 在 15%~75%时,相应 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷 刀具材料抗弯强度预测值在 583~966 MPa。

以上预测结果可为 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶 瓷材料基于组分配比的强度设计及优化提供参考。

3.5 不同型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料组 分相力学性能预测

由文献[12]知,在基体中添加纳米 Al₂O₃ 颗粒的 比例不同, Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料可以分 为若干型号。表 3 是各型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合 陶瓷材料组分。

66

表 3 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料组分

材料型号	亚微米 Al ₂ O ₃ 占基体百分比	纳米 Al ₂ O ₃ 占基体百分比
AWT5	84	16
AWT10	80	20
AWT15	75	25
AWT20	67	33
AWT30	51	49
AWTn	2	98

通过添加纳米 Al₂O₃ 颗粒,可以抑制基体晶粒 长大,细化基体组织结构,从而改变复合陶瓷材料 的力学性能^[13]。因此各型号纳米复合陶瓷材料的力 学性能发生改变,下面通过本文的方法来预测这些 型号材料组相的性能。

在基于统一强度理论的材料抗弯强度数值计 算过程中,需要事先得到的各组分相的力学参数: 弹性模量 E、泊松比ν、拉压强度比 a、抗拉强度值 σ_b、抗压强度值 σ_c以及拉剪强度比 b 和材料硬化模 量 H。现通过若干假设和数值计算的方法来预测。

在此作以下假设。

(1) 取统一强度理论参数 b=0.5。

(2) 各相材料均为刚塑性材料,强化模量 H=0。

(3) 增强相(W,Ti)C 的力学性能不变,纳米 Al₂O₃ 基体颗粒的引入主要影响基体相材料的力学 性能。因此增强相(W,Ti)C 的力学性能参数仍可参 看表 1。

(4) 基体材料的刚度不变(即弹性模量 *E*、泊松 比ν 不变),因为纳米 Al₂O₃基体颗粒的引入主要影 响基体 Al₂O₃ 材料的强度性能(即抗拉、抗压强度 值)。保持基体 Al₂O₃ 材料拉压强度比不变。通过调 整弹塑性计算模型中基体材料的抗拉、抗压强度参 数(σ_b 和 σ_c),同时固定这两个参数的比值(即拉压强 度比 *a*),使抗弯强度预测结果接近试验结果,从而 得到不同型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料基 体相的力学性能。

表4给出了不同型号Al₂O₃/(W,Ti)C纳米复合陶 瓷材料基体相的力学性能。同时各型号材料增强相 (W,Ti)C 的力学性能由表1给出,因此结合表1、4, 便可对不同型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料 进行抗弯强度预测。

主 其体相力受性能会数

	-7X 4	坐[[4]	ロハチエル	9° 90	
纳米 Al ₂ O3		基体 Al ₂ O ₃ 的力学性能			
占基体百分	弹性模量	泊松	拉压强度	抗拉强度	硬化模量
	E/GPa	比レ	比。	$\sigma_{\rm b}/{\rm MPa}$	H/MPa
16				143	
20				265	
25	400	0.26	0.000 6	136	0
33	400	0.20	0.088 0	155	0
49				216	
98				163	

3.6 组分相体积分数比对抗弯强度的影响

由上述可知:① 增加增强相(W,Ti)C 的体积分数,可提高 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的整体. 抗弯强度;② 在基体材料中添加纳米 Al₂O₃颗粒,导致 Al₂O₃基体力学性能变化。因此,Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的力学性能与增强相(W,Ti)C 的 体积分数,以及纳米 Al₂O₃颗粒占基体百分比有直 接关系。

本节研究 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的 抗弯强度随增强相(W,Ti)C的体积分数和纳米 Al₂O₃ 颗粒占基体的百分比这两个因素同时变化的规律。 其中增强相(W,Ti)C 的力学参数由表 1 给出,基体 相 Al₂O₃的力学性能参数由表 4 给出。假设各组分 材料均为刚塑性材料,取参数 b=0.5 进行计算。

表 5 列出了各组分相材料不同体积分数比, Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料抗弯强度的预测 结果。

表ら	牥斖强度 预测结果
12.3	加与强度坝测温不

编号	材料中增强相(W,Ti)C	纳米 Al ₂ O3 占	抗弯强度预测
拥与	的体积分数(%)	基体百分比(%)	结果/MPa
1		16	3405
2		20	584.9
3	16	25	326.8
4	15	33	365.8
5		49	488.1
6		98	382.7
7		16	507.0
8		20	737.7
9	20	25	493.9
10	30	33	531.4
11		49	648.7
12		98	547.5
13		16	630.4
14		20	853.4
15		25	618.4
16	45	33	653.3
17		49	766.0
18		98	668.6
19		16	724.1
20		20	886.0
21	(0)	25	717.6
22	60	33	736.3
23		49	793.1
24		98	743.8
25		16	878.8
26		20	967.8
27	75	25	874.4
28	15	33	887.2
29		49	932.1
30		98	893.0

表 5 中各组分体积分数比与材料抗弯强度预测 结果关系如图 11 所示。



参看表 3,可知表 5 中编号为 13~18 的 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的组分配比与表 4 中现有的6种型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料 相同。因此,表 5 中编号 13~18 所对应的数值计算 结果可以认为是该6种型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合 陶瓷材料抗弯强度的预测值。

表6列出了上述6种型号的Al₂O₃/(W,Ti)C纳米 复合陶瓷材料的试验抗弯强度^[13]以及数值预测 结果。

材料型号	试验抗弯强度值/	预测抗弯强度值/	相对误差
	MPa	MPa	(%)
AWT5	630	630	0
AWT10	850	853	0.35
AWT15	620	618	0.32
AWT20	650	653	0.46
AWT30	765	766	0.13
AWTn	670	668	0.30

表 6 试验数据及预测结果

由表 6 知,抗弯强度预测误差最大为 0.46%未 超过 1%,较好地与试验值相吻合,验证了本文的 数值预测方法具有很高的精确性和可靠性。

编号为 1~12 和 19~30 的 24 种 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的组分配比,对应了众多尚未开 发的新型 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料。所得的 预测结果可为之后相应组分比下 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳 米复合陶瓷材料的强度设计提供重要参考。

4 结论

(1) 开发了基于序列图像的多相材料细观构造 有限元重构方法建立了可反映 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米 复合材料真实微观结构的有限元模型,并且利用统 一强度理论推导了可考虑材料硬化效应的弹塑性本 构模型,编写了用于强度预测的有限元计算程序, 进行了抗弯强度数值预测。

(2) 假设各相材料均为刚塑性材料,即无硬化

现象(硬化模量H=0),参数b分别取0和1,预测了 AWT10抗弯强度的上下限,且b=0.5时的预测结果 与试验值相吻合。假设增强相(W,Ti)C有硬化效应, 基体的Al₂O₃无硬化,进行抗弯强度预测,结果表明 当组分相具有硬化效应时,Al₂O₃/(W,Ti)C纳米复合 陶瓷材料在宏观也表现出变性硬化现象。

(3) 通过改变材料各组分相体积分数比,研究 了 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料抗弯强度的变 化规律。所预测的结果不仅与现有 6 种型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合材料的试验抗弯强度值相 吻 合,而且得到了许多新组分配比下的 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料抗弯强度值。本文 的数值预测方法和计算结果为设计、开发新型号 Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料提供了有效手段 和重要参考。

参考文献

- [1] 周咏辉. Al₂O₃基纳米复合陶瓷刀具材料的研制及切削 性能研究[D]. 济南:山东大学,2010.
- ZHOU Yonghui. Al₂O₃ based nanocomposite ceramic cutting tool material and its cutting performance[D].Jinan: Shandong University, 2010
- [2] 刘含莲. 多元多尺度纳米复合陶瓷刀具材料的研制及 其切削性能研究[D]. 济南:山东大学,2005.
 LIU Hanlian. Study on the fabrication and cutting performance of ceramic tool materials based on multi-phase and multi-scale nanocomposites[D]. Jinan: Shandong University, 2005.
- [3] 成红梅.纳米复合陶瓷刀具材料多尺度模拟研究[D].
 济南:山东大学,2011.
 CHENG Hongmei. Multi-scale simulation study on nanocomposite ceramic tool materials[D]. Jinan : Shandong University, 2011.
- [4] 朱小辉. 陶瓷刀具材料微观尺度有限元模拟模型及 其应用研究[D]. 济南:山东大学,2011.
 ZHU Xiaohui. Study on microscale finite element simulation model of ceramic tool materials and applications[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [5] YU Maohong. Computational plasticity with emphasis on the application of the unified strength theory[M]. Hangzhou: Springer and Zhejiang University Press, 2012.
- [6] JERRAM D A, HIGGINS M D. 3D analysis of rock textures : Quantifying igneous microstructures[J]. Elements, 2007, 3(4): 239-245.
- [7] REZA A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization(CLAHE) for real-time image

enhancement[J]. Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology, 2004, 38(1): 35-44.

- [8] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [9] 潘晓明,孔娟,杨钊,等.统一弹塑性本构模型在 ABAQUS中的开发与应用[J]. 岩土力学,2010,31(4): 1092-1098.

PAN Xiaoming, KONG Juan, YANG Zhao, et al. Secondary development and application of unified elastoplastic constitutive model to ABAQUS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1092-1098.

[10] 马宗源,廖红建.双剪统一弹塑性有限差分方法研究[J]. 计算力学学报,2012,29(1): 43-48.

MA Zongyuan, LIAO Hongjian. Study of twin shear unified elastoplastic finite element difference method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(1): 43-48.

[11] 中华人民共和国国家技术监督局. GB6596-1986. 中华
 人民共和国国家标准-工程陶瓷弯曲强度试验方法[M].
 北京:中国标准出版社,1986.

State Bureau of Technical Supervision of the People's Republic of China. GB6596-1986. National Institute of

Standards of the People's Republic of China-engineering ceramic bending strength test method[M]. Beijing: Standards Press of China, 1986.

[12] 周咏辉,艾兴,赵军,等. Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷 材料的显微结构[J].人工晶体学报,2008,37(4): 810-813.

ZHOU Yonghui, AI Xing, ZHAO Jun, et al. Microstructure of Al₂O₃/(W,Ti)C nanocompiste[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2008, 37(4): 810-813.

[13] 周咏辉, 艾兴, 赵军, 等. Al₂O₃/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷 刀具材料的制备及切削性能研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(22): 2751-2754.

ZHOU Yonghui, AI Xing, ZHAO Jun, et al. Study on preparation of $Al_2O_3/(W,Ti)C$ nanocomposite tool material and its cutting performance[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(22): 2751-2754.

作者简介:林晨,男,1987年出生,博士研究生。主要研究方向为超高 速切削刀具材料微观与宏观性能关系。

E-mail: linchen19870117@stu.xjtu.edu.cn

李跃明(通信作者),男,1961年出生,博士,教授,博士研究生导师。 主要研究方向为超高速切削刀具材料微观与宏观性能关系。

E-mail: liyueming@mail.xjtu.edu.cn