

毫米级碳化硼颗粒增强核辐射屏蔽材料的力学性能预测

孙伟强¹, 刘小君^{1,2}, 燕奕宏¹, 纪富¹, 林瀚文¹, 柯涛¹, 胡华四¹, 胡光¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 国家国防科技工业局西北核安全中心, 710000, 西安)

摘要: 针对现有预测模型不完全适用于兼具中子、伽马综合屏蔽性能的毫米级碳化硼(B_4C)颗粒增强金属基核辐射屏蔽材料力学性能预测的问题,提出一种结合有限元仿真软件和自编程序的力学性能预测模型。首先,使用 LiveLinkTM for MATLAB[®]接口将有限元软件 COMSOL Multiphysics 和 MATLAB 自编程序相结合,构建基于随机算法模型(GRM)的代表性体元模型,并计算确定了模型尺寸、网格划分尺寸等关键模拟参数;其次,与文献模型数据对比,验证了模型的正确性;最后,仿真计算了 B_4C 颗粒的含量、形状和粒径等参数对复合材料力学性能的影响。结果表明:当 B_4C 颗粒与基体理想结合、半径为 0.20 cm、体积分数为 30% 时,复合材料的屈服强度比 B 质量分数为 1.80% 和 1.65% 的硼钢分别高 25.60% 和 21.00%;在毫米级粒径范围内, B_4C 颗粒形状和粒径大小对复合材料弹性模量、屈服强度的影响不超过 3.28%;所提预测模型对毫米级 B_4C 颗粒增强核辐射屏蔽复合材料多性能优化设计时力学性能的评估具有指导意义。

关键词: 毫米级 B_4C 颗粒;核辐射屏蔽;代表性体元模型;力学性能预测

中图分类号: TB33 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202511015 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0155-09

Mechanical Property Prediction of Millimeter-Level B_4C Particles Reinforced Nuclear Radiation Shielding Materials

SUN Weiqiang¹, LIU Xiaojun^{1,2}, YAN Yihong¹, JI Fu¹, LIN Hanwen¹,

KE Tao¹, HU Huasi¹, HU Guang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Nuclear Safety Center of the State Administration of Science, Technology and

Industry for National Defense, Xi'an 710000, China)

Abstract: To address the limitations of existing prediction models in evaluating the mechanical properties of millimeter-level B_4C particle-reinforced metal matrix nuclear radiation shielding materials with integrated neutron and gamma radiation shielding performance, a novel mechanical property prediction model combining finite element simulation software and self-programming is proposed. First, the LiveLinkTM for MATLAB[®] interface is utilized to integrate the finite element software COMSOL Multiphysics with self-programming in MATLAB, establishing a GRM stochastic RVE model. Key simulation parameters including model dimensions and mesh

sizes are determined through computational analysis. Subsequently, the model's validity is verified through comparison with literature data. Finally, the effects of B_4C particle content, shape, and size on the composite material's mechanical properties are systematically investigated via simulation. Results demonstrate that when the B_4C particles are ideally bonded with the matrix at a radius of 0.20 μm and a volume fraction of 30%, the composite material's yield strength increases by 25.60% and 21.00% compared to boron steels containing 1.80% and 1.65% boron, respectively. Within the millimeter-level particle size range, variations in B_4C particle shape and size affect the composite material's elastic modulus and yield strength by no more than 3.28%. The proposed prediction model provides valuable guidance for multi-property optimization design of millimeter-level B_4C particle-reinforced nuclear radiation shielding composite materials.

Keywords: millimeter-level B_4C particles; nuclear radiation shielding; representative volume element models; mechanical property prediction

核科学与技术在国家经济发展,如能源、环境和健康等领域中的作用日益显著,与之密切相关的核辐射防护也越来越受到重视。核辐射屏蔽材料是保障屏蔽防护的基础,其多服役于核电站、核动力舰船、宇航器等存在中子、伽马射线等强辐射的苛刻环境,故要求其不仅具有好的中子、伽马屏蔽性能,也应具有良好的热力学性能。相对于传统的单质材料如铅、水、石蜡等,复合材料更能满足服役要求,而金属基复合材料在综合性能方面又是其中的佼佼者,广泛应用于核辐射防护领域^[1-3]。

含硼不锈钢是一种最为常见的金属基核辐射屏蔽材料,硼(B)元素和金属元素的存在使其兼具良好的中子、伽马综合屏蔽性能,广泛用于乏燃料运输和存储容器等方面^[4]。但由于硼元素在不锈钢中的溶解度极限较低,过量添加会导致脆性相的形成,使其塑性、冲击韧性和耐腐蚀性下降,因此硼的质量分数一般在 0.20%~2.25%^[5-7]。低含量的硼元素会严重制约其中子屏蔽性能^[1]。为解决硼元素低的问题,本课题组向不锈钢基体中嵌入毫米级功能性碳化硼(B_4C)球颗粒,并采用真空渗流铸造法制备得到材料样品,发现此材料中 B_4C 质量分数可达 24.68%,硼含量高达 19.31%,经实验验证,该复合材料具有比现有含硼钢更好的中子、伽马射线综合屏蔽性能,在核辐射领域具有极大的应用潜力^[8]。但是,除屏蔽性能外,力学性能的好坏决定其能否真正应用于工程。

目前,对于颗粒增强复合材料弹性模量的理论预测方法和模型有基于 Eshelby 等效夹杂理论的自洽法、Mori-Tanaka 方法、Halpin-Tsai 方法、Kerner 方法及 Lielens 方法等^[9-13],这些理论模型均具有其局限性,如 Mori-Tanaka 方法只涉及体积分数一个

参数,未考虑增强颗粒的形状参数,也没有考虑增强颗粒之间的相互作用;Halpin-Tsai 方法形式简单,但它假设增强颗粒方向与施加应力方向完全一致,是一种半经验的预测方法;Kerner 方法也未考虑增强颗粒的形状参数,只假设其是理想的球形等。以上理论模型均无法完全满足毫米级 B_4C 颗粒增强复合材料的力学性能预测。

除理论方法和模型外,采用有限元计算细观力学来求解受载下体元中具有夹杂的边值问题,也被广泛地用于模拟复合材料的力学行为。目前,采用有限元方法对复合材料力学性能进行数值模拟时有较多的模型可供选择,包括单颗粒轴对称单胞模型^[14]、多颗粒随机分布代表性体元(RVE)模型^[15]、基于真实微观组织的三维连续切片扫描模型^[16]和基于 Voronoi 算法复合结构模型^[17]等。然而,目前大多数是针对微、纳米级颗粒增强的复合材料展开模拟计算。针对 SiC 、 B_4C 及 Al_2O_3 等微米颗粒增强金属基复合材料,国内外学者主要研究颗粒形态及界面行为等对金属基复合材料宏、微观力学性能的影响。对于碳纳米管(CNT)、石墨等纳米颗粒增强金属复合材料,研究者更多关注的是材料微观构型分布和多相混杂问题,模拟过程中需考虑纳米颗粒团聚的问题^[18-19]。增强颗粒大小对复合材料性能有影响是共识^[20-24],用前述微、纳米模型预测毫米级颗粒增强复合材料的力学性能必然是不准确的。为此,有必要开展适用于该类复合材料力学性能预测的模型研究。

本论文在现有有限元建模方法的基础上,结合有限元软件 COMSOL Multiphysics 和 MATLAB 自编程序,构建得到基于随机算法模型(GRM)的 RVE 模型,并仿真获得增强颗粒参数对力学性能的影响规律,旨在解决现有预测模型无法完全满足毫米级 B_4C

颗粒增强复合材料的力学性能预测的问题,从而为毫米级 B_4C 颗粒增强核辐射屏蔽复合材料多性能优化设计时力学性能的评估提供技术支撑。

1 模型构建

1.1 基于 GRM 的 RVE 模型建模流程

本文使用 LiveLink™ for MATLAB®接口将 COMSOL Multiphysics 软件和 MATLAB 软件进行结合,基于自编程网格化随机算法模型^[8,25]建立了适用于毫米级 B_4C 颗粒增强不锈钢基复合材料力学性能仿真计算的代表性体元模型。模型构建流程如图 1 所示。



图 1 模型构建流程图

Fig. 1 Flow scheme of models construction

模型的具体流程如下。

(1) 基于 MATLAB 自编程网格化随机算法模型 (GRM), 生成 B_4C 颗粒参数。划分的网格尺寸与颗粒的大小相关, 针对不同形状的增强颗粒, 网格大小分别如下

$$\begin{cases} a_{SPH} = 2r \\ a_{RCC} = L \\ a_{RPP} = 2r_{us} = H \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_{SPH} 、 a_{RCC} 、 a_{RPP} 分别为球形颗粒、正六面体颗粒和圆柱体颗粒时划分网格边长; r 为球形颗粒的半径; L 为正六面体的边长; r_{us} 为圆柱体底面半径;

H 为圆柱体的高。

(2) 采用 MATLAB 自编程生成可通过 LiveLink™ for MATLAB®接口导入 COMSOL Multiphysics 软件的 GRM 随机 RVE 模型。不同 B_4C 参数下的 RVE 模型如图 2 所示, ω 为 B_4C 的体积分数。

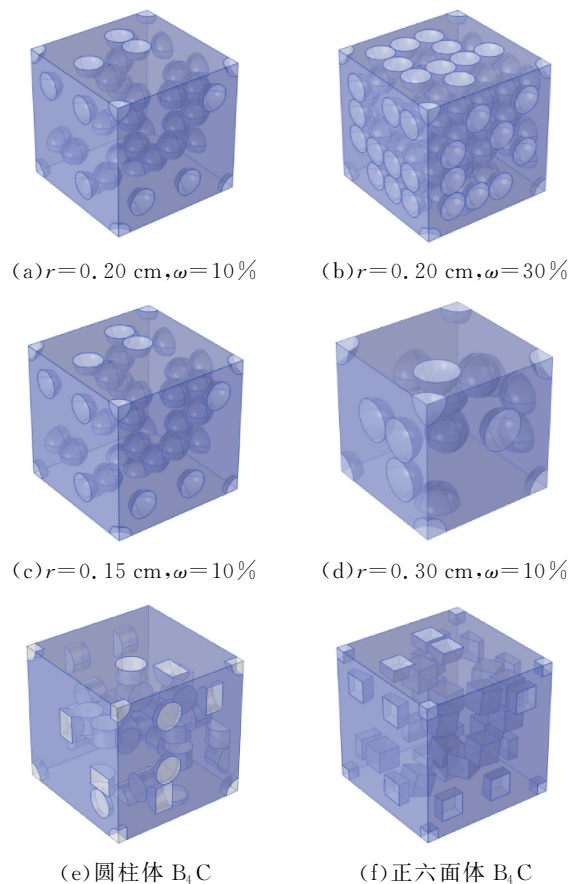


图 2 不同颗粒参数下基于 GRM 的 RVE 模型

Fig. 2 GRM random RVE models with different particle parameters

1.2 模型参数设定

建模过程中, 考虑了模型表面和 8 个角的颗粒分布。对于角上, 增强颗粒为 $1/8$ 大小; 对于面上, 增强颗粒为 $1/2$ 大小, 并保证颗粒在对应面上是镜像分布, 这样可以满足几何周期性边界条件。

B_4C 颗粒弹性模量设定为 450 GPa, 泊松比为 0.18, 密度为 $2.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 根据文献^[26], 316 不锈钢的屈服强度 ($\sigma_{0.2}$) 选定为 319 MPa, 弹性模量和泊松比采用软件内部推荐参数。设定 316 不锈钢为线弹性材料, 并添加塑性模型, 使用 Von Mises 屈服函数; B_4C 颗粒为线弹性材料, 不添加塑性模型。同时, 假定 B_4C 颗粒与 316 不锈钢基体之间为理想结合, 不考虑界面脱粘。模拟计算时, 沿 X 轴方向

固定复合材料,另一端施加指定拉伸位移 ΔX ,计算复合材料发生不同应变时 RVE 模型下复合材料的应力变化,即得到拉伸名义应力-应变曲线。同时,在计算结果中提取数据可得到 Von Mises 等效应力(σ_v)分布云图。

1.2.1 RVE 模型尺寸的确定

RVE 模型中 B_4C 颗粒越多,模拟越准确,但计算效率越低。为选择最佳的 RVE 模型尺寸,计算了 B_4C 颗粒半径为 0.20 cm、体积分数为 10% 时,不同模型尺寸下复合材料的单轴拉伸名义应力-应变曲线,结果如图 3 所示。可以看出,随着模型尺寸的增大,模拟结果差别减小,即模拟结果趋于收敛,模拟更加精确。当应变为 0.01 时,模型 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 和模型 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 应力差为 0.30%,模型 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 和模型 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 的应力差为 1.82%;通过计算可得,模型 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 、模型 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 和模型 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 下复合材料的弹性模量分别为 192.35、197.67、198.58 GPa,模型 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的结果更接近模型 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 。综上结果,兼顾计算精度和计算效率,确定后续模拟时 RVE 模型尺寸为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 。

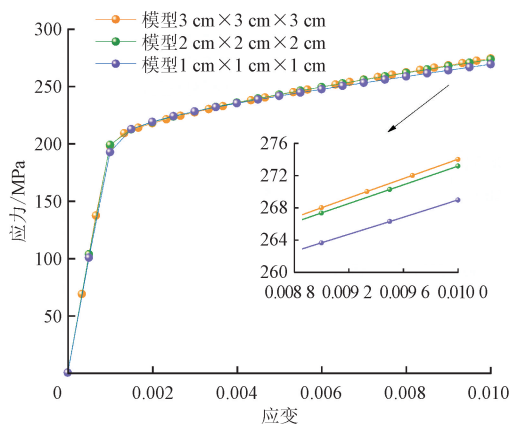


图 3 不同模型尺寸下单轴拉伸名义应力-应变曲线

Fig. 3 Nominal stress-strain curves of uniaxial tensile under different model sizes

1.2.2 网格尺寸的确定

COMSOL 软件仿真模拟时,划分的网格尺寸越小,模拟精度越高,但计算效率会越低。在 RVE 模型中,网格尺寸需能较好地对应增强颗粒、增强颗粒与基体界面处的形貌轮廓进行拟合,因此网格划分大小与颗粒的尺寸有关。以网格最大单元尺寸与颗粒半径的比 λ 作为网格划分的尺度标准,计算公式为

$$\lambda = \frac{L_{\max}}{r} \quad (2)$$

式中: $L_{\max}$ 为划分网格的最大单元尺寸。

在 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 尺寸的 RVE 模型下,计算了 B_4C 颗粒半径为 0.20 cm、体积分数为 10%、 λ 分别为 0.50、0.75、1.00、1.50 时,复合材料的单轴拉伸名义应力-应变曲线,以确定最佳的网格划分。不同 λ 时复合材料拉伸名义应力-应变曲线如图 4 所示。可以看出,随着 λ 的变化,拉伸名义应力-应变曲线变化极小,当应变为 0.01 时,应力之间的变化小于 0.10%,经计算,复合材料弹性模量之间的变化也小于 0.10%。可以认为,计算结果对此范围内的 λ 变化不敏感,所以可适当地粗化网格。确定后续计算中, λ 取值为 1.00。

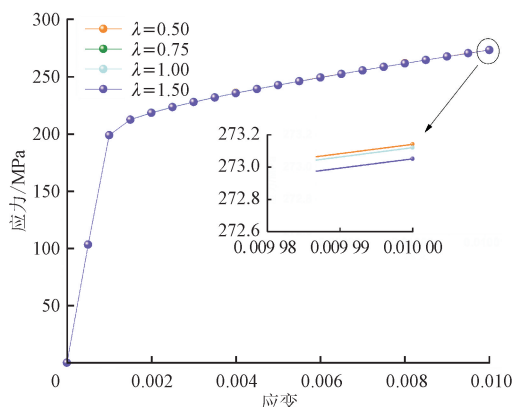


图 4 不同 λ 时复合材料拉伸名义应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial tensile nominal stress-strain curves of composites under different λ

2 模型验证

为保证后续仿真计算的准确性,结合参考文献验证了 GRM 随机 RVE 模型的正确性。考虑到目前没有毫米级增强颗粒的仿真模型,故本文主要验证建模方法的正确性。

文献[27]建立了颗粒增强铝基复合材料的轴对称单胞模型,并通过有限元方法模拟了微米级 B_4C 颗粒增强 5083 铝基复合材料的力学性能和微观应力分布。本部分仅对该文献图 7 中体积分数为 5% B_4C 颗粒增强 5083 铝基复合材料的应力-应变曲线进行模拟(B_4C 颗粒粒径假定为 $1.0\text{ }\mu\text{m}$),结果如图 5 所示。可以看出,GRM 随机 RVE 模型计算结果与参考文献结果在弹性阶段符合得较好,而在复合材料开始屈服阶段有一定的差别。文献[27]所得的弹性模量和屈服强度约为 80.180 GPa 和 459.46 MPa,本文模型计算得到的分别为 75.665 GPa 和 430.27 MPa,分别比参考文献小约 5.63% 和 6.35%。由于本论文中的 GRM 随机 RVE 模型与文献[27]中的轴对称单胞模型有所不同,且该文献中未明确说明 B_4C

颗粒粒径在 $0.50 \sim 1.50 \mu\text{m}$ 范围内的具体比例,因此本论文中只能假定 B_4C 颗粒粒径为均值 $1.00 \mu\text{m}$ 。这两个原因导致二者计算结果产生偏差,但平均偏差为 9.04% ,且多数数据点的偏差在 10% 以内,基本在可接受范围内,即基于 GRM 的 RVE 模型计算结果是可信的。

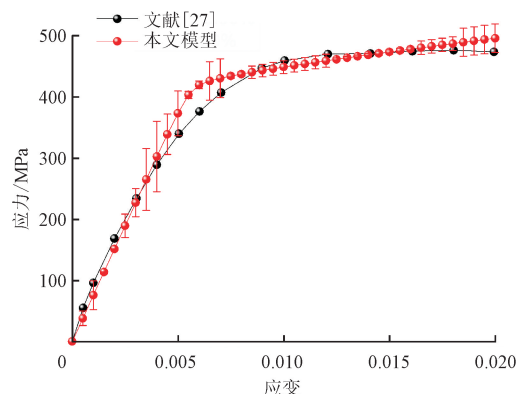
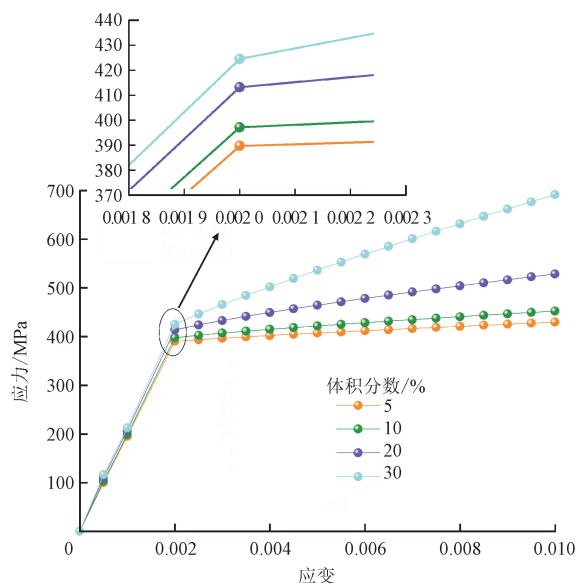


图 5 GRM 随机 RVE 模型结果与文献模型结果对比
Fig. 5 Comparison of GRM random RVE model results with literature results

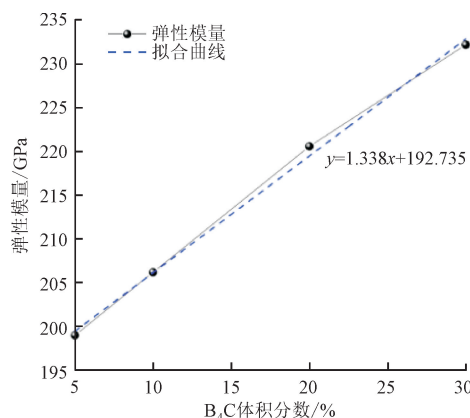
3 复合材料的力学性能预测

3.1 B_4C 含量对复合材料力学性能的影响

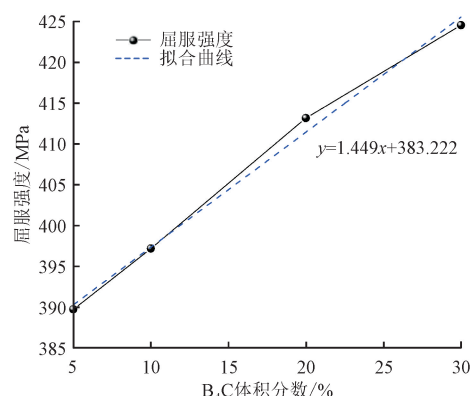
不同体积分数 B_4C 颗粒的复合材料拉伸名义应力-应变曲线、弹性模量和屈服强度见图 6。其中,球形 B_4C 颗粒的体积分数为 $5\% \sim 30\%$,半径为 0.20 cm 。由图 6 可知,随着 B_4C 体积分数的增大,复合材料的应力变化较大。这主要是因为,本文未考虑不锈钢与 B_4C 之间的界面,认为二者理想结合, B_4C 的强度远高于基体不锈钢,所以当 B_4C 含量增加时,材料可以承担更多的应力,复合材料强度增加。



(a) 拉伸应力-应变曲线



(b) 弹性模量拟合曲线



(c) 屈服强度拟合曲线

图 6 不同体积分数 B_4C 颗粒时复合材料拉伸名义应力-应变曲线、弹性模量和屈服强度

Fig. 6 Tensile nominal stress-strain curves, elastic modulus and yield strength of the composites with different volume fractions of B_4C particles

当含有不同体积分数 B_4C 时,复合材料的弹性模量和屈服强度如表 1 所示。可以看出,当 B_4C 体积分数为 30% 时,复合材料的弹性模量比 5% 时高 16.76% ,屈服强度高 8.93% , 0.01 应变时对应的应力则高 115.70% ,可见, B_4C 含量对复合材料力学性能的影响极大。

表 1 不同含量 B_4C 时复合材料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of composites with different B_4C contents

B_4C 体积分 数/ %	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	应变为 0.01 时的 应力/MPa
5	198.95	389.72	429.09
10	206.16	397.16	451.91
20	220.58	413.17	528.01
30	232.20	424.54	690.65

文献[28-29]报道,ATI 公司采用粉末冶金工艺制备的 B 质量分数为 1.80% 和 1.65% 的硼钢,屈服强度分别为 338、351 MPa,体积分数为 30% 的 B_4C 增强的复合材料分别比前两类硼钢的屈服强度高 25.60% 和 21.00%。可见, B_4C 颗粒增强的不锈钢复合材料具有较好的力学性能。随着 B_4C 含量的增加,复合材料的弹性模量和屈服强度均几乎呈线性的增长,二者拟合函数分别为

$$E(x) = 1.338x + 192.735 \quad (3)$$

$$\sigma_{0.2}(x) = 1.449x + 383.222 \quad (4)$$

式中: E 为复合材料弹性模量。

以上规律与文献[30]结果类似,由于 B_4C 颗粒的弹性模量远高于基体不锈钢材料,可承担更多的应力,因此较大体积分数 B_4C 颗粒对复合材料强度起着明显的增强作用。上述拟合曲线可用于该类复合材料多性能优化设计时力学性能的评估函数。

3.2 B_4C 形状对力学性能的影响

本文构建了体积分数为 10%,不同形状 B_4C 增强复合材料的 GRM 随机 RVE 模型。模型保持单个球形、圆柱体与正六面体 B_4C 颗粒的体积相同:球形 B_4C 半径为 0.20 cm,圆柱体 B_4C 底面边长为 0.20 cm,高为 0.266 6 cm,正六面体 B_4C 边长为 0.322 4 cm。复合材料的拉伸名义应力-应变曲线如图 7 所示。由图可见,正六面体 B_4C 增强复合材料的弹性模量及 $\sigma_{0.2}$ 最高,圆柱体次之,而球体较差。计算可得,3 种复合材料的弹性模量分别为 209.42、207.02、206.16 GPa,正六面体 B_4C 增强复合材料的弹性模量比球形复合材料高约 1.57%,差别较小;3 种复合材料的 $\sigma_{0.2}$ 分别为 385.16、387.50、393.62 MPa,正六面体 B_4C 增强复合材料比球体复合材料高约 2.20%,比圆柱体 B_4C 增强复合材料高

约 1.58%。当应变为 0.01 时,正六面体 B_4C 增强复合材料对应的应力分别比球体 B_4C 和圆柱体 B_4C 增强复合材料高 6.23% 和 8.63%。总体而言, B_4C 颗粒形状对复合材料弹性模量和屈服强度的影响较小,差别未超过 2.20%。

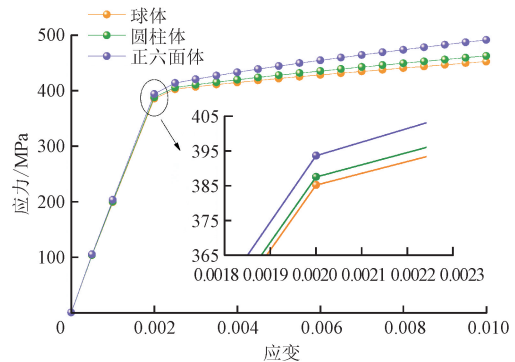


图 7 不同形状 B_4C 颗粒的应力-应变曲线

Fig. 7 Tensile nominal stress-strain curves of the composites with different shape of B_4C

不同形状 B_4C 颗粒增强的复合材料整体 Von Mises 等效应力云图如图 8 所示。在 x 轴方向 1.5 cm 处,不同形状复合材料在 yz 平面上 Von Mises 等效应力云图,如图 9 所示。

由图 8 可见,加载位移载荷后,复合材料 RVE 模型发生明显的拉伸形变,在 RVE 模型的尖角处,应力明显高于其他区域,存在应力集中的趋势。Chawla 等的计算表明,在采用 RVE 模型模拟复合材料力学性能时,随着增强颗粒体积分数的增加,模型的左下边界大部分区域会充斥着增强颗粒,模拟结果可能不准确^[31]。很明显,球形 B_4C 时模型尖角处应力集中要弱于圆柱体和正六面体,模拟相对更加准确。

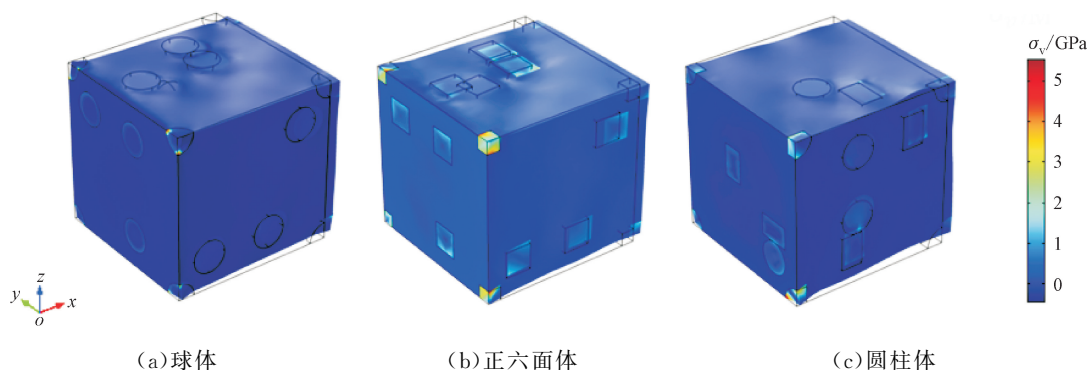


图 8 不同形状 B_4C 颗粒的复合材料整体 Von Mises 等效应力云图

Fig. 8 Von Mises equivalent stress nephogram of the composites with different shapes of B_4C

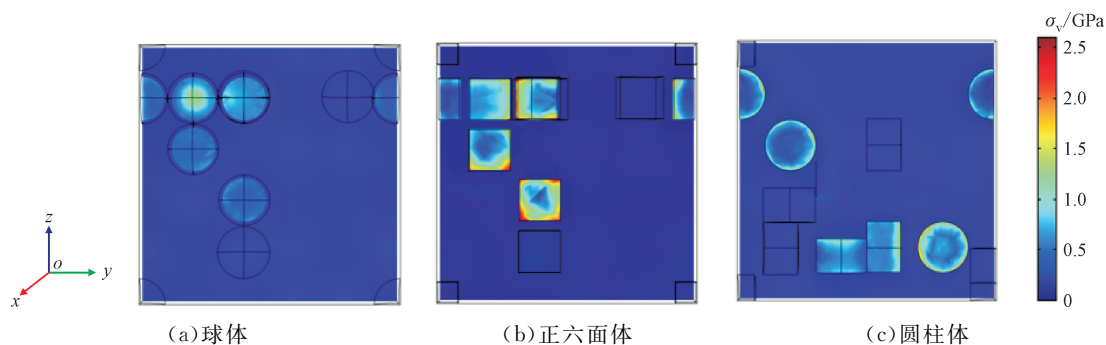


图 9 不同形状 B_4C 颗粒的复合材料在 $x=1.5$ cm 的 yz 平面处的 Von Mises 等效应力云图

Fig. 9 Von Mises equivalent stress nephogram of the composites with different shapes of B_4C at $x=1.5$ cm in the yz plane

有研究表明,小裂纹会因为应力集中过高而形成,在复合材料变形过程中,小裂纹逐渐扩展为大裂缝,最终造成材料的破坏。所以,虽然球体 B_4C 增强复合材料的弹性模量和屈服强度略小于正六面体和圆柱体,但是球体 B_4C 和基体界面处过渡较为均匀,应力集中也远弱于正六面体和圆柱体。

3.3 B_4C 粒径对力学性能的影响

众多研究表明,增强颗粒的大小对复合材料的力学性能有所影响。构建了体积分数为 10%,不同粒径球形 B_4C 颗粒增强复合材料的 GRM 随机 RVE 模型。模型中,球体 B_4C 颗粒的半径分别为 0.15、0.20、0.25、0.30 cm,其拉伸名义应力-应变曲线如图 10 所示。

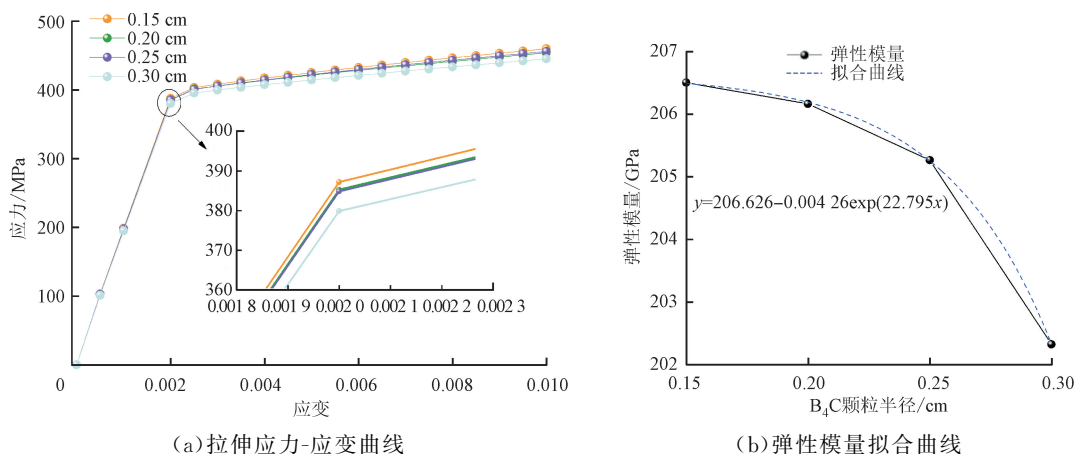


图 10 不同半径球形 B_4C 时,复合材料的拉伸名义应力-应变曲线和弹性模量

Fig. 10 Tensile nominal stress-strain curves and elastic modulus of the composites with different radius of sphere B_4C

由图 10 可知,随着 B_4C 半径的减小,复合材料的弹性模量和 $\sigma_{0.2}$ 均增大,但增幅较小。4 种半径 B_4C 增强复合材料的弹性模量分别为 206.50、206.16、205.26、202.32 GPa,0.15 cm B_4C 的复合材料比 0.30 cm B_4C 复合材料的弹性模量高 2.07%;当应变为 0.01 时,0.15 cm B_4C 与 0.30 cm B_4C 相比,复合材料的应力高 3.28%。复合材料的弹性模量与 B_4C 半径的关系拟合曲线为

$$E(r) = 206.626 - 0.00426\exp(22.795r) \quad (5)$$

不同粒径 B_4C 增强复合材料在 x 轴方向 1.50 cm 处, yz 平面上 Von Mises 等效应力云图如图 11 所示。从图 11 可以看出,当球形 B_4C 颗粒相互不接

触时,应力分布较为平滑;当球形 B_4C 颗粒相互接触时,接触面之间会发生应力集中现象,应力远高于其他区域。在 $x=1.50$ cm 处,当 B_4C 半径为 0.15 cm 时, yz 平面上 Von Mises 等效应力最大值为 1942.1 MPa,当 B_4C 半径为 0.30 cm 时,应力最大值为 1283.10 MPa。可见,粒径越小,应力集中区域的应力越大; B_4C 粒径越小,相同体积分数下,颗粒数量越多,会有更多的颗粒接触面,会有更多的应力集中区域,会有更多的应力值较大的区域,故而, B_4C 粒径越小,复合材料的弹性模量越大,屈服强度越高。上述拟合曲线也可用于该类复合材料多性能优化设计时力学性能的评估。

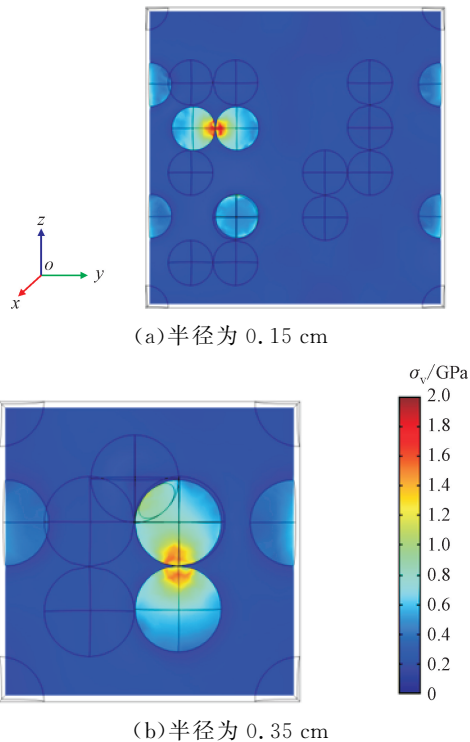


图 11 不同半径 B_4C 颗粒的复合材料在 $x=1.5$ cm 的 yz 平面处的 Von Mises 等效应力云图

Fig. 11 Von Mises equivalent stress nephogram of the composites with different radius of B_4C at $x=1.5$ cm in the yz plane

4 结 论

(1) 本文将 COMSOL Multiphysics 软件和 MATLAB 自编程相结合, 构建了一种适用于毫米级颗粒增强金属基复合材料力学性能预测模型。该模型能够较为准确地预测毫米级增强颗粒参数对复合材料力学性能的影响规律, 对该类复合材料多性能优化设计时力学性能的评估具有指导意义。

(2) 对于毫米级 B_4C 颗粒增强的不锈钢基核辐射屏蔽材料, 仿真结果表明: B_4C 颗粒与基体理想结合、半径为 0.20 cm、体积分数为 30% 时, 复合材料的屈服强度比 B 质量分数为 1.80%、1.65% 的硼钢分别高 25.60% 和 21.00%。

(3) 在毫米级粒径范围内, B_4C 颗粒形状和粒径大小对复合材料弹性模量、屈服强度的影响不超过 3.28%。球体 B_4C 颗粒增强的复合材料的弹性模量和屈服强度略小于正六面体、圆柱体, 但是球体 B_4C 和基体界面处过渡较为均匀, 应力集中也远弱于正六面体和圆柱体; 球体 B_4C 颗粒的粒径越小, 应力集中区域的应力越大, 复合材料的弹性模量越大, 屈服强度越高, 但在 0.15~0.30 cm 范围内, 差别不大。

本文证明了兼具良好中子、伽马综合屏蔽性能的该类复合材料也具有较好的力学性能, 但由于应力集中多在增强颗粒和金属基体界面处, 意味着材料失效更可能发生与界面结合处, 所以后续只有提高增强颗粒与金属基体的界面结合性, 才能更好地将其应用于工程实际。

参考文献:

- [1] 何林, 蔡永军, 李强. 中子和伽马射线综合屏蔽材料研究进展 [J]. 材料导报, 2018, 32(7): 1107-1113.
HE Lin, CAI Yongjun, LI Qiang. Research progress in radiation shielding materials serving as the combined barrier against neutron and gamma-ray [J]. Materials Review, 2018, 32(7): 1107-1113.
- [2] 王玉容, 赵勇, 蒋明忠, 等. 功能/结构一体化中子屏蔽材料的研究现状 [J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 166-172.
WANG Yurong, ZHAO Yong, JIANG Mingzhong, et al. Research status in neutron shielding materials with combined functional and structural performance [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 166-172.
- [3] 杨文锋, 刘颖, 杨林, 等. 核辐射屏蔽材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2007, 21(5): 82-85.
YANG Wenfeng, LIU Ying, YANG Lin, et al. Research progress in shielding materials for nuclear radiation [J]. Materials Review, 2007, 21(5): 82-85.
- [4] 汪海, 童明炎, 孙胜, 等. 乏燃料运输容器研究进展 [J]. 机械工程师, 2015(12): 65-69.
WANG Hai, TONG Mingyan, SUN Sheng, et al. Research progress of spent fuel transport container [J]. Mechanical Engineer, 2015(12): 65-69.
- [5] LORIA E A, ISAACS H S. Type 304 stainless steel with 0.5% boron for storage of spent nuclear fuel [J]. JOM, 1980, 32(12): 10-17.
- [6] LIU Jing, ZHANG Ke, XIE Guoliang. Effect of Cr and Ni contents on microstructure and properties of high boron stainless steel composite plate [J]. Advanced Materials Research, 2012, 535-537: 883-887.
- [7] FU Xuelong, JI Zhengbo, WEI Lin, et al. The advancement of neutron shielding materials for the storage of spent nuclear fuel [J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2021, 2021(1): 5541047.
- [8] SUN Weiqiang, HU Guang, YU Xiaohang, et al. Study on a high-boron-content stainless steel composite for nuclear radiation [J]. Materials, 2021, 14(22): 7004.
- [9] HILL R. Theory of mechanical properties of fibre-

- strengthened materials; III self-consistent model [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1965, 13(4): 189-198.
- [10] BENVENISTE Y. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials [J]. Mechanics of Materials, 1987, 6(2): 147-157.
- [11] AFFDL J C H, KARDOS J L. The Halpin-Tsai equations; a review [J]. Polymer Engineering & Science, 1976, 16(5): 344-352.
- [12] KERNER E H. The elastic and thermo-elastic properties of composite media [J]. Proceedings of the Physical Society; Section B, 1956, 69(8): 808-813.
- [13] LIELENS G, PIROTTE P, COUNIOT A, et al. Prediction of thermo-mechanical properties for compression moulded composites [J]. Composites: Part A Applied Science and Manufacturing, 1998, 29(1/2): 63-70.
- [14] GUO Zaoyang, SHI Xiaohao, CHEN Yang, et al. Mechanical modeling of incompressible particle-reinforced neo-Hookean composites based on numerical homogenization [J]. Mechanics of Materials, 2014, 70: 1-17.
- [15] BÖHM H J, ECKSCHLAGER A, HAN W. Multi-inclusion unit cell models for metal matrix composites with randomly oriented discontinuous reinforcements [J]. Computational Materials Science, 2002, 25(1/2): 42-53.
- [16] CHAWLA N, GANESH V V, WUNSCH B. Three-dimensional (3D) microstructure visualization and finite element modeling of the mechanical behavior of SiC particle reinforced aluminum composites [J]. Scripta Materialia, 2004, 51(2): 161-165.
- [17] FRITZEN F, BÖHLKE T. Periodic three-dimensional mesh generation for particle reinforced composites with application to metal matrix composites [J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(5): 706-718.
- [18] SU Yishi, LI Zhiqiang, JIANG Lin, et al. Computational structural modeling and mechanical behavior of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 614: 273-283.
- [19] SU Yishi, LI Zan, YU Yang, et al. Composite structural modeling and tensile mechanical behavior of graphene reinforced metal matrix composites [J]. Science China Materials, 2018, 61(1): 112-124.
- [20] 俞洋, 苏益士, BERTHELOT Y, 等. 颗粒增强金属基复合材料的结构建模与力学模拟研究进展 [J]. 中国材料进展, 2020, 39(3): 214-225.
- YU Yang, SU Yishi, BERTHELOT Y, et al. Recent progress in structural modelling and mechanical simulation of particle reinforced metal matrix composites [J]. Materials China, 2020, 39(3): 214-225.
- [21] 张江涛. 颗粒增强金属基复合材料动态力学性能的实验研究与数值模拟 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [22] MA Siming, ZHUANG Xincun, WANG Xiaoming. Particle distribution-dependent micromechanical simulation on mechanical properties and damage behaviors of particle reinforced metal matrix composites [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(11): 6780-6798.
- [23] REDFERN L R, FARHA O K. Mechanical properties of metal-organic frameworks [J]. Chemical Science, 2019, 10(46): 10666-10679.
- [24] 信振洋. 颗粒增强金属基复合材料力学性能数值模拟研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
- [25] 孙伟强. 大颗粒嵌入金属基核辐射屏蔽材料的优化设计、制备工艺及效果分析研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2022.
- [26] 孙伶俐, 何声馨, 刘坤坤, 等. 316 不锈钢拉伸过程微观结构演化研究 [J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(4): 142-145.
- SUN Lingli, HE Shengxin, LIU Kunkun, et al. Microstructure evolution of 316 stainless steel during tensile process [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(4): 142-145.
- [27] 王传薪, 刘东明, 王建刚, 等. B₄C 增强铝基复合材料力学性能有限元模拟 [J]. 复合材料学报, 2016, 33(10): 2253-2260.
- WANG Chuanxin, LIU Dongming, WANG Jiangang, et al. Simulation of mechanical behaviors of B₄C reinforced Al matrix composites by finite element [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2016, 33(10): 2253-2260.
- [28] 刘桂荣, 裴燕斌. 含 B 中子吸收材料的研究进展 [J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(5): 1-5.
- LIU Guirong, PEI Yanbin. Research progress of boron-containing neutron absorber materials [J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(5): 1-5.
- [29] STINNER C. The application and properties of ATI nushieldTM borated stainless steels [EB/OL]. [2025-02-01]. <https://www.scribd.com/document/248182700>.
- [30] 王传薪. B₄C 增强铝基复合材料显微组织、力学性能的研究和有限元模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [31] CHAWLA N, SHEN Y. Mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites [J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(6): 357-370.

(编辑 亢列梅)