

高体积分数比金属颗粒增强树脂基复合材料弹性模量预测

赵金峰¹ 朱福先¹ 庄百亮² 杨皓清² 周勇权³

(1. 江苏理工学院 材料工程学院, 常州 213001)

(2. 中国机械总院集团江苏分院有限公司, 常州 213001)

(3. 扬州平航航空动力技术有限公司, 扬州 225200)

摘要: 为研究高金属颗粒增强树脂基复合材料的力学性能,基于细观力学理论和细观有限元法预测了该复合材料的弹性模量。首先,制备了复合材料的标准试样,通过单轴拉伸试验测试了其宏观弹性模量,并观测了试样的微观特性。其次,采用基于细观力学理论的Voigt、Reuss、Mori-Tanaka和广义均值法预测了复合材料的弹性模量。然后,根据试样微观的粒径统计结果,采用高斯分布规律确定了金属颗粒粒径的级配及其数量,采用Python语言编写了颗粒随机投放程序,基于Abaqus平台构建了由颗粒、树脂基体以及界面组成的二维代表性体积单元(Representative Volume Element, RVE)有限元模型。最后,通过理论计算和有限元数值模拟预测了高金属颗粒增强树脂基复合材料的弹性模量。分析结果表明,广义均值模型和有限元模型预测的弹性模量与试验测试结果误差较小,复合材料弹性模量随金属颗粒的增大而增大。

关键词: 高体积分数比; 颗粒增强复合材料; 弹性模量; 随机分布

中图分类号: TB332 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.06.016

0 引言

在汽车领域,新车型的推出需经过样车试制,使用快速模具试制汽车覆盖件,可以大大缩短新车的研发周期,节约时间成本,降低能源消耗^[1]。金属颗粒增强树脂基复合材料具有低成本、易成形等优势,是快速模具的理想材料。KHUSHAIRI等^[2]研究表明,增加颗粒填料的含量可以显著提高树脂基复合材料的强度和硬度,高体积分数比(颗粒含量超过30%)金属颗粒增强树脂基复合材料可作为快速模具材料,能够满足汽车覆盖件冲压模具强度、刚度、耐磨性等力学性能的使用需求。金属颗粒增强树脂基复合材料的弹性模量是其重要的力学性能指标,对保证模具的形状稳定性、提高成形精度、抵抗疲劳损伤和延长使用寿命至关重要,因此,准确预测弹性模量是设计制备达到模具使用要求的复合材料的基础和关键。

工程中常见的颗粒增强复合材料有混凝土、树脂基和金属基颗粒增强复合材料,其弹性模量的预测方法可分为理论分析和数值模拟两类^[3]。近年来,细观力学方法,如自洽法、Mori-Tanaka法、Voigt-Ruess上下

限理论和Hashin-Shtrikman上下限理论等,广泛应用于颗粒增强复合材料弹性模量的预测。姚战军等^[4]假定增强颗粒为椭圆形夹杂,考虑增强颗粒方位的随机性,利用Mori-Tanaka方法推导了弹性模量的计算公式,预测了不同体积分数比陶瓷颗粒增强金属基复合材料的弹性模量,结果表明,复合材料的弹性模量随颗粒体积分数比的增大而增大。YUAN等^[5]运用Voigt、Reuss、Paul、Maxwell和Klemens模型分析了退火时长对Al_{0.6}CoCrFeNi颗粒增强铝基复合材料弹性模量的影响。SAHOO等^[6]使用Halpin-Tsai、Hashin-Shtrikman上下限理论和Mura模型对不同体积分数的TiB₂颗粒增强Al7075基复合材料的弹性模量进行了计算,结果发现,当增强颗粒体积分数比较低时,基于变分原理的Hashin-Shtrikman上下限理论模型预测的弹性模量更接近于试验结果。除了上述基于细观力学的理论分析方法外,数值模拟也是预测颗粒增强复合材料弹性模量的有效方法。DARAMOLA等^[7]⁰⁴⁰⁰⁸使用Digimat多尺度建模软件和随机顺序吸附(Random Sequential Adsorption, RSA)算法建立了高岭石颗粒增强环氧树脂复合材料的三维随机代表性体积单元(Representa-

收稿日期: 2023-11-21 修回日期: 2023-12-30

基金项目: 江苏省科技计划项目(BK20211069); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX23_1603)

作者简介: 赵金峰,男,2000年生,河南平顶山人,硕士研究生; 主要研究方向为材料绿色成型工艺; E-mail:374148177@qq.com。

朱福先(通信作者),男,1979年生,江苏东台人,博士,副教授; 主要研究方向为复合材料力学; E-mail:jxzfz@jsut.edu.cn。

引用格式: 赵金峰,朱福先,庄百亮,等. 高体积分数比金属颗粒增强树脂基复合材料弹性模量预测[J]. 机械强度,2025,47(6):132-140.

ZHAO Jinfeng, ZHU Fuxian, ZHUANG Bailiang, et al. Elastic modulus prediction of high volume fraction metal particle reinforced resin matrix composite [J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(6): 132-140.

tive Volume Element, RVE)模型,预测结果与实际结果误差低于5%,说明质量含量百分数为6%的高岭石微粉可以显著增强复合材料的弹性模量和强度。DING等^[8]采用Ansys软件建立了核壳颗粒增强复合材料的细观有限元模型,基于各向同性假设,计算了该材料的弹性模量,发现当壳层的弹性模量大于芯层弹性模量时,复合材料的弹性模量增大,反之降低。田学亮等^[9]⁹²⁻⁹⁷建立了碳化硅颗粒增强铝基复合材料的REV有限元模型,研究了颗粒形状和体积分数对弹性模量的影响,结果显示,颗粒形状对预测结果的影响较小,体积分数对复合材料的弹性模量影响显著。

现有研究中,对增强颗粒体积分数比高于30%的复合材料力学性能的分析较少。但是,实际工程中采用了多种高体积分数比复合材料,如树脂砂复合材料^[10]、树脂混凝土复合材料^[11]等。当复合材料中颗粒体积分数比超过30%,颗粒夹杂之间的相互影响变得更为明显^[12]。因此,预测该材料的弹性模量时,必须考虑夹杂颗粒之间的相互作用。

本文基于细观力学理论和细观有限元模型,考虑高体积分数比颗粒之间的相互影响,预测高体积分数比金属颗粒增强树脂基复合材料的弹性模量,分析颗粒体积分数比含量对材料弹性模量的影响。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料为金属颗粒增强树脂基复合材料。其中,树脂由环氧树脂、改性环氧树脂、环氧稀释剂、分散剂、抗沉降助剂、聚合助剂和消泡剂在反应釜中混合而成;金属颗粒由还原铁粉、氧化铁粉及微量的Al粉、Zn粉组成,其中铁粉质量占比为90%。

1.2 试样制备

试样由金属颗粒和树脂溶液按一定比例混合,在模具中,经常温固化、加热强化制备而成,制备流程如图1所示。首先,将环氧树脂、改性环氧树脂、环氧稀释剂等溶液在反应釜中混合成液态树脂溶液;其次,将金属颗粒进行清洗、干燥处理,经充分混合后添加到液态树脂混合溶液中,搅拌均匀并使用真空脱泡仪进行真空脱泡,得到液态的金属/环氧树脂复合材料;然后,在液态金属/环氧树脂复合材料中加入固化剂,搅拌均匀后倒入试样模具中,静置固化后脱膜并进行表面抛光;最后,将试样放入烘箱恒温60℃保持2h,再恒温80℃保持6h。最终制得金属颗粒质量占比为80%,体积含量约为30%的金属/树脂复合材料试样。试样尺寸及所制试样如图2所示。采用扫描电子显微镜观测复合材料微观形貌,并通过Image 1软件统计金属颗粒的粒径,金属颗粒粒径分布结果如图3所示。

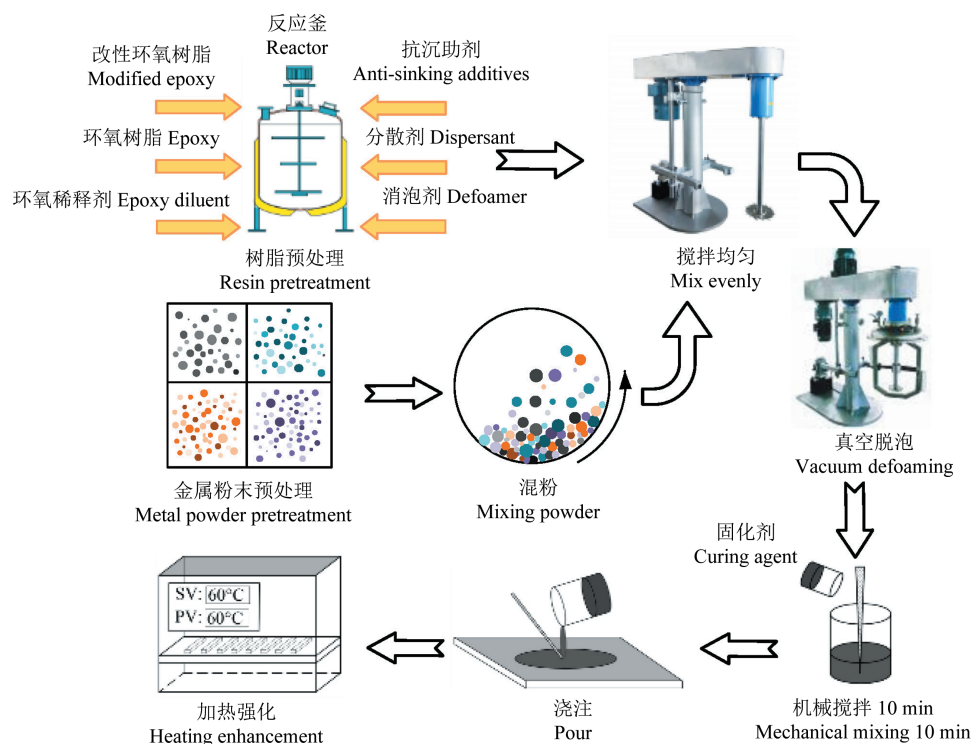


图1 试样制备流程

Fig. 1 Sample preparation process

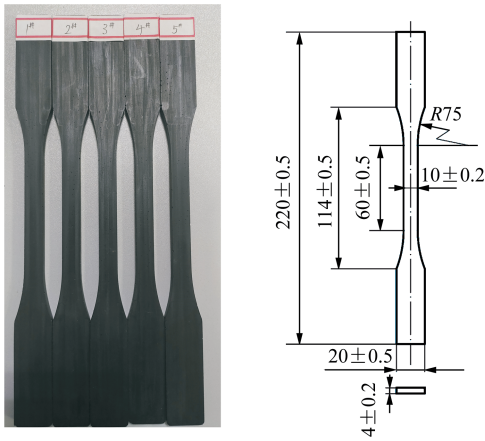
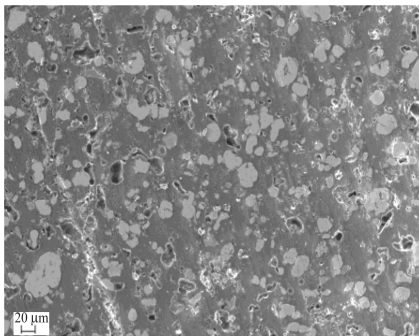


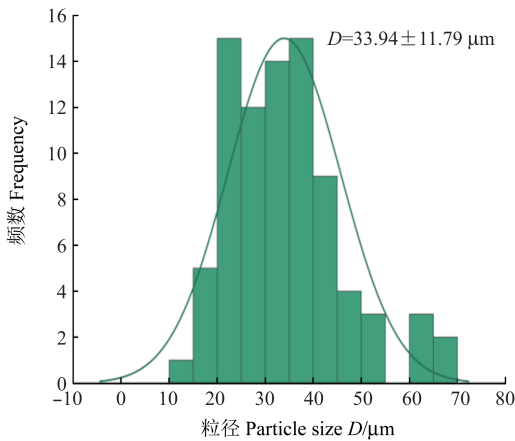
图2 试样及其尺寸

Fig. 2 Sample and its size



(a) 微观形貌

(a) Micromorphology



(b) 粒径统计

(b) Particle size statistics

图3 试样表面微观形貌及粒径统计

Fig. 3 Microscopic morphology and particle size statistics of the sample surface

1.3 试验方法与装置

材料拉伸试验参照标准 GB/T 2567—2021^[13], 采用分级加载的方式, 拉伸速度为 2 mm/min。试验通过应变片测量材料的泊松比和弹性模量, 应变片粘贴方案如图 4 所示, 拉伸试验装置如图 5 所示。

1.4 试验结果

将制备的体积分数比为 30% 的 5 根试样编号分别

记为 H₁~H₅, 试验测得 5 根试样拉伸应力-应变曲线如图 6 所示。

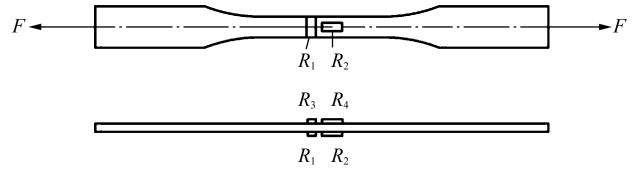


图4 应变片的位置

Fig. 4 Position of strain gauges

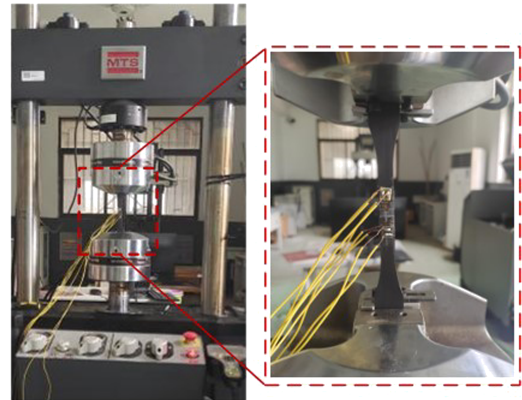


图5 拉伸试验装置

Fig. 5 Device of the tensile test

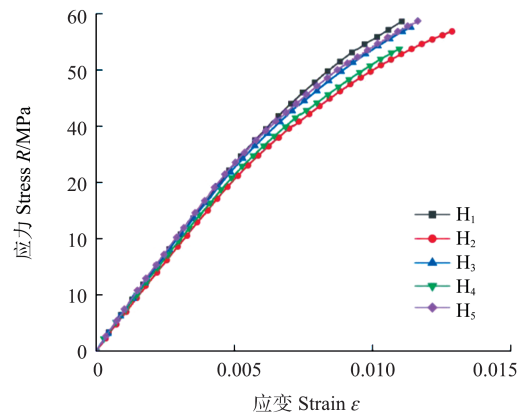


图6 试样应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of the sample

试样弹性模量的计算式为

$$E = \frac{\Delta F}{b_0 h \Delta \varepsilon} \quad (1)$$

式中, ΔF 为试样某级加载力的增量; b_0 为试样截面宽度; h 为试样截面厚度; $\Delta \varepsilon$ 为试样某级加载纵向应变的增量。

试样泊松比的计算式为

$$\nu = \left| \frac{\Delta \varepsilon'}{\Delta \varepsilon} \right| \quad (2)$$

式中, $\Delta \varepsilon'$ 为试样某级加载横向应变的增量。

表 1 所示为由式(1)、式(2)计算得到的 5 根拉伸试样的弹性模量和泊松比, 平均弹性模量为 6.76 GPa, 平均泊松比为 0.34。

表 1 拉伸试样测试结果

Tab. 1 Test results of the tensile sample

试样编号 Number of the samples	破坏载荷 Failure load F/kN	拉伸强度 Tensile strength R_m/MPa	泊松比 Poisson ratio ν	弹性模量 Elastic modulus E/GPa
H ₁	2.80	55.9	0.36	6.83
H ₂	2.73	54.68	0.37	6.52
H ₃	2.75	54.96	0.33	7.18
H ₄	2.55	51.04	0.33	6.61
H ₅	2.81	56.24	0.33	6.68

2 基于细观力学的弹性模量预测理论

2.1 等效夹杂理论

假定夹杂和基体均嵌于弹性刚度为 C^0 的参考介质中,非均匀复合材料第 r 相的平均应变为 $\langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle_{(r)}$ (椭圆形区域 H_r 内),其弹性刚度张量为 c_r ,不同夹杂的几何形状为 H_r ,所占体积比为 f_r 。当 $r=0$ 时,表示基体相,并在无穷远处作用参考介质的平均应变 $\underline{\underline{E}}^0$,其均匀化弹性特征如图 7 所示。此时,夹杂和基体被周围的参考介质包围,并通过参考介质的平均应变 $\underline{\underline{E}}^0$ 与邻近的夹杂和基体相互作用,参考介质的平均应变 $\underline{\underline{E}}^0$ 即反映了不同介质之间的相互作用。

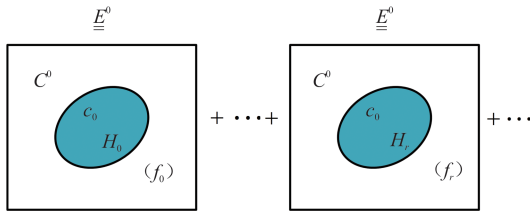


图 7 复合材料均匀化弹性特征

Fig. 7 Homogeneous elastic characteristics of composite materials

在上述复合材料均匀化弹性特征下,参考介质的弹性刚度 C^0 有以下 3 种选择^[14-15]:

1) 当参考介质为无限刚度 ($C^0 \rightarrow \infty$) 时,可得到复合材料有效弹性刚度的 Viogt 近似,表示为

$$\bar{C} \leq \frac{1}{V} \sum_{r=0}^{N-1} \int_{V_r} c_r dV = \sum_{r=0}^{N-1} f_r c_r \quad (3)$$

式中, V 为体积; \bar{C} 为复合材料的有效弹性刚度; N 为复合材料的总相数。Viogt 近似相当于给出了复合材料等效刚度的上限。

2) 当参考介质为无限柔性 ($C^0 \rightarrow 0$) 时,可得到复合材料有效弹性刚度的 Ruess 近似,表示为

$$\bar{C} \geq \left[\frac{1}{V} \sum_{r=0}^{N-1} \int_{V_r} S_r dV \right]^{-1} = \left[\sum_{r=0}^{N-1} f_r (c_r)^{-1} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中, S_r 为复合材料的有效弹性柔度。Ruess 近似相当于给出了复合材料等效刚度的下限。

3) 当参考介质的弹性刚度取复合材料基体的刚度 ($C^0=c_0$) 时,即为 Mori-Tanaka 方法,表示为

$$\bar{C} = c_0 + \sum_{r=0}^{N-1} f_r (c_r - c_0) : T_r : (f_0 I + \sum_{r=0}^{N-1} f_r T_r)^{-1} \quad (5)$$

$$T_r = [I + S_r^E : c_0^{-1} : (c_r - c_0)]^{-1} \quad (6)$$

式中, I 为单位张量; S_r^E 为第 r 相等效颗粒的 Eshelby 张量。

对于球形颗粒增强的两相各向同性复合材料,可以求得等效体积模量为^[16]

$$\bar{K} = K_0 + \frac{f_1 (4G_0 + 3K_0)(K_1 - K_0)}{(4G_0 + 3K_0) + 3(1 - f_1)(K_1 - K_0)} \quad (7)$$

式中, K_0 、 K_1 分别为基体和夹杂的体积模量; G_0 为基体的剪切模量; \bar{K} 为等效体积模量。

对于各向同性弹性材料,其等效弹性模量 \bar{E} 为

$$\bar{E} = 3\bar{K}(1 - 2\nu) \quad (8)$$

上述方法中, Viogt 近似和 Ruess 近似分别是基于各 r 相材料组成的弹性刚度和弹性柔度以及它们的体积平均值,得到复合材料的有效刚度,没有考虑各相材料的空间分布和它们的相互作用。因此,应用式 (3)、式 (4) 预测复合材料的整体特性,与试验误差相差较大。HILL^[17] 研究表明, Viogt 近似和 Ruess 近似给出复合材料均匀化弹性特征的上限和下限。Mori-Tanaka 方法则通过改变无穷远处应变或应力的方法考虑介质的相互作用,能够较为准确地预测复合材料的有效刚度。

2.2 修正的 Viogt-Ruess 理论

利用 Viogt 等应变假设和 Ruess 等应力假设可以计算出复合材料的弹性模量的上、下限,但只能给出其近似解。当夹杂颗粒的体积分数过大时,没有考虑颗粒间的相互作用、孔隙、缺陷等因素,导致预测值与实际值产生较大误差。JI^[18] 提出了广义均值法,在 Viogt 等应变假设和 Ruess 等应力假设计算的基础上对其进行了修正,通过引入结构因子 J , 建立计算颗粒增强复合材料弹性模量的表达式为

$$E(J) = \left[\sum_{r=0}^{N-1} (f_r c_r^J) \right]^{1/J} \quad (9)$$

式中, 下标 r 表示由 N 相组成的复合材料中的第 r 相, 且 $\sum_{r=0}^{N-1} f_r = 1$ 。

对于由两相组成的复合材料,若 $J=1.00$, 弹性模量为复合材料中组成相弹性模量的算术平均值,即 Viogt 近似;若 $J=-1.00$, 则为复合材料中组成相弹性模量的 Ruess 近似。因此, J 的值取决于复合材料的微观结构,如界面、缺陷、相与相的结合情况。柏振海

等^[19]通过研究 SiC/6606Al 复合材料弹性模量与 SiC 颗粒体积分数的关系,得出当 J 取值为 $-0.25 \sim 0.25$ 时,预测的弹性模量与实测值较吻合。对于本文的高体积分比金属颗粒增强树脂基复合材料,经测算,当 J 取 -0.9 时,对该类型复合材料弹性模量的预测能取得较好成效。

3 有限元模拟

3.1 有限元建模

本文基于 Abaqus 软件,建立金属颗粒增强树脂基复合材料细观结构的 RVE,通过施加位移载荷模拟单轴拉伸试验,计算其弹性模量,RVE 的选择如图 8 所示。

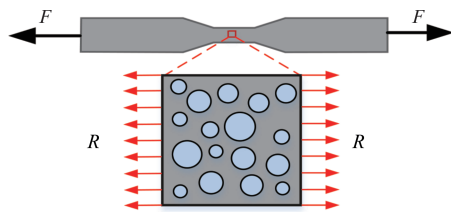


图 8 代表性体积单元

Fig. 8 Representative volume element

3.1.1 金属颗粒投放级配及概率

复合材料中金属颗粒的主要成分为铁粉,其他颗粒含量仅为 10%,为便于有限元模拟,将所有颗粒简化为铁粉。复合材料中金属颗粒的粒径和位置是随机分布的,由图 3 可以看出,金属颗粒的粒径符合高斯分布规律,其概率分布函数为

$$P(a < x < b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (10)$$

式中, μ 为均值; σ 为标准差。根据统计结果,复合材料的均值为 33.94,方差为 11.79。

根据高斯分布的 σ 准则,当分布区间为 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 时,有

$$\int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = 0.68$$

由图 3 可以看出,大多数颗粒的粒径 D 位于 $[20, 45]$,与 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 为同一区间,因此可将粒径位于 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 的视为第 2 级配段,记为 D_2 ,可见随机投放颗粒的粒径大小位于 $[22, 45]$ 的概率为 0.68,那么位于 D_2 级配段之外的概率为 0.32。根据高斯分布的 2σ 准则,可取第 1 级配段 D_1 的粒径范围为 $[10, 22]$,第 3 级配段 D_3 的粒径分布范围为 $[45, 57]$ 。根据高斯分布的对称性特点,忽略极小粒径和极大粒径存在的概率,则位于级配段 D_1 和 D_3 的概率均为 16%。

3.1.2 金属颗粒投放数量

试样承受平面应力载荷,可以将复合材料的 RVE

单元简化为平面二维结构。田学亮等^{[9]92-97}、王振清等^[20]在构建二维颗粒增强复合材料 RVE 有限元模型时,均假设增强颗粒为圆形,取得了较好的模拟效果。本文根据复合材料的微观特性,将颗粒简化为圆形颗粒。

假设粒径在级配段 D_n 范围内的颗粒所占面积为 A_n ,若模型的总面积为 A_c ,则 A_n 表示为

$$A_n = fP_n A_c \quad (11)$$

式中, f 为颗粒的体积分比; P_n 为相应级配段的投放概率。

不同级配段所投放的颗粒数目表示为

$$N_n = \frac{4A_n}{\pi D^2} \quad (12)$$

式中, N_n 为在级配段 D_n 中所投放颗粒的数目; D 为级配段 D_n 的中位数。

取二维 RVE 的总面积 A_c 为 0.25 mm^2 ,颗粒体积分比 f 为 30%,由式(11)和式(12)计算得到不同级配段的颗粒数目为 $N_1 = 60, N_2 = 60, N_3 = 6$ 。通过调用 Python 标准库中的 random.normal() 正态分布函数,模拟实际的粒径分布情况,生成一组符合该正态分布的随机数集,再通过线性变换将这些随机数转换到相应级配段,以满足预期的粒径分布范围要求。

3.1.3 界面相厚度

在金属颗粒增强树脂基复合材料中,由于金属颗粒填料表面与树脂基体的相互影响,在两相交界面处会形成结构和性能均不同于两相的界面层^[21]。界面作为连接基体与夹杂的纽带,有着极其重要的力学性能。界面在宏观上可以视为两相材料的分界面,没有厚度,但是在细观尺度上,界面是具有一定厚度的界面层或界相。ZHANG 等^[22]在模拟颗粒增强复合材料界面裂纹的渐进式脱黏时,研究了界面相厚度对材料力学行为的影响,当颗粒半径为 0.3 mm 时,界面相厚度 h' 取 $0.03 \sim 0.05 \text{ mm}$ 。杨慧^[23]研究认为,颗粒直径为 $30 \mu\text{m}$,界面相厚度取 $1.5 \mu\text{m}$ 。基于以上研究可以发现,界面相厚度约取值为颗粒半径的 $1/10$,可取得较好的模拟结果。因此,本文所研究材料的界面相厚度取为 $1 \mu\text{m}$,代表颗粒与基体之间的界面层。

3.1.4 金属颗粒投放

使用 Python 语言编写随机投放 3 种级配下的程序,具体步骤如下:

1) 随机生成第 1 个颗粒。使用随机函数获得投放第 1 个颗粒的坐标 (x_1, y_1) ,颗粒直径为 d_1 。考虑到界面相厚度 h' ,为确保颗粒位于正方形 RVE 内,则颗粒的坐标满足 $x_1, y_1 \in [d_1/2 + h', L - (d_1/2 + h')]$,颗粒直径 d_1

满足 $d_1 \in D_n$, 其中 L 为正方形 RVE 的边长。

2) 生成颗粒集。使用随机函数生成第 2 个颗粒, 其坐标为 (x_2, y_2) , 直径为 d_2 , 其中 x_2, y_2 的取值范围同步骤 1) 中所述。为确保所投颗粒在几何空间上不相交, 需设置相交判断函数; 为避免因相邻颗粒间距过小而导致网格畸变, 需额外引入颗粒最小间距 l , 则颗粒间距 S 应满足:

$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \geq \frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} + l + 2h' \quad (13)$$

将已生成满足条件的坐标纳入一个集合, 后将新生成的坐标 (x_i, y_i) 和直径 d_i 均同集合内的坐标进行相交判断, 直至达到该级配段所应投放的数量。

3) 生成代表体积单元。首先, 使用 Python 语言编写调用 Abaqus 中的草图绘制代码; 其次, 运用循环语句将集合中的坐标、直径和界面相厚度等信息作为参数逐个取出, 并导入代码中; 最后, 在 Abaqus 中的命令行接口, 通过运行所编写的 Python 程序, 自动生成包含 3 种级配的 RVE。投放步骤如图 9 所示。

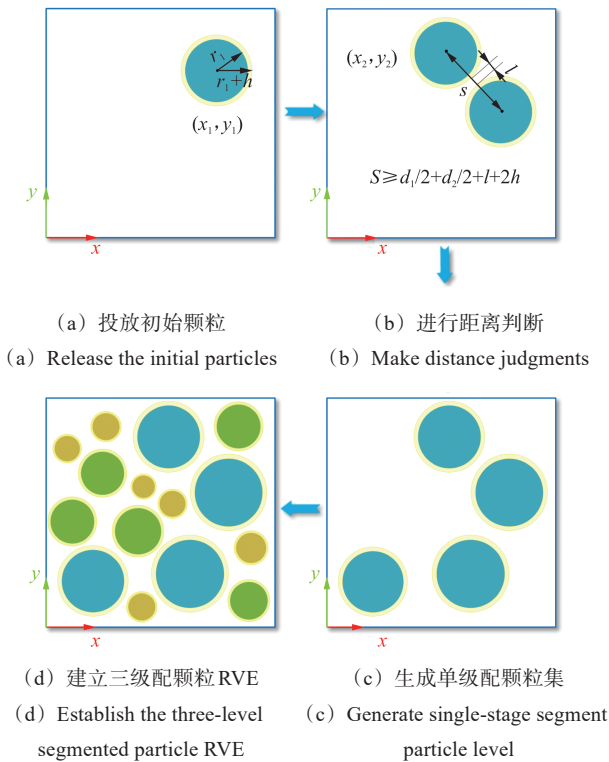


图 9 3 种级配颗粒的投放步骤

Fig. 9 Delivery of three gradated particles

5) 生成 RVE 有限元模型。根据上述金属颗粒投放方法, 当铁粉颗粒体积分数比为 30% 时, 生成 5 组不同随机颗粒分布的 RVE 模型, 分别记为 $Z_1 \sim Z_5$ 。在二维模型的左下角节点施加位移约束 U_1, U_2, U_{R3} , 在底边节点约束 U_2, U_{R1}, U_{R3} , 在顶端节点施加 0.01 mm 的位移载荷。为使计算结果更为精确, 模型采用四节点双线性平面应变四边形单元 CPS4R 划分网格, RVE 的有

限元模型如图 10 所示。各相材料的力学性能参数如表 2^{[7]e04008[24-25]} 所示。

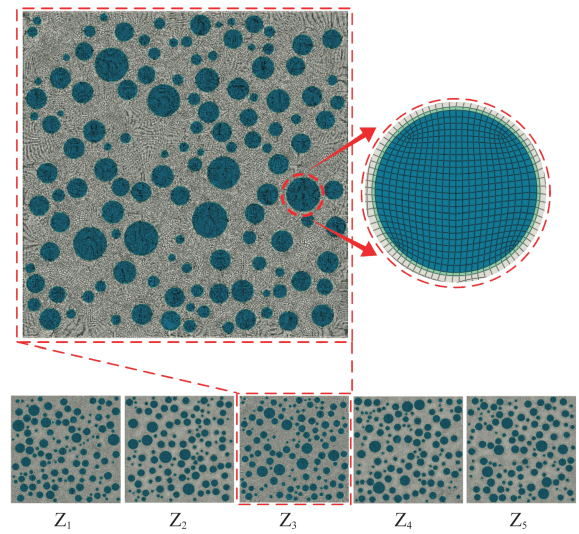


图 10 代表性体积元的有限元模型

Fig. 10 Finite element model of RVE

表 2 各相材料的力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of each phase material

组成 Composition	弹性模量 Elastic modulus E /GPa	泊松比 Poisson ratio ν
基体 Matrix	4.50	0.30
颗粒 Particle	170	0.34
界面 Interface	2.50	0.25

3.2 试验验证

图 11 所示为试验与数值模拟的线弹性阶段的应力-应变曲线。由图 11 可知, 5 组数值模拟的曲线与试验曲线相吻合。5 组随机颗粒分布模型的弹性模量模拟结果与试验结果对比如表 3 所示, 其中误差最大的为试验 H_3 与模拟 Z_1 , 误差值为 6.4%, 误差最小的为 H_1 与 Z_3 , 误差值为 0.2%, 平均误差仅为 1.0%。可见, 基于高斯分布规律构建的随机颗粒分布 RVE 有限元模型是合理的, 能较好地预测该材料的弹性模量。

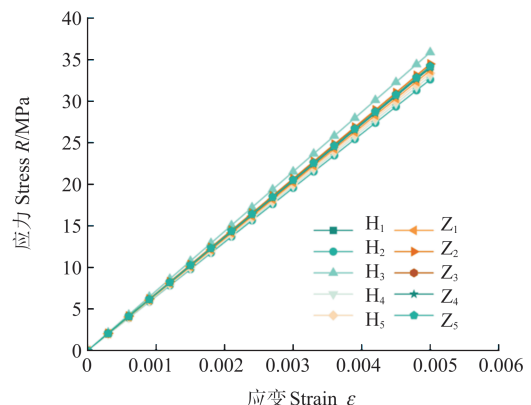


图 11 试验与模拟的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of test and simulation

表3 弹性模量的有限元模拟结果与试验结果对比

Tab. 3 Comparison of elastic moduli between simulation and test

模拟结果 Simulation result/GPa						试验结果 Test result/ GPa	相对误差 Relative error/%
Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	平均值 Average value		
6.74	6.90	6.85	6.80	6.84	6.83	6.76	1.0

4 讨论与分析

4.1 不同预测方法的对比

表4所示为采用不同方法预测金属颗粒增强树脂基复合材料弹性模量的结果。由表4可以看出,与试验结果最接近的细观力学理论方法为广义均值法,该方法通过引入随体积分数变化的结构因子 J ,体现了材料的微观结构及颗粒间的夹杂作用的影响,因此在预测高体积分数比颗粒增强树脂复合材料方面具有较高的精度。Vioigt方法则是假设颗粒与基质之间的界面完全强固,颗粒与基质之间传递完全的应变载荷,而颗粒增强树脂基复合材料的界面多为弱界面,使得预测结果远大于试验值。与之相反,Ruess方法则是假设颗粒与基体之间有零切应力和完全分离的界面,即颗粒和基体具有相同的应力而不发生载荷传递,相较于Vioigt方法更接近于试验值,但该方法没有考虑夹杂物的尺寸、相互作用以及夹杂物在基体中的分布等参数的影响^[26]。Mori-Tanaka方法则通过改变远处应变或应力的方法考虑介质的相互作用,能较好地预测复合材料的有效刚度,但无法体现夹杂物的排列方式和尺寸的变化,不能全面反映颗粒的微观特性。广义均值法和有限元模拟的预测结果与试验测试结果的误差均小于3%,说明采用广义均值法和考虑颗粒随机分布特性的RVE有限元模型可以很好地预测高体积分数比金属颗粒增强树脂基复合材料的弹性模量。

表4 不同预测方法与试验结果对比

Tab. 4 Comparison of different prediction methods and test results

预测方法 Prediction method	弹性模量 Elastic modulus/ GPa	误差(与试验结果比较) Error (Comparison with the test result)/%
Vioigt	55.05	—
Ruess	6.35	6.1
Mori-Tanaka	6.50	3.8
广义均值法 Generalized means method	6.57	2.8
有限元模拟 Finite element simulation	6.83	1.0

4.2 体积分数比对弹性模量的影响分析

为进一步探讨体积分数比对金属颗粒增强树脂

基复合材料弹性模量的影响,制备了体积分数比分别为35%、40%、45%的3组试样,每组试样制备5根,弹性模量取5根试样的算数平均值。采用细观力学理论以及文中所建立的有限元模型与试验所测得的结果进行对比,不同方法所得的弹性模量及对比如表5和图12所示。可以看出:

表5 不同体积分数比复合材料弹性模量预测结果

Tab. 5 Prediction results of the elastic modulus of composite materials with different volume fraction ratios

预测方法 Prediction method	体积分数比 Volume fraction ratio				平均相对误差 Average relative error /%
	30%	35%	40%	45%	
Ruess	6.35	6.83	7.37	8.01	6.92
Mori-Tanaka	6.50	7.14	7.90	8.78	4.13
广义均值法 Generalized means method	6.57	7.10	7.72	8.45	3.58
有限元模拟 Finite element simulation	6.83	7.39	8.10	8.47	2.19
试验 Test	6.76	7.67	8.01	8.32	0

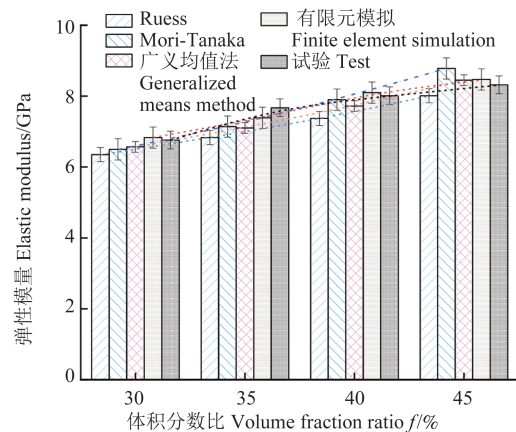


图12 体积分数比对弹性模量的影响

Fig. 12 Effect of the volume fraction ratio on the elastic modulus

1)采用细观力学理论、有限元模拟、试验所得的结果整体趋势一致,证明了预测方法的可靠性。Mori-Tanaka方法和广义均值法的平均相比误差分别为4.13%和3.58%,有限元模拟的平均相比误差为2.19%。可见,在细观力学理论预测方法中,考虑复合材料颗粒微观分布和体积分数比的广义均值法的预测精度更高。有限元模型预测的弹性模量精度要高于细观力学理论方法。

2)金属颗粒增强树脂基复合材料的弹性模量随颗粒体积分数比的增加而增大。金属颗粒相对基体具有较高的弹性模量,加入复合材料中可以有效增加基体抵抗变形的能力。另外,颗粒间的相互作用也随颗粒体积分数的增大而变得显著,颗粒之间直接传递载荷,增加了复合材料的刚性和弹性模量。

5 结论

基于细观力学理论和细观有限元模型,预测了高体积分数比($\geq 30\%$)金属颗粒增强树脂基复合材料的弹性模量,并将预测结果与试验结果进行对比分析。主要结论如下:

1)采用 Ruess 下限、Mori-Tanaka 方法、广义均值法预测了复合材料的弹性模量。其中,广义均值法通过引入结构因子 J ,考虑了材料微观结构特征和含量的影响,预测精度更高。

2)依据复合材料的微观特征,采用高斯分布规律,建立了考虑颗粒随机分布的二维 RVE 有限元模型,该模型预测的弹性模量精度高于细观力学理论方法。

3)金属颗粒增强树脂基复合材料的弹性模量随金属颗粒体积分数比的增大而增大。

参考文献(References)

- [1] 刘方彪,王丹勇,陈以蔚,等. 颗粒增强、增韧环氧树脂基复合材料制备研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(4): 613-618.
LIU Fangbiao, WANG Danyong, CHEN Yiwei, et al. Review on fabrication of epoxy composites reinforced or toughened with particles[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2014, 32(4): 613-618. (In Chinese)
- [2] KHUSHAIRI M T M, SHARIF S, JAMALUDIN K R, et al. Effects of metal fillers on properties of epoxy for rapid tooling inserts[J]. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2017, 7(4): 1155-1161.
- [3] 周储伟. 高体积含量颗粒增强复合材料的一个细观力学模型 I: 弹性分析与等效模量[J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 125-130.
ZHOU Chuwei. Micromechanical model for composites reinforced by large volume fraction of particles I: Elastic analysis and effective modulus [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2005, 22(4): 125-130. (In Chinese)
- [4] 姚战军,郑坚,倪新华,等. 颗粒增强复合材料有效弹性模量的预报[J]. 机械强度, 2007, 29(1): 72-76.
YAO Zhanjun, ZHENG Jian, NI Xinhua, et al. Effective elastic modulus prediction of the particle reinforced composites [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1): 72-76. (In Chinese)
- [5] YUAN Z W, MA Z, ZHANG H, et al. Macro-micro analysis of mechanical properties of $Al_{10}CoCrFeNi$ high-entropy alloy particle-reinforced Al-based composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 885: 145625.
- [6] SAHOO B P, DAS D, CHAUBEY A K. Strengthening mechanisms and modelling of mechanical properties of submicron- TiB_2 particulate reinforced Al 7075 metal matrix composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 825: 141873.
- [7] DARAMOLA O O, OLAJIDE J L, ADEDIRAN A A, et al. Multiscale analysis and experimental validation of the effective elastic modulus of epoxy-dioctahedral phyllosilicate clay composite [J]. Heliyon, 2020, 6(6): e04008.
- [8] DING H M, JIA H R, LI M M, et al. Study on stress distribution in microregion close to the shell of core-shell particle reinforced metal matrix composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 784: 139317.
- [9] 田学亮,徐颖. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料有效弹性模量预测[J]. 航空发动机, 2021, 47(5): 92-97.
TIAN Xueliang, XU Ying. Prediction of effective elastic modulus for SiC particle reinforced aluminium matrix composites [J]. Aeroengine, 2021, 47(5): 92-97. (In Chinese)
- [10] JI Y D, LIU Z H, ZHENG K D, et al. Effects of interface adhesive and resin cohesive strength on tensile strength of resin sand based on numerical analysis[J]. China Foundry, 2019, 16(6): 406-413.
- [11] TAUFIQ R, EVA A, NUR C E, et al. The performance of novel polymer mortar containing vinyl ester resin reinforced by fly ash and iron sand under compressive, tensile, and flexural test [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107205.
- [12] 陈康,许希武,马凯. 考虑夹杂间相互影响的弱界面颗粒复合材料等效模量预测的一般细观力学方法[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(1): 27-33.
CHEN Kang, XU Xiwu, MA Kai. A general micro-mechanical method for effective modulus prediction of particulate composites with pair-wise particle interactions and slightly weakened interfaces [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2013, 31(1): 27-33. (In Chinese)
- [13] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-4.
National Technical Committee on Fiber Reinforced Plastics Standardization. Test methods for properties of resin casting body: GB/T 2567-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1-4. (In Chinese)
- [14] 张研,张子明. 材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 72-77.
ZHANG Yan, ZHANG Ziming. Micromechanics of materials[M]. Beijing: Science Press, 2008: 72-77. (In Chinese)
- [15] 沈观林,胡更开,刘彬. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 269-275.
SHEN Guanlin, HU Gengkai, LIU Bin. Mechanics of composite materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 269-275. (In Chinese)
- [16] 陈玉丽,马勇,潘飞,等. 多尺度复合材料力学研究进展[J]. 固体力学学报, 2018, 39(1): 1-68.
CHEN Yuli, MA Yong, PAN Fei, et al. Research progress in multi-scale mechanics of composite materials [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2018, 39(1): 1-68. (In Chinese)
- [17] HILL R. The elastic behaviour of a crystalline aggregate [J]. Proceedings of the Physical Society. Section A, 1952, 65(5): 349-354.
- [18] JI S C. Generalized means as an approach for predicting Young's moduli of multiphase materials [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 366(1): 195-201.
- [19] 柏振海,黎文献,罗兵辉,等. 一种复合材料弹性模量的计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(3): 438-443.
BAI Zhenhai, LI Wenxian, LUO Binghui, et al. A calculation

- method of elastic modulus of composites [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(3): 438-443. (In Chinese)
- [20] 王振清, 雷红帅, 王晓强, 等. 纳米 TiO₂ 颗粒弱界面增强树脂基复合材料宏观力学行为有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2013, 30(1): 236-243.
WANG Zhenqing, LEI Hongshuai, WANG Xiaoqiang, et al. Finite element simulation for macroscopic mechanical behavior of nano TiO₂ particulate reinforced epoxy composites with weak interface [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(1): 236-243. (In Chinese)
- [21] 王挺. 含界面相颗粒增强复合材料的 Voronoi 单元有限元法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022: 2-4.
WANG Ting. Voronoi cell finite element method for particle reinforced composites with interfacial phase [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022: 2-4. (In Chinese)
- [22] ZHANG R, GUO R, Modeling of progressive debonding of interphase- matrix interface cracks in particle reinforced composites using VCFEM [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 248: 107734.
- [23] 杨慧. 含韧性界面相的颗粒增强复合材料的损伤研究[J]. 机械强度, 2015, 37(4): 735-741.
YANG Hui. Incremental damage theory of particulate-reinforced composites with a ductile interphase [J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(4): 735-741. (In Chinese)
- [24] 方奕欣, 陈蔚, 蒋震宇, 等. 碳纤维和 SiO₂ 纳米颗粒增强环氧树脂复合材料的压缩性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1343-1352.
FANG Yixin, CHEN Wei, JIANG Zhenyu, et al. Compressive performance of multi phase reinforced epoxy composites with carbon fibers and nano SiO₂ [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1343-1352. (In Chinese)
- [25] YANG B J, KIM B R, LEE H K. Micromechanics-based viscoelastic damage model for particle-reinforced polymeric composites [J]. Acta Mechanica, 2012, 223(6): 1307-1321.
- [26] DARAMOLA O O, OLAJIDE J L, BABARINSA S O, et al. Rutile titania-filled polyethylene composites: Microstructural evolution, empirical modeling of the mechanical properties and comparative validation of the quasi-elastic modulus using micromechanical models [J]. Fibers and Polym, 2018, 19(6): 1347-1358.

Elastic modulus prediction of high volume fraction metal particle reinforced resin matrix composite

ZHAO Jinfeng¹ ZHU Fuxian¹ ZHUANG Bailiang² YANG Haoqing² ZHOU Yongquan³

(1. School of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

(2. China Machinery Academy Group Jiangsu Branch Co., Ltd., Changzhou 213001, China)

(3. Yangzhou Pinghang Aeropower Technology Co., Ltd., Yangzhou 225200, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of high volume fraction ratio metal particle reinforced resin matrix composites, the elastic modulus of the composites was predicted based on the micromechanics theory and the meso-finite element method. Firstly, standard specimens of the composites were prepared, and their macroscopic elastic moduli were tested by uniaxial tensile experiments, and the microscopic properties were observed. Secondly, the elastic modulus of the composites was predicted by using Voigt, Reuss, Mori-Tanaka and Generalized means based on the micromechanics theory. Then, based on the microscopic particle size statistics of the specimens, the gradation of the metal particle size and its quantity were determined by using the Gaussian distribution law, and the random particle placement program was written by Python language to construct a two-dimensional representative volume element (RVE) finite element model consisting of the particles, the resin matrix, and the interface. Finally, the elastic modulus of resin matrix composites reinforced with high volume fraction metal particles was predicted by theoretical and finite element simulations. The analysis results show that the generalized means and finite element models predict the elastic modulus with less error from the experimental test results, and the elastic modulus of the composites increases with the increase of the volume fraction of the metal particles.

Key words: High volume fraction ratio; Particle reinforced composite; Modulus of elasticity; Random distribution

Corresponding author: ZHU Fuxian, E-mail: jxzfx@jsut.edu.cn

Fund: Science and Technology Plan of Jiangsu Province (BK20211069); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX23_1603)

Received: 2023-11-21 Revised: 2023-12-30