doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2023.262

考虑颗粒团聚影响的聚合物基复合材料温度相关性拉伸断裂强度理论表征模型

徐 超[1],董 攀[1],巫运韬[1],王如转[2],李 莹[3],李卫国[1]
(1. 重庆大学 航空航天学院,重庆 400044; 2. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院,重庆 401331;
3. 重庆交通大学 航空学院,重庆 400074)

摘要:聚合物基复合材料在不同温度下的拉伸断裂强度一直是人们关注的焦点,颗粒作为一种常见增强相可以显著提高聚合物基复合材料的拉伸断裂强度。然而,随着颗粒体积分数的增加,颗粒将会发生团聚现象,从而影响增强效果。针对颗粒增强聚合物基复合材料,通过计及颗粒团聚的影响,以及材料热物理性能随温度的演化,建立了一个考虑团聚影响的温度相关性拉伸断裂强度理论表征模型。模型得到了实验数据的良好验证。研究成果为定量表征不同颗粒含量、不同温度下复合材料的拉伸断裂强度提供了一种有效途径,加深了对不同温度下团聚现象对复合材料力学性能影响的认识。

关键词:颗粒增强;聚合物基复合材料;温度相关性;团聚;拉伸断裂强度
中图分类号:O341 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2024)08-132-09

Theoretical characterization model of temperature-dependent tensile fracture strength of polymer matrix composites with considering the effect of particle agglomeration

XU Chao[1], *DONG Pan*[1], *WU Yuntao*[1], *WANG Ruzhuang*[2], *LI Ying*[3], *LI Weiguo*[1]
(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. College of Metallurgical and Materials Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China; 3. School of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: The tensile fracture strength of polymer matrix composites at different temperatures has always been an important concern. As a common reinforcement phase, particles can significantly improve the tensile fracture strength of polymer matrix composites. However, with the increase of particle volume fraction, particles tend to agglomerate, which affects the strengthening effect. For particle-reinforced polymer composites, with considering the effects of particle agglomeration, as well as the evolution of the thermo-physical performance with temperature, a temperature-dependent analytical model for predicting the tensile fracture strength of particle-reinforced polymer composites was developed. The model predictions were in good agreement with the experimental data. The research results provide an effective way to quantitatively characterize the tensile fracture

收稿日期:2023-04-21 **网络出版日期:**2023-09-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(12172069,12202086)。
Supported by National Natural Science Foundation of China (12172069, 12202086).
作者简介:徐超(1997—),男,硕士研究生,主要从事复合材料力学性能方面的研究。
通信作者:李卫国,男,教授,博士生导师,(E-mail)wgli@cqu.edu.cn。

strength of composites with different particle contents and temperatures, and deepen the understanding of the influence of agglomeration phenomenon on the mechanical properties of composites at different temperatures.

Keywords: particle-reinforced; polymer matrix composites; temperature-dependence; agglomeration; tensile fracture strength

颗粒增强聚合物基复合材料由于其优异的力学性能在航空航天、汽车工业和能源化工等领域中得到了广泛应用[1-3]。材料在上述领域服役时常面临高温环境的挑战[3-4]，而拉伸断裂强度作为评估材料安全可靠性的一个重要指标[5-11]，对温度非常敏感。同时，颗粒体积分数也是影响复合材料拉伸断裂强度的重要因素[12-13]，研究表明，随着颗粒体积分数的增加，复合材料的拉伸断裂强度先升高达到最大值，这个最大值对应的颗粒体积分数被称为临界体积分数[1]，之后拉伸断裂强度随着颗粒体积分数的增加而下降，下降的原因是此时复合材料中出现了颗粒团聚现象，颗粒团聚会削弱复合材料的拉伸断裂强度[14-15]。因此，表征温度和团聚对颗粒增强聚合物基复合材料拉伸断裂强度的影响对于颗粒增强聚合物基复合材料的应用、评价和新材料研制具有重要意义。目前，已经有众多学者分别研究了温度、团聚或两者共同作用对颗粒增强聚合物基复合材料拉伸断裂强度的影响。在实验方面，Bora[16]对聚氯乙烯/火山灰复合材料的拉伸力学性能进行了实验研究，测定了其在不同温度下的拉伸断裂强度，发现拉伸断裂强度随着温度的升高而显著降低。Agrawal等[17-19]采用固溶铸造法制备了硫化镉颗粒增强聚甲基丙烯酸甲酯（CdS/PMMA）复合材料、硫化镉颗粒增强聚苯乙烯（CdS/PS）复合材料和硫化锌颗粒增强聚甲基丙烯酸甲酯（ZnS/PMMA）复合材料，并研究了这3种材料在不同温度下的拉伸断裂强度。研究发现，当颗粒质量分数达到一定值时，会出现团聚现象，此后复合材料的拉伸断裂强度随着颗粒质量分数的增加而降低。上述实验研究加深了对颗粒增强聚合物基复合材料的拉伸断裂强度的认识和理解。在理论方面，Dai等[1]建立了可考虑团聚影响的颗粒增强聚合物基复合材料拉伸断裂强度理论表征模型，但该模型没有以显式的形式考虑温度对复合材料拉伸断裂强度的影响。Li等[3]建立了一个颗粒增强聚合物基复合材料温度相关性拉伸断裂强度理论表征模型，而该模型没有考虑颗粒团聚的影响。因此，有必要建立能定量表征温度和团聚对颗粒增强聚合物基复合材料拉伸断裂强度共同影响的理论表征模型。

在本研究中，考虑材料热物理性能随温度的演化及颗粒团聚的影响，建立了一个考虑颗粒团聚影响的聚合物基复合材料温度相关性拉伸断裂强度理论表征模型，并利用获取到的所有3种颗粒增强聚合物基复合材料的实验数据对模型进行了验证，为定量表征不同颗粒含量、不同温度下复合材料的拉伸断裂强度提供了一种有效途径，加深了对不同温度下团聚现象对复合材料力学性能影响的认识。

1　模型建立

针对颗粒增强聚合物基复合材料，Dai等[1]建立了一个拉伸断裂强度理论表征模型

$$\sigma_c=\frac{3}{\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\frac{4}{\pi}\right)V_p\sigma_{n0}+\left(1-\frac{1}{4}V_p\right)\sigma_m, \tag{1}$$

式中：σ_c为复合材料的拉伸断裂强度；σ_m为基体的拉伸断裂强度；σ_{n0}为平均界面强度；V_p为颗粒体积分数。

当颗粒体积分数达到一定值时，会出现团聚现象，此后复合材料的拉伸断裂强度随着颗粒体积分数的增加而降低[20-21]，Dai等[1]认为复合材料中发生颗粒团聚后拉伸断裂强度减少量与$(V_p-V_{pc})^2$成正比，此时，复合材料的拉伸断裂强度可用式（2）表示。

$$\sigma_c=\frac{3}{\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\frac{4}{\pi}\right)V_{pc}\sigma_{n0}+\left(1-\frac{1}{4}V_p\right)\sigma_m-\eta\left(V_p-V_{pc}\right)^2\sigma_m, \tag{2}$$

式中：V_{pc}为颗粒临界体积分数，表示增强颗粒对复合材料拉伸断裂强度增强效果达到最大时对应的体积分数；η为聚集因子，反映颗粒团聚削弱复合材料拉伸断裂强度的程度，其值受颗粒的形状和基体的类型等因素的影响[1]。

将式（2）拓展应用于不同温度下，可得：

$$\sigma_c(T)=\frac{3}{\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\frac{4}{\pi}\right)V_{pc}(T)\sigma_{n0}(T)+\left(1-\frac{1}{4}V_p\right)\sigma_m(T)-\eta(T)\left[V_p-V_{pc}(T)\right]^2\sigma_m(T)。\tag{3}$$

Pérez等[22]给出了颗粒增强聚合物基复合材料的界面强度理论表征模型，将其应用于不同温度下，可得

$$\sigma_{n0}(T)=\left(\frac{4}{3}\frac{\gamma(T)E_m(T)K_t(T)}{\left(1-\nu_m(T)\right)}\frac{1}{r_p(T)}\right)^{0.5},\tag{4}$$

式中：$\nu_m(T)$和$E_m(T)$分别为聚合物基体的温度相关性泊松比和杨氏模量；$\gamma(T)$为界面的温度相关性断裂表面能，假设其近似等于基体的断裂表面能[23]；$K_t(T)$为温度相关性应力集中系数；$r_p(T)$为温度相关性的颗粒半径大小。

Deng等[24]建立了聚合物材料的温度相关性断裂表面能模型，如式(5)所示。

$$\gamma(T)=\gamma(T_0)\left[1-\frac{\int_{T_0}^{T}C_p(T)\mathrm{d}T}{\int_{T_0}^{T_{melting}}C_p(T)\mathrm{d}T}\right],\tag{5}$$

式中：$\gamma(T_0)$为任意参考温度T_0下聚合物材料的界面断裂表面能；$C_p(T)$为温度相关性定压比热容；对于结晶聚合物和半结晶聚合物，$T_{melting}$为熔融温度，对于非晶聚合物，$T_{melting}$为黏流温度[25]。

将式(5)代入式(4)，可得：

$$\sigma_{n0}(T)=\left[\frac{4\gamma(T_0)E_m(T)K_t(T)}{3r_p(T)\left[1-\nu_m(T)\right]}\left(1-\frac{\int_{T_0}^{T}C_p(T)\mathrm{d}T}{\int_{T_0}^{T_{melting}}C_p(T)\mathrm{d}T}\right)\right]^{0.5}。\tag{6}$$

Li等[2]建立了聚合物材料温度相关性拉伸断裂强度模型：

$$\sigma_m(T)=\left[\frac{E_m(T)}{E_m(T_0)}\left(1-\frac{\int_{T_0}^{T}C_p(T)\mathrm{d}T}{\int_{T_0}^{T_{melting}}C_p(T)\mathrm{d}T}\right)\right]^{0.5}\sigma_m(T_0)。\tag{7}$$

将式(6)和式(7)代入式(3)，可以得到考虑颗粒团聚影响的聚合物基复合材料温度相关性拉伸断裂强度理论表征模型

$$\begin{aligned}\sigma_c(T)=&\frac{3}{\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\frac{4}{\pi}\right)V_{pc}(T)\times\left[\left(\frac{4\gamma(T_0)E_m(T)K_t(T)}{3r_p(T)\left(1-\nu_m(T)\right)}\right)\left(1-\frac{\int_{T_0}^{T}C_p(T)\mathrm{d}T}{\int_{T_0}^{T_{melting}}C_p(T)\mathrm{d}T}\right)\right]^{0.5}+\\&\left(1-\frac{V_p}{4}\right)\left[\frac{E_m(T)}{E_m(T_0)}\left(1-\frac{\int_{T_0}^{T}C_p(T)\mathrm{d}T}{\int_{T_0}^{T_{melting}}C_p(T)\mathrm{d}T}\right)\right]^{0.5}\sigma_m(T_0)-\\&\eta(T)\left(V_p-V_{pc}(T)\right)^2\left[\frac{E_m(T)}{E_m(T_0)}\left(1-\frac{\int_{T_0}^{T}C_p(T)\mathrm{d}T}{\int_{T_0}^{T_{melting}}C_p(T)\mathrm{d}T}\right)\right]^{0.5}\sigma_m(T_0),\end{aligned}\tag{8}$$

式中：$\sigma_c(T)$为颗粒增强聚合物基复合材料温度相关性拉伸断裂强度；$\sigma_m(T_0)$和$E_m(T_0)$为聚合物基体在任意一个参考温度T_0下的拉伸断裂强度和杨氏模量；V_p为颗粒体积分数；$V_{pc}(T)$为温度相关性颗粒临界体积分数；$\gamma(T_0)$为任意一个参考温度T_0下界面断裂表面能；$E_m(T)$和$\nu_m(T)$为基体的温度相关性杨氏模量和泊松比；$K_t(T)$为温度相关性应力集中系数；$r_p(T)$为温度相关性的颗粒半径大小；$C_p(T)$为温度相关性定压比热容；对于结晶聚合物和半结晶聚合物，$T_{melting}$为熔融温度，对于非晶聚合物，$T_{melting}$为黏流温度[25]。

2　模型验证

通过查阅文献[17-19],得到CdS/PMMA、CdS/PS和ZnS/PMMA 3种复合材料在不同颗粒含量下的温度相关性拉伸断裂强度的实验数据,并对本文建立的考虑颗粒团聚影响的聚合物基复合材料温度相关性拉伸断裂强度理论表征模型(式(8))进行了验证。由于聚合物基体泊松比对温度不敏感[26-27],所以,计算中忽略了泊松比的温度相关性。考虑到增强颗粒的热膨胀系数很小(如硫化镉和硫化锌的热膨胀系数数量级在10^{-6} K),文中复合材料的服役温域一般从室温到363 K,所以,计算中忽略了颗粒半径的温度相关性。对于本文验证的3种材料,应力集中系数大小取为1.5[22]。3种材料对应的临界体积分数没有在文献中获取到,首先,绘制了3种材料在不同温度下拉伸断裂强度实验数据与体积分数的关系图(见图1~图3);然后,利用OriginPro 2017通过一元二次多项式对3种材料在不同温度、不同体积分数下拉伸断裂强度的实验数据进行拟合得到多项式函数;最后,对多项式函数求导,通过导函数等于零即可获得这3种材料在不同温度下的临界体积分数,分别如表1~表3所示。通过分析发现这3种复合材料的临界体积分数对温度不敏感,鉴于室温下的临界体积分数较易获取,在模型预测中均采用室温下的临界体积分数V_{pc}。模型所需其他材料参数如表4所示。

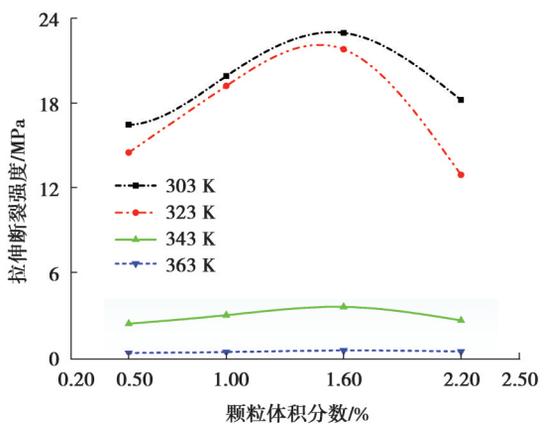


图1　CdS/PMMA复合材料在不同温度下拉伸断裂强度随体积分数变化的实验数据

Fig. 1　Experimental values of tensile strength with volume fraction of CdS/PMMA composites at different temperatures

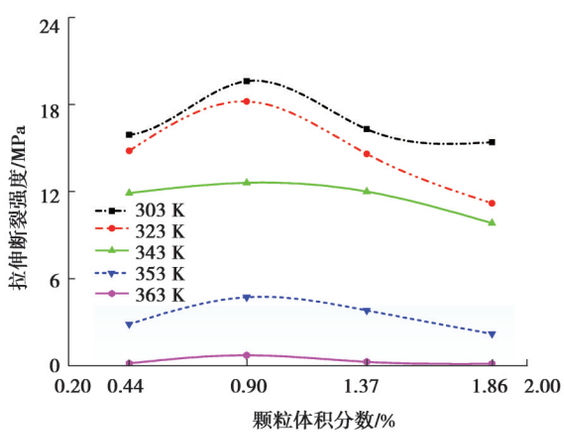


图2　CdS/PS在不同温度下拉伸断裂强度随体积分数变化的实验数据

Fig. 2　Experimental values of tensile strength with volume fraction of CdS/PS composites at different temperatures

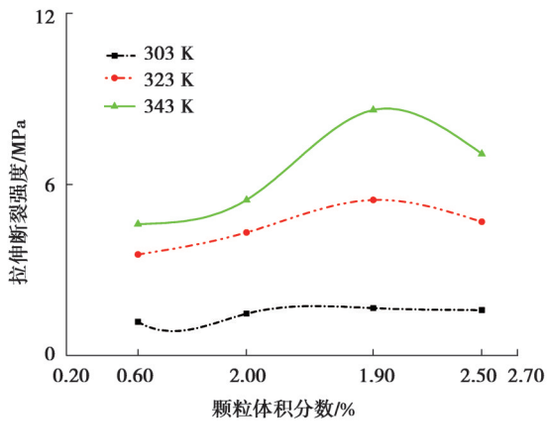


图 3 ZnS/PMMA 在不同温度下拉伸断裂强度随体积分数变化的实验数据

Fig. 3 Experimental values of tensile strength with volume fraction of ZnS/PMMA composites at different temperatures

表 1 CdS/PMMA 复合材料不同温度下的临界体积分数

Table 1 Critical volume fractions of CdS/PMMA at different temperatures

温度/K	多项式函数	V_{pc}/%
303	σ_c=7.98+1 960.41v_p−67 398.72v_p^2	1.45
323	σ_c=2.27+2 899.20v_p−109 084.05v_p^2	1.33
343	σ_c=0.80+368.29v_p−12 842.99v_p^2	1.43
363	σ_c=7.98+1 960.41v_p−1 292v_p^2	1.45

表 2 CdS/PS 复合材料不同温度下的临界体积分数

Table 2 Critical volume fractions of CdS/PS at different temperatures

温度/K	多项式函数	V_{pc}/%
303	σ_c=5.95+2 974.97v_p−161 986.61v_p^2	0.92
323	σ_c=5.14+2 907.75v_p−161 837.41v_p^2	0.90
343	σ_c=10.04+555.37v_p−30 089.62v_p^2	0.92
353	σ_c=5.95+2 974.97v_p−161 986.61v_p^2	0.92
363	σ_c=-1.28+436.19v_p−23 498.75v_p^2	0.93

表 3 ZnS/PMMA 复合材料不同温度下的临界体积分数

Table 3 Critical volume fractions of ZnS/PMMA at different temperatures

温度/K	多项式函数	V_{pc}/%
323	σ_c=7.84+1 071.93v_p−26 346.15v_p^2	2.00
343	σ_c=1.22+307.20v_p−8 012.82v_p^2	1.92
363	σ_c=0.12+83.43v_p−1 987.18v_p^2	2.10

表 4 模型预测使用的材料参数

Table 4 The material parameters for model predictions

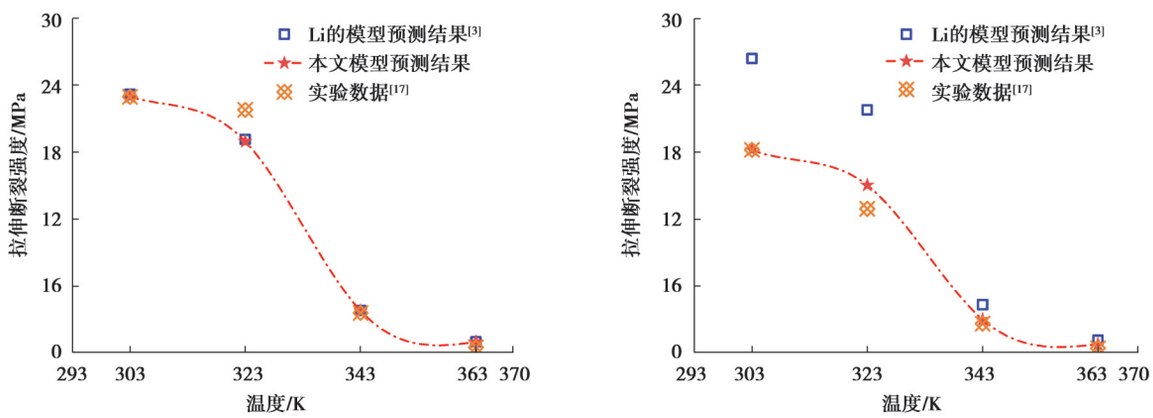
材料参数	CdS/PMMA	CdS/PS	ZnS/PMMA
T_0/K	303[17]	303[18]	323[19]
V_p/%	1.6; 2.2[17]	1.37; 1.86[18]	2.5[19]
v_m	0.35[28]	0.353[29]	0.35[28]

续表 4

材料参数	CdS/PMMA	CdS/PS	ZnS/PMMA
r_p/nm	1.59[17]	15[18]	3[19]
$\gamma(T_0)$/(J·m^{-2})	1.16[30]	30[30]	0.75[31]
$\sigma_m(T_0)$/MPa	14.63[17]	10.7[18]	12.58[19]
$T_{melting}$/K	433[32]	379[18]	433[32]
$E_m(T)$/MPa	303K: 1 597[17] 323K: 1 240[17] 343K: 58[17] 363K: 5[17]	303K: 1 740[18] 323K: 1 660[18] 343K: 1 180[18] 353K: 238[18] 363K: 35.1[18]	323K: 1 240[19] 343K: 58[19] 363K: 5[19]
ρ/(g·cm^{-3})	CdS: 4.82[33]; ZnS: 4.09[34]; PMMA: 1.223[35]; PS: 1.048[35]		
$C_p(T)$/(J·kg^{-1}K^{-1})	PMMA: $-6.35\times10^{-5}T^3+6.081\times10^{-2}T^2-12.06T+1\,236$ (100~500 K)[35] PS: $-5.197\times10^{-5}T^3+5.241\times10^{-2}T^2-10.3T+1\,019$ (100~600 K)[35]		

2.1　CdS/PMMA 复合材料

Agrawal 等[17]采用固溶铸造法制备了不同增强颗粒体积分数（0.5%、1.0%、1.6% 和 2.2%）的 CdS/PMMA 复合材料，并实验测试了不同温度下的拉伸断裂强度。在模型预测中采用室温下的临界体积分数 V_{pc}，其值为 1.45%，如表 1 所示。进一步，根据室温下拉伸断裂强度的实验数据，反推得到颗粒体积分数为 1.6% 和 2.2% 的 η 分别为 17 544 和 5 031，并假设其与温度无关。利用理论模型（式（8））预测了 CdS/PMMA 复合材料在 2 种颗粒体积分数（1.6% 和 2.2%）下的温度相关性拉伸断裂强度，并与文献[3]模型的预测结果和实验数据进行了比较。从图 4（a）可以看出，无论是本文模型的预测结果，还是文献[3]的预测结果，都与 1.6% 下的实验数据取得很好的一致性。从图 4（b）可以发现，本文模型的预测结果在不同温度下与实验数据吻合较好，但文献[3]模型的预测结果与实验数据偏差较大，进一步说明考虑团聚影响的必要性和本文模型的有效性。



（a）1.6% CdS/PMMA复合材料　　（b）2.2% CdS/PMMA复合材料

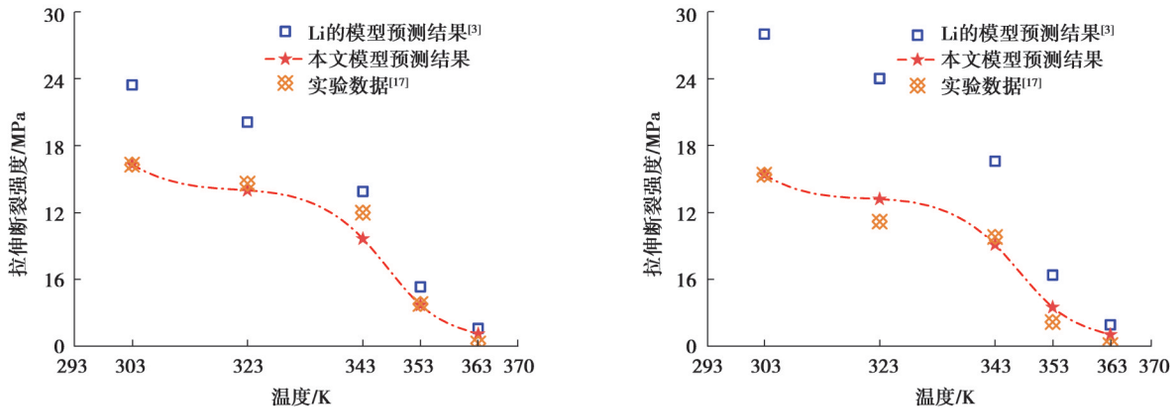
图 4　颗粒增强聚合物基复合材料拉伸断裂强度在不同温度下的预测结果与实验数据对比

Fig. 4　Comparison of predicted and experimental tensile fracture strength of particle-reinforced polymer composites at different temperatures

2.2　CdS/PS 复合材料

Agrawal 等[18]采用固溶铸造法制备了不同增强颗粒体积分数（0.44%、0.9%、1.37% 和 1.86%）的 CdS/PS 复合材料，并实验测试了不同温度下的拉伸断裂强度。在预测中采用室温下的临界体积分数 V_{pc}，其值为 0.92%（见表 2）。根据室温下拉伸断裂强度的实验数据，颗粒体积分数为 1.37% 和 1.86% 的 CdS/PS 复合材料的 η 分

别为 13 556 和 4 044。利用理论模型(式(8))预测了 CdS/PS 复合材料在 2 种颗粒体积分数下的温度相关性拉伸断裂强度,并与文献[3]模型的预测结果和实验数据进行了比较。如图 5(a)和图 5(b)所示,本文模型的预测结果与实验数据取得了很好的一致性,而文献[3]模型因没有考虑团聚的影响,致使其预测结果与实验数据出现较大偏差,温度越低,偏差越大。可以看出,对于 CdS/PS 复合材料,颗粒团聚对拉伸断裂强度的影响显著。



(a) 1.37% CdS/PMMA复合材料 (b) 1.86% CdS/PMMA复合材料

图 5 颗粒增强聚合物基复合材料拉伸断裂强度在不同温度下的预测结果与实验数据对比

Fig. 5 Comparison of predicted and experimental tensile fracture strength of particle-reinforced polymer composites at different temperatures

2.3 ZnS/PMMA 复合材料

Agrawal 等[19]采用固溶铸造法制备了不同增强颗粒体积分数(0.6%、1.2%、1.87% 和 2.5%)的 ZnS/PMMA 复合材料,并实验测试了不同温度下的拉伸断裂强度。在预测中采用室温下的临界体积分数 V_{pc},其值为 2.0%(见表 3)。根据室温下拉伸断裂强度的实验数据,颗粒体积分数为 2.5% 的 ZnS/PMMA 复合材料的 η 为 153。利用理论模型(式(8))预测了 ZnS/PMMA 复合材料在颗粒体积分数 2.5% 下的温度相关性拉伸断裂强度,并与文献[3]模型的预测结果和实验数据进行了比较。从图 6 可以看出,本文模型的预测结果和文献[3]模型的预测结果均与 2.5% 下的实验数据吻合较好,这归因于此时团聚的影响很小。

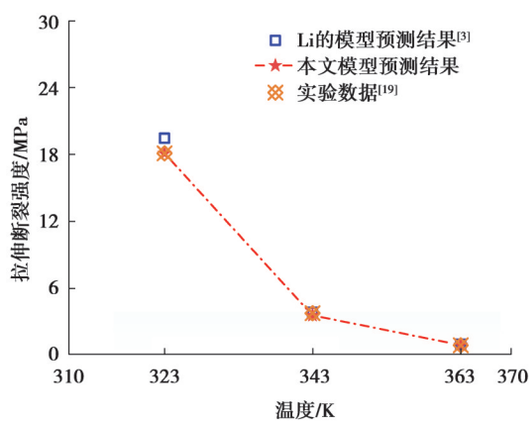


图 6 颗粒增强聚合物基复合材料拉伸断裂强度在不同温度下的预测结果与实验数据对比(2.5% ZnS/PMMA 复合材料)

Fig. 6 Comparison of predicted and experimental tensile fracture strength of particle-reinforced polymer composites at different temperatures(2.5% ZnS/PMMA composites)

3 结　论

1)建立了一个考虑颗粒团聚影响的聚合物基复合材料温度相关性拉伸断裂强度理论表征模型。该模型计及颗粒团聚的影响,以及材料热物理性能随温度的演化。通过与获取到的所有 3 种材料(CdS/PMMA、CdS/PS 和 ZnS/PMMA)的实验数据的对比,验证了模型的有效性;相比于文献[3]模型的预测结果,本文模型的预测结果与实验数据吻合得更好,说明了考虑团聚的必要性。

2)根据一元二次多项式对 CdS/PMMA、CdS/PS 和 ZnS/PMMA 3 种复合材料在不同温度、不同体积分数下拉伸断裂强度实验数据的拟合,获得了这 3 种复合材料在不同温度下的临界体积分数,得到了临界体积分数对温度不敏感的结论。

参考文献

[1] Dai H L, Mei C, Rao Y N. A novel method for prediction of tensile strength of spherical particle-filled polymer composites with strong adhesion[J]. Polymer Engineering & Science, 2017, 57(2): 137-143.

[2] Li Y, Li W G, Deng Y, et al. Theoretical model for the tensile strength of polymer materials considering the effects of temperature and particle content[J]. Materials Research Express, 2018, 6(1): 015315.

[3] Li Y, Li W G, Lin X, et al. Theoretical modeling of the temperature dependent tensile strength for particulate-polymer composites[J]. Composites Science and Technology, 2019, 184: 107881.

[4] Wang R Z, Li W G, Li D Y, et al. A new temperature dependent fracture strength model for the ZrB_2-SiC composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(10): 2957-2962.

[5] Jayaseelan C, Padmanabhan P, Athijayamani A, et al. Effect of mechanical properties on banana macro particle reinforced epoxy composites[J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2020, 27(3): 643-648.

[6] Jayaseelan C, Padmanabhan P, Athijayamani A, et al. Comparative investigation of mechanical properties of epoxy composites reinforced with short fibers, macro particles, and micro particles[J]. Bioresources, 2017, 12(2): 2864-2871.

[7] Miwa M, Horiba N. Effects of fibre length on tensile strength of carbon/glass fibre hybrid composites[J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(4): 973-977.

[8] Alam M N, Choi J. Highly reinforced magneto-sensitive natural-rubber nanocomposite using iron oxide/multilayer graphene as hybrid filler[J]. Composites Communications, 2022, 32: 101169.

[9] Zhu Z B, Lu K Y, Ling H, et al. Enhanced longitudinal compressive strength of CFRP composites with interlaminar CNT film prepreg from hot-melt pre-impregnation[J]. Composites Communications, 2023, 37: 101457.

[10] Nicolais L, Nicodemo L. The effect of particles shape on tensile properties of glassy thermoplastic composites[J]. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 1974, 3(3): 229-243.

[11] 杨济世, 栗娜, 孙东阳, 等. 碳纤维/玻璃纤维混编编织复合材料顶盖中横梁三点弯强度分析[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(2): 72-81.
Yang J S, Li N, Sun D Y, et al. Three-point bending strength analysis of middle cross beam-roof made of carbon/glass fiber-reinforced and 2D triaxial braided composites[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(2): 72-81. (in Chinese)

[12] 栾佰峰, 裴英飞, 黄天林, 等. 颗粒增强铝基复合材料的制备及热膨胀性能[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8): 136-142.
Luan B F, Pei Y F, Huang T L, et al. Fabrication and thermal expansion properties of particle reinforced Al matrix composites[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(8): 136-142. (in Chinese)

[13] 黄宏志, 刘燕, 邬昌丽. 铁磁颗粒增强橡胶复合材料的力学性能探究[J]. 中国高新科技, 2018(23): 81-84.
Huang H Z, Liu Y, Wu C L. Study on mechanical properties of ferromagnetic particle reinforced rubber composites[J]. China High and New Technology, 2018(23): 81-84. (in Chinese)

[14] Ran Y, Li Y D, Zeng J B. Dynamic crosslinking towards well-dispersed cellulose nanofiber reinforced epoxy vitrimer composites[J]. Composites Communications, 2022, 33: 101228.

[15] Slipenyuk A, Kuprin V, Milman Y, et al. Properties of P/M processed particle reinforced metal matrix composites specified by reinforcement concentration and matrix-to-reinforcement particle size ratio[J]. Acta Materialia, 2006, 54(1): 157-166.

[16] Bora M Ö. Evaluation of volcanic ash concentration effect on mechanical properties of poly(vinyl chloride) composites[J]. Acta Physica Polonica A, 2015, 127(4): 1004-1006.

[17] Agrawal S, Patidar D, Saxena N S. Investigation of temperature-dependent mechanical properties of CdS/PMMA nanocomposites[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(24): 2507-2514.

[18] Agarwal S, Patidar D, Saxena N S. Study on glass transition temperature and mechanical properties of cadmium sulfide/polystyrene nanocomposites[J]. Polymer Engineering & Science, 2013, 53(6): 1223-1229.

[19] Agarwal S, Patidar D, Saxena N S. Effect of ZnS nanofiller and temperature on mechanical properties of poly(methyl methacrylate)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123(4): 2431-2438.

[20] Boisvert J P, Persello J, Guyard A. Influence of the surface chemistry on the structural and mechanical properties of silica-polymer composites[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2003, 41(23): 3127-3138.

[21] Meguid S A, Sun Y. On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces[J]. Materials & Design, 2004, 25(4): 289-296.

[22] Pérez E, Lauke B. Calculation of debonding strength at the interface of particles with different shapes and matrix[J]. Composite Structures, 2017, 167: 262-270.

[23] 胡福增, 郑安呐, 张群安. 聚合物及其复合材料的表界面[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 89.
Hu F Z, Zheng A N, Zhang Q A. Surface interfaces of polymers and their composites[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001, 89. (in Chinese)

[24] Deng Y, Li W G, Wang R Z, et al. Temperature dependent first matrix cracking stress model for the unidirectional fiber reinforced ceramic composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(4): 1305-1310.

[25] Yang M Q, Li W G, He Y, et al. Modeling the temperature dependent ultimate tensile strength of fiber/polymer composites considering fiber agglomeration[J]. Composites Science and Technology, 2021, 213: 108905.

[26] Wang R Z, Li W G, Ji B H, et al. Fracture strength of the particulate-reinforced ultra-high temperature ceramics based on a temperature dependent fracture toughness model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 107: 365-378.

[27] Li W G, Zhang X H, Kou H B, et al. Theoretical prediction of temperature dependent yield strength for metallic materials[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 105: 273-278.

[28] Shin D K, Lee J J, Lyu M Y. A study on the impact failure mechanism of aluminum-PMMA interfacial crack[J]. Key Engineering Materials, 2000, 183/184/185/186/187: 259-264.

[29] Rinde J A. Poisson's ratio for rigid plastic foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1970, 14(8): 1913-1926.

[30] Kusy R P, Katz M J. Generalized theory of the total fracture surface energy for glassy organic polymers[J]. Polymer, 1978, 19(11): 1345-1357.

[31] Katsamanis F G, Delides C G. Fracture surface energy measurements of PMMA: a new experimental approach[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1988, 21(1): 79-86.

[32] Chand N, Vashishtha S R. Development, structure and strength properties of PP/PMMA/FA blends[J]. Bulletin of Materials Science, 2000, 23(2): 103-107.

[33] 符秀丽, 唐为华. 硫化镉纳米结构的制备与光学性质研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S2):1047-1050.
Fu X L, Tang W H. Fabrication and optical properties of CdS nanostructures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(S2):1047-1050. (in Chinese)

[34] 王敦青, 焦秀玲, 陈代荣. 硫化锌性质、用途及制备方法概述[J]. 山东化工, 2003, 32(2):4.
Wang D Q, Jiao X L, Chen D R. Brief introduction on properties, synthesis and application of zinc sulfide[J]. Shandong Chemical Industry, 2003, 32(2):4. (in Chinese)

[35] Mark J E. Physical properties of polymers handbook[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2007.

（编辑　郑　洁）