

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.003

煤矸石的表面改性及对复合材料性能的影响

刘晓阳^{1,2}, 马扶宸^{1,2}, 樊东焱^{1,2}, 杜涛^{1,2}, 钱大益^{1,2}, 宋剑斌^{1,2}

(1. 伊犁师范大学化学化工学院, 新疆伊宁 835000; 2. 新疆维吾尔自治区生物质资源清洁转化与高值利用重点实验室, 新疆伊宁 835000)

摘要: 煤矸石作为煤炭资源开发的副产物,会带来环境污染和大量资源的浪费。为探索煤矸石的高值化利用,选用新疆伊犁地区所产煤矸石作为研究对象,使用钛酸酯偶联剂(NDZ-201)改性煤矸石,采用模压法与环氧树脂共混制备复合材料,借助万能力学试验机、电子简支梁冲击试验机、接触角测量仪、扫描电子显微镜(SEM)和导热系数测定仪等研究煤矸石表面改性对复合材料力学性能、吸水率、接触角、微观形貌和导热系数的影响。力学性能测试结果表明,使用占煤矸石质量分数0.5%的NDZ-201改性时,复合材料的各项力学性能达到最大,其弯曲模量、弯曲强度、冲击强度和压缩强度比未改性煤矸石/环氧树脂复合材料分别提升了91.52%,66.13%,38.82%和50.7%;吸水率分析表明,复合材料的吸水率在NDZ-201质量分数为0.5%时最小(0.343 1%),比未改性复合材料降低了41.57%,同时接触角达到最大(101.6°);SEM观察发现,改性后复合材料的孔洞减少,证实NDZ-201能促进相界面相融,使环氧树脂与煤矸石两相均质化;导热系数分析表明,复合材料的导热系数在NDZ-201质量分数为0.5%时达到最大[0.488 97 W/(m·K)],比未改性煤矸石/环氧树脂复合材料提升了67.16%。

关键词: 钛酸酯偶联剂;煤矸石;环氧树脂;力学性能;导热系数

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0015-06

Surface modification of coal gangue and its influence on properties of composite materials

LIU Xiaoyang^{1,2}, MA Fuchen^{1,2}, FAN Dongyan^{1,2}, DU Tao^{1,2}, QIAN Dayi^{1,2}, SONG Jianbin^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yili Normal University, Yining 835000, China;

2. Key Laboratory of Clean Conversion and High Value Utilization of Biomass Resources in Xinjiang, Yining 835000, China)

Abstract : As a byproduct of coal resource exploitation, coal gangue poses significant environmental pollution risks and resource waste. To explore its high-value utilization, coal gangue from Xinjiang Yili region was selected as the research subject, the coal gangue was modified using titanate coupling agent (NDZ-201), and composites were prepared via compression molding with epoxy resin. The effects of surface modification on the mechanical properties, water absorption, contact angle, microstructure, and thermal conductivity of the composites were systematically investigated using a universal testing machine, electronic charpy impact tester, contact angle analyzer, scanning electron microscopy (SEM), and thermal conductivity meter. Mechanical performance analysis reveals that the mechanical properties of the composites reach the maximum when modified with NDZ-201 accounting for 0.5 wt% of coal gangue, its flexural modulus, flexural strength, impact strength and compressive strength are increased by 91.52%, 66.13%, 38.82% and 50.7%, respectively, compared with unmodified coal gangue/epoxy resin composites. Water absorption analysis demonstrates that the composite with 0.5wt% NDZ-201 achieves the lowest water absorption (0.343 1%), representing a 41.57% reduction relative to the unmodified sample, while simultaneously attaining the maximum contact angle (101.6°). SEM observations confirmed reduced porosity in modified composites, indicating that NDZ-201 enhances interfacial compatibility and homogenizes the epoxy resin-coal gangue phases. Furthermore, thermal conductivity analysis shows that the composite with 0.5 wt% NDZ-201 achieves the highest thermal conductivity [0.488 97 W/(m·K)], reflecting a 67.16% improvement over the unmodified counterpart.

Keywords : titanate coupling agent ; coal gangue ; epoxy resin ; mechanical property ; thermal conductivity

基金项目: 伊犁师范大学提升学科综合实力专项项目(22XKZZ15),伊犁师范大学科研创新团队培育计划(CXZK2021002),新疆科技厅重点研发项目(2023B01014)

通信作者: 宋剑斌,博士,教授,主要从事高分子改性、生物质复合材料、电磁屏蔽的研究

收稿日期: 2025-02-26

引用格式: 刘晓阳,马扶宸,樊东焱,等.煤矸石的表面改性及对复合材料性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(4):15-20.

LIU Xiaoyang, MA Fuchen, FAN Dongyan, et al. Surface modification of coal gangue and its influence on properties of composite materials [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 15-20.

随着煤炭资源的开发,伴随产生了大量的煤矸石废弃物,导致土地资源的浪费和环境污染。目前煤矸石的主要应用途径是矸石烧制水泥、混凝土轻质骨料和烧制耐火砖等,所产生的经济效益较低,因此,探索煤矸石的高价值利用途径,实现其资源化、无害化处理,对于环境保护和资源节约具有重要意义。

环氧树脂因优异的黏接性、力学性能和耐化学腐蚀性而被广泛应用于涂料、胶黏剂和复合材料等领域,然而,单一环氧树脂的力学性能有限,通过添加填料可以提高其各项性能。Kocaman等^[1]使用橄榄渣废料颗粒生物填料,用以制备环氧树脂复合材料,所得复合材料的力学、耐热和耐湿性能有所增强;Xu等^[2]通过聚氨酯、纳米二氧化硅和稀释剂对环氧树脂进行改性,使复合环氧树脂拉伸和弯曲等力学性能提高;Cha^[3]通过利用异佛尔酮二胺(IPDA)偶联剂改性含酮环氧树脂生产具有高导热性的聚合物纳米复合材料,使得复合材料的拉伸强度和导热性提高;Guo等^[4]以聚乙二醇为相变材料,环氧树脂为基体,制备聚乙二醇/环氧树脂复合材料,使得其具有良好热循环稳定性和力学性能;马扶宸等^[5]通过添加薰衣草蒸馏废渣作为环氧树脂填料,发现树脂力学性能随填料量增大而呈先增大后减小的趋势。

由于煤矸石富含氧化铝、二氧化硅、氧化铁等成分,具有大量的微孔和高比表面积,且具有一定的硬度、强度和热传导能力,故将其作为填料,可以有效增强复合材料的力学性能和导热性能,是极好的填料^[6];钛酸酯偶联剂(NDZ-201)展现出优于IPDA的更广泛的应用潜力和优势,尤其是能够改善无机填料与有机聚合物之间的相容性^[7],提高填料在树脂中的分散性,从而提升复合材料的整体性能。在复合材料的制备中,NDZ-201因其多功能性和改善材料性能的能力而具有明显优势,通过将煤矸石与环氧树脂结合制备复合材料,不仅能提高环氧树脂的力学性能,还能增加其表面活性基团数量,这对于材料在复杂环境下的应用尤为重要。

因此笔者采用新疆伊犁地区煤矸石,将其通过NDZ-201改性后与环氧树脂共混、固化后制得复合材料,通过万能力学试验机和电子简支梁冲击试验机等检测仪器,探究不同添加量的NDZ-201对煤矸石/环氧树脂复合材料的力学性能、表面能和微观形貌特征等的影响,为大规模利用煤矸石提出新的思

路,也为高值化利用煤矸石探究新的理论基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂:E-51,南通星辰合成材料有限公司;

环氧固化剂(二亚乙基三胺-丁基缩水甘油醚共聚物):593,中石化巴陵石油化工有限公司;

钛酸酯偶联剂:NDZ-201,东莞市康锦新材料有限公司;

氢氧化钠(NaOH):天津市鑫铂特化工有限公司;

煤矸石:伊犁新天煤化工有限责任公司。

1.2 主要仪器及设备

小型平板硫化机:CREE-6014B-30T,东莞市科锐仪器科技有限公司;

万能力学试验机:UTM-1432s,承德市金建检测仪器有限公司;

电子简支梁冲击试验机:XJJD-5,承德市金建检测仪器有限公司;

接触角测量仪:JC2000D1,上海中晨数字技术设备有限公司;

导热系数测定仪:DZDR-S,南京大展检测仪器有限公司。

1.3 试样制备

称量溶剂质量分数1%的NaOH加入乙醇/水溶液中(乙醇占溶剂质量分数的75%),搅拌至溶液澄清,备用;然后将煤矸石进行初步破碎后放入粉碎机,筛分后得到煤矸石粉末(150~180 μm),120 $^{\circ}\text{C}$ 干燥12 h,称量5组煤矸石粉末备用;分别将煤矸石质量分数0%,0.5%,1%,1.5%,2%的NDZ-201加入盛有NaOH的乙醇/水溶液的烧杯中,持续搅拌约2 h,待溶液清澈后,加入煤矸石粉,继续反应2 h后过滤取出,放入80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干24 h,改性完成;取定量的改性煤矸石粉末(占复合材料总质量的50%)放入环氧树脂(含固化剂)中剧烈搅拌5 min,静置5 min后转移至平板硫化机中,在70 $^{\circ}\text{C}$,8 MPa的压力下固化1 h,取出试样冷却至室温,用带锯机切成测试样条备用。

1.4 测试与表征

(1)力学性能测试:复合材料的弯曲强度、压缩强度和冲击强度分别按照GB/T 9341-2008,GB/T 1041-2008和GB/T 1043.2-2018测试,测试速率分别为2 mm/min,1 mm/min和2.9 m/s,室温下进行5

次测试,选取平均值。

(2)吸水率测量:将复合材料分别浸没于盛有水的烧杯中,间隔一定的时间梯度测量复合材料的质量,计算得到吸水率。

(3)接触角测量:将复合材料放入接触角测量仪,选取液体为水,拍摄照片,使用ImageJ进行绘制,得到左、右和椭圆3种接触角参数。

(4)导热系数测量:按照ISO 22007-2:2008测试,选取30 mm×30 mm×5 mm大小的试样片,使用压具压紧后每10 min测量一次数据,共3组数据。

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

弯曲模量和弯曲强度是衡量材料抵抗形变能力的指标。使用万用试验机对试样进行力学性能的测量,如图1所示。由图1a可知,当NDZ-201质量分数为0.5%时,改性煤矸石/环氧树脂复合材料的弯曲模量和弯曲强度达到最大,弯曲模量(2.342 GPa)和弯曲强度(33.89 MPa)比未改性煤矸石/环氧树脂分别提升了91.52%和66.13%;随着NDZ-201添加量的继续增加,复合材料的力学性能缓慢下

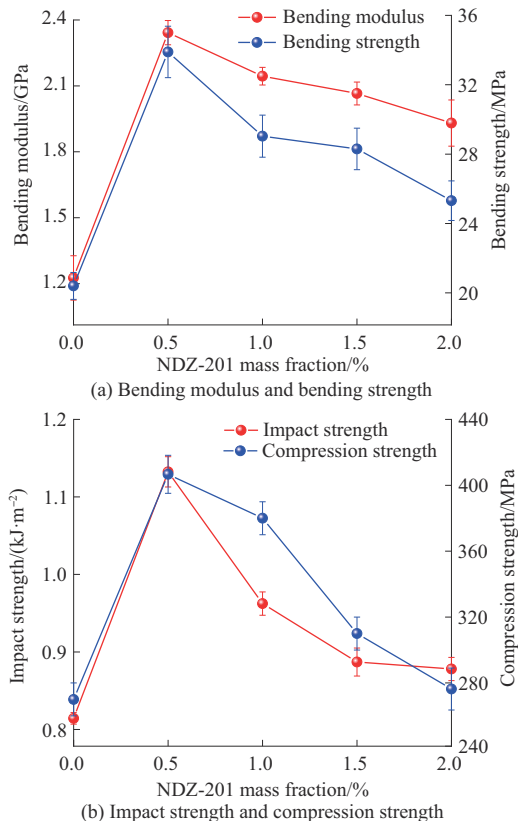


图1 不同质量分数NDZ-201对复合材料力学性能的影响

Fig. 1 Influence of different mass fractions of NDZ-201 on mechanical properties of composites

降。初步认为是由于NDZ-201附着于煤矸石表面,使煤矸石表面附着长链烷基,改善煤矸石与环氧树脂的界面相容性,使材料结合更紧密,性能增强,在接受径向载荷时,径向力会更均匀分散在复合材料中;但是随着NDZ-201用量的进一步增加,煤矸石在NDZ-201的作用下会更加分散,导致煤矸石逐渐失去因其团聚所产生的原有刚性,煤矸石的刚性是复合材料吸收应力的重要部分,故继续加入NDZ-201,致使弯曲模量和弯曲强度逐渐下降^[8]。

冲击强度用来衡量材料的抗冲击能力。由图1b可知,试样冲击强度在NDZ-201质量分数为0.5%时达到最大,达到1.13 kJ/m²,相较未改性复合材料提升了38.82%;然后随NDZ-201含量的进一步增加,复合材料的冲击强度迅速下降。由于所用NDZ-201中含有辛基官能团,在少量添加时,煤矸石起到骨架的作用,NDZ-201强化煤矸石骨架与环氧树脂的反应性,增加煤矸石附着环氧树脂的量,使材料更致密,冲击强度有很大的提升,但当其添加量继续增大,未附着于煤矸石上的NDZ-201增多,NDZ-201所携带的长链烷基大量与环氧树脂交联,会在材料中产生强度缺陷,冲击强度会迅速降低,直至平稳^[9]。

压缩强度反映了材料抵抗压缩载荷的能力。由图1b可知,试样的压缩强度在NDZ-201质量分数为0.5%时达到最大,为407 MPa,相较未改性复合材料提升了50.7%;然后随NDZ-201含量的进一步增加,复合材料的压缩强度迅速下降,在关乎压缩强度的因素中,应力集中当属关键,由于NDZ-201携带大量的三维基团,会使煤矸石与环氧树脂反应相界面大幅扩大,且NDZ-201所携带有大量的烷基,能与环氧树脂形成复杂的交联网络,而使其更好地分散在环氧树脂中,宏观来看材料会更致密,在接受轴向力时,受力更均匀,而当NDZ-201逐步增多,会有部分NDZ-201自聚形成应力集中点,且该自聚物强度极低,最终会导致压缩强度急剧下降。以上数据分析结论可以得出:添加质量分数0.5%的NDZ-201用于改性煤矸石时,复合材料的力学性能最好^[10]。

结合力学性能分析结果绘制了改性煤矸石/环氧树脂复合材料的合成路线,如图2所示。由图2可见,煤矸石表面上含有羟基结构,且活化后的NDZ-201会与羟基结合,每分子NDZ-201含有的3

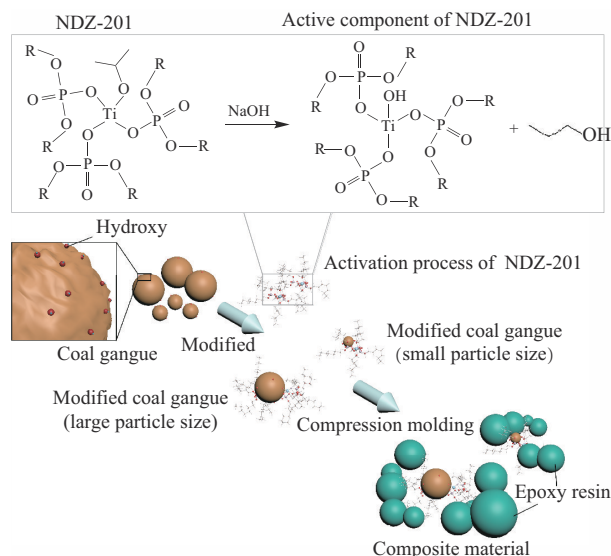


图2 改性煤矸石/环氧树脂复合材料的合成路线

Fig. 2 Synthesis route of modified coal gangue/epoxy resin composites 个焦磷酸酯基团,会通过NDZ-201结构连接到煤矸石表面,焦磷酸酯带有的长链烷基能大大改善煤矸石与环氧树脂的亲水性,促进与环氧树脂交联,使两相结合更紧密,宏观来看复合材料结构更致密,故材料整体强度会提升^[11-12]。

2.2 吸水率分析

吸水率反映了复合材料的孔隙结构特征,如图3所示。由图3可知,未添加NDZ-201的复合材料吸水率为0.587 2%,添加NDZ-201的复合材料都比未改性复合材料的吸水率低,且随着NDZ-201含量的逐渐增加,复合材料的吸水率也随之增大,最终吸水率在NDZ-201质量分数为0.5%时最低,为0.343 1%,比未改性复合材料降低41.57%。这是因为NDZ-201会与煤矸石表面羟基等极性基团结合,其含有的长链烷基会促进与环氧树脂的结合,使材料更致密,减少材料空隙,使得吸水率降低;而随着

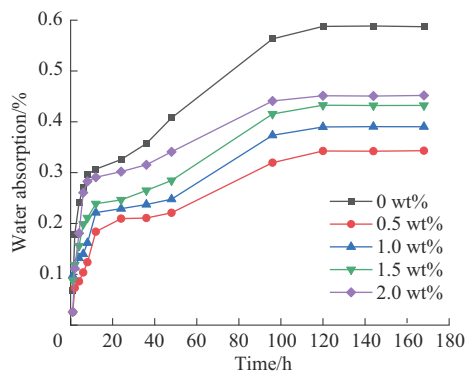


图3 不同质量分数NDZ-201对复合材料吸水率的影响

Fig. 3 Influence of different mass fractions of NDZ-201 on water absorption of composites

NDZ-201的继续添加,未键合在煤矸石表面的NDZ-201自行聚合,后与环氧树脂结合,偶联剂与环氧树脂发生过度反应,改变了树脂的交联结构和反应性能,使得树脂基体与煤矸石颗粒间的结合不均匀,在相界面处形成薄弱环节,水分更容易经此渗透进材料内部,导致吸水率增加^[13]。

2.3 接触角分析

接触角反映了材料的润湿性能,如图4所示。由图4可知,在NDZ-201质量分数为0.5%时,复合材料的接触角达到最大,为101.6°;而随着NDZ-201含量的逐渐增加,复合材料的接触角逐渐减小,直至接触角恒定;结合图4a中接触角的变化幅度可知,在未添加NDZ-201时,材料表面含有来自环氧树脂以及煤矸石的羟基,当适量添加NDZ-201会使材料表面富有烷基、表面能降低、接触角增大,由于所用NDZ-201空间效应大,随着NDZ-201添加量的增大,煤矸石会被NDZ-201完全包裹,其所含硅元素无法存在于表面,致使界面层亲水性增强,接触角下降;结合力学性能分析可得:添加NDZ-201质量分数0.5%的改性煤矸石会使复合材料孔隙率降低,力学性能增强,吸水率降低,但随着NDZ-201添

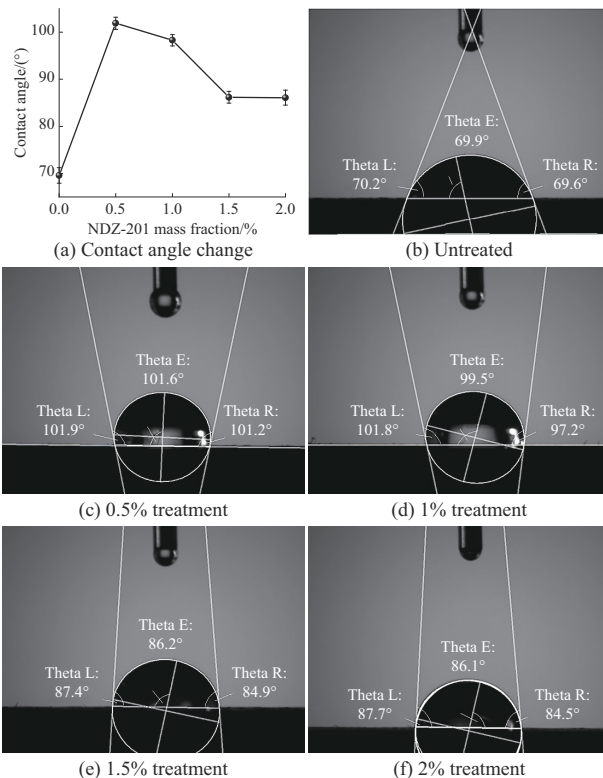


图4 不同质量分数NDZ-201对复合材料接触角的影响

Fig. 4 Influence of different mass fractions of NDZ-201 on contact angle of composites

加量的进一步增加,反应剩余的NDZ-201偶联剂会使复合材料中羟基数增加,吸水率增加^[14]。

2.4 形貌分析

SEM观测到试样的微观形貌结构,如图5所示。图5a为未经NDZ-201改性的煤矸石/环氧树脂复合材料断裂面SEM照片,其表面显露出明显颗粒,即为煤矸石颗粒;图5b为添加质量分数0.5%的NDZ-201改性煤矸石/环氧树脂复合材料断裂面SEM照片,其表面颗粒数显著下降。改性前,由于环氧树脂与煤矸石界面相容性较差、二者键合不均匀,在应力施加过程中会导致煤矸石成为应力集中点,从而使断裂面出现大量应力集中点;改性后,环氧树脂与煤矸石界面相容性改善,环氧树脂与煤矸石紧密键合,不易出现应力集中点,各项力学性能提高,符合力学性能分析结果^[15-16]。

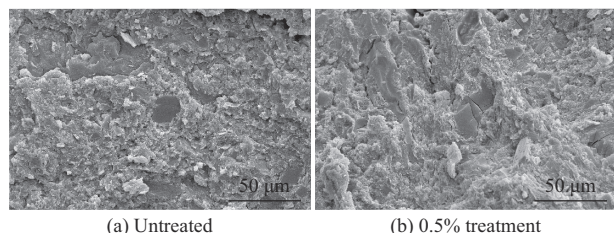
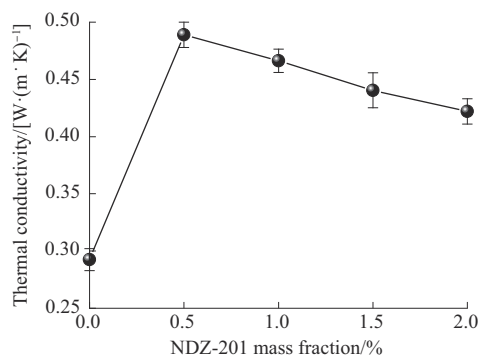


图5 NDZ-201改性前后复合材料的断裂面SEM照片

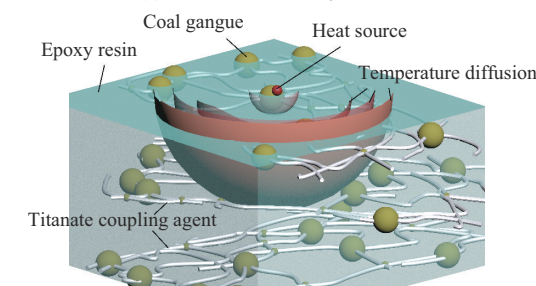
Fig. 5 SEM images of fracture surface of composites before and after NDZ-201 modification

2.5 导热系数分析

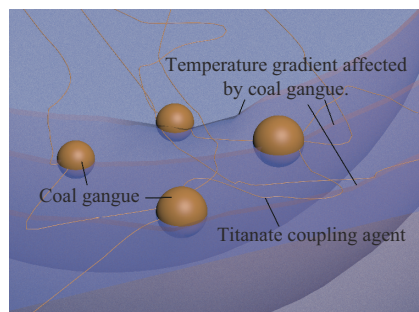
导热系数反映材料的导热性能,如图6所示。由图6a可知,由于NDZ-201的添加,复合材料的导热系数大幅提升,在NDZ-201质量分数为0.5%时最高,达 $0.488\ 97\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,相较未改性复合材料提升67.16%;之后随NDZ-201添加量的进一步增加,复合材料的导热系数逐渐降低。在导热机理层面分析,如图6b和图6c所示,引入NDZ-201后,煤矸石表面的羟基被钛酸酯偶联剂占据,所引入的烷基,将延长煤矸石之间的导热网络,相较未改性前的“煤矸石-环氧树脂”导热网络,导热效率更高,与此同时,煤矸石/环氧树脂间的作用也随着NDZ-201的添加而逐渐紧密,试样的气泡逐渐减少,材料逐渐致密,也使得材料更加均匀,在两因素的共同作用下,使改性煤矸石/环氧树脂复合材料的导热系数升高。而随着NDZ-201含量的进一步增继加,如图6c所示的热量梯度,NDZ-201所引入的烷基会相互交织成新的网络,其导热性能极差,同时新网络的



(a) Thermal conductivity variation



(b) Schematic diagram of the determination of thermal conductivity



(c) Schematic diagram illustrating effect of coal gangue surface structure on thermal conductivity

图6 不同质量分数NDZ-201对复合材料导热系数的影响及导热机理图

Fig. 6 Effect of different mass fractions of NDZ-201 on thermal conductivity of composites and thermal conductivity schematic diagram

形成会破坏导热良好的“煤矸石-钛酸酯偶联剂-煤矸石”导热网络,良导体煤矸石之间的联系被逐步切断,导致导热系数缓步下降^[17-18]。

3 结论

通过模压法制得NDZ-201改性的煤矸石/环氧树脂复合材料,对其力学、导热和吸水等性能进行研究,结论如下。

(1)力学性能研究表明,复合材料的弯曲模量、弯曲强度、冲击强度和压缩强度均在NDZ-201质量分数为0.5%时达到最高,弯曲模量(2.342 GPa)、弯曲强度(33.89 MPa)、冲击强度(1.13 kJ/m²)、压缩强度(407 MPa)比未改性复合材料分别提升91.52%,66.13%,38.82%和50.7%,。

(2)吸水性能表明,吸水率在NDZ-201质量分数为0.5%时最低,随着NDZ-201添加量的继续增加,复合材料的吸水率随之逐渐增加;接触角分析表明,在NDZ-201质量分数为0.5%时,材料的接触角达到最大,为 101.6° ,随着NDZ-201添加量的继续增加,复合材料相应的接触角随之逐渐减小。

(3)SEM分析证实NDZ-201能使环氧树脂与煤矸石均质化。

(4)导热系数表明,在NDZ-201质量分数为0.5%时,导热系数达到最大 $[0.488\ 97\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,比未改性复合材料提升了67.16%。

参考文献

- [1] KOCAMAN S, AKYAY İ. Itaconic acid based epoxy resin and application of olive pomace on the production of composite materials[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.120022.
- [2] XU H, KONG L, ZHANG Y Y, et al. Preparation and characterization of polyurethane composite modified epoxy resin for novel colored anti-skid pavement materials[J]. *Materials Letters*, 2024, 369. DOI:10.1016/j.matlet.2024.136760.
- [3] CHA Y, HONG Y, PANG K, et al. Maximizing filler content and manufacturing highly thermal conductive composite materials through eutectic liquefaction of epoxy resin[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2024, 140:376–384.
- [4] GUO X, WEI K, NI T F, et al. Preparation and performance analysis of polyethylene glycol/epoxy resin composite phase change material[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 88. DOI: 10.1016/j.est.2024.111525.
- [5] 马扶宸, 杜涛, 刘伟, 等. 薰衣草蒸馏废渣/环氧树脂复合材料的制备及力学性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(2):51–56.
MA Fuchen, DU Tao, LIU Wei, et al. Preparation and mechanical properties of lavender distillation residue/epoxy resin composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(2):51–56.
- [6] 田宇红, 杨荣添, 张李超, 等. 煤矸石复合吸附材料制备及脱硫性能[J]. *化学工业与工程*, 2024, 41(6):120–127.
TIAN Yuhong, YANG Rongtian, ZHANG Lichao, et al. Preparation and desulfurization performance of coal gangue composite adsorption material[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2024, 41(6):120–127.
- [7] ZHANG Y P, DING C, ZHANG N, et al. Surface modification of silica micro-powder by titanate coupling agent and its utilization in PVC based composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 307. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124933.
- [8] 熊一鸣, 宋季岭, 鲁显睿, 等. 粉煤灰表面修饰及其对PE基复合材料性能的影响[J]. *塑料*, 2021, 50(6):34–37, 42.
XIONG Yiming, SONG Jiling, LU Xianrui, et al. Surface modification of fly ash and its effect on properties of PE composite[J]. *Plastics*, 2021, 50(6):34–37, 42.
- [9] 刘晓明, 张增起, 李宇, 等. 赤泥在建筑材料和复合高分子材料中的利用研究进展[J]. *材料导报*, 2023, 37(10):15–28.
LIU Xiaoming, ZHANG Zengqi, LI Yu, et al. Research progress of utilization of red mud in building materials and geopolymer composites[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(10):15–28.
- [10] 文爱诗, 何素萍, 潘浩津, 等. 低温等离子体预处理对混杂纤维复合材料性能的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2023, 52(3):423–428.
WEN Aishi, HE Suping, PAN Haojin, et al. Effect of low-temperature plasma pretreatment on mechanical properties of hybrid fiber-reinforced composites[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2023, 52(3):423–428.
- [11] 吕生华, 晏移寒, 郭子轶, 等. 钛酸酯偶联剂改性二氧化钛/环氧树脂基超疏水涂层的制备及其性能研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2024, 42(4):86–93.
LYU Shenghua, YAN Yihan, GUO Ziyi, et al. Study on preparation and properties of titanate coupling agent modified titanium dioxide/epoxy resin based superhydrophobic coating[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2024, 42(4):86–93.
- [12] WANG H H, HE Y, FEI G Q, et al. Functionalizing graphene with titanate coupling agents as reinforcement for one-component waterborne poly(urethane-acrylate) anticorrosion coatings[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359:331–343.
- [13] 熊一鸣, 宋季岭, 秦舒浩, 等. 二聚甘油增塑淀粉及其PBAT复合膜制备与性能[J]. *塑料*, 2022, 51(4):56–59.
XIONG Yiming, SONG Jiling, QIN Shuhao, et al. Preparation and properties of diglycerol plasticized starch and its PBAT composite membrane[J]. *Plastics*, 2022, 51(4):56–59.
- [14] 章亚琼, 邢明欣, 戚嘉璐, 等. 小麦秸秆/弹性体复合材料的制备及性能测试[J]. *塑料*, 2022, 51(5):80–86.
ZHANG Yaqiong, XING Mingxin, QI Jialu, et al. Preparation and properties of wheat straw/elastomer composite[J]. *Plastics*, 2022, 51(5):80–86.
- [15] WANG Y Y, POURDEYHIMI B, YARIN A L. Thermoelastic stresses and delamination in composite bicomponent fibers: Experimental study[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 293. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112129.
- [16] DING S J, WU X M, CHEN C, et al. Enhanced adhesion strength of copper deposited epoxy composite films for chip substrates by tuning copper oxide and internal stress[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 684. DOI:10.1016/j.apsusc.2024.161911.
- [17] YAO J, XIANG D P. Facile preparation of heat-conducting ceramics/epoxy composites by pre-constructing Si_3N_4 -SiC skeleton from photovoltaic silicon waste[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(18):33 725–33 735.
- [18] 杜元开, 董姗, 柯雪, 等. 高分子导热复合材料结构设计及性能研究进展[J]. *化学通报*, 2023, 86(9):1 026–1 034.
DU Yuankai, DONG Shan, KE Xue, et al. Research progress in structural design and properties of polymer thermal conductive composites[J]. *Chemistry*, 2023, 86(9):1 026–1 034.