粉煤灰对聚氨酯注浆材料性能的影响

张丹青[1]，乔晓英[2]，张士俊[1]

（1.山西水利职业技术学院，山西 太原 030032；2.长安大学水利与环境学院，陕西 西安 710054）

摘　要：为应对聚氨酯（PU）注浆材料固化放热剧烈、热稳定性与阻燃性能不足及成本偏高等问题，同时推动工业粉煤灰（FA）的高附加值资源化利用，文章采用改性粉煤灰（mFA）作为功能填料制备PU注浆材料，系统研究mFA添加量对其固化特性、力学性能、热稳定性及阻燃性能的影响。结果表明，随着mFA添加量的增加，注浆材料固化峰值温度降低，力学性能先升后降，热稳定性和阻燃性能持续提高。当mFA添加量为30 phr时，注浆材料综合性能较优，固化时间略有延长，抗压强度提升23.1%，初始热分解温度提升55 ℃，残炭率提升至39.5%，极限氧指数由19.2%提升至34.6%，热释放速率峰值和烟释放速率峰值分别降低48.1%和41.3%，总热释放量和总烟释放量分别降低50.0%和51.6%。

关键词：聚氨酯注浆材料；粉煤灰；固化特性；热稳定性；阻燃性能

中图分类号：TQ323.8　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-3360（2026）08-0120-06

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.021

Effect of Fly Ash on Properties of Polyurethane Grouting Material

ZHANG Danqing[1], QIAO Xiaoying[2], ZHANG Shijun[1]

(1. Shanxi Conservancy Technical Institute, Taiyuan 030032, China; 2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To address the issues of intense exothermic curing, insufficient thermal stability and flame retardancy, and high cost of polyurethane (PU) grouting materials, while promoting the high-value-added resource utilization of industrial fly ash (FA), the study employed modified fly ash (mFA) as a functional filler to prepare PU grouting materials. The effects of mFA content on the curing characteristics, mechanical properties, thermal stability, and flame retardancy of the grouting materials were systematically investigated. The results showed that with increasing mFA content, the peak temperature during curing decreased, mechanical properties first increased and then decreased, while thermal stability and flame retardancy continuously improved. At an mFA adding amount of 30 phr, the grouting material exhibited optimal comprehensive performance. The curing time was slightly prolonged, compressive strength increased by 23.1%, initial thermal decomposition temperature increased by 55 ℃, char residue rate increased to 39.5%, and the limiting oxygen index increased from 19.2% to 34.6%. The peak heat release rate and peak smoke production rate decreased by 48.1% and 41.3%, respectively, while the total heat release and total smoke production decreased by 50.0% and 51.6%, respectively.

Keywords: PU grouting material; FA; Curing characteristics; Thermal stability; Flame retardancy

聚氨酯(PU)注浆材料因成型性好、固化速度快、黏结性强等优势，广泛应用于矿山围岩加固、采矿注浆、工程堵漏、基坑土体补强等场景，是兼具防渗与加固功能的核心高分子材料，可适配多类工程施工需求[1-3]。然而，纯PU存在固化反应放热剧烈、易造成材料焦烧或开裂、PU热稳定性较弱、力学性能不足[4-5]、阻燃性差、燃烧时易释放有毒烟气[6-7]以及原料成本较高等缺陷，使其规模化应用受到限制。因此，提高PU注浆材料的耐热性和阻燃性至关重要。目前，研究人员主要采用纳米材料和阻燃剂改善阻燃性能[8-10]。李强等[11]研究纳米改性剂CAG-1对PU注浆材料

收稿日期Submitted date 2026-01-26；修回日期Revised date 2026-02-28；录用日期Accepted date 2026-03-25

基金项目：2020年山西省水利科学技术与推广项目（SZ-2020-29）；2024年国家自然科学基金项目（42307261）

联系人，zhangdanqing168@163.com

引用本文：张丹青，乔晓英，张士俊．粉煤灰对聚氨酯注浆材料性能的影响[J]. 塑料科技，2026，54(8)：120−125.

Citation：ZHANG D Q, QIAO X Y, ZHANG S J. Effect of fly ash on properties of polyurethane grouting material[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 120-125.

性能的影响。结果表明，CAG-1的加入可提高注浆材料的密度、黏度、不挥发物质量分数、凝胶时间和包水性，减小发泡率和遇水膨胀率，CAG-1的最佳质量分数为5%。何继[12]研究阻燃剂ZR-2对PU注浆材料性能的影响。结果表明，随着阻燃剂添加量的增加，注浆材料力学性能先增大后减小，阻燃剂最佳质量分数为8%，此时注浆材料的阻燃、耐热、力学及耐老化等综合性能良好。

粉煤灰(FA)是燃煤发电产生的工业副产物，富含SiO_2、Al_2O_3等无机组分，具备孔隙率高、化学稳定性好、性价比高的特点，可作为优质改性填料[13-14]。目前，FA被广泛应用于水泥基材料，比如混凝土和砂浆，FA可以降低砂浆和混凝土的成本，提高材料的耐久性[15-16]；FA可以提升聚合物阻燃与热稳定性能，用FA替代部分有机原料可以实现固废资源化利用及材料性能升级的双向价值[17-18]。许秀丽等[19]采用羧甲基壳聚糖包覆FA得到改性FA (mFA)，研究mFA对聚氯乙烯(PVC)复合材料热稳定性、力学性能和抑烟性能的影响。结果表明：当mFA质量分数为10%时，复合材料抑烟性能较优，最大比光密度比纯PVC降低74%；当mFA质量分数为14%时，复合材料热稳定性较好，残炭率可达8.6%；当mFA质量分数为8%时，复合材料断裂伸长率为395.6%。

目前，关于FA增强PU的研究较少。为改善PU综合性能，同时推动FA高附加值资源化利用，文章采用铝酸酯偶联剂改性的FA作为功能填料，制备PU注浆材料，系统研究mFA对注浆材料固化特性、力学性能、热稳定性、阻燃性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

FA，山西弘炜环保科技有限公司，表1为FA的化学组成；聚醚多元醇，4110，工业级，固含量99%，绿联(济宁)化学科技有限公司；聚丙二醇(PPG)，PPG-2000，工业级，固含量99%，泰州佳音化工有限公司；锌铋复合催化剂，工业级，固含量99%，济南荣正化工有限公司；异氰酸酯(PAPI)，工业级，固含量99%，湖北鑫杰成化工科技有限公司；铝酸酯偶联剂，LS-62，质量分数98%，天长市绿色化工助剂厂；无水乙醇，分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

表1 FA的化学组成

Tab.1 Chemical composition of FA 单位：%

$w(SiO_2)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fel_2O_3)$	w(CaO)	w(MgO)	w(其他)
52.3	28.7	6.8	4.2	2.1	5.9

1.2 仪器与设备

高速搅拌器，JJ-1，金坛区西城新瑞仪器厂；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，Nicolet iS50，美国Thermo Fisher科技公司；表面接触角测试仪，OCA40 Micro，德国Dataphysics公司；万能试验机，WDW-100，济南试金集团有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，Gemini SEM 360，德国蔡司公司；热重分析仪(TG)，Q500，美国TA仪器公司；氧指数测定仪，JF-3，南京江宁分析仪器有限公司；锥形量热仪，TD-311ZZ，沧州泰鼎恒业试验仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 mFA的制备

将FA置于105 ℃烘箱中干燥24 h，磨细过400目筛备用。将铝酸酯偶联剂溶于无水乙醇(无水乙醇与铝酸酯偶联剂的质量比为4∶1)中，于60 ℃搅拌30 min，配制成改性溶液。取100 g上述处理好的FA粉末，加入400 mL去离子水，以1 000 r/min的转速搅拌30 min。随后将20 g改性溶液加入该混合液中，继续搅拌1.5 h后过滤，将所得沉淀在60 ℃下烘干，再次磨细过400目筛，制得mFA。

1.3.2 注浆材料的制备

表2为注浆材料的配方。其中，PU基体包括聚醚多元醇、PPG、催化剂和PAPI，四者共计100 phr，在此基础上外掺mFA。先将聚醚多元醇与PPG在500 r/min下搅拌5 min，再依次加入mFA和催化剂，然后在1 000 r/min下搅拌5 min，得到A组分；称取PAPI作为B组分，将B组分与A组分在1 500 r/min下快速混合30 s；快速注浆成型，常温固化24 h，得到注浆材料。

表2 注浆材料的配方

Tab.2 Formula of grouting materials 单位：phr

样品名称	添加量				
	聚醚多元醇	PPG	催化剂	PAPI	mFA
纯PU	30	32.5	0.2	37.3	0
PU/mFA10	30	32.5	0.2	37.3	10
PU/mFA20	30	32.5	0.2	37.3	20
PU/mFA30	30	32.5	0.2	37.3	30
PU/mFA40	30	32.5	0.2	37.3	40

1.4 性能测试与表征

FTIR测试：采用傅里叶变换红外光谱仪测试FA和mFA，扫描范围为400~4 000 cm^{-1}，分辨率为2 cm^{-1}，扫描次数16次。

接触角(CA)测试：采用表面接触角测试仪对FA和mFA进行测试。先将粉体压平，分别向其表面滴加约4 μL去离子水。

固化峰值温度($t_{cr,max}$)测试：材料的$t_{cr,max}$按照KA/T 1089—2020进行测试。取200 mL注浆材料，搅拌30 s后，倒入直径50 mm的绝热杯中，立即将温度计插入注浆材料

中心，采集固化过程中的最高温度。环境温度为(23±2) ℃，相对湿度为(50±5)%。

固化时间测试：采用250 mL烧杯盛装注浆材料，用秒表记录固化时间(按压无凹陷的时间计)。

力学性能测试：抗压强度按照GB/T 2567—2021进行测试，样品尺寸为50 mm×50 mm×100 mm，压缩速率为5 mm/min。

SEM测试：将样品在液氮中脆断后进行喷金处理，然后采用扫描电子显微镜观察微观结构，加速电压为15 kV。

TG分析：按照GB/T 27761—2011进行热稳定性测试，取5 mg注浆材料粉末，在N_2氛围下进行TG分析，温度为30~800 ℃，流速为50 mL/min，升温速率为10 ℃/min。

极限氧指数(LOI)测试：按照GB/T 2406.2—2009进行测试，样品尺寸为100 mm×10 mm×4 mm。

锥形量热分析：按照ISO 5660—1∶2015进行测试，记录样品热释放速率峰值(PHRR)、总热释放量(THR)、烟释放速率峰值(PSPR)和总烟释放量(TSR)，样品尺寸为100 mm×100 mm×10 mm，辐照功率为35 kW/m^2。

2 结果与讨论

2.1 改性前后FA的FTIR分析

图1为铝酸酯偶联剂、FA和mFA的FTIR谱图。从图1可以看出，在铝酸酯偶联剂的FTIR谱图中，3 440 cm^{-1}附近对应吸附水及Al—OH中羟基(—OH)的伸缩振动峰，2 810~2 900 cm^{-1}处对应—CH_2—的不对称和对称伸缩振动峰，1 630~1 730 cm^{-1}处对应C═O的伸缩振动峰，1 124 cm^{-1}处对应Al—O—C的伸缩振动峰，这些是铝酸酯的特征吸收峰[20]。FA在3 440 cm^{-1}附近出现显著的—OH伸缩振动，在1 600 cm^{-1}处出现较强的—OH弯曲振动。这说明FA表面含有大量—OH，呈亲水性，而PU基体呈疏水性，两者的界面相容性较差，会导致FA在PU基体中分散不均匀，这也是FA需要改性的原因[21-22]。FA在1 086 cm^{-1}处出现SiO_2中Si—O—Si和Al_2O_3中Al—O—Al的伸缩振动特征峰。经过铝酸酯偶联剂改性后，mFA在3 440 cm^{-1}附近和1 600 cm^{-1}处的—OH峰强度显著降低。原因在于铝酸酯偶联剂中烷氧基与FA表面Si—OH、Al—OH发生酯化反应，消耗大量—OH；mFA在2 810~2 900 cm^{-1}处再次出现新的吸收峰，对应—CH_2—的伸缩振动，原因在于铝酸酯分子中的长链烷基接枝到FA表面，引入有机疏水基团。

2.2 改性前后FA的CA

图2为FA和mFA的CA。从图2a可以看出，改性前，FA的CA仅为16°，表现出较强的亲水性。从图2b可以看出，改性后，mFA的CA大幅提高至143°，变为疏水性。原因在于FA表面含有大量—OH，容易与水结合，而mFA表面接枝一层铝酸酯偶联剂，铝酸酯偶联剂中的疏水有机链分布在mFA表面，使mFA具有较强疏水性。

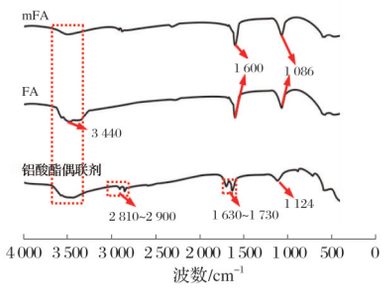


图1 铝酸酯偶联剂、FA和mFA的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectra of aluminate coupling agent, FA and mFA

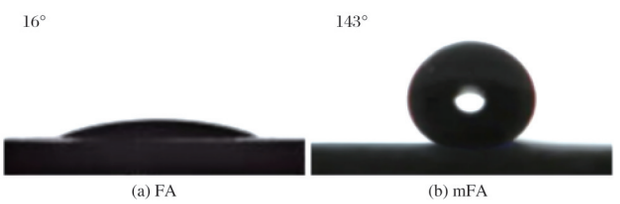


图2 FA和mFA的CA

Fig.2 CA of FA and mFA

2.3 注浆材料的$t_{cr,max}$和固化时间

图3为注浆材料的$t_{cr,max}$。从图3可以看出，随着mFA添加量的增加，注浆材料的$t_{cr,max}$呈现显著下降趋势，下降幅度先快后慢。纯PU的$t_{cr,max}$为137.2 ℃，当mFA添加量分别为10、20、30、40 phr时，$t_{cr,max}$分别降至114.7、102.3、96.5、93.4 ℃。当mFA添加量为30 phr和40 phr时，注浆材料满足KA/T 1089—2020中对$t_{cr,max}$不超过100 ℃的要求。其原因在于mFA中的多孔结构具有良好的吸热和散热性能，可以快速吸收PU固化反应释放的热量，孔隙能够将热量散发出去，从而降低$t_{cr,max}$[23]。mFA中的活性组分(SiO_2、Al_2O_3)能够与PU反应体系中的羟基发生微弱反应，调节PAPI与聚醚多元醇的反应速率，避免反应过于剧烈，使热量缓慢释放。同时，适量mFA能够分散反应体系中活性基团的浓度，避免局部反应过于集中导致的高温积聚。当添加量超过30 phr时，mFA分散性下降，部分出现团聚，吸热与散热效果均受到影响，因此$t_{cr,max}$下降幅度减小。

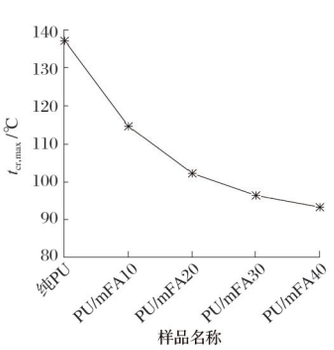


图3 注浆材料的$t_{cr,max}$

Fig.3 $t_{cr,max}$ of grouting materials

图4为注浆材料的固化时间。从图4可以看出，纯PU的固化时间为92 s，随着mFA添加量的增加，注浆材

料的固化时间逐渐延长。当mFA添加量分别为10、20、30、40 phr时，固化时间分别延长至105、110、116、129 s。原因是mFA的加入抑制了PU固化放热，导致固化时间延长。

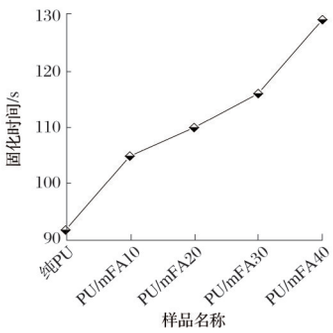


图4 注浆材料的固化时间

Fig.4 Curing time of grouting materials

2.4 注浆材料的力学性能

图5为注浆材料的抗压强度。从图5可以看出，随着mFA添加量的增加，注浆材料的抗压强度呈先上升后下降的趋势。纯PU的抗压强度为61.9 MPa，当mFA添加量为30 phr时，抗压强度达到最大值76.2 MPa，比纯PU增长23.1%；当mFA添加量为40 phr时，抗压强度降至73.3 MPa。

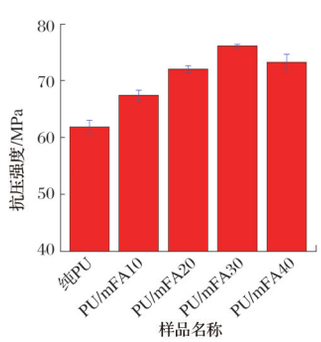


图5 注浆材料的抗压强度

Fig.5 Compressive strength of grouting materials

图6为注浆材料的SEM照片。从图6a可以看出，纯PU断面较为光滑平整。从图6b~图6e可以看出，加入mFA后，样品断面出现凹凸的孔洞和部分球状mFA颗粒，凹凸的孔洞较分散，而图6e中凹凸的孔洞出现部分聚集现象。凹凸的孔洞是由于mFA被拔出所造成。

结合图5和图6可得出抗压强度变化的机理。mFA中的活性组分(SiO_2、Al_2O_3)能够与PU体系中的羟基发生微弱反应，调控PAPI与聚醚多元醇的聚合速率，避免反应过于剧烈，使热量缓慢释放，缓解热应力，减少材料开裂、焦烧等固化缺陷[24]；10~30 phr的mFA均匀分散于PU基体中，形成承载骨架，有效传递应力，抑制PU分子链的变形和断裂，使力学性能提高。同时，铝酸酯偶联剂在mFA表面引入的分子链能够改善mFA与PU的界面相容性，形成稳定的化学键结合，使外力能够在PU基体与mFA之间有效传递，避免界面分离导致的应力集中。同时，mFA颗粒状结构能够阻碍裂纹的扩展，吸收外力能量，减少裂纹的产生和扩展，提升材料强度。但当mFA添加量超过30 phr时，mFA可能发生团聚，导致界面结合力下降。团聚体成为应力集中点，因此材料在外力作用下易发生断裂，即抗压强度降低。

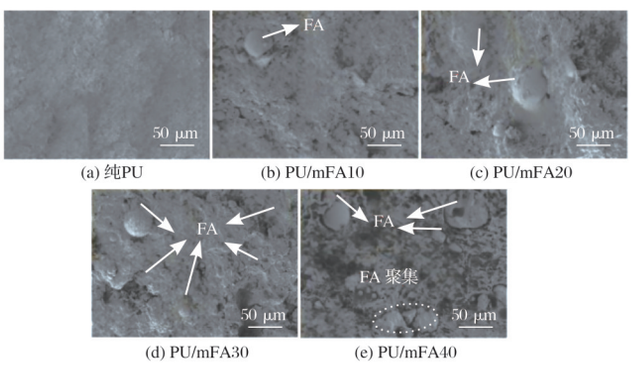


图6 注浆材料的SEM照片(1 000×)

Fig.6 SEM images of grouting materials (1 000×)

2.5 注浆材料的热稳定性

图7为注浆材料的TG曲线，表3为注浆材料的TG数据。从图7可以看出，纯PU的热降解主要包括3个阶段。第一阶段在216~346 ℃之间，主要是PU中氨基甲酸酯的分解；第二阶段在346~450 ℃之间，对应多元醇长链的破坏；第三阶段在450~520 ℃之间，对应多元醇短链进一步破坏。

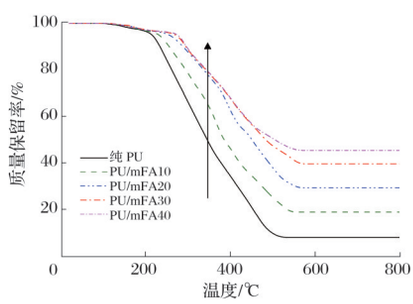


图7 注浆材料的TG曲线

Fig.7 TG curves of grouting materials

表3 注浆材料的TG数据

Tab.3 TG data of grouting materials

样品名称	初始热分解温度/℃	残炭率/%
纯PU	221	7.8
PU/mFA10	235	18.7
PU/mFA20	251	29.1
PU/mFA30	276	39.5
PU/mFA40	281	45.2

从表3可以看出，纯PU的初始热分解温度为221 ℃，残炭率为7.8%。加入mFA后，注浆材料的热降解曲线也分为3个阶段，随着mFA添加量的增加，TG曲线向右上方偏移量增大。当mFA添加量分别为10、20、30、40 phr时，

注浆材料的初始热分解温度分别提升至235、251、276、281 ℃，残炭率分别提升至18.7%、29.1%、39.5%和45.2%。这说明mFA可以提高注浆材料的热稳定性，使其各阶段热分解温度升高，残炭率增大。

mFA提高注浆材料热稳定性的原因在于：mFA中的无机组分(SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3等)具有良好的耐高温性能，能够抑制PU分子链的热降解反应，延缓热分解速率[24]；mFA与PU基体之间的化学键结合能够增强分子链的稳定性，减少热分解过程中分子链的断裂，从而提升热分解温度；mFA多孔结构能够吸附热分解产生的小分子物质，减少热分解反应的连锁反应；mFA中无机组分在高温下不易分解，能够形成隔热层，而PU分子链热分解后形成的炭层与mFA形成复合炭层，能够进一步阻碍热量和氧气的传递，抑制材料进一步热分解，从而提高残炭率，提升热稳定性[25]。

2.6 注浆材料的阻燃性能

表4为注浆材料的阻燃数据。从表4可以看出，纯PU的LOI仅为19.2%，说明其为易燃材料。随着mFA添加量的增加，注浆材料的LOI逐渐增大。当mFA的添加量分别为10、20、30、40 phr时，LOI分别提升至24.7%、27.8%、34.6%和35.8%。纯PU的PHRR和PSPR分别为526.91 kW/m²和0.081 2 m²/s。随着mFA添加量的增加，注浆材料的PHRR和PSPR逐渐降低。当mFA添加量为30 phr时，PHRR和PSPR较纯PU分别降低48.1%和41.3%。

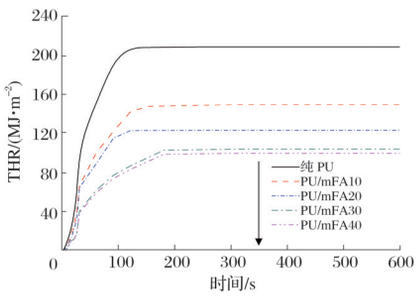
表4 注浆材料的阻燃数据

Tab.4 Flame retardant data of grouting materials

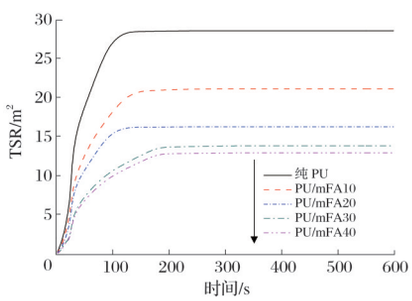
样品名称	LOI/%	PHRR/(kW·m⁻²)	PSPR/(m²·s)
纯PU	19.2	526.91	0.081 2
PU/mFA10	24.7	383.72	0.078 5
PU/mFA20	27.8	320.68	0.064 6
PU/mFA30	34.6	273.55	0.047 7
PU/mFA40	35.8	256.94	0.045 9

图8为注浆材料的THR和TSR曲线。从图8可以看出，随着时间的延长，纯PU的THR和TSR曲线快速上升，最后趋于平衡，最终THR和TSR分别达到208.83 MJ/m²和28.60 m²，说明燃烧剧烈。随着mFA添加量的增加，注浆材料THR和TSR达到平衡时的数值逐渐减小，最终THR分别降至149.68、123.64、104.48、100.17 MJ/m²，TSR分别降至21.16、16.26、13.83、12.94 m²。这说明mFA能够降低注浆材料的THR和TSR。当mFA添加量为30 phr时，THR和TSR较纯PU分别降低50.0%和51.6%。

为了进一步了解mFA对注浆材料阻燃性能的影响机理，对锥形量热分析后的样品进行微观形貌分析。图9为注浆材料残炭的SEM照片。从图9可以看出，纯PU残留物表面为疏松多孔结构。随着mFA添加量的增加，样品燃烧后残留物致密性增加，微观孔洞逐渐减少，尤其是mFA添加量达到30 phr后，残留物逐渐形成完整的炭层结构。



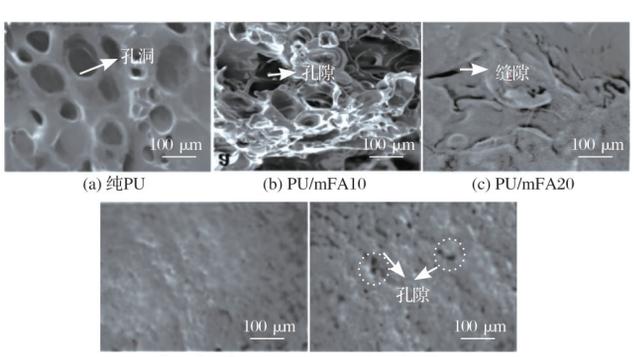
(a) THR



(b) TSR

图8 注浆材料的THR和TSR曲线

Fig.8 THR and TSR curves of grouting materials



(a) 纯PU (b) PU/mFA10 (c) PU/mFA20

(d) PU/mFA30 (e) PU/mFA40

图9 注浆材料残炭的SEM照片(500×)

Fig.9 SEM images of residual carbon of grouting materials (500×)

结合表4、图8和图9可以看出，mFA的加入能够显著提高注浆材料的阻燃性能，尤其是mFA添加量达到30 phr以上。此外，PU/FA40阻燃性能较PU/FA30提高幅度不明显，原因是mFA含有的SiO_2、Al_2O_3等无机成分不燃，在注浆材料中PU基体燃烧时，mFA会形成致密的隔离层结构，阻隔热量、氧气和可燃气体向基体内部扩散，从而阻止火焰蔓延，也会降低烟雾释放[26]；mFA多孔结构能够吸附燃烧过程中产生的可燃气体和热量，减慢燃烧速率，降低烟气释放量[27]。然而，当mFA添加量增至40 phr时，过量mFA出现部分团聚，难以充分发挥其阻燃效应，但由于mFA持续降低注浆材料中PU组分的质量分数，材料阻燃性能仍继续提升，只是提高幅度趋于平缓。

3 结论

本文采用铝酸酯偶联剂改性的FA制备PU/mFA注浆

材料，系统研究mFA添加量对其固化特性、力学性能、热稳定性及阻燃性能的影响，结合微观结构表征结果揭示mFA的增强机理。结果表明：铝酸酯偶联剂成功接枝于FA表面，使FA由亲水性转为疏水性，有利于mFA与PU基体的界面相容性。随着mFA添加量的增加，$t_{cr,max}$降低，力学性能先升后降，热稳定性和阻燃性能持续提高。mFA可在提升PU注浆材料综合性能的同时实现FA的高值资源化利用，降低材料成本。当mFA添加量为30 phr时，注浆材料的综合性能较优，$t_{cr,max}$由137.2 ℃降至96.5 ℃，固化时间由92 s延长至116 s，抗压强度提高23.1%，初始热分解温度提升55 ℃，残炭率提升至39.5%，LOI由19.2%提升至34.6%，PHRR和PSPR分别降低48.1%和41.3%，THR和TSR分别降低50.0%和51.6%。

参考文献

[1] 施贤仁, 李强, 俞斌, 等. 聚氨酯注浆材料生产及应用[J]. 工程学研究与实用, 2025, 6(19): 25-27.

[2] 李文杰, 申铁军. 聚氨酯新型复合注浆材料在隧道小导管注浆中的应用[J]. 河南建材, 2025(3): 24-27.

[3] YANG T T, XU Y M, HUANG Q Q, et al. An efficient biochar synthesized by iron-zinc modified corn straw for simultaneously immobilization Cd in acidic and alkaline soils[J]. Environmental Pollution, 2021, 291: 118129.

[4] 耿乾浩, 徐晓云, 李冰晶. 矿用聚氨酯注浆材料反应热控制技术研究进展[J]. 化工进展, 2025, 44(1): 319-328.

[5] 徐莉莉, 索旭勃, 陈博文, 等. EVA/TPU共混体系接枝物增容改性及发泡性能研究[J]. 沈阳化工大学学报, 2025, 39(5): 516-528.

[6] 李阳, 王玉超, 陈贵锋, 等. 矿用聚氨酯注浆材料改性研究进展[J]. 化工新型材料, 2026, 54(1): 61-65.

[7] 刘宏霞, 李军星. 有机硅改性聚磷酸铵制备聚氨酯复合材料及其力学性能和阻燃性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 59-63.

[8] 徐长波. 矿用聚氨酯注浆加固材料存在问题及研究展望[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(4): 142-145.

[9] 皮茂, 郑鹏程, 李孟瑶, 等. 阻燃低热聚氨酯注浆加固材料的研究进展[J]. 当代化工研究, 2025(18): 11-13.

[10] YU X F. Preparation and structure analysis of aluminum oxide/water glass/polyurethane composite grouting material for mining[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107170.

[11] 李强, 黄浩, 吕扬, 等. 新型聚氨酯注浆材料的研制及其在煤层防治水中的应用[J]. 能源与环保, 2024, 46(5): 45-49.

[12] 何继. 煤矿井防治水用新型聚氨酯注浆材料研究[J]. 化学工程师, 2026, 40(2): 94-97.

[13] 李快, 栗照帅, 董庭轩, 等. THEIC与DOTP复配改性粉煤灰/聚氯乙烯电缆用复合材料的制备和性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(5): 28-32.

[14] 李快. 电缆用粉煤灰/聚氯乙烯复合材料的制备及性能研究[D]. 银川: 北方民族大学, 2024.

[15] 陈海娜, 聂集祥. 纳米二氧化硅、粉煤灰微珠改性砂浆力学和耐久性研究[J]. 混凝土, 2026(1): 121-126.

[16] 李玉根, 陈鸿峪, 陆睿, 等. 铝酸酯偶联剂湿法改性粉煤灰疏水风积砂砂浆制备及吸水特性评估[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(12): 118-122.

[17] 扈霜月, 徐子芳, 王学凯, 等. 表面改性粉煤灰增强膨胀型防火涂料的耐火与隔热性能[J]. 复合材料学报, 2026, 43(1): 301-310.

[18] 詹朝瑟, 车荣辉, 陈浩东, 等. 改性粉煤灰补强丁苯橡胶性能研究[J]. 东莞理工学院学报, 2026, 33(1): 101-108.

[19] 许秀丽, 赵良莲, 张恒, 等. 微胶囊化粉煤灰对PVC能源线缆抑烟性能的影响[J]. 塑料, 2026, 55(1): 74-80.

[20] 姚岱森, 童张法, 廖丹葵, 等. 铝酸酯偶联剂湿法表面改性三氧化二锑及其在阻燃复合材料中的应用[J]. 塑料科技, 2024, 52(10): 12-18.

[21] 韩晨浩, 滕阳, 张锴. 粉煤灰基NaX沸石CO_2吸附剂的疏水改性研究[J]. 环境科学学报, 2026, 46(1): 310-320.

[22] 吴金, 肖少林, 关海中. 粉煤灰的红外光谱研究[J]. 山东化工, 2023, 52(16): 156-159.

[23] 王萧萧, 管雪怡, 荆磊, 等. 煤矸石-粉煤灰多孔骨料的制备及性能表征[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(8): 782-789.

[24] 尚予涵. 矿用粉煤灰/聚氨酯复合注浆材料的制备及其性能优化研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2025.

[25] ZHOU Q Q, LIU C K, ZHOU K Q, et al. Synergistic effect between solid wastes and intumescent flame retardant on flammability and smoke suppression of thermoplastic polyurethane composites[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31(1): 4-14.

[26] LI X, LIU Y, LI M Y, et al. High-value and environmentally friendly recycling method for coal-based solid waste based on polyurethane composite materials[J]. Polymers, 2024, 16(14): 2044.

[27] DONG Y Y, GUI Z, HU Y, et al. The influence of titanate nanotube on the improved thermal properties and the smoke suppression in poly (methyl methacrylate) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 209: 34-39.