复合材料学报 第31卷 第3期 6月 2014年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 31 No. 3 June 2014

文章编号：1000-3851(2014)03-0541-09

纤维增强发泡保温复合材料的制备与性能

李小龙，李国忠*
（济南大学 材料学院，建筑材料制备与测试技术山东省重点实验室，济南 250022）

摘　要： 为了增强玻化微珠/水泥发泡保温复合材料的力学性能和保温性能，通过掺加改性物理泡沫降低发泡保温复合材料的密度和导热系数，采用改性纤维对发泡保温复合材料进行增强。研究了纤维增强发泡保温复合材料的力学性能和耐水性能，并利用扫描电镜对试样内部微观形貌进行观察，探讨了改性泡沫和改性纤维对发泡保温复合材料的增强机制。结果表明，掺加泡沫明显降低了发泡保温复合材料的密度和导热系数，当泡沫掺量为1.05 mL/g时，试样密度和导热系数分别为186 kg/m^3 和0.056 W/(m·K)。泡沫改性可有效改善发泡保温复合材料的强度和软化系数，掺加改性泡沫试样的抗折强度、抗压强度和软化系数较掺加乳胶粉试样的分别提高了21.05%、21.43%和13.56%。改性纤维可显著提高发泡保温复合材料的强度和软化系数，掺加改性纤维试样的抗折强度、抗压强度和软化系数较掺加未改性纤维试样的分别提高了25.93%、13.51%和8.33%。

关键词： 发泡保温复合材料；泡沫改性；改性纤维；力学性能；耐水性能；增强机制
中图分类号： TB34　　**文献标志码：** A

Preparation and properties of fiber reinforced foamed thermal insulation composite

LI Xiaolong, LI Guozhong*
(Shandong Provincial Key Laboratory of Preparation and Measurement of Building Materials, School of Materials Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: To improve the mechanical properties and thermal insulation properties of glazed hollow bead/cement foamed thermal insulation composite, the modified physical foam was added in foamed thermal insulation composite to reduce the density and thermal conductivity of the composite, and modified fibers were adopted to reinforce the performance of foamed thermal insulation composite. The mechanical properties and water resistance of fiber reinforced foamed thermal insulation composite were studied, and the internal micro-morphology of samples was observed by SEM. The improving mechanism of modified foam and modified fibers on foamed thermal insulation composite were explored. The results show that, mixing foam decreases the density and thermal conductivity of foamed thermal insulation composite significantly, when the content of foam is 1.05 mL/g, the density and the thermal conductivity of samples are 186 kg/m^3 and 0.056 W/(m·K) respectively. The modified foam can effectively improve the strength and softening coefficient of foamed thermal insulation composite, compared with samples mixed with latex powder, the flexural strength, compressive strength and softening coefficient of samples mixed with modified foam increase by 21.05%, 21.43% and 13.56% respectively. Modified fibers can significantly improve the strength and softening coefficient of samples, the flexural strength, compressive strength and softening coefficient of samples mixed with modified fibers increase by 25.93%, 13.51% and 8.33% respectively than the samples mixed with unmodified fibers.

Keywords: foamed thermal insulation composite; foam modification; modified fibers; mechanical properties; water resistance; improving mechanism

收稿日期： 2013-08-26；**录用日期：** 2013-11-13；**网络出版时间：** 2014-01-09 10:35
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20140109.1035.002.html
通讯作者： 李国忠，教授，研究方向为新型墙体材料和纤维增强复合材料。 E-mail：mse_ligz@ujn.edu.cn

引用格式：李小龙，李国忠. 纤维增强发泡保温复合材料的制备与性能[J]. 复合材料学报，2014，31(3)：541-549. Li Xiaolong, Li Guozhong. Preparation and properties of fiber reinforced foamed thermal insulation composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 541-549.

目前我国建筑单位面积能耗偏高，尤其是建筑外围护墙体保温性能差，导致围护结构的热损耗严重[1]。研发可提高围护墙体保温隔热性能的新型保温材料，最大限度地减少建筑外墙结构的热损失，是实现建筑节能的关键。聚苯颗粒具有容重小、吸水率低和保温隔热性能优异的特性[2]，玻化微珠具有防火性能好、耐老化性强和绿色环保特点[3]，因而以聚苯颗粒和玻化微珠为骨料的复合材料具有更为突出的优异性能。通过发泡可进一步降低发泡保温复合材料的密度，提高复合材料的保温性能。通常情况下，在发泡复合材料中直接掺加乳胶粉用以改善其力学性能和防水性能[4]，但易存在胶粉分布不均匀和难以直接有效覆盖粘结孔壁的缺陷。而将乳胶粉改性的发泡剂掺入复合材料料浆，可在孔壁的表面形成富乳胶粉层，减少孔壁微裂纹产生的概率，抑制微裂纹的扩展，对发泡保温复合材料具有明显的增强作用。在复合材料体系中引入纤维，可提高发泡保温复合材料强度，但聚丙烯纤维表面能较低，表面不含活性基团，往往影响其增强效果。对聚丙烯纤维表面进行适当改性，可增强其与基体的界面结合，显著提高发泡保温复合材料的性能。

本文中采用聚苯颗粒和玻化微珠为轻质骨料制备发泡保温复合材料，通过掺加改性物理泡沫和改性纤维，减小复合材料的密度和导热系数，增强其力学性能和耐水性能，研究了改性泡沫和改性纤维对纤维增强发泡保温复合材料强度和软化系数的影响，并探讨了其作用机制。

1　实验材料及方法

1.1　实验原料

阻燃型聚苯乙烯颗粒(以下简称聚苯颗粒)：购自济南海天舜特建材有限公司，密度为 16～20 kg/m^3，粒径为 1～2.5 mm，导热系数≤0.041 W/(m·K)，憎水率≥96%，吸水率≤4%；玻化微珠：购自山东创智新材料科技有限公司，呈不规则球状颗粒，表面玻化封闭，内部为多孔空腔结构；水泥：购自山东水泥厂生产的 42.5 R 快硬硫铝酸盐水泥；粉煤灰：购自山东某热电厂生产的Ⅰ级灰；可再分散乳胶粉：购自 Elotex 公司；聚丙烯(PP)纤维：采用实验室自制改性 PP 纤维，长度为 12～16 mm，密度为 0.91 g/cm^3，弹性模量为 3.9～4.2 GPa，抗拉强度为 550～600 MPa；激发剂：采用实验室自配粉煤灰复合激发剂；发泡剂：采用实验室自制高效复合发泡剂，具有效率高、发泡倍数高、稳定性好等特点；稳泡剂：采用实验室自制高效复合稳泡剂；聚乙烯醇(PVA)乳液：质量分数为 10%；氢氧化钾(KOH)溶液：质量分数为 5%；醋酸乙烯-乙烯共聚(VAE)乳液：m(VAE)：m(水)＝1：1 的乳液稀释液；防水剂：采用实验室自制乳化复合防水剂。

1.2　泡沫改性

改性泡沫的制备：将乳胶粉、PVA 乳液(10wt%)、发泡剂和水按表 1 试验配比配制改性发泡剂，再通过机械作用产生改性泡沫，并确定 R_6 为改性发泡剂最佳配比。

1.3　PP 纤维表面改性

纤维表面改性：将 PP 纤维浸泡于 KOH 溶液，10 h 后取出并用蒸馏水洗净表面；再将 PP 纤维置于 VAE 乳液稀释液中搅拌浸泡 30 min，取出纤维并压挤出残余乳液，均匀分散，干燥后待用。碱液侵蚀溶解纤维表面的杂质，在纤维表面留下微小孔隙，增加纤维表面粗糙度；碱处理后的纤维在 VAE 乳液中搅拌时，乳液中的醋酸乙烯与乙烯共聚物牢固包覆在纤维表面，提高了纤维与基体的接触面积，改善了纤维与基体的界面结合状况。

表 1　改性发泡剂试验配比及性能

Table 1　Experiment ratios and performances of modified foaming agent

No.	Mass ratio of latex powder, PVA emulsion, foaming agent and water	Foaming multiple	1 h sedimentation distance/mm	1 h secretion of water/mL
R_1	0：0：1：40	25.8	7.2	53.0
R_2	0.4：0：1：40	21.0	9.7	67.2
R_3	0.6：0：1：40	18.9	11.6	78.4
R_4	0.8：0：1：40	14.5	14.7	92.7
R_5	0.6：2：1：40	20.8	10.3	69.2
R_6	0.6：3：1：40	22.7	9.1	62.5
R_7	0.6：4：1：40	21.4	10.9	66.5

Note: R_1 —Unmodified foaming agent; R_2 - R_7 —Modified foaming agent.

1.4 试验方法

按照表 2 中发泡复合材料试验配比，将水泥、粉煤灰、激发剂、纤维、玻化微珠准确计量，混合后，加泡沫、稳泡剂、防水剂和水搅拌均匀形成料浆，再将聚苯颗粒掺入料浆并搅拌均匀形成浇注料，注入 500 mm×300 mm×40 mm 的模具中，整平后室温静置 0.5 h 脱模，得到尺寸为 500 mm×300 mm×40 mm 的发泡保温复合材料。经前期试验研究，胶凝材料与玻化微珠的体积比固定为 1∶1，其中胶凝材料主要由质量比为 7∶3 的水泥与粉煤灰组成。为使料浆充分包裹聚苯颗粒，料浆与聚苯颗粒的体积比不小于 1.2∶1；乳胶粉、稳泡剂和乳化复合防水剂的最佳掺量分别固定为 3%、2%和 5%，其掺量均以胶凝材料质量分数表示，其中复合激发剂掺量为粉煤灰质量的 3%。

表 2 纤维增强发泡保温复合材料试验配比

Table 2 Mix proportions of fiber reinforced foamed thermal insulation composite

No.	Unmodified foam/ ($mL \cdot g^{-1}$)	Modified foam/ ($mL \cdot g^{-1}$)	Latex powder/%	Unmodified PP fibers/%	Modified PP fibers/%
A_0	0	-	-	-	-
A_1	0.55	-	-	-	-
A_2	0.80	-	-	-	-
A_3	1.05	-	-	-	-
A_4	1.30	-	-	-	-
A_5	1.55	-	-	-	-
T	-	X_1	-	-	-
S	X_1	-	3	-	-
P_1	-	X_1	-	-	0.2
P_2	-	X_1	-	-	0.4
P_3	-	X_1	-	-	0.6
P_4	-	X_1	-	-	0.8
P_5	-	X_1	-	-	1.0
P_6	-	X_1	-	X_2	-

Note: A —Samples mixed with unmodified foam; T —Samples mixed with modified foam; S —Samples mixed with latex powders; P_1 - P_5 —Samples mixed with modified PP fibers; P_6 —Samples mixed with unmodified PP fibers; X_1 —Optimal dosage of foam; X_2 —Optimal dosage of fibers.

试样脱模后置于水泥标准养护箱（温度为 20 ℃、相对湿度为 95%）中养护 3 d，再放入 45 ℃电热恒温鼓风干燥箱中烘干至恒重（2 次称量试样质量变化率小于 0.2%），冷却至室温进行性能测试。依照国标 GB/T 5486－2008《无机硬质绝热制品试验方法》[5]和 GB/T 20473－2006《建筑保温砂浆》[6]，将复合材料分别加工成尺寸为 250 mm×100 mm×40 mm 的抗折测试试样、尺寸为 100 mm×100 mm×40 mm 的抗压测试试样和尺寸为100 mm×100 mm×40 mm 的抗压软化系数测试试样，分别测试试样的干密度、抗折强度、抗压强度和抗压软化系数（文中密度、软化系数分别表示干密度和抗压软化系数）；将材料加工成尺寸为300 mm×300 mm×20 mm 的测试试样，依照国标 GB/T 10294－2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法》[7]的测试方法，使用 IM－DRY3001 智能型双平板导热系数测定仪测试试样的导热系数；采用 QUANTA FEG 250 型扫描电子显微镜对保温材料断口微观形貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 泡沫对发泡保温复合材料性能的影响

2.1.1 未改性泡沫掺量对发泡保温复合材料性能的影响

为使料浆充分包裹聚苯颗粒，形成轻质复合材料，必须保证一定的料浆与聚苯颗粒体积比，通常情况下是增加料浆用水量来增加其体积比。而在体系中引入泡沫，可保证料浆与聚苯颗粒体积比的同时不增加料浆用水量。在料浆与聚苯颗粒体积比固定的前提下，掺加泡沫使料浆用水量减少，发泡保温复合材料的强度和软化系数随未改性泡沫掺量增加的变化趋势如图 1 所示，发泡保温复合材料的密度和导热系数随未改性泡沫掺量增加的变化如表 3 所示。从图 1(a)可知，随着泡沫掺量增加，发泡保温复合材料的抗折强度和抗压强度均呈先增大后减小的趋势，当泡沫掺量达到 1.05 mL/g 时，复合材料抗折强度、抗压强度分别达到峰值 0.15 MPa 和

0.23 MPa，较未掺泡沫空白试样 A_0 分别提高36.36%和27.78%，当泡沫掺量超过 1.05 mL/g后，发泡保温复合材料的强度逐渐减小。由图1(b)可得，发泡保温复合材料的软化系数随泡沫掺量的增加呈先增大后减小的趋势，当泡沫掺量为1.05 mL/g时，复合材料的软化系数为 0.54，较试样 A_0 提高 14.89%，当泡沫掺量达到 1.05 mL/g后，复合材料的软化系数呈逐渐减小的趋势。由表3 可见，随着泡沫掺量的增加，发泡保温复合材料的密度逐渐减小，导热系数先减小后增大，当泡沫掺量为 1.05 mL/g 时，发泡保温复合材料的导热系数为 0.056 W/m·K，继续增加泡沫掺量导致体系内的联通孔明显增加，使试样导热系数反而增加。根据以上分析，未改性泡沫掺量选定为 1.05 mL/g，此时发泡保温复合材料的密度和导热系数分别为 186 kg/m³ 和 0.056 W/(m·K)。

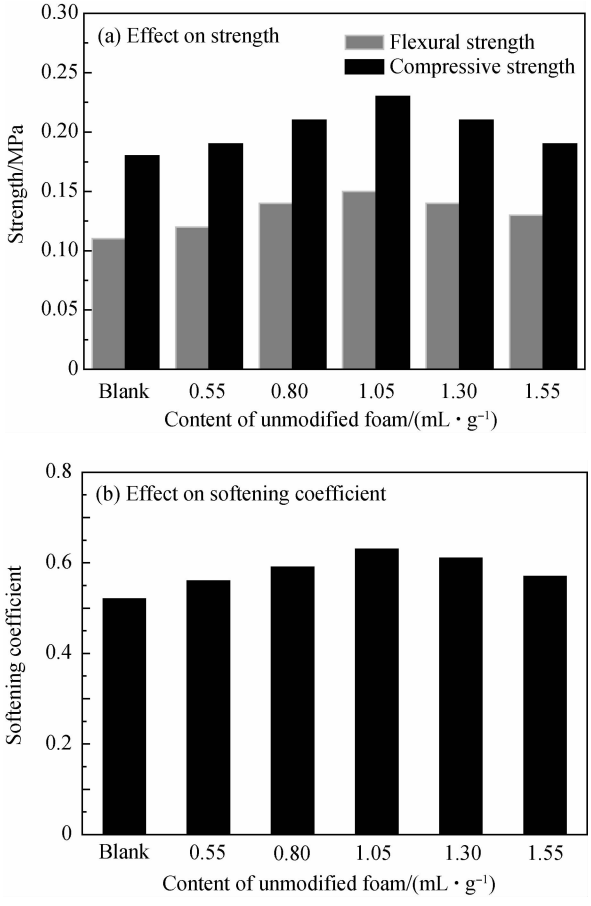


图 1　泡沫掺量对玻化微珠/水泥发泡保温复合材料强度和软化系数的影响

Fig. 1　Effects of foam content on strength and softening coefficient of glazed hollow bead/cement foamed thermal insulation composite

表 3　泡沫掺量对玻化微珠/水泥发泡保温复合材料密度和导热系数的影响

Table 3　Effects of foam content on density and thermal conductivity of glazed hollow bead/cement foamed thermal insulation composite

No.	Foam content/ (mL·g⁻¹)	Dry density/ (kg·m⁻³)	Thermal conductivity/ (W·m⁻¹·K⁻¹)
A_0	0	252	0.073
A_1	0.55	217	0.067
A_2	0.80	201	0.061
A_3	1.05	186	0.056
A_4	1.30	170	0.057
A_5	1.55	156	0.059

2.1.2　改性泡沫对发泡保温复合材料性能的影响

图 2 为改性泡沫对发泡保温复合材料强度和软化系数的影响。可知，泡沫改性后可有效增强发泡保温复合材料的力学性能和耐水性能，掺加改性泡沫试样 T 的抗折强度、抗压强度分别为 0.23 MPa和 0.34 MPa，较只掺加未改性泡沫的试样 A_3 和掺

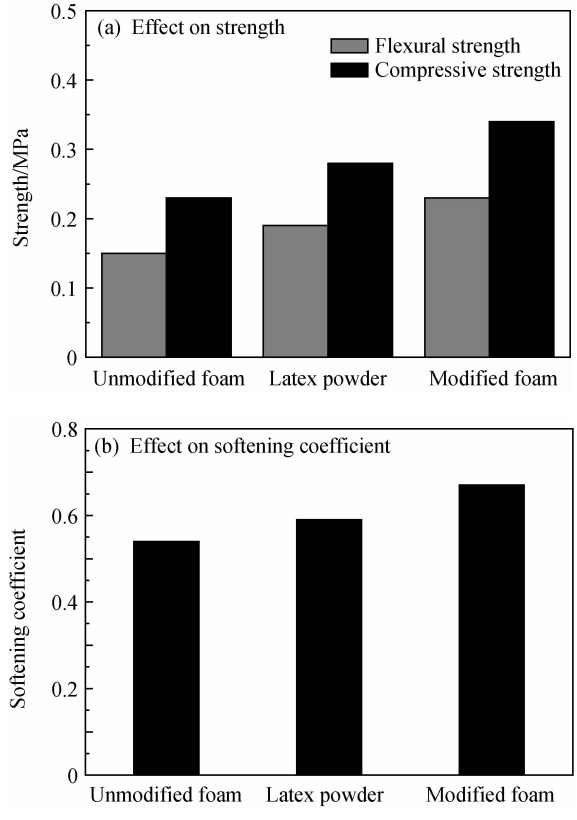


图 2　改性泡沫对玻化微珠/水泥发泡保温复合材料强度和软化系数的影响

Fig. 2　Effects of modified foam on strength and softening coefficient of glazed hollow bead/cement foamed thermal insulation composite

加了乳胶粉的试样 S 分别提高了 53.33%、47.83% 和 21.05%、21.43%；掺加改性泡沫试样 T 的软化系数为 0.67，较只掺加未改性泡沫的试样 A_3 和掺加了乳胶粉的试样 S 分别提高了 24.07%和 13.56%。

2.2 改性纤维对发泡保温复合材料性能的影响

图 3 为不同改性 PP 纤维掺量对发泡保温复合材料强度和软化系数的影响。由图 3(a)和图 3(c)可知，发泡保温复合材料的抗折强度随改性纤维掺量的增加呈先增大后减小的趋势，当纤维掺量达到 0.8%时，复合材料的抗折强度峰值为0.34 MPa，较只掺加改性泡沫的试样 T 和掺加未改性纤维的试样 P_6 分别提高了 47.83%和25.93%，当掺量超过 3%后，复合材料的抗折强度减小；发泡保温复合材料的抗压强度随改性纤维掺量的增加呈先增大后减小的趋势，当纤维掺量达到 0.8%时，复合材料的抗压强度峰值为 0.42 MPa，较只掺加改性泡沫的试样 T 和掺加未改性纤维的试样 P_6 分别提高了 23.53%和 13.51%。从图 3(b)和图 3(c)可以看出，随着改性纤维掺量的增加，发泡保温复合材料的软化系数逐渐增大，当纤维掺量达到 0.8%时，保温材料的软化系数达到最大值 0.78，较试样 T 和试样 P_6 分别提高了 16.42%和 8.33%，而当纤维掺量超过 0.8%后，保温材料软化系数呈趋于稳定的趋势。由此，改性纤维最佳掺量选定为 0.8%，此时发泡保温复合材料的密度和导热系数分别为 187 kg/m^3 和 0.056 W/(m·K)。

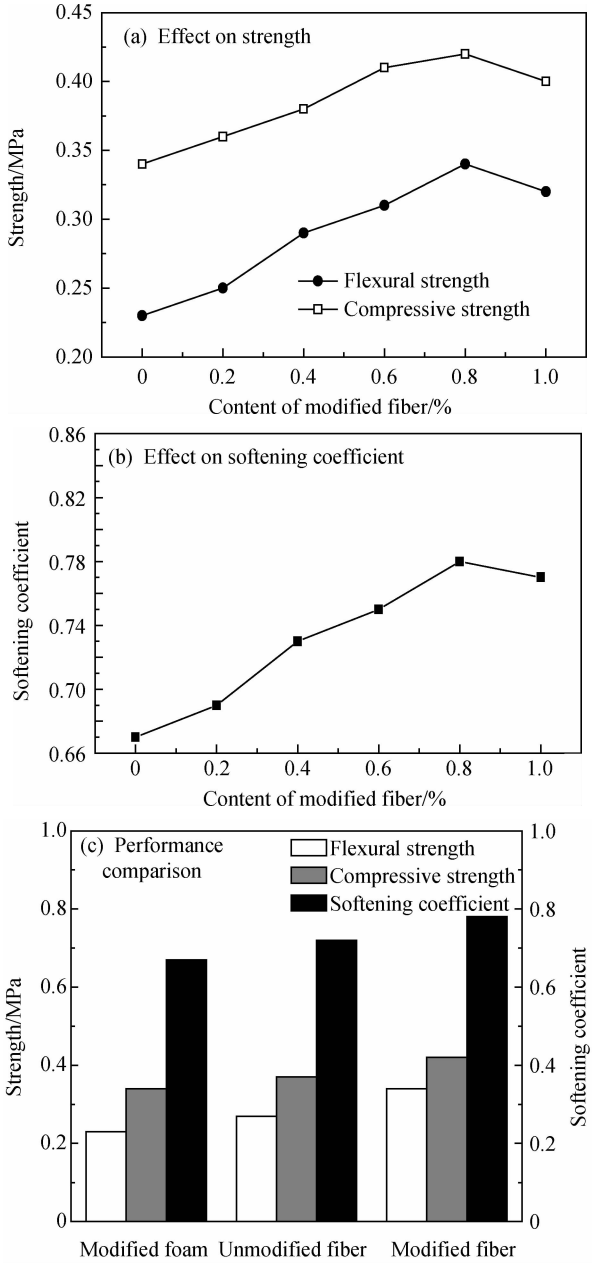


图 3 改性聚丙烯(PP)纤维掺量对发泡保温复合材料强度和软化系数的影响

Fig. 3 Effects of modified polypropylene (PP) fiber content on strength and softening coefficient of foamed thermal insulation composite

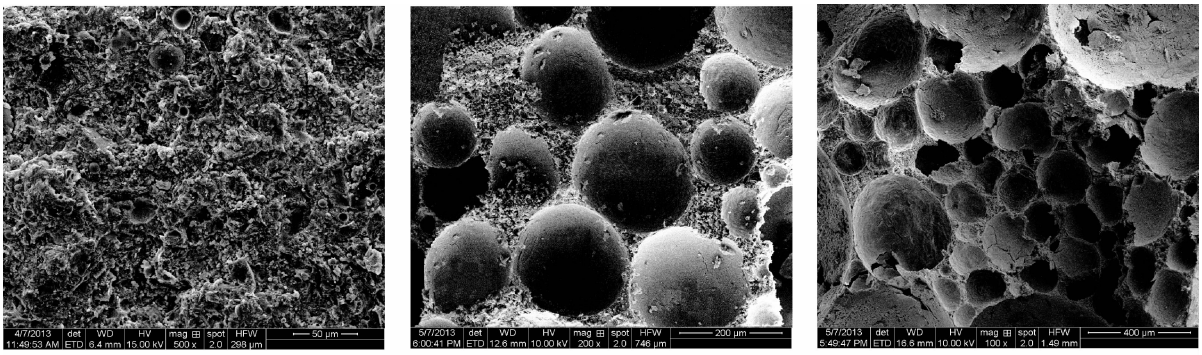
2.3 泡沫对发泡保温复合材料的改性机制

图 4 为玻化微珠/水泥发泡保温复合材料 A_0、A_3 和 A_5 内部微观形貌。观察图 4(a)，未掺泡沫发泡保温复合材料内部存在水泥、粉煤灰固体颗粒与水化产物，水化产物相互交联形成结构致密、密度高的胶凝物质；由图 4(b)可知，掺加适量泡沫试样内部呈多孔形态，由大小均一的球形气孔和气孔壁组成的复合体系构成；由图 4(c)可以看出，掺加过量泡沫的试样内部气孔孔径变小且破损严重，孔壁和孔间壁均存在大量明显裂纹和孔洞。在体系中掺入泡沫，使料浆体积增大、用水量减少，含有泡沫的料浆可充分覆盖、包裹于聚苯颗粒周围，增大了复合材料的整体强度；同时，随着胶凝物质水化消耗水分及水分散失，物料颗粒与水化产物取代泡沫液膜，在胶凝材料内部形成众多气孔，增大试样孔隙率，使试样密度明显减小；另外，分布于材料内部的气孔减缓甚至阻断热流的流通，从而减小试样导热系数。但当过多泡沫掺入体系，发泡保温复合材料内部孔隙率过大，导致气孔孔径减小，联通孔增多，同时气孔壁出现大量微裂纹和孔洞，使试样单位受压面上净压面和可承受压力减小，从而导致发泡保温复合材料的强度和软化系数降低，导热系数增高。

2.4 改性泡沫对发泡保温复合材料的作用机制

图 5 为玻化微珠/水泥发泡保温复合材料 S 和

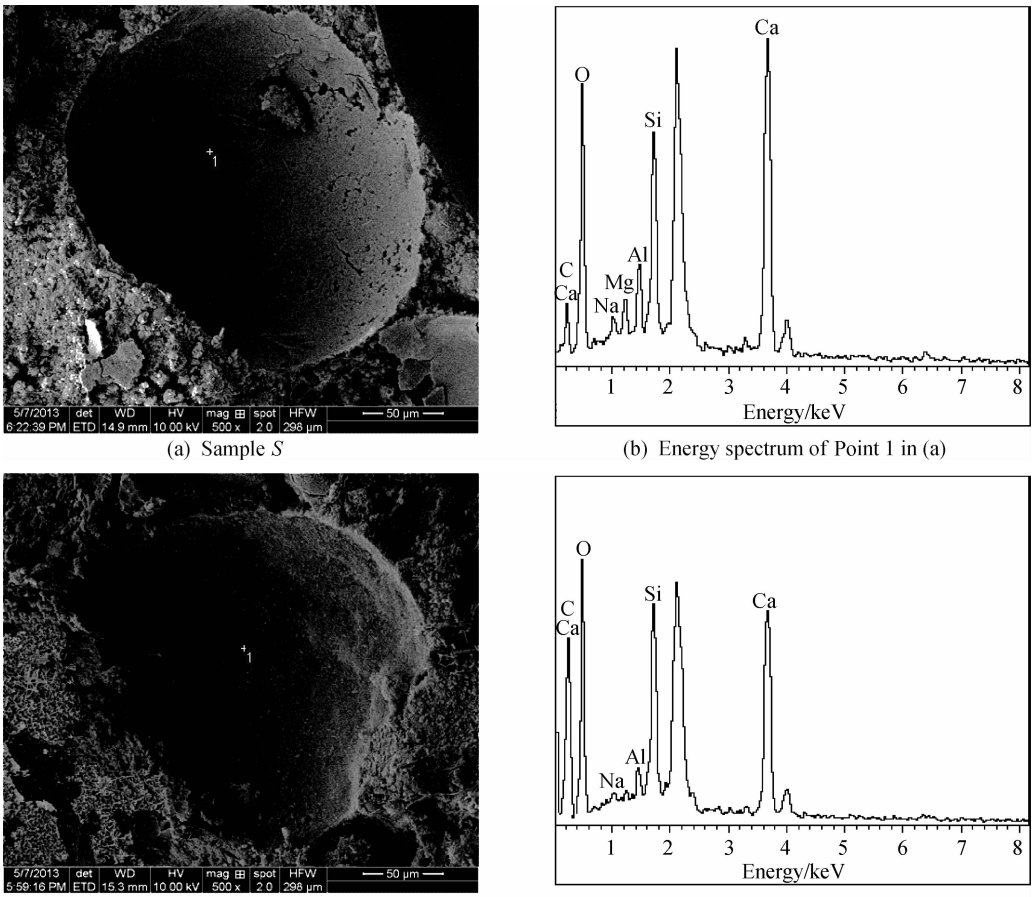
T 内部气孔微观形貌。由图 5(a)可知，掺加未改性泡沫的发泡保温复合材料气孔壁表面存在微裂缝和细小孔洞；由能谱分析图 5(b)可知，1 点主要存在 Si、Ca 和 O 元素，另外存在少量 C、Al 和 Na 元素，说明试样 S 内部气孔壁主要由水化产物构成。观察图 5(c)，掺加改性泡沫试样内孔壁和孔间壁较密实，特别是气孔壁表面平整、致密，未见微裂缝和孔洞；分析图 5(d)，1 点主要含有 C、O、Si 和 Ca 元素，可知试样 T 内部孔壁存在大量有机聚合物，从而推断气孔壁由水化产物和聚合物复合构成，有效提高发泡保温复合材料的强度和软化系数。改性泡沫掺入发泡保温复合材料体系后，气泡壁体上的聚合物协同水化产物，与其相互交联、穿插，形成由水化产物和聚合物构成的复合胶凝物质，随着气



(a) Sample A_0　　(b) Sample A_3　　(c) Sample A_5

图 4　玻化微珠/水泥发泡保温复合材料 A_0、A_3 和 A_5 的断面微观形貌

Fig. 4　Micromorphologies on the section of glazed hollow bead/cement foamed thermal insulation composite A_0, A_3 and A_5



(a) Sample S　　(b) Energy spectrum of Point 1 in (a)

(c) Sample T　　(d) Energy spectrum of Point 1 in (c)

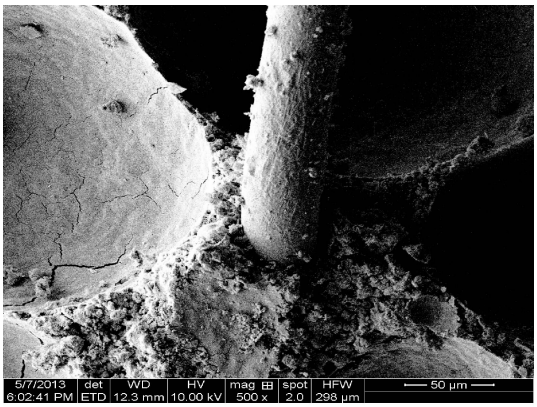
图 5　玻化微珠/水泥发泡保温复合材料 S 和 T 断面气孔微观形貌的 SEM－EDS 照片

Fig. 5　SEM－EDS photographs of pores of glazed hollow bead/cement foamed thermal insulation composite S and T

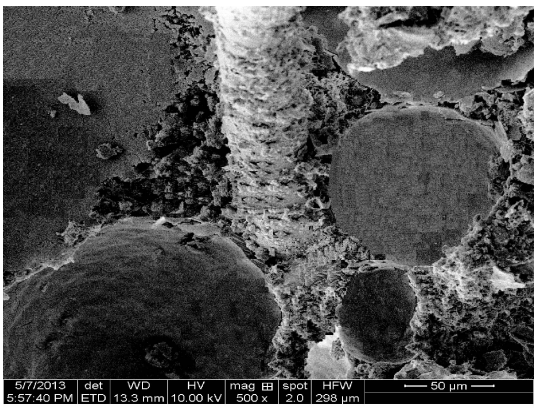
孔在硬化过程中的固定，复合胶凝物质构成致密气孔壁，并在气孔壁表面形成富乳胶粉层，可有效抑制裂纹的产生和发展，增加了气孔壁密实度、强度和复合材料的耐水性。

2.5 纤维和改性泡沫对发泡保温复合材料的增强机制

图 6 为纤维增强发泡保温复合材料 P_6 和 P_4 断口处 PP 纤维的微观形貌。由图 6(a)知，发泡保温复合材料断口中拔出的纤维表面光滑洁净，未见明显胶凝物质覆盖，说明纤维发生脱粘，纤维与基体之间结合疏松；由图 6(b)，试样断口处改性纤维连同基体水化产物一同被拔出，试样破坏发生在基体内，说明改性纤维与基体之间的界面结合良好，纤维与基体粘结紧密，其增强作用明显优于未改性纤维。改性纤维表面包覆的共聚物带有极性基团，且表面粗糙度较高，使纤维与基体中水化产物具有良好的界面结合，牢固的结合界面增大了纤维拉长、拔出和界面破坏的难度，使试样受到外来载荷破坏时需克服更大界面摩擦力和消耗更多能量，从而增强了复合材料的力学性能。改性纤维在发泡保温复合材料体系中均匀分布，形成贯穿三维空间的网络骨架结构，当复合材料受到外力作用时，外力沿着均匀分布的单丝纤维传递，在传递过程中消耗能量，可有效分散应力，降低裂纹产生的概率；在复合材料的破坏过程中，改性纤维阻碍和拦截裂纹的进一步扩展，减弱裂纹尖端的应力集中，并消耗裂纹发展过程的能量，从而显著提高发泡保温复合材料强度。



(a) Sample P_6



(b) Sample P_4

图 6 纤维增强发泡保温复合材料 P_6 和 P_4 断口处 PP 纤维的微观形貌

Fig. 6 Micromorphologies of PP fibers on the fracture of fiber reinforced foamed thermal insulation composite P_6 and P_4

为了进一步说明改性纤维和改性泡沫对纤维增强发泡保温复合材料的改性机制，构造出改性泡沫转变成气孔的模型，如图 7 所示，其形成过程分为 4 个阶段：(1) 气-液体系阶段。液膜包围气体构成泡沫，是气液两相体系[8]。(2) 气-液体系向气-液-固体系过渡阶段。聚苯颗粒掺入料浆，并搅拌均匀后，改性纤维和改性泡沫均匀分散到复合材料体系内。物料固体颗粒黏附、沉积在纤维和泡沫液膜表面，并在泡沫表面形成包围层，增大泡沫厚度和韧性。同时，在体系中呈三维空间支撑网络分布的纤维发挥桥联作用，提高体系的均质性，阻止体系的离析和泌水[9]，抑制裂纹的产生。另外，随着水化反应的进行，黏附在泡沫表面的物料颗粒开始产生水化产物，生成的水化产物逐渐穿插、填充到液膜分子之间，特别是乳胶粉粒子开始形成聚合物膜，与水化产物相互交织，形成复合胶凝物质，对液膜起到支撑、加固的作用，提高了泡沫的机械强度和稳定性。此时，气-液体系转变为气-液-固体系。(3) 气-液-固体系向气-固体系过渡阶段。随着水化反应和成膜反应的加速进行，液膜及泡沫间的水分被迅速消耗，大量复合胶凝物质生成，进一步发挥其对气泡的骨架支撑作用，有利于气泡在硬化过程中形态的固定。同时，改性纤维表面具有极性基团和较高的粗糙度，纤维周围的水化产物紧密包裹在纤维表面，形成良好的界面结合，提高了纤维与基体的机械啮合性。(4) 气-固体系阶段。随着反应的持续进行和水分进一步的蒸发，生成的复合胶凝物质逐渐取代气泡液膜，并在硬化过程中封闭气体，形成了坚固、致密的气孔壁。当液膜完全消失时，体系内部形成孔径均一、泡孔结构完整的球形气孔。致密的气孔壁可增强气孔承受外力作用的能力，提高其耐水性

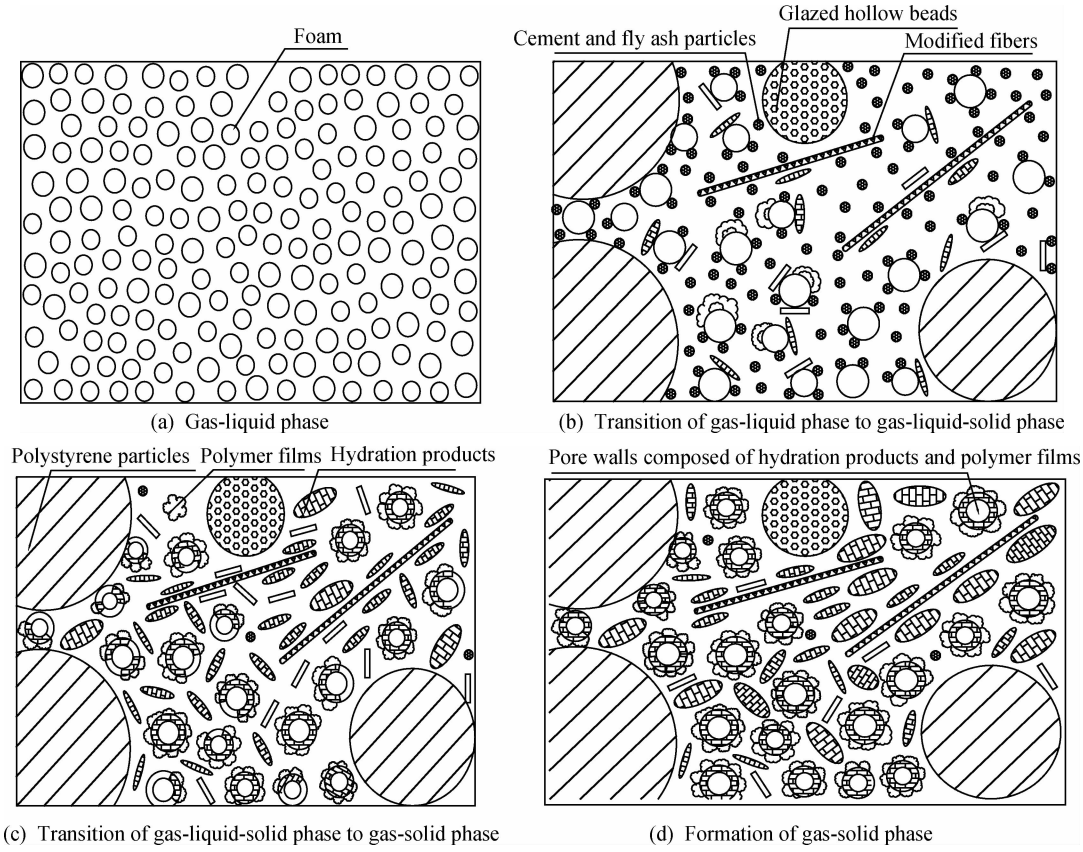


图 7　纤维增强发泡保温复合材料气孔形成模型

Fig. 7　Formation models of pores of fiber reinforced foamed thermal insulation composite

能。改性纤维可发挥桥联作用，提高体系的均质性，有效改善气孔结构，抑制裂纹的产生，且纤维与基体具有良好的界面结合，增强了复合材料的力学性能和耐水性能。

3　结　论

（1）在玻化微珠/水泥发泡保温复合材料中掺入泡沫，可使料浆体积增大、用水量减少，含有泡沫的料浆充分包裹聚苯颗粒，提高了试样强度；泡沫在硬化过程中形成气孔，减缓、阻断了热流的流动，增大了试样孔隙率，使试样密度和导热系数明显减小。当泡沫掺量为 1.05 mL/g 时，玻化微珠/水泥发泡保温复合材料密度和导热系数分别为 186 kg/m^3 和 0.056 W/(m·K)。

（2）改性气泡壁体上的聚合物与水化产物相互交联，形成由水化产物和聚合物膜组成的复合胶凝物质。随着气孔在硬化过程中的固定，复合胶凝物质构成气孔壁，并在气孔壁表面形成富乳胶粉层，可有效抑制裂纹的产生和发展，增加了气孔壁密实度、强度和试样的耐水性。掺加改性泡沫的玻化微珠/水泥发泡保温复合材料的抗折强度、抗压强度和软化系数较掺加乳胶粉试样的分别提高了 21.05%、21.43%和 13.56%。

（3）改性纤维表面包覆的醋酸乙烯与乙烯共聚物带有极性基团，且表面粗糙度较高，使纤维与玻化微珠/水泥基体具有良好的界面结合，牢固的结合界面增大了纤维拉伸、拔出和界面破坏的难度。同时，在体系中呈三维空间支撑网络分布的纤维发挥桥联作用，提高了体系的均质性，阻止了体系的离析和泌水，抑制了裂纹的产生。掺加改性纤维的纤维增强发泡保温复合材料的抗折强度、抗压强度和软化系数较掺加未改性纤维试样的分别提高了 25.93%、13.51%和 8.33%。

参考文献：

[1] 徐炳范. 建筑外墙保温技术的应用研究 [D]. 长春：吉林大学，2006.
Xu Bingfan. Application and research on building out wall heat preservation technology [D]. Changchun: Jilin University, 2006.

[2] 寇秀蓉. 胶粉聚苯颗粒保温材料的研究 [D]. 苏州：苏州大

学，2008.
Kou Xiurong. Study on thermal insulation material consisting of emulsion powder & EPS pellets [D]. Suzhou: Soochow University, 2008.

[3] 陈晓莉. 玻化微珠保温砂浆基本性能的试验研究与应用 [D]. 淮南：安徽理工大学，2012.
Chen Xiaoli. Experimental research of basic performance and application of vitrified microsphere insulation mortar [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2012.

[4] 王培铭，刘恩贵. 苯丙共聚乳胶粉水泥砂浆的性能研究 [J]. 建筑材料学报，2009，12(3)：254-258.
Wang Peiming, Liu Engui. Study on properties of styrene-acrylate copolymer powder modified cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 254-258.

[5] 全国绝热材料标准化委员会. GB/T 5486－2008 无机硬质绝热制品试验方法 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.
National Technical Committee of Insulation Materials Standardization. GB/T 5486－2008 Test methods for inorganic rigid thermal insulation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[6] 全国绝热材料标准化技术委员会. GB/T 20473－2006 建筑保温砂浆 [S]. 北京：中国标准出版社，2007.
National Technical Committee of Insulation Materials Standardization. GB/T 20473－2006 Dry mix thermal insulating composition for buildings [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

[7] 全国绝热材料标准化技术委员会. GB/T 10294－2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法 [S]. 北京：中国标准出版社，2009.
National Technical Committee of Insulation Materials Standardization. GB/T 10294－2008 Thermal insulation-determination of steady-state thermal resistance and related properties-guarded hot plate apparatus [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

[8] 闫振甲，何艳君. 泡沫混凝土实用生产技术 [M]. 北京：化学工业出版社，2006：29-34.
Yan Zhenjia, He Yanjun. Foamed concrete practical production technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 29-34.

[9] 李启金，李国忠，杜传伟. 改性聚丙烯纤维对发泡水泥性能的影响 [J]. 复合材料学报，2013，30(3)：14-20.
Li Qijin, Li Guozhong, Du Chuanwei. Effects of modified polypropylene fibers on properties of foamed cement [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(3): 14-20.