

【涂料技术/Coating Material】

DOI: 10.19289/j.1004-227x.2026.04.021

大颗粒气凝胶在水性气凝胶绝热厚质中涂漆中的应用

赵哲¹, 刘举¹, 张凯¹, 杨贺辉¹, 宫梦雨¹, 郭晓强^{2,*}

1. 中德新亚建筑材料有限公司, 郑州 450000

2. 友亚(广东)新材料有限公司, 韶关 511100

摘要: [目的] 研究采用直接添加粒径至少 0.6 mm 的气凝胶颗粒的方法来制备水性气凝胶绝热厚质中涂漆, 以替代先将微米级气凝胶粉体制成一定固含量水性浆料的传统复杂工艺, 以简化生产工艺。[方法] 用丙烯酸乳液作为成膜物质, 气凝胶颗粒作为隔热填料, 空心玻璃微珠作为辅助隔热填料和厚涂层的支撑骨架, 探究了不同粒径和用量的气凝胶颗粒、不同最低成膜温度和用量的丙烯酸乳液, 以及不同粒径和用量的空心玻璃微珠对中涂漆导热系数、粘结强度和柔韧性的影响。[结果] 当选用 30% (质量分数, 后同) 的最低成膜温度为 14 °C 的丙烯酸乳液, 13% 的粒径 0.6 mm、真密度 0.15 g/cm³ 的空心玻璃微珠, 以及 7% 的粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒时, 涂膜的各种性能达到了平衡, 导热系数为 0.038 61 W/(K·m), 粘结强度为 0.96 MPa, 柔韧性至少 100 mm。[结论] 采用大颗粒气凝胶与采用同质量气凝胶粉(粒径 50 μm) 制成的水性绝热厚质中涂漆相比, 前者不仅性能上存在明显的优势, 而且简化了生产工艺, 具有一定的市场应用价值。

关键词: 水性丙烯酸中涂漆; 气凝胶; 空心玻璃微珠; 导热系数; 粘结强度**中图分类号:** TQ630.7**文献标志码:** A**文章编号:** 1004-227X(2026)04-0169-07**Application of large-size aerogel particles in waterborne aerogel thick thermal insulation intermediate paint**ZHAO Zhe¹, LIU Ju¹, ZHANG Kai¹, YANG Hehui¹, GONG Mengyu¹, GUO Xiaoliang^{2,*}

1. Zhongdexinya Building Materials Limited Company, Zhengzhou 450000, China

2. Youya (Guangdong) New Materials Limited Company, Shaoguan 511100, China

Abstract: [Objective] To simplify the production process of waterborne aerogel thick thermal insulation intermediate paint by directly adding aerogel particles with a particle size of at least 0.6 mm, instead of the conventional method that involves a complicated pre-dispersion of micron-sized aerogel powder into an aqueous slurry with a certain solid content. [Method] Acrylic emulsion used as the film-forming material, aerogel particles as the thermal insulation filler, and hollow glass microbeads as the auxiliary thermal insulation filler and supporting framework for the thick coating. The effects of the particle size and dosage of aerogel particles, the minimum film-forming temperature (MFFT) and dosage of acrylic emulsion, and the particle size and dosage of hollow glass microbeads on the thermal conductivity, adhesion strength, and flexibility of the intermediate coating were studied. [Result] When the formulation contained 30% (mass fraction) of acrylic emulsion with an MFFT of 14 °C, 13% (mass fraction) of hollow glass microbeads with a particle size of 0.6 mm and a true density 0.15 g/cm³, and 7% (mass fraction) of aerogel particles with a particle size of 0.6 mm, the coating achieved balanced properties: thermal conductivity 0.038 61 W/(K·m), adhesion strength 0.96 MPa, and flexibility at least 100 mm. [Conclusion] Compared with a waterborne aerogel thick thermal insulation intermediate paint prepared using the same dosage of aerogel powder with a particle size of 50 μm, the coating made with large-size aerogel particles not only exhibits much better performance, but also simplifies the production process, showing considerable market application value.

Keywords: waterborne acrylic intermediate paint; aerogel; hollow glass bead; thermal conductivity; adhesion strength

在当前我国“双碳”的大目标下, 节能减排成为建筑行业未来发展的主要方向^[1]。在建筑节能领域, 气凝胶材料因其极低的密度、较高的比表面积和优异的隔热性能^[2-6]而受到学者的广泛关注^[7-8], 被大量应用在涂料^[9-10]、毛毡^[11]和混凝土砂浆^[12]中。

水性气凝胶绝热厚质中涂漆是一种采用丙烯酸乳液作为粘结剂、气凝胶材料作为保温填料、空心玻璃微珠作为涂层骨架和去离子水作为稀释剂而制备出的用于建筑和管道保温的新型涂料, 拥有较低的导热系数、

收稿日期: 2025-05-20 **修回日期:** 2025-11-30**第一作者:** 赵哲(1991-), 男, 硕士, 研究方向为水性工业和保温涂料。**通信作者:** 郭晓强(1988-), 男, 研究方向为水性涂料。**引用格式:** 赵哲, 刘举, 张凯, 等. 大颗粒气凝胶在水性气凝胶绝热厚质中涂漆中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(4): 169-175.

ZHAO Z, LIU J, ZHANG K, et al. Application of large-size aerogel particles in waterborne aerogel thick thermal insulation intermediate paint [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(4): 169-175.

较高的粘结强度及不危害人体健康的优点，且其极低的密度可以给建筑物减负，能取代存在脱落风险的岩棉、复合硅酸盐保温板等传统保温材料，具有广泛的市场价值。

在传统的制备工艺中多采用小粒径(如 50 μm)的气凝胶粉体来制备水性气凝胶绝热厚型中涂漆。例如，袁雪松等^[13]采用深圳中凝科技有限公司的气凝胶粉体作为隔热填料制备出导热系数为 0.042 W/(K·m)的中涂漆；许建明等^[14]采用一定的工艺将安徽科昂气凝胶粉体做成 30%固含量的浆料，成功制备出水性气凝胶隔热涂料；赵万赛等^[15]采用气凝胶粉体自制 10%固含量的浆料，制备出导热系数为 0.041 W/(K·m)的中涂漆。因气凝胶粉体自身的疏水性和极低的密度，极易漂浮在空气中^[16]，无法被直接加入中涂漆中，这些学者多采用复杂的工艺将气凝胶粉体制备成一定固含量的水性浆料来使用，不仅拉长了生产周期，而且浪费能源。大粒径(0.5 mm 以上)的气凝胶颗粒由于粒径大而不容易漂浮，可直接添加在混凝土砂浆中以提高隔热性能，但大粒径气凝胶颗粒的添加会给涂层的柔韧性和粘结强度带来副作用，这限制了其在水性气凝胶绝热厚质中涂漆中的应用。

本文直接添加粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒来制备水性气凝胶绝热厚质中涂漆，令其在粘结强度合格的同时，柔韧性也能符合标准，不仅导热系数更低，而且简化了生产工艺，带来了一定的经济效益。

1 实验

1.1 材料和设备

去离子水：实验室自制；HL15、HL20 和 HL25 空心玻璃微珠：郑州圣莱特空心玻璃微珠新材料有限公司；粒径为 0.6 mm、1 mm 和 2 mm 的气凝胶颗粒和粒径为 50 μm 的气凝胶粉：苏州中萃新纳米科技材料有限公司；各种功能性助剂：陶氏化学(中国)有限公司；丙烯酸乳液 A、B 和 C：巴德富集团有限公司；防沉剂：亚什兰化工(南京)有限公司。

JSF-550 实验室高速分散机：普申检测仪器(上海)有限公司；SHBY-90B 恒温恒湿养护箱：沧州裕德冲建筑器材有限公司；DHG-9053A 电热鼓风干燥箱：北京雅士林试验设备有限公司；GL2004B 电子天平：上海佑科仪器仪表有限公司；硅胶成型框(40 mm × 40 mm × 2 mm)和四氟乙烯成膜框(300 mm × 300 mm × 30 mm)：徐州城亿精工科技有限公司；马口铁板(155 mm × 85 mm × 0.25 mm)和水泥砂浆块(70 mm × 70 mm × 20 mm)：标格达精密仪器(广州)有限公司。

1.2 水性气凝胶绝热厚质中涂漆的制备

参照表 1 将适量的去离子水加到高速分散机中，在 800 r/min 的转速下缓慢加入防沉剂，分散 20 min 后按配方量添加各种功能性助剂、丙烯酸乳液、气凝胶颗粒和空心玻璃微珠，搅拌均匀后补齐配方中剩余的去离子水，即可制备出水性气凝胶绝热厚质中涂漆。

表 1 水性气凝胶绝热厚质中涂漆的配方

Table 1 Formulation of waterborne aerogel thick thermal insulation intermediate paint

原料	质量分数/%	原料	质量分数/%
防沉剂	0.1 ~ 0.2	成膜助剂	1 ~ 2
pH 调节剂	0.1 ~ 0.2	防冻剂	1 ~ 2
润湿剂	0.1 ~ 0.3	气凝胶颗粒	3 ~ 9
消泡剂	0.4 ~ 0.6	空心玻璃微珠	9 ~ 15
分散剂	0.4 ~ 0.6	去离子水	余量
丙烯酸乳液	25 ~ 40		

1.3 样品的制备

参考 T/CECS 10126-2021《气凝胶绝热厚型涂料系统》，用浇筑于四氟乙烯成膜框的 30 mm 厚涂层来测导热系数。通过在水泥砂浆块上用硅胶成型框来成型的 2 mm 厚涂层测粘结强度。在马口铁板上批刮 2 mm 厚的涂层，用于测试柔韧性。在测导热系数的样板上切割出 10 mm × 10 mm × 10 mm 的试块来制备扫描电子显微镜(SEM)和同步热分析仪的样块。

1.4 测试与表征

参考 T/CECS 10126-2021 标准，分别采用湘潭湘仪仪器有限公司的 DRH-V 导热系数测定仪、时代试金

(山东)科学仪器有限公司的 WDW-300E 微机控制电子式万能试验机和标格达精密仪器(广州)有限公司的 BGD 256 腻子柔韧性测定仪测定涂层的导热系数、粘结强度和柔韧性。合格涂层的要求如下:导热系数(25 °C) ≤ 0.044 W/(K·m), 粘结强度 ≥ 0.6 MPa, 柔韧性 100 mm 无裂纹。

采用德国 ZEISS Sigma 360 扫描电子显微镜观察涂层的微观形貌。

采用美国 PerkinElmer STA 8000 同步热分析仪测试涂层在不同温度下的表现。

2 结果与讨论

2.1 不同粒径气凝胶颗粒和用量对水性气凝胶绝热厚质中涂漆性能的影响

固定丙烯酸乳液 B 的用量为 30%, HL15 空心玻璃微珠的用量为 13%, 调整气凝胶颗粒的粒径和用量进行实验。由表 2 可知, 在相同的气凝胶颗粒用量下, 随着其粒径增大, 涂层的导热系数明显降低, 同时由于涂层的形变能力变弱, 柔韧性也变差, 且实验过程中发现采用较大粒径的气凝胶颗粒会造成涂层的粗糙度大幅增加, 影响下一道涂层的施工。综合考虑后, 决定采用粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒来进行后续实验。气凝胶是已知最轻、导热系数最低的固体材料, 随着其用量增加, 涂层的导热系数会越来越低。但单位乳液包裹的气凝胶颗粒增多会导致涂层的内聚强度降低, 粘结强度变差。当 0.6 mm 粒径的气凝胶颗粒用量为配方总质量的 3%~7% 时, 涂层的导热系数、粘结强度和柔韧性均符合 T/CECS 10126-2021 标准的要求, 但明显 7% 能带来更低的导热系数, 因此选择 0.6 mm 气凝胶颗粒的用量为 7% 来进行后续实验。

表 2 采用不同粒径的气凝胶颗粒在不同用量下所制涂料的性能
Table 2 Properties of coatings prepared with different particle sizes and dosages of aerogel particles

气凝胶粒径/mm	质量分数/%	导热系数/(W·K ⁻¹ ·m ⁻¹)	粘结强度/MPa	柔韧性
0.6	3	0.042 91	1.22	100 mm 无裂纹
	5	0.040 32	1.10	100 mm 无裂纹
	7	0.038 61	0.96	100 mm 无裂纹
	9	0.037 02	0.53	100 mm 有裂纹
1	3	0.040 22	0.76	100 mm 有裂纹
	5	0.039 09	0.62	100 mm 有裂纹
	7	0.037 65	0.58	100 mm 有裂纹
	9	0.035 26	0.58	100 mm 有裂纹
2	3	0.037 22	0.89	100 mm 有裂纹
	5	0.035 32	0.53	100 mm 有裂纹
	7	0.032 56	0.48	100 mm 有裂纹
	9	0.030 63	0.26	100 mm 有裂纹

2.2 不同乳液及其用量对水性气凝胶绝热厚质中涂漆性能的影响

固定配方中粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒的用量为 7%, HL15 空心玻璃微珠的用量为 13%, 选择了 3 种不同最低成膜温度的丙烯酸乳液进行实验。丙烯酸乳液 A、B 和 C 的最低成膜温度分别为 9、14 和 21 °C。从表 3 可见, 在相同的乳液用量下, 丙烯酸乳液 A 的涂层柔韧性最好, 但粘结强度最低。丙烯酸乳液 C 的涂层在三者之中最硬, 粘结强度也最高, 但柔韧性最差。丙烯酸乳液 B 的最低成膜温度适中, 涂层的各种性能达到平衡, 能满足导热系数、粘结强度和柔韧性的要求, 因此选择它进行后续实验。从表 3 还可知, 当丙烯酸乳液 B 的用量为 25% 时, 因为不足以完全包裹气凝胶颗粒和玻璃微珠, 所以涂层的柔韧性不够好。随着丙烯酸乳液 B 用量增加, 涂层的导热系数和粘结强度均存在明显升高的趋势。这是因为涂层中导热系数极高的有机成膜物的比例大大增加, 其导热系数必定增加, 且内聚强度也得到了提升, 粘结强度随之提高。当丙烯酸乳液 B 用量为 30% 和 35% 时, 涂层的导热系数和粘结强度均满足标准, 但用量为 30% 时不仅导热系数更低, 且更经济, 因此丙烯酸乳液 B 的用量以 30% 为宜。

2.3 不同型号和用量的空心玻璃微珠对水性气凝胶绝热厚质中涂漆性能的影响

固定配方中丙烯酸乳液 B 的用量为 30%, 粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒的用量为 7%, 选择 3 种不同的空心玻璃微珠 HL15、HL20 和 HL25(厂家提供的真密度分别为 0.15、0.20 和 0.25 g/cm³) 来调整配方。空心玻璃微珠为中空球形结构, 其内部是真空结构或者含有 CO₂、N₂ 等气体, 能有效地阻隔热传递。从表 4

表 3 采用不同型号的乳液在不同用量下所制涂料的性能
Table 3 Properties of coatings prepared with different types and dosages of emulsions

乳液型号	质量分数/ %	导热系数/ (W·K ⁻¹ ·m ⁻¹)	粘结强度/ MPa	柔韧性
A	25	0.036 29	0.44	100 mm 无裂纹
	30	0.038 94	0.52	100 mm 无裂纹
	35	0.040 62	0.68	100 mm 无裂纹
	40	0.042 32	0.99	100 mm 无裂纹
B	25	0.036 52	0.87	100 mm 有裂纹
	30	0.038 61	0.96	100 mm 无裂纹
	35	0.040 27	1.05	100 mm 无裂纹
	40	0.042 38	1.12	100 mm 无裂纹
C	25	0.037 01	0.98	100 mm 有裂纹
	30	0.039 22	1.01	100 mm 有裂纹
	35	0.040 99	1.03	100 mm 有裂纹
	40	0.042 89	1.05	100 mm 无裂纹

表 4 采用不同粒径的空心玻璃微珠在不同用量下所制涂料的性能
Table 4 Properties of coatings prepared with different types and dosages of hollow glass microbeads

空心玻璃微珠型号	质量分数/ %	导热系数/ (W·K ⁻¹ ·m ⁻¹)	粘结强度/ MPa	柔韧性
HL15	9	0.040 25	1.19	100 mm 无裂纹
	11	0.039 76	1.06	100 mm 无裂纹
	13	0.038 61	0.96	100 mm 无裂纹
	15	0.037 51	0.56	100 mm 无裂纹
HL20	9	0.048 22	0.96	100 mm 无裂纹
	11	0.043 09	0.92	100 mm 无裂纹
	13	0.042 65	0.88	100 mm 无裂纹
	15	0.040 26	0.68	100 mm 无裂纹
HL25	9	0.051 22	0.99	100 mm 无裂纹
	11	0.048 32	0.83	100 mm 无裂纹
	13	0.045 63	0.78	100 mm 无裂纹
	15	0.042 63	0.66	100 mm 无裂纹

可知,随着空心玻璃微珠真密度的增大,涂层的导热系数升高,粘结强度则呈现出相反的趋势。真密度为物质在绝对密实状态下单位体积的质量。由于真密度越低,同等质量的空心玻璃微珠拥有更大的体积,空心玻璃微珠颗粒间的空隙率越高,因此采用 HL15 空心玻璃微珠能使涂层内部存在大量的孔隙和空洞,这种结构可以减少热量的传递,从而降低导热系数。空心玻璃微珠的真密度越低,其粒径越大,比表面积越小^[17],同样的乳液用量能带来更好的包裹效果,因此采用 HL15 空心玻璃微珠的涂层的粘结强度也是最好的。实验表明,随着 HL15 空心玻璃微珠用量增加,涂层的导热系数和粘结强度均明显降低。这是因为空心玻璃微珠增多之后,涂层变得越来越疏松^[18]。当 HL15 空心玻璃微珠的用量为配方总质量的 9% ~ 13% 时,涂层的导热系数、粘结强度和柔韧性均符合标准的要求,但明显 13% 的 HL15 空心玻璃微珠能达到更低的导热系数,因此选择 HL15 空心玻璃微珠且其用量为 13% 进行后续实验。

2.4 气凝胶颗粒与气凝胶粉体的性能对比

采用与上文优化得到的粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒的添加量相同的气凝胶粉体(粒径 50 μm)做成水性气凝胶浆料,然后制备水性气凝胶绝热厚质中涂漆,并与采用 0.6 mm 气凝胶颗粒制备的中涂漆进行对比。从表 5 可知,两者的导热系数、粘结强度和柔韧性均符合标准,但以 0.6 mm 的气凝胶颗粒制备的涂层拥有更低的导热系数,表现出更好的隔热能力。

表 5 采用 0.6 mm 粒径的气凝胶颗粒和 50 μm 粒径的气凝胶浆料所制涂层性能的对比
Table 5 Comparison between properties of coatings prepared with 0.6 mm aerogel particles and 50 μm aerogel powder

气凝胶材料	导热系数/ (W·K ⁻¹ ·m ⁻¹)	粘结强度/ MPa	柔韧性
粒径为 0.6 mm 的颗粒	0.038 61	0.96	100 mm 无裂纹
粒径为 50 μm 的粉体	0.042 25	1.02	100 mm 无裂纹

为分析造成性能差异的原因,观察了分别用 0.6 mm 气凝胶颗粒和 50 μm 气凝胶粉体所制涂层的微观结构。从图 1a 可见,在 50 倍放大倍数下可以明显看出前者具有更加疏松、丰富的孔洞结构,后者的结构更致密(见图 1d)。在放大 100 倍的情况下,图 1b 中不仅可以看到由于制作切面时被刀片切碎的空心玻璃微珠,而且通过比后者大的孔洞和疏松的漆膜看到内部完整的空心玻璃微珠,而后者由于漆膜致密,因此在图 1e 中只能看到刀片切碎的空心玻璃微珠。对比 1 000 倍下的图 1c 和图 1f 可以看出,前者的孔洞比后者大得多,后者更致密。综上所述,采用粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒能为水性气凝胶绝热厚质中涂漆带来更加疏松多孔的结构,进而获得更低的导热系数。

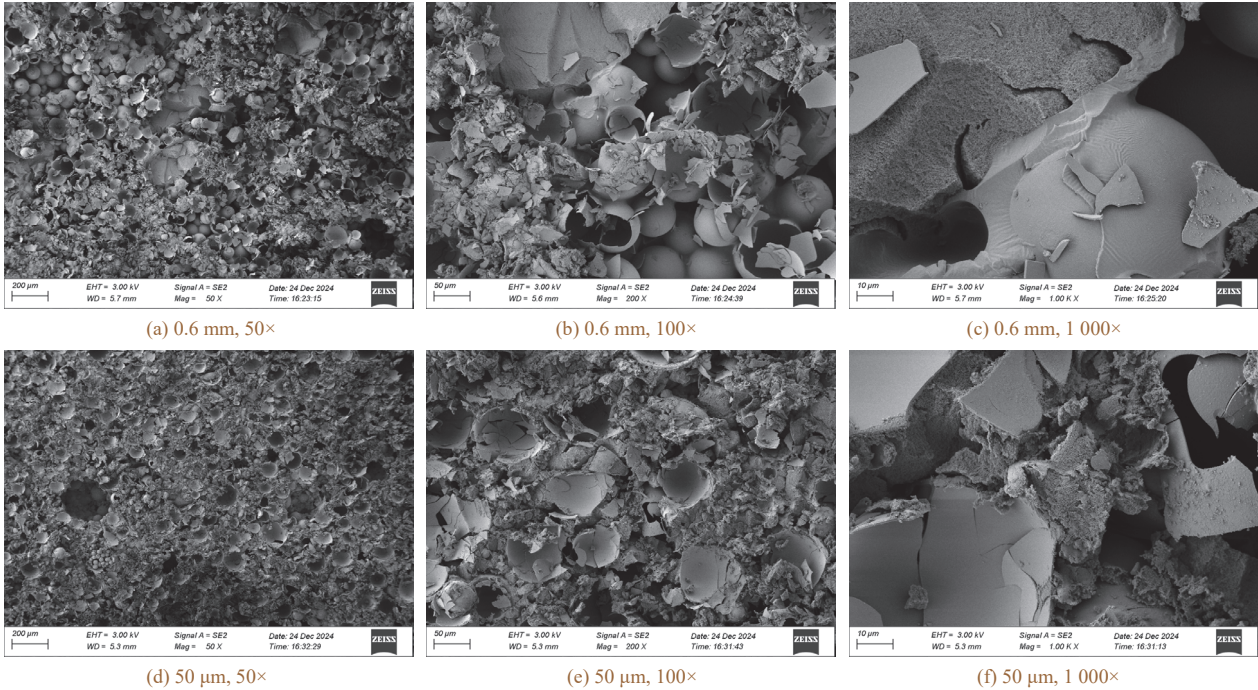


图 1 分别采用 0.6 mm 粒径气凝胶颗粒和 50 μm 粒径气凝胶粉体做成的水性气凝胶绝热厚质中涂漆的 SEM 照片
Figure 1 SEM images of waterborne aerogel thick thermal insulation intermediate paint prepared with 0.6-mm-diameter aerogel particles and 50-μm-diameter aerogel powder, respectively

2.5 水性气凝胶绝热厚质中涂漆的同步热分析

为探究水性气凝胶绝热厚质中涂漆的使用温度及其涂层在不同温度下的表现,在空气气氛下对涂层做了同步热分析。热重(TG)曲线为干燥后漆膜的质量分数(w)随温度(θ)的变化;微分热重(DTG)曲线表示干燥后漆膜的质量分数随时间的变化率(dw/d θ)与温度的函数关系;差示扫描量热(DSC)曲线显示的是干燥后的漆膜与参考物之间的热流差,以表征所有与热效应有关的物理变化和化学变化。

从图 2a 可知,在 120 °C 以下时, TG 曲线与横坐标接近平行,此时涂层基本没有变化,失去的极小部分质量为涂层吸附的水和吸附在气凝胶孔径中的乙二醇、成膜助剂等物质。120 °C 以后涂层的失重速率开始增大,此时更多的是涉及到乳液的轻微糊化现象,主要是低聚物的化学键断裂,部分汽化失重。223.87 °C 后,涂层的质量损失进一步加快。600 °C 之后涂层几乎不再失重,此时的质量损失率约为 51%。观察 DTG 曲线后发现在 353.34 °C 和 486.44 °C 出峰,对应图 2b 中 DSC 曲线的两个放热行为,分别由丙烯酸树脂和粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒表面的疏水基团在空气气氛下快速氧化所形成。这些数据证明了涂层可以在 120 °C 以下的环境中稳定工作,在 120 °C 以上时会发生各种反应,导致涂层失效。

3 结论

1) 当采用 30%的丙烯酸乳液 B、7%的气凝胶颗粒(粒径 0.6 mm)和 13%的 HL15 空心玻璃微珠时,所制水性气凝胶绝热厚质中涂漆的各项性能达到了平衡,其导热系数为 0.038 61 W/(K·m),粘结强度达到 0.96 MPa,符合 T/CECS 10126-2021 标准的要求,具有良好的保温和隔热性能,可在 120 °C 下稳定工作,有极大的市场应用价值。

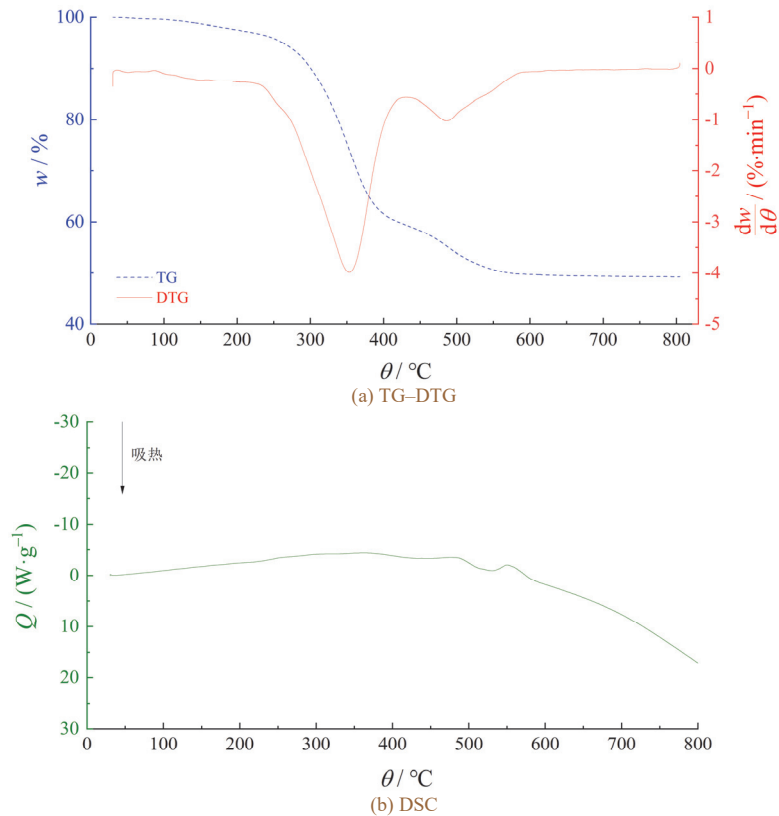


图2 水性气凝胶绝热厚质中涂漆的同步热分析

Figure 2 Synchronous thermal analysis of waterborne aerogel thick thermal insulation intermediate coating

2) 直接添加粒径为 0.6 mm 的气凝胶颗粒, 相比于用粒径为 50 μm 的气凝胶粉体事先做浆料后添加的方法, 不仅带来了更低的导热系数, 而且简化了水性气凝胶绝热厚质中涂漆的生产工艺, 节省了生产成本, 带来了极佳的经济效益。

参考文献:

- [1] 赵丽娜. “双碳”背景下化工企业节能减排策略研究[J]. 塑料工业, 2024, 52 (6): 189-190.
ZHAO L N. Research on energy conservation and emission reduction strategies for chemical enterprises under the background of “carbon neutrality” [J]. China Plastics Industry, 2024, 52 (6): 189-190.
- [2] AL ZAIDI I K, DEMIREL B, ATIS C D, et al. Investigation of mechanical and thermal properties of nano SiO₂/hydrophobic silica aerogel co-doped concrete with thermal insulation properties [J]. Structural Concrete, 2020, 21 (3): 1123-1133.
- [3] CUCE E, CUCE P M, WOOD C J, et al. Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 34: 273-299.
- [4] PIYAWONGSIRI T, AMMARINPONCHAI C, YODYINGYONG S, et al. Durable superhydrophobic silica aerogel coating from hydrophobic gel synthesis [J]. Key Engineering Materials, 2019, 824: 156-162.
- [5] LI C D, CHEN Z F, DONG W F, et al. A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: performance optimization through composition and microstructure [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2021, 553: 120517.
- [6] 路林, 张增辉, 贺优优. 莫来石纤维与二氧化硅气凝胶对防火涂料性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (1): 30-36.
LU L, ZHANG Z H, HE Y Y. Effects of mullite fiber and silica aerogel on properties of fire-retardant paint [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (1): 30-36.
- [7] 束树军. 隔热涂料在工业防护中的研究进展[J]. 涂料工业, 2022, 52 (11): 77-82, 88.
- [8] SHU S J. Research progress of thermal insulation coatings for industrial protection [J]. Paint & Coatings Industry, 2022, 52 (11): 77-82, 88.
- [9] 李伟胜, 赵苏, 吕毅涵. 二氧化硅气凝胶在反射隔热涂料中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39 (6): 316-322.
LI W S, ZHAO S, LYU Y H. Application of silica aerogel in reflective thermal insulation paint [J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39 (6): 316-322.
- [10] BECKER P F B, EFFTING C, SCHACKOW A. Lightweight thermal insulating coating mortars with aerogel, EPS, and vermiculite for energy conservation in buildings [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 125: 104283.
- [11] MOTLAGH K L, SEYFI J, KHONAKDAR H A, et al. Investigating the effects of graphene content and application method on surface properties of vinyl ester/silica aerogel coatings [J]. Macromolecular Research, 2022, 30 (5): 334-341.
- [12] HUANG Y J, HE S, CHEN G N, et al. Fast preparation of glass fiber/silica aerogel blanket in ethanol & water solvent system [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 505: 286-291.
- [13] LI P W, WU H J, LIU Y C, et al. Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 205: 529-542.
- [14] 袁雪松, 刘改利, 刘虎冰, 等. 气凝胶水性隔热保温涂料制备与性能研究[J]. 中国涂料, 2025, 40 (3): 29-35.
YUAN X S, LIU G L, LIU H B, et al. Preparation of aerogel waterborne thermal insulation coatings and study on the properties [J]. China Coatings, 2025, 40 (3): 29-35.
- [15] 许建明, 卢瑶琴, 甄荣仕, 等. 水性气凝胶保温隔热涂料的制备及其

- 性能研究[J]. 涂层与防护, 2025, 46 (3): 12-16.
- XU J M, LU Y Q, ZHEN R S, et al. Preparation and properties of waterborne aerogel thermal insulation coatings [J]. Coating and Protection, 2025, 46 (3): 12-16.
- [15] 赵万赛, 王学克, 李顺霞, 等. 水性气凝胶中涂保温涂料的研制及性能研究[J]. 涂层与防护, 2025, 46 (1): 11-15.
- ZHAO W S, WANG X K, LI S X, et al. Preparation and properties of heat insulation coatings in waterborne aerogel [J]. Coating and Protection, 2025, 46 (1): 11-15.
- [16] 李月香, 马军霞, 王蒙. SiO₂ 高效节能气凝胶隔热材料的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55 (7): 7224-7230.
- LI Y X, MA J X, WANG M. Study on preparation and properties of SiO₂ high efficiency energy saving aerogel thermal insulation materials [J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55 (7): 7224-7230.
- [17] 王焕焕. SiO₂ 气凝胶隔热保温涂料的研究及保温结构优化设计[J]. 涂料工业, 2020, 50 (8): 81-87.
- WANG H H. Research progress of SiO₂ aerogel-based thermal insulation coatings and optimization design of thermal insulation structure [J]. Paint & Coatings Industry, 2020, 50 (8): 81-87.
- [18] 何丽红, 李青林, 徐心硕, 等. 水性环氧乳液/海泡石复合改性苯丙乳液涂层粘结性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52 (1): 203-206.
- HE L H, LI Q L, XU X S, et al. Bonding performance of waterborne epoxy emulsion/sepiolite composite modified styrene-acrylic emulsion coating [J]. New Chemical Materials, 2024, 52 (1): 203-206.

【编辑：温靖邦】