

浅谈外墙涂料涂膜的透水性水汽透过性

常熟巴德富科技公司 郑公劭

一、关于涂膜的透水性水汽透过性

用于建筑的外墙涂料，其功能主要有两个：装饰功能和保护功能。对于保护功能，是指涂料的涂膜对外墙墙面具有抵抗雨雪、紫外线、酸雨及尘埃等侵蚀。而这些保护性功能中，一个主要的作用是阻止水透过涂层，进入到墙面底材，防止水对建筑外墙墙体结构和保温系统造成危害。因此涂料涂膜的不透水性成了其主要性能之一。

外部的水分如果渗漏到墙面里，墙面孔隙、裂缝里的水遇到严寒气候环境就会结冰，它的体积会膨胀 9%，挤压材料，使薄弱部分产生被侵蚀、剥落现象。如果建筑结构是钢筋混凝土，水分的侵入使钢筋发生锈蚀，截面减小。钢筋的锈蚀体体积会膨胀 1~4 倍，引发混凝土中的细小裂缝扩大，严重的会使保护层崩脱。这些都会严重影响建筑结构的完整性，耐久性和安全性。对于外墙外保温体系，水分的侵入会提高保温材料的导热系数，降低保温效果。因此，提高外墙涂料涂膜的抗透水性，是优质外墙涂料的主要性能之一。



图 1 墙面涂层剥落崩脱



图 2 墙面发霉

我们知道，涂膜越致密，微观的孔隙越小，涂膜的透水率就越低。如果涂膜没有任何可让水透过的孔隙，水就无法透过涂膜进入墙体了。

那么是不是外墙涂料涂膜的透水性越小越好呢？

当室内温度高于室外环境温度时，室内的水汽会通过墙面向温度较低的室外扩散渗透。如果外墙涂料涂膜非常致密，其对水蒸汽的渗透阻力必然非常大，水汽很难通过涂膜向外挥发，就会停留在墙体内部。所以外墙涂层的透气性不好，水汽扩散受阻，导致湿气在墙体内部或涂层界面的积聚，产生应力。湿度变化引起墙体内外压力不平衡，从而造成墙体表面结露，使涂层

鼓泡，脱落，造成墙体结构的破坏。砌体墙基体的含湿量逐步增加，产生冷凝水聚集，对墙体热工，结构性能带来不利影响，这种内部冷凝或结冰现象危害更大，造成材料软化，强度降低，饰面脱落等现象。特别是对于外墙外保温体系的外层涂料，如果涂膜透气性差，湿气无法向外扩散，留在保温层材料内，保温材料导热系数升高，最终会影响到整个保温体系的保温效果和安全稳定性。



图 3 涂膜起皮剥落



图 4 涂膜鼓泡

外墙墙面采用涂料做饰面层，为防止雨水雪水经外墙涂料渗入造成墙体结构内部受潮，影响建筑结构的完整性，耐久性和安全性，外墙涂料涂膜透水率要低，应具有较好的防水性能。同时为防止墙体内部水蒸汽因无法及时扩散到室外，停留在墙体内部冷凝，甚至结冰，又要求外墙涂料涂膜具有较小的水汽渗透阻，也就是要使水蒸气易于透过。所以理想的外墙涂料即要有良好的防水性能，又要有良好的水蒸气透过性。任何单方面强调涂膜的防水性或涂膜的透气性都是片面的，必须两者兼顾。

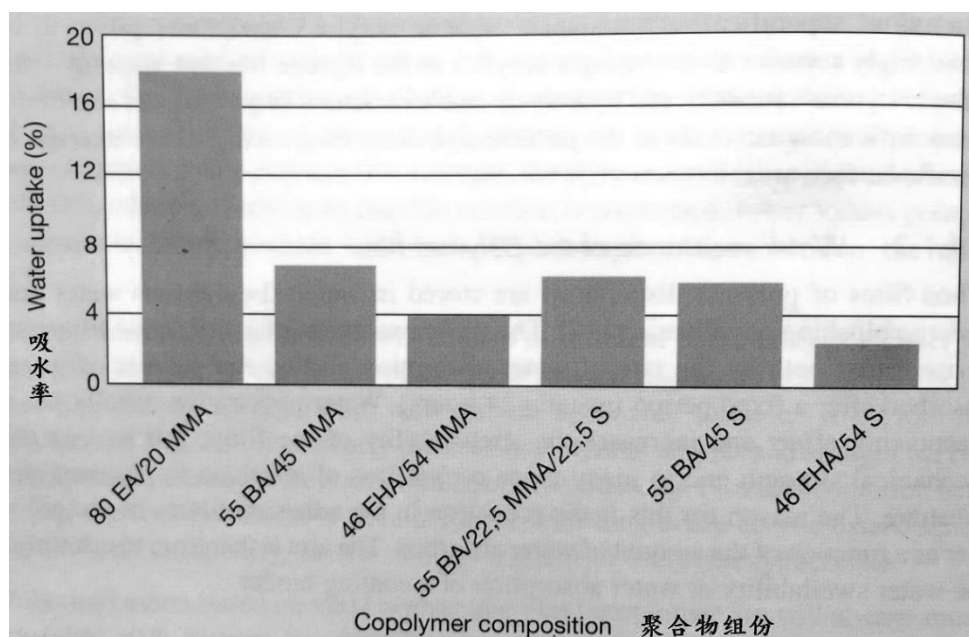
涂膜的防水性（低的透水率）与涂膜的吸水性密切相关。水的吸收渗透是通过涂膜中的毛细管效应进行的。空隙率越低，吸水性越低。同时涂膜的透气性也与空隙率密切相关，空隙率越大，透气性就越大。

由于乳液膜的透水性与它本身的吸水性密切相关，我们先讨论乳液膜的吸水性。影响乳液膜的吸水程度涉及许多因素：

1. 化学组分和聚合物极性。
2. 水溶盐和乳化剂（包围在粒子间，形成渗透压）的种类和数量。
3. 遇水膨胀助剂的种类和数量，如保护胶体。
4. 粒径。
5. 聚合物的玻璃化温度。
6. 膜厚。

7. 膜的质量，干燥情况。
8. 温度、
9. 盐的含量和水的 pH 值。

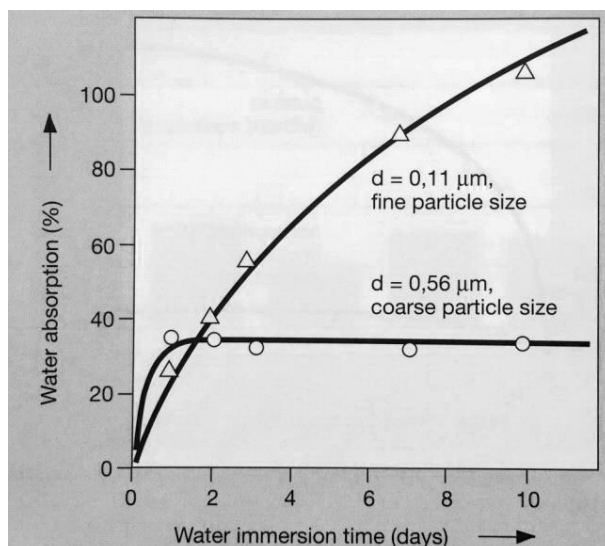
单体的极性对乳液膜的吸水性有重要的影响。亲水的功能团（如羧基团）溶于水，会提高吸水性。通常的规律是，基本聚合物本身越亲水，在其它条件相同时，吸水性越高。这点可以从一系列聚丙烯酸酯聚合物在相同玻璃化温度下的吸水量看出。当链长降低，软丙烯酸酯单体的极性上升（体系中 EHA<BA<EA），乳液膜的吸水量就明显上升。同样，当硬单体苯乙烯换为更亲水的甲基丙烯酸甲酯时，也是这样（图 5）。



Water uptake of different straight acrylic and styrene acrylic dispersion films with the same Tg and same stabilization

图 5 不同纯丙烯酸和苯丙分散体膜的吸水率（相同的 Tg 和稳定体系）

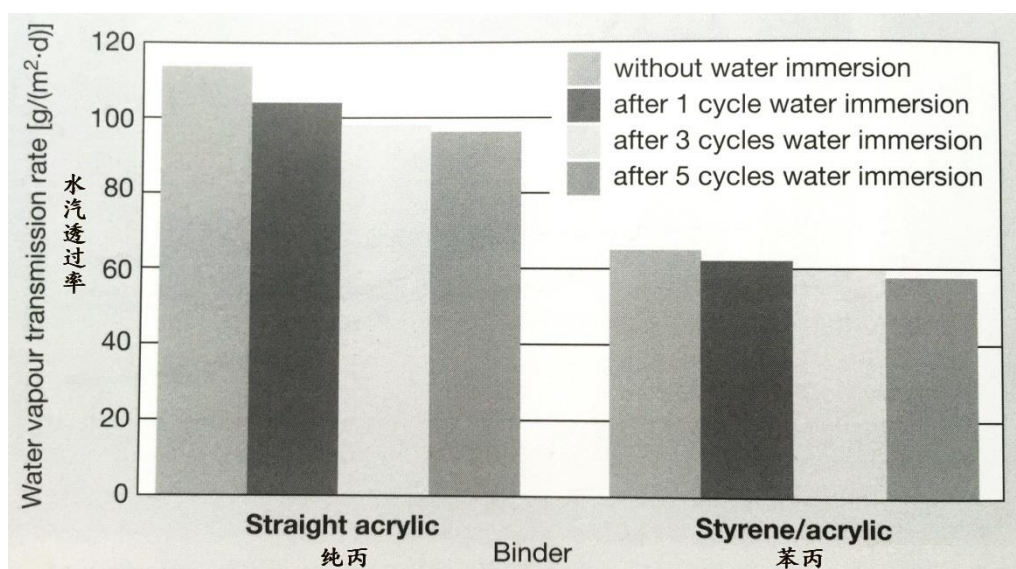
乳液粒径对乳液膜本身吸水性也有影响。从粒径对长期耐水性的作用来讲，24h 吸水率所达到的程度是不平衡的（见图 6）。粒径粗乳液的膜，因为成膜相对较差，常表现出快速的水渗透性。粒径细乳液的膜，成更连续的膜，吸水较慢。由于对水溶性成分过滤有较高的阻拦，经过长时间储存后，常常会得到较高的最后的吸水值



Influence of the particle size on longtime water uptake

图 6 粒径对长时间吸水的影响

乳液膜的水汽透过率与透水性是相互联系的。Kossmann 和 Schwartzanzh 按照 DIN 53615 进行的试验证明苯丙乳液的膜的水汽透过率都比纯丙乳液低。试验循环是涂膜浸入水中 24h，然后取出在 50°C 条件下干燥 48h。涂膜预先在室温条件下干燥几天（保持恒重）。干膜厚度约 500 微米。对所有的乳液，其膜的水汽透过率随着试验循环次数增加而降低。当浸水循环次数上升，纯丙乳液膜的水汽透过率下降，而苯丙乳液的膜的下降低小。

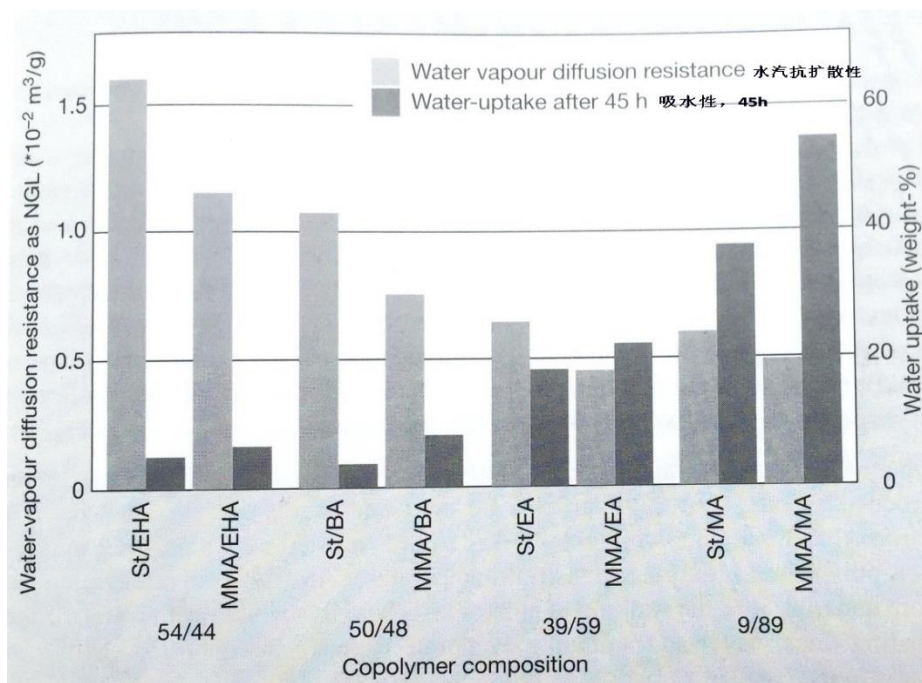


Water vapour transmission of polymer dispersion film

图 7 涂膜的水汽透过速率

上面试验中，涂膜放入水中一段时间，期间干燥一段时间，观察到涂膜的水汽透过率降低，其实涂膜的吸水性也同时下降。这可以认为是涂膜中水溶性组分被浸滤掉，膜的质量得到了改进，另外水透过涂膜的微细毛孔时，会与亲水的羧基团结合，使胶膜溶胀，使透过的水量减少，当然水汽的通过能力也相应减少了。

图 8 中的数据揭示，对这些最低成膜温度几乎相同的聚合物分散体，当涂膜的水汽抗透过扩散力上升，吸水性就下降。纯丙烯酸共聚物的吸水程度和水汽透过性都比苯丙聚合物高。当共聚物变得更疏水时水汽透过性和吸水性会同时下降。试图降低吸水性，往往也使水汽透过率变差。



Water uptake and water vapour diffusion resistance- Styrene/acrylic and Straight acrylic dispersion of same Tg

图 8 吸水性和水汽抗扩散性—相同 Tg 的苯丙/纯丙乳液

以上介绍的仅是乳液膜的部分情况。对于外墙涂料，整个配方中除了乳液外，还有各种不同品种、不同粒径颜填料，各种助剂，配方不同的 PVC 等。影响涂料涂膜的吸水性和水汽透过率的因素众多。

德国人 **Künzel** 提出了一个外墙保护理论，只有当透气性和透水性（吸水性）测试值及两者综合计算后达到某一个合适的值时，涂膜才具有优越的保护功能。在欧洲，材料层的水汽扩散阻通常用其扩散等效空气层厚度 S_d 值 (S =厚度, d =扩散) 来描述 (参阅 EN ISO 12572)。 S_d 值描述具有与被测材料层相同的扩散阻力的空气层 (静止空气) 的厚度。 **Künzel** 外墙保护理论要求：

涂膜的吸水系数 $W \leq 0.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$;

表征透气性的等效静止空气层厚度 $S_d \leq 2\text{m}$;

而且要求 $W \cdot S_d \leq 0.1 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{h}^{0.5})$

这三个要求的综合结果，涂料的拒水性和透气性必须落在图 9 的阴影面积范围内，才能有较好的保护功能。

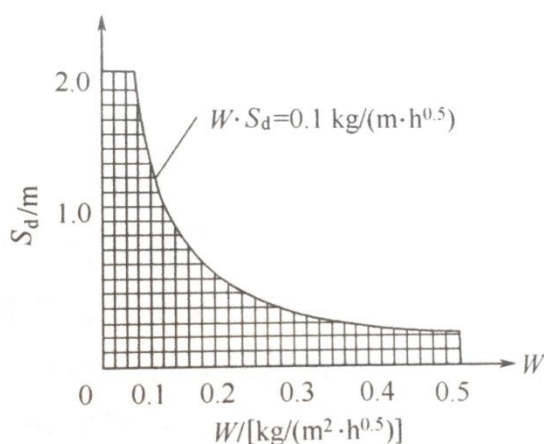


图 9 Künzel 外墙保护理论

表 1 显示的是不同乳液，不同 PVC 和不同膜厚的涂料的水汽透过率，等效静止空气层厚度 S_d 和吸水量的测试结果。乳液苯丙 2a 和苯丙 2b 有相同的单体组份，在生产过程中使用了不同的乳化剂，在聚合反应后使用了不同的中和剂。分散体苯丙 2a 使用氨中和，苯丙 2b 则含有氢氧化钠。

	PVC=40%					PVC=50%					PVC=60%				
	乳液					乳液					乳液				
	纯丙 1	纯丙 2	苯丙 1	苯丙 2a	苯丙 2b	纯丙 1	纯丙 2	苯丙 1	苯丙 2a	苯丙 2b	纯丙 1	纯丙 2	苯丙 1	苯丙 2a	苯丙 2b
	用量: 300g/m ²														
水汽透过率 [g/(m ² *h)]	41.5	36.4	41.7	24.1	29	40.5	37.7	47.2	28.9	27.7	41.5	36.4	41.7	24.1	29
S_d (m)	0.5	0.5	0.5	0.8	0.7	0.5	0.5	0.4	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.8	0.7
	用量: 500g/m ²														
水汽透过率 [g/(m ² *h)]	28.8	27.3	35.9	18.8	18.2	27	29.8	33.2	17.9	19.4	28.8	27.3	35.9	18.8	18.2
S_d (m)	0.7	0.7	0.5	1.1	1.1	0.7	0.7	0.6	1.1	1	0.7	0.7	0.5	1.1	1.1
吸水量 [kg/(m ² *h ^{1/2})]	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.04	0.05	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01

表 1 不同 PVC 涂料涂膜的测试结果

如何平衡这两个互相矛盾的性能，制造出综合性能合适的具有既防水又透气，防水透气性能

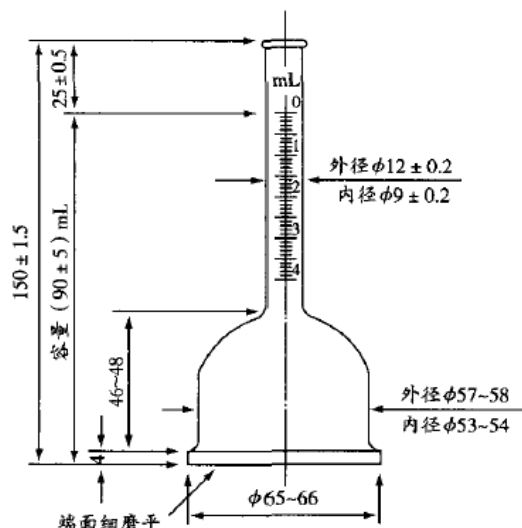
平衡的外墙饰面涂料，是涂料技术人员的任务。

外墙涂料涂膜的防水性（吸水率）和水汽透过率是涂料的重要性能指标。这两个性能是相辅相成，又相互矛盾的，不能片面强调一个方面。JG/T 512-2017《建筑外墙涂料通用技术要求》中包括有吸水性和水蒸汽透过率两项指标要求。GB 50574《墙体材料应用统一技术规范》对用于外保温墙体和内保温墙体的外饰面层涂料都要求选用具有防水透气性能的涂料。GB/T 9755《合成树脂乳液外墙涂料》标准在2014年修订版中第一次加入了防水性指标“透水性”，并从合格品、一等品和优等品不同的透水性指标设定，可以认为GB/T 9755-2014提倡涂膜透水性越低越好，但是没有同时对涂膜的水汽透过率提出要求。透水性越低的涂膜其水汽透过率也会越低，过低的水汽透过率会使涂膜的水汽渗透阻过高，影响外墙涂料涂膜的综合性能。从这点来看，GB/T 9755-2014在这方面存在片面的引导作用，建议标准制定者对此进行修订。

二、透水量测试方法探究

考核测量外墙涂料涂膜的防水性和水汽透过率这两个性能需要合理的测试方法。国际标准和国外先进标准，如ISO，ASTM，DIN等对这两个性能的测试都制定有测试方法标准。因为涂膜的防水性（低的透水率）与涂膜的吸水性密切相关，这些测试方法标准均以吸水性来测试涂膜的防水性能。我国参照这些方法标准，也已经制定有JG/T 343-2011《外墙涂料吸水性的测定及分级》（修改采用EN 1062-3: 2008《色漆和清漆 - 涂层材料和涂层系统外部砖石和混凝土 - 第3部分：测定液态水渗透性》）和JG/T 309-2011《外墙涂料水蒸气透过率的测定及分级》（修改采用ISO 7783-2:1999）两个测试方法标准。

GB/T 9755-2014《合成树脂乳液外墙涂料》标准中，使用透水性指标作为衡量涂膜的防水性能指标。检测设备采用倒漏斗装置，具体为：在符合标准规定的无石棉水泥平板上按照要求涂刷湿膜厚度为 $120\mu\text{m}+80\mu\text{m}$ 的涂料，在标准环境下养护7 d，将透水性实验装置放在试板的中部，用不吸水的密封材料密封，干燥后将水缓慢注入玻璃管内，直至试管的0mL刻度，确认容器中没有气泡，并用锡箔纸包住玻璃管顶端，在标准环境下静置24h后，观察并记录液面下降的毫升数。整个测试过程均在标准环境下进行。实验装置见图10。



The experimental device for the water permeability

图10 透水性试验装置

实践过程中发现，相同产品在不同实验室的测试结果有时相差很大。人们对一些影响因素进行了对比测试，发现不同的水质、不同的保养时间、不同的环境温度和湿度对透水性的实验结果基本没有产生影响，并非主要影响因素。而测试用底板对透水性测试结果影响最大。^{【3】}

按照标准规定，透水性测试用底板应符合JC/T 412.1-2006中NAF H V级要求的无石棉水泥平板，即标准中规定的高密度、抗折强度为V级的无石棉水泥平板。其密度 D (g/cm^3) 应为 $1.4 < D \leq 1.7$ ，吸水率 $\leq 28\%$ 。GB/T 9755-2014还补充规定未涂漆试板24h的初始透水性值不小于4mL。

对不同的底板测试结果发现，无石棉水泥平板的密度和透水性是存在差异的。标准规定未涂漆试板24h的初始透水性值不小于4mL，但没有规定下限，即未涂漆试板24h的初始透水性值为4mL和8mL都被认为是符合要求的。试板密度和初始透水性的差异对涂膜透水性的测试结果影响很大。表1是我们对不同来源的无石棉水泥平板（未浸水和浸水后）透水性的测试结果

编号	样板规格(mm)	密度 g/cm^3	裸板透水性 mL(24 h)		备注
			浸水	未浸水	
A	300×150×5.2	1.58	~8	~8	
B	430×150×5.8	1.45	~6	~7.5	
C	430×150×4.9	1.69	2.8	~4.5	
D	425×150×4.0	1.77	3.8	3.3	某检测站取来底板

表2 不同密度水泥板裸板的透水性

为了排除底板对涂膜透水性的影响，笔者尝试把涂膜从底板上脱模，测试纯涂膜的透水性。

具体方法是在平板玻璃上涂上一层蜡，然后在蜡上涂布涂料。待涂料膜干燥后，小心地把涂膜从玻璃底板上铲下。然后按照标准规定的同样方法，将透水性实验装置（漏斗）放在试板的中部，用不吸水的密封材料密封，密封材料干燥后将水缓慢注入玻璃管内，直至试管的 0 mL 刻度，确认容器中没有气泡，并用锡箔纸包住玻璃管顶端，在标准环境下静置一段时间后，观察并记录液面下降的毫升数。

实际操作中发现，由于乳胶漆涂膜较薄，漏斗中注入水后，提起涂膜和漏斗，柔韧性好的涂膜，尤其是弹性涂料涂膜在水的重力作用下，会下垂（见图 11）。为防止涂膜下垂，我们将这种涂膜和漏斗固定在一个不锈钢筛子里（见图 12）。这样往漏斗里注水后，涂膜不会下垂，而透过涂膜的水依然可以自由地流出。



图 11



图 12

我们对几种涂料裸涂膜的透水性进行了测试，并与有底板的进行对比。结果如下：

	透水性			
	22 分钟后	70 分钟后	89 分钟后	24h 后
无底板	1.2ml	3.4ml	4.0ml	
底板 a	0ml	0ml	0ml	0.58ml
底板 b	0ml	0ml	0ml	0.58ml
底板 c	0ml	0ml	0ml	0.36ml

表 3 外墙涂料的透水性，干膜厚度约 100 μm

	干膜厚度 μm	透水性				
		30min	80min	220min	330min	24h
无底板	~100	0.5ml	0.6ml	0.85ml	>4ml	
底板 1	~100					0.98ml
底板 1	~200					0.75ml
底板 1	~300					0.5ml
底板 2	~200					1.9ml

表 4 弹性涂料的透水性

从以上的测试数据可以看到，没有底板衬托的涂膜的透水性是很大的。加上底板后，透水量明显减少。我们反复测试了多次，虽然每次的透水量有些差异，但整个趋势，有/没有底板时涂膜的透水性差异是一致的。整个涂膜+底板体系中，阻止水透过的主要因素是底板，而不是涂膜。这样的测试方法，究竟是在测涂膜的透水性，还是在测底板的透水性，不是清清楚楚的吗？这样的测试结果，也证明了上面“测试用底板对透水性测试结果影响最大。”的结论。

我们又对真石漆的涂膜进行了裸膜透水性的测试。真石漆的涂膜较厚（试验中干膜厚度达5mm），可以承受水的重量，所以不用绑定在不锈钢筛子上。

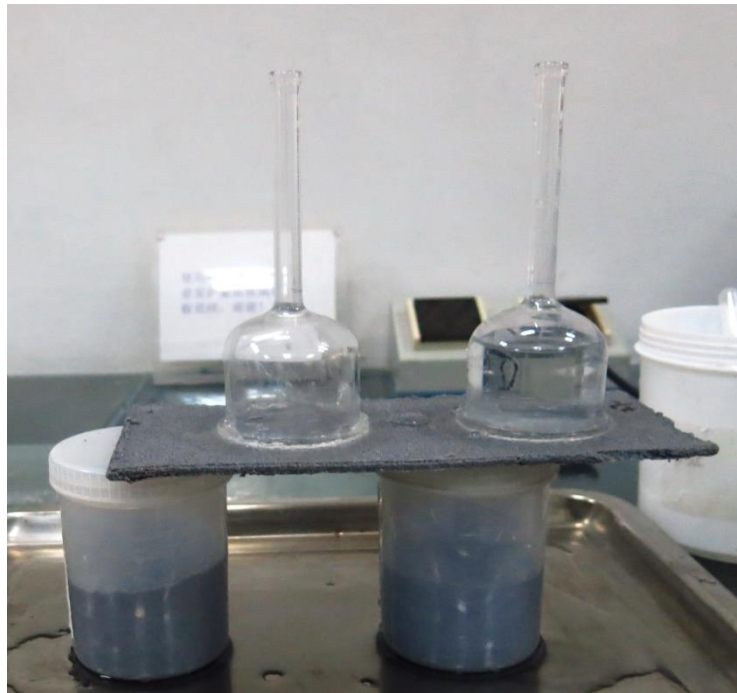


图 13

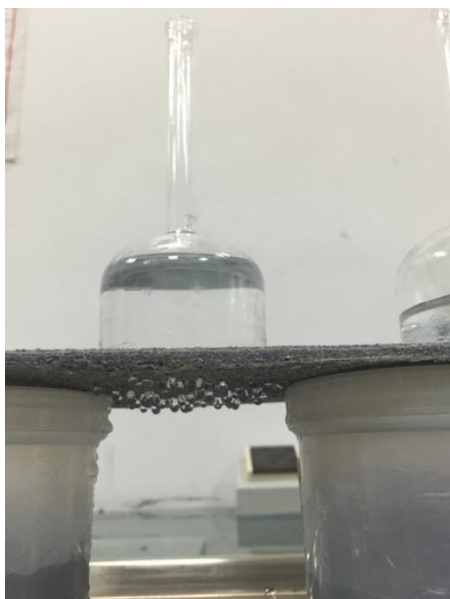


图 14

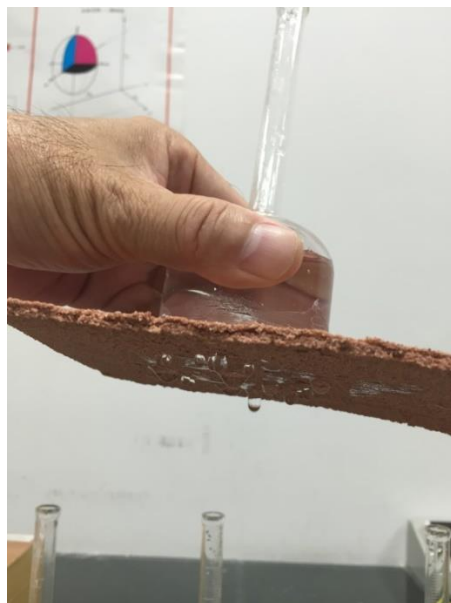


图 15

真石漆涂膜透水性测试结果如下：

乳液含量	干膜厚度 mm	透水情况
10%	5	直透
14%	5	直透

表 5 真石漆涂膜的透水性

尽管涂膜厚度达 5mm，比一般平涂外墙乳胶漆涂膜厚许多倍，真石漆涂膜几乎没有阻水性。水可以“直透”涂膜往下滴。（图 13~15）。

试验发现在往漏斗中注水到一定高度时就会出现直透水的现象，即到达一定水压时膜就大量透水。水位降到到高度约 15mm 左右时，透水明显降低，甚至停止。在对一般乳胶漆膜透水性测试中，也发现类似现象，即水位降到一定高度时，涂膜透水停止。这说明涂膜的透水性与受到的水压有关。GB/T 9755-2014 规定的透水性测试方法中玻璃漏斗中注水的高度达 125mm。这样高度的水压，与外墙涂料涂膜现实使用中可能受到的水压是有较大差别的。JG/T 343-2011 《外墙涂料吸水性的测定及分级》使用的是欧洲普遍采用的 EN 1062-3: 2008 中规定的方法，即“将待测涂料涂布于多孔矿物底材的一个表面，制备成试件。将试件进入水中，在规定的条件下，称出该试件质量，根据试件浸水前后质量的变化来测定吸水性。”并规定保持涂有涂料的面位于水面下 5-10mm。所以不存在涂膜面受到较高水压影响的问题。

三、思考

我们已经了解，涂膜过高的透水性，水渗入涂膜里面，会造成墙体结构内部受潮，影响建筑

结构的完整性，耐久性和安全性。上面试验显示的真石漆的裸膜的高透水现象，从理论上讲，应该对整个墙面的保护性能的负面影响是较大的。真石漆在我国作为外墙涂料大面积使用已经有多多年，目前真石漆是整个外墙涂料中产量最大的。可实际中并没有因为真石漆膜透水性高而出现大量的破坏墙体基面耐久性，底面（包括腻子层）的疏松起壳，涂膜因背面水分过多出现涂膜起鼓，脱落等投诉。

由于没有符合 JG/T 343-2011 (EN 1062-3: 2008) 规定的吸水性测试底材灰砂砖。所以我们没有按照这个测试方法测试真石漆涂膜的吸水性，也就无法计算真石漆涂膜的拒水性和透气性的综合结果。请注意这个标准中规定的底材灰砂砖与修订中的 JG/T 24-20** 《合成树脂乳液砂壁状建筑涂料》中吸水性测试用底材水泥砂浆块是不一样的。灰砂砖规定的吸水性大约是 $3.0\sim 7.7 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{0.5})$ ，而水泥砂浆块的吸水性大约是 $2.0\sim 3.0\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{0.5})$ 。

Künzel创立外墙保护理论的试验是在位于慕尼黑南部，靠近巴伐利亚阿尔卑斯山的霍尔茨克钦（HolzKirchen）试验场进行的。与大多数德国其它地点相比，其室外温度波动和出现大风降雨情况相当严重。考虑到不同的气候条件，墙面的不同朝向（如暴露于大风雨朝西的墙面的受雨水影响与受遮蔽的一面向东的墙面不一样），另外大风雨并不是墙内唯一可能的湿气源等因素，霍尔茨克钦的田间条件太严重，从那里试验收集到的数据难以普遍应用，所以上面**Künzel**外墙保护理论中要求的 $W\cdot S_d \leq 0.1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{h}^{0.5})$ 已被修改为 $W\cdot S_d \leq 0.2 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{h}^{0.5})$ ，并被纳入德国防雨灰泥和涂料标准（DIN 18558）和德国建筑节能标准（DIN 4108）。

为了将外墙体的潮气状况和明确定义的外涂层（厚质砂浆或涂料）的温湿特性联系起来，必须分析自然润湿和干燥过程。**Künzel**等对涂和不涂不同类型厚质砂浆涂层的蒸压加气混凝土（AAC）墙体构件的水分状况进行了考察，测量了水含量的变化，这种变化在雨水吸收和随后在干燥气候条件下水分的释放之间达到平衡。试验发现，有砂浆防水涂层的墙壁不会吸收大量的雨水。这意味着这种涂层的毛细管输送能力很小，AAC砌块里的初始水分以水汽形式通过涂层扩散出去了。涂有传统砂浆的墙体的吸水率与没涂砂浆的墙体相似，但砂浆层的存在大大减少了水的释放，墙体中能加速无涂层砌块干燥过程的毛细传输似乎受到阻塞，这种毛细阻塞只出现在干燥过程中，因此，涂层中剩余水分的输送很可能是纯粹的水汽扩散，它远远低于毛细管抽吸作用。这说明涂层的水汽透过性能对墙体受潮后的干燥至关重要。

这些是否可以引起我们另外一种思考，即在涂膜的不透水性和涂膜的水汽透过率两者之间，哪一个更重要。如果能在两者之间取得很好的平衡，达到 **Künzel** 外墙保护理论的要求，那固然好。但如果有一个方面不能达到要求，如涂膜孔隙相对较多，其透水性和水汽透过率都较高，或者是涂膜非常致密，涂膜的透水率和水汽透过率都很低，哪个更好？

真石漆涂膜透水率较高，水汽透过率也较高，实践证明大量的使用效果不错。**Künzel** 外墙保护理论是否适用于真石漆？这些现象和试验结果，能否引起广大的涂料技术人员对外墙涂膜保护理论的更进一步的思考？

参考资料

- 【1】 Manfred Schwartz & Roland Baumstark, Waterbased Acrylates for Decorative Coatings.
- 【2】 Clifford K. Schoff, Permeability of organic coating
- 【3】 高继东等, GB/T 9755—2014 新标准中透水性测试方法的探讨, 上海涂料, 2015. 4.
- 【4】 Künzel et al, Rain Protection of Stucco Facades
- 【5】 C. BAERÄ et al, Moisture Transfer through Facades Covered with Organic Binder Renders