

建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1984

No. 6-5

屋面浅色隔热处理和隔热防水涂料

Light Colour Insulating Measure and Insulating/Water-Proof Coating on Roofs

中国建筑科学研究院

CHINA ACADEMY OF BUILDING RESEARCH



提 要

本课题主要研究轻薄屋面浅色降温的机理和隔热防水涂料的研制。

本文以大量的试验资料证明：浅色屋面的外表面温度可比黑色屋面降低 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，从而改善了轻薄屋盖的隔热效果；提出了工业厂房不同净高屋盖的内表面温度的限制指标，为合理选择隔热措施提供依据；屋面隔热防水涂层是一种既能隔热又能防水的复合涂层，具有良好的耐水、耐碱、耐热、耐裂、耐老化和耐污染性能；隔热防水涂料无毒，可冷作业，原料易得，成本较低，为我国增添了一种新的屋面隔热防水材料。

目 录

一、前言	(2)
二、浅色面层的降温作用	(2)
三、浅色处理的屋面实测效果分析	(7)
四、不同层高的屋盖对表面温度的限制	(10)
五、屋面隔热防水涂料的研制	(11)
六、施工工艺	(19)
七、屋面隔热防水涂料的经济效益	(21)
八、结论	(21)

参考文献

Light Colour Insulating Measure and Insulating/Water-Proof Coating on Roofs

Institute of Building Physics

Shen yunyuan Shi manping Liu yueli

Abstract

This project has studied mainly on the mechanism of light colour decreasing temperature on light-weight roofs and the manufacture of insulating/water-proof coating.

Through a large number of experiments it has been proved that if the roof has been treated by means of light colour, the solar radiation would be greatly reflected, subsequently the highest temperature on the outside surface would be $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ lower than that of black colour. By using this sort of light colour coating, the insulating effectiveness of the light-weight roofs would be improved greatly. The report worked out the restricted index of inside surface temperature suitable for different net heights of roof in industry buildings. As a result, it has provided a basis for the reasonable choice of various insulating measures. The insulating/water-proof coating on roof is a sort of the compound coating both insulating and water-proof. It is of good performance in water-tolerance, soda-resisting, thermal-resistance, splitting-resistance, ageing-resistance and pollution-resistance. The coating is non-poisonous, easy to be worked without the need of preheat. The raw material is plentiful with low price and to be a new building material for roof insulating and water-proof.

屋面浅色隔热处理和隔热防水涂料

中国建筑科学研究院物理研究所 沈轶元、石曼萍、刘月莉

一、前言

夏季，屋盖的隔热主要是隔掉强烈的太阳辐射热。

屋盖的隔热措施采用得较多的是设置绝热材料层和通风的架空板；也有在屋面板上采用无土种植草和绿色植物，蓄水，淋水和在屋面板下设置铝箔吊顶等措施。这些措施都具有良好的效果。

除了上述的措施以外，还有一种特殊的隔热措施——屋面面层浅色处理，即在屋面上喷涂一层白色（或其他浅色）涂层，藉以减少太阳辐射热的吸收，降低屋面表面温度，达到改善屋盖隔热的目的。面层浅色处理最适用于工业厂房中所推行的大型屋面板、折板、双T板、马鞍壳板等轻薄屋盖。

目前，南方炎热地区的轻薄屋盖多数不作隔热处理。而屋面防水又多采用黑色的油毡、乳化沥青及聚氯乙烯胶泥等材料。在夏季这种屋面的温度高达 $70\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，板面昼夜温差达 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。这样的轻薄屋盖，一方面向室内发射强烈的辐射热，影响到操作人员的健康、生产效率及产品质量；另一方面由于板面昼夜的温差作用大，天长日久的板面反复伸缩，致使板面产生裂缝，造成渗漏现象。如常州某厂新建厂房的屋面，涂刷黑色的聚氯乙烯胶泥后，经过不长时间屋面板就有70%产生渗漏现象。如果在这些轻薄屋盖的面层作浅色处理，那么屋盖表面最高温度可相应地降低 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，而屋面板昼夜温差也同样能减小 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。这样，由温度应力所引起的裂缝必然可以得到防止或减少。

屋面经常受着曝晒、雨淋、风吹和周围环境的其他有害物质的侵蚀。因此，对屋面面层浅色处理的材料性能（如耐老化、耐裂、耐污染、耐热、耐冻融、耐水、耐碱等）要求很高。目前，国内能同时满足隔热和防水要求的工程材料很少，而且价格很高。为此，本课题就是要组织有关单位共同研制价格较低，隔热防水性能好的涂料，使浅色处理降温的办法在工程实践中得以推广使用。

二、浅色面层的降温作用

（一）浅色面层反射太阳能的特性

众所周知，太阳辐射到达地球大气层外界时，其辐射强度为 $1164\text{千卡}/\text{米}^2\cdot\text{小时}$ 。在

比较理想的大气透明度条件下，到达地面的太阳辐射能量只是大气层外的80%左右，因此，夏季太阳高度角很高的情况下，太阳辐射到地面水平方向的热量约在900千卡/米²·小时左右。

太阳辐射热能主要分布在波长为0.3~3.0微米的波段内，这个波段也称作短波段。波长0.3~0.4微米为紫外线区，它所占有太阳辐射能量约为5%；波长0.4~0.7微米为可见光区，它所占有的太阳辐射能量约为52%；波长0.7~3.0微米为红外线区，它所占有的太阳辐射能量约为43%。太阳辐射能量的分布曲线如图1所示。

根据太阳辐射能的分布状况，如何提高屋面反射太阳能的能力，这就需要研究浅色面层反射太阳能的特性。材料表面吸收或反射太阳辐射能力的大小，主要取决于材料的化学成分、表面的光滑状况和表面颜色。而表面颜色又是影响反射率的主要因素。表面颜色越浅，反射太阳辐射热的能力就越大。如白色表面对太阳辐射的反射率可达0.8，而黑色表面的反射率只有0.1。因此，夏季，在强烈的太阳照射下，白色表面的温度可比黑色表面低25~30℃。同样，其他反射率较太的浅色表面（如浅黄、浅绿）也具有良好的降温效果，一般也要比黑色表面低20℃左右（见图2）。

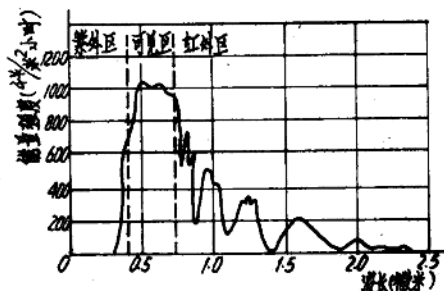


图1 太阳光谱分布曲线

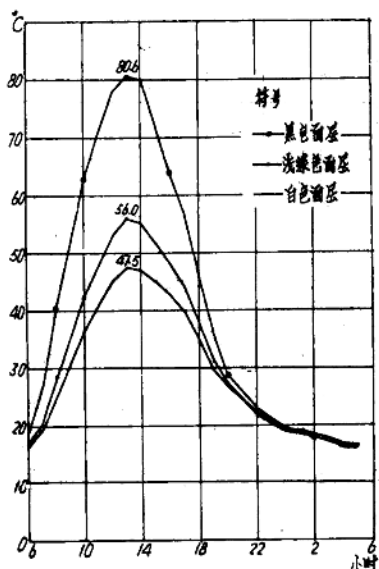


图2 浅色与黑色表面温度对比图

所有不透明的建筑材料表面都能吸收一部分太阳辐射能，吸收率越大，表面温度越高。图3表示，在相同的气温和日照条件下，表面不同吸收率与表面最高温度关系的试验曲线。

（二）屋面材料发射长波辐射能的特性

所有的建筑材料除了能吸收和反射太阳辐射能量以外，本身也都具有辐射能量的能力。这种能力的大小用材料的辐射率也称黑度系数 e 来表示。材料本身辐射出的能量的波长，一般在5~100微米之间。这个波段称为长波段。因此，材料表面本身的辐射也称长波辐射。

材料的辐射率主要取决于材料的化学成分和表面状况，而与材料颜色的深浅无关。例如，材料相同的黑白两色表面对于太阳辐射有着极不相同的反射率，在白天阳光的曝晒下，黑色表面比白色表面的温度高得多。但它们的长波辐射率则几乎相同，大致都在0.9

左右。在夜间，这黑白两表面向天空辐射的能力相同而等效地降温。图 4 即为我们研制的黑白两色涂层的温度试验曲线。白天它们的最高温度分别为 79.1°C 和 47.6°C ，相差 31.5°C ；夜间它们的最低温度分别为 16.5°C 和 15.9°C ，相差为 0.6°C 。

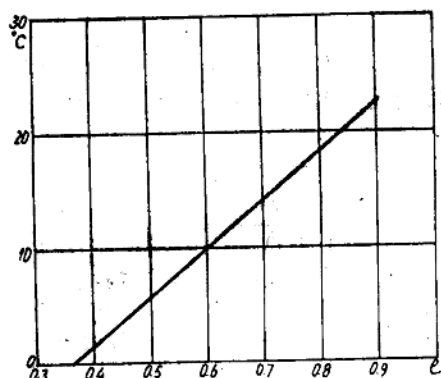


图 3 表面吸收系数与温度的关系
注：本图以 $\rho=0.37$ 测得的表面温度假定为 0，其他 ρ 值的温度为其差值

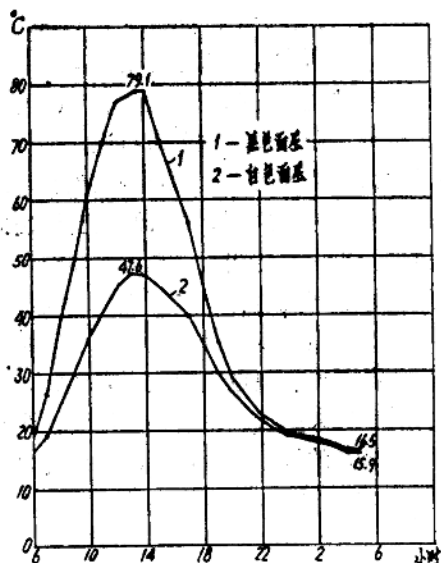


图 4 白色与黑色涂料面层温度曲线

材料的辐射率也影响着表面温度。不同材料性质的表面辐射率差别很大，从 $\epsilon=0.0$ （光亮的铝箔）到 $\epsilon=0.95$ （石棉纸、烟灰），辐射率愈大的材料表面向天空辐射出的能量就愈大。因此，材料外表面温度的高低既受吸收太阳辐射强度的影响，又受长波辐射的影响。从图 5 的实测曲线可以看出：反射率为 0.85，辐射率为 0.043 的铝箔和反射率为 0.77，辐射率为 0.10 的铝板表面的最高温度比反射率为 0.61、辐射率为 0.93 的白色涂料层分别高出 1.4°C 和 12.2°C ；最低温度分别高出 7.3°C 和 6.5°C 。这说明白色涂层虽然反射太阳辐射热比铝板和铝箔小，但它本身向温度低的天空辐射出的热量却比铝板和铝箔大。结果白色涂层表面温度反而比它们低。

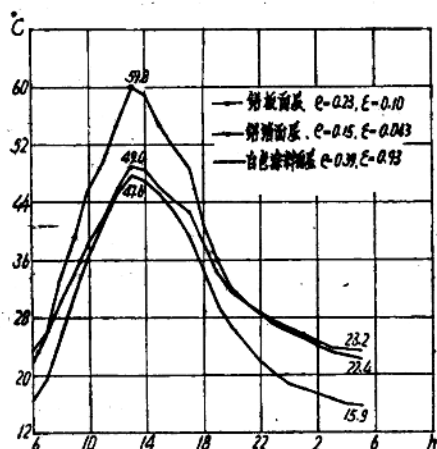


图 5 不同材料性能的表面温度对比图

以上分析说明：选择对太阳辐射的反射率大而本身的辐射率也大的材料面层是降温效果最好的面层。

要提高涂料型的浅色面层反射率的途径，大致有三个方面：

1. 扩大涂层物质与空气的接触界面。在涂

料内添加某些特殊骨料,如适当细度的玻璃粉,使涂膜形成高密度的微细凹凸结构,使其能产生良好的折射和漫反射的效果。

2.反射体的粒径、粒度分布,粒子间隔和太阳辐射的全波长相搭配。并尽可能选择折射率大的反射体。

反射体表面对可见光的反射率 γ 为:

$$\gamma = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为反射体和媒介物的折射率。 n_1 和 n_2 的差值越大,涂膜的反射率越大。据资料说明:白色颜料中以 $n_1 = 2.6 \sim 2.9$ 的金红石型氧化钛的反射性能为最好。然而对于太阳辐射全区域的反射率来说,金红石型氧化钛的粒径较细不够理想,其太阳全反射率仅为 0.85。而氧化镁涂膜结构较好,其太阳全反射率达到 0.96。如果在涂料中的反射体成分配比得当就能研制出性能优良的反射涂料。

3.尽量消除吸热物质。在涂料中添加的骨料中往往含有多量的铁质成分 (Fe_2O_3)。它对太阳辐射的红外区域有强烈的吸收性,因此要尽量消除铁粉的含量,这是影响涂料反射效果很重要的因素。

(三) 浅色面层表面温度变化的特性

屋面外表面温度的高低还要取决于表面的热平衡(见图 6)。屋顶表面一方面接受太阳辐射热,另一方面又要向天空辐射出一部分热量,被周围空气介质带走一部分热量,还要向室内传递一部分热量。对于轻薄屋盖外表面的热平衡方程式,可以写成如下形式:

$$\rho J - \alpha_t (\tau_w - t_0) - \alpha_w (\tau_w - t_w) - \frac{\tau_w - t_n}{R_0 - R_w} = 0 \quad (2)$$

经过整理,屋顶外表面温度 τ_w 的表达式为:

$$\tau_w = t_s - \left[\frac{\rho J}{\alpha_w} - \frac{\alpha_t}{\alpha_w} (t_w - t_0) \right] \frac{R_w}{R_0}, \quad (3)$$

式中

t_s ——室外综合温度,

$$t_s = t_w + \frac{\rho J}{\alpha_w} - \frac{\alpha_t}{\alpha_w} (t_w - t_0),$$

t_w ——室外空气温度,

t_n ——室内空气温度,夏季室内通风时近似地取 $t_n \approx t_w$,

t_0 ——天空的平均辐射温度(见表 1, 2),

J ——太阳辐射强度,

ρ ——太阳辐射吸收系数,

- α_w ——外表面热转移系数;
 α_r ——外表面的对流换热系数;
 α_t ——外表面的辐射换热系数;
 R_0 ——屋面总热阻;
 R_w ——外表面热转移阻。

从公式(3)中可看出,外表面温度随着屋面的总热阻增大而增高。当热阻大到一定时候,外表面温度近似等于综合温度。因此,有隔热层的屋顶外表面温度比轻薄屋顶外表面温度高。它们的差值随着吸收系数 ρ 的增大而增大。图7为薄板面层和绝热板面层的温度随着表面吸收系数变化的关系曲线。

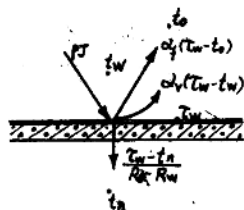


图6 屋顶外表面热平衡示意图

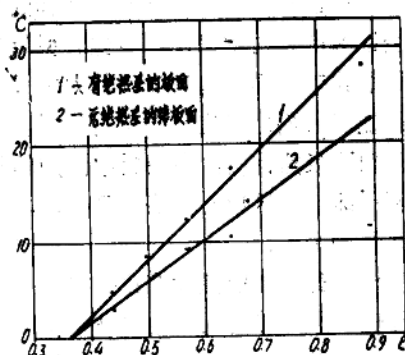


图7 有无绝热层板面的吸收系数与温度的关系
注: 假定以 $\rho=0.37$ 所测得的表面温度为 0°C

用 t_w 和 e 查取天空的平均辐射温度 t_0

表 1

e^* (mmHg)	$t_w(^{\circ}\text{C})$							
	32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0	38.0	39.0
15.0	9.9	10.8	11.7	12.6	13.6	14.5	15.4	16.5
16.0	10.8	11.7	12.7	13.6	14.5	15.5	16.4	17.3
17.0	11.5	12.4	13.4	14.3	15.2	16.2	17.1	18.0
18.0	12.2	13.1	14.1	15.0	15.9	16.9	17.8	18.7
19.0	12.8	13.8	14.7	15.6	16.6	17.5	18.4	19.3
20.0	13.5	14.4	15.3	16.3	17.2	18.2	19.1	20.0
21.0	14.1	15.0	16.0	16.9	17.8	18.8	19.7	20.6
22.0	14.7	15.6	16.5	17.5	18.4	19.4	20.3	21.2
23.0	15.2	16.2	17.1	18.1	19.0	20.0	20.9	21.8
24.0	15.8	16.7	17.7	18.6	19.6	20.5	21.5	22.4
25.0	16.3	17.3	18.2	19.2	20.1	21.1	22.0	22.9

注: 1. e^* ——空气的水蒸气分力压

2. 本表取自四川省建筑科学研究所:《轻屋盖的隔热设计》

南方地区主要城市最热月的水蒸汽分压力 e 值

表 2

地 名	合肥	南京	上海	杭州	南昌	福州	广州	南宁	长沙	武汉	成都	重庆
相 对 湿 度	81	81	83	80	75	78	84	82	75	79	85	76
平均室外气温	28.5	28.2	27.9	28.7	29.7	28.7	28.3	28.3	29.4	28.1	25.8	28.6
e	23.6	23.3	23.4	23.6	23.5	23.0	24.3	23.7	23.1	22.5	21.2	22.3

计算轻薄屋盖内表面温度 τ_n 的公式为:

$$\tau_n = t_n + \frac{(t_s - t_n)R_n}{R_0}, \quad (4)$$

当室内通风时可近似地取 $t_w = t_n$ 。于是 (4) 式可写成:

$$\tau_n = t_w + \left[\frac{\rho J}{a_w} - \frac{a_i}{a_w} (t_w - t_o) \right] \frac{R_n}{R_0}. \quad (5)$$

从公式 (5) 中可看出: 当屋面的总热阻增加时。虽然外表面温度也增高, 但是内表面温度却愈来愈低。而且随着屋面总热阻增高, 颜色的深浅的影响也逐渐减小。表 3 列出的测试数据表明: 在同样的气温和日照条件下, 刷白色涂层与刷黑色涂层的加气混凝土复合板屋面的外表面温度差 23.0°C ; 内表面温度只差 7.9°C 。而刷白色涂层与刷黑色涂层的大型屋面板外表面温度之差仅为 17.9°C ; 而内表面温度却相差 15.9°C 。这些试验数据告诉我们, 浅色处理的降温作用, 对于轻薄屋面其效果愈加显著。

颜色对薄厚屋面的降温效果的影响

表 3

屋 面	色 泽	吸 收 系 数	外表面最高温度	内表面最高温度
15厘米厚加气 混凝土复合板	黑 色	0.90	65.1	41.6
	白 色	0.30	42.1	33.7
	差 值		23.0	7.9
3 厘米厚大型 屋 面 板	黑 色	0.90	59.1	55.9
	白 色	0.30	41.2	40.0
	差 值		17.9	15.9

三、浅色处理的屋面实测效果分析

工业厂房, 特别是多跨厂房的围护结构中, 由于屋盖所占的面积大, 接受日照的时间长和太阳辐射的强度大, 因此, 夏季屋盖隔热效果的好坏是影响厂房热环境的主要因素。

我们在常州地区选择了六个未作隔热处理的大型屋面板屋盖进行热工试验。试验结果见表 5。表中的数据表明: 这些吸收系数很大的深黑色面层的表面最高温度达 70°C 左右, 屋盖内表面最高温度也在 60°C 左右。工作区所接受的热辐射强度几乎都在 30 千卡/米²·小

时以上。特别是搪瓷厂，自行车厂这些低矮厂房，工作区操作人员所要接受的辐射热都将超过40千卡/米²·小时。这种过热环境，操作人员是难以忍受的。

各色涂料和其他面层实测的表面温度对比表*

表 4

序号	面层性质	面层色泽	太阳辐射的反射率	长 波 辐 射 率	薄 板 外 表 面		绝 热 板 外 表 面	
					最高温度	平均温度	最高温度	平均温度
1	涂 料 类	白 色	0.61	0.93	0	0	0	0
2		浅 黄 色	0.56	0.93	3.9	1.3	2.2	0.7
3		黄 色	0.57	0.94	2.7	1.0	4.5	1.2
4		浅 绿 色	0.50	0.93	6.5	2.1	8.4	2.5
5		绿 色	0.43	0.94	9.1	2.9	12.2	4.1
6		铁 黄 色	0.46	0.94	10.0	3.2	8.7	
7		铝 粉 色	0.35	0.79	10.2	3.4	17.5	6.1
8		铁 红 色	0.32	0.94	12.0	3.9	20.0	6.2
9		酞 青 兰	0.37	0.87	13.0	4.3	17.9	6.3
10		酞 青 绿	0.37	0.93	14.2	4.4	19.0	6.2
11		碳 黑 色	0.09	0.87	22.8	7.6	31.5	11.5
12	其 他	银色铝箔	0.85	0.043	0.3	2.6	1.4	4.6
13		金色铝箔	0.63	0.15	4.9	3.7	12.5	7.6
14		铝 板	0.73	0.10	9.7	5.2	12.2	7.6
15		镀锌铁皮	0.34	0.05	20.5	7.1	26.0	10.5
16		波形石棉瓦	0.37		9.9	3.5	11.1	3.8
17		石棉水泥板	0.31		11.3	3.9	16.6	5.5
18		再 生 胶	0.08	0.91	24.4	8.3	33.1	12.1
19		油 毡	0.10		24.2	8.4	30.2	11.6

* 温度表示方法：以测得的白色涂层温度假定0℃，其他都是与它的差值。

未作隔热处理的屋顶热工试验结果

表 5

厂 名	厂房高度 米	面层材料	吸收系数 (ρ)	室外最高 气温 (℃)	室内最高 气温 (℃)	外 表 面 最高温度 (℃)	内 表 面 最高温度 (℃)	热辐射强度 (千卡/米 ² ·小时)
玻璃钢厂	10.5	油 毡	0.92	33.6	32.6	69.5	57.5	33.4
玻璃钢厂	10.5	沥青涂料	0.88	33.6	32.6	68.0	57.0	31.4
玻璃钢厂	10.5	混凝土本色	0.77	33.6	32.6	61.5	53.0	29.2
冶金厂	9.6	油 毡	0.90	33.4	33.1	—	60.0	34.8
搪瓷厂	6.6	混凝土原色	0.77	36.2	36.2	72.5	64.0	45.7
自行车厂	7.2	混凝土原色	0.78	34.8	34.5	70.5	61.0	41.4

当屋面面层涂刷浅色涂层后,表面温度大幅度下降,向厂房内辐射的热量也大幅度减小。这里列举在常州自行车厂和常州建科所试验房的屋盖上,所作的深色和浅色面层隔热效果的对比试验:

自行车厂的厂房是18米的双跨厂房,高度7.2米,南跨面层作石灰粉刷,吸收系数为0.48;北跨面层是大型屋面板的混凝土原色,吸收系数为0.78。晴朗无云的夏天,当室外温度为34.8℃时,北跨外表面最高温度为70.5℃,内表面最高温度为61.0℃,内表面向室内工作面的辐射热量达到41.4千卡/米²·小时。而南跨外表面最高温度为45.5℃,内表面最高温度为41.5℃,辐射热量仅为16千卡/米²·小时。白色屋面的外表面温度要比混凝土原色屋面低25℃;内表面温度低19.5℃,辐射热量降低25千卡/米²·小时(见表6)。在浅色处理的南跨车间工作人员明显地感到舒适。

常州建科所试验房屋盖也是3厘米厚的大型屋面板,层高6米。屋盖表面分别涂刷白色隔热防水涂料和黑色防水涂料。在进行隔热测试期间,虽然天气多云,气温不太高,但是白色处理的隔热效果仍然能充分地显示出来。白色外表面最高温度比黑色表面低17.9℃,内表面温度低15.9℃(见表6)。

浅色处理后屋盖隔热效果对比数据

表 6

测试工程	面层材料	吸收系数 (ρ)	室内最高 气温 (℃)	外表面 最高温度 (℃)	内表面 最高温度 (℃)	热辐射强度 (千卡/米 ² · 小时)	天气状况
自行车厂	北跨 混凝土原色	0.78	34.8	70.5	61.0	41.4	晴
	南跨 白灰粉刷	0.48	34.8	45.5	41.5	16.0	
	差 值			25.0	19.5	25.4	
试验房	北 黑色防水涂层	0.9	33.0	59.1	55.9	—	多云
	南 白色防水涂层	0.3	33.0	41.2	40.0	—	
	差 值			17.9	15.9	—	

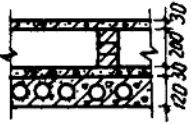
目前,南方地区的民用建筑的屋盖,通常是多孔板上作刚性混凝土防水层,再铺设通风架空板。这种屋盖重量达440公斤/米²,施工较复杂,夏季隔热尚可,但冬季保温效果较差。近年来,也有采用油毛毡为防水层的加气混凝土复合板屋盖。根据隔热标准要求,加气混凝土厚度需20厘米左右。这种屋盖的重量约为320公斤/米²。现在我们设计的面层采用浅色隔热涂料的加气混凝土复合屋盖,其加气厚度仅为12厘米,屋盖重量为260公斤/米²。

上述三种屋盖的隔热效果列于表7。表中所示,面层浅色处理的总厚度为15厘米的复合屋盖,其夏季隔热效果能满足目前民用建筑屋盖隔热检验标准。这种新型复合屋盖与传统的架空板通风屋盖相比,重量可减轻40%,水泥可节约40%,工期可缩短40%。同不作浅色处理的加气混凝土复合屋盖相比,重量可减轻20%,加气混凝土厚度减少8厘米,节约加气混凝土45%。

浅色隔热防水涂料中,除白色涂层具有良好的隔热效果外,其他浅色涂料,如浅黄、

浅绿色等对太阳辐射的吸收系数小于0.5的涂层也都具有良好的隔热效果。我们在常州设计了四间屋盖为15厘米厚的加气混凝土复合板，开间为3.6米×6.0米，层高为3米的试验房。屋盖表面分别涂刷白色、浅黄色、浅绿色和黑色等四种涂层。通过热工测试所获得的数据列于表8。

三种屋盖隔热效果对比 表 7

屋 盖 构 造	重 量 公斤/米 ²	面 层 材 料	吸 收 系 数 ρ	室 外 最高气温	外 表 面 最高温度	内 表 面 最高温度	内表面温度与 室外气温差值
	440	混凝土 原 色	0.75	34.8	53.7	35.1	0.3
	320	油 毡	0.90	32.6	68.6	33.0	0.4
	260	白色隔 热防水 涂 料	0.30	33.0	40.9	33.0	0

不同颜色涂层的屋面隔热效果对比表 表 8

屋 盖 构 造	色 泽	吸 收 系 数	室 外 最高气温	外 表 面 最高温度	内 表 面 最高温度	备 注
15厘米厚加 气混凝土复 合板屋盖	黑 色	0.90	30.5	63.1	37.2	天 气 多 云
	浅绿色	0.46	30.5	46.2	32.3	
	浅黄色	0.39	30.5	42.4	31.5	
	白 色	0.30	30.5	38.5	30.5	

表8中的数据表明：

- 1.白色、浅黄色、浅绿色涂层的外表面最高温度分别比黑色涂层低24.6℃、20.7℃和16.9℃；内表面最高温度分别比黑色涂层低6.7℃、5.7℃和4.9℃。
- 2.浅黄、浅绿色涂层的外表面最高温度分别比白色涂层仅高出3.9℃和7.8℃，而内表面最高温度分别比白色涂层高出更少，只有1.0℃和1.8℃。因此，在较高的工业厂房屋盖上采用非白色的浅色隔热防水涂料，对改善屋面面层的色泽是很有意义的。

四、不同层高的屋盖对表面温度的限制

工业厂房由于生产工艺的不同，要求厂房的高度也不同，有高有矮。同样的屋盖内表面温度，辐射到工作面（指离地面1.5米左右，人所活动的区域）的热量，随厂房高度的

增加而减少。以某工厂的实测数据为例，当屋盖内表面温度为 56.0°C ，室内气温为 36.2°C 时，辐射计离屋架下弦不同距离所测得的热辐射强度如下：

离屋架下弦的距离米	10.6	9.6	8.6	7.6	6.6
热辐射强度千卡/米 ² ·小时	27.2	29.0	30.8	33.0	35.2

其他厂房测得的结果也都相差不多。

此外，根据实测数据分析表明：内表面温度在 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的范围内，厂房的高度每增加1米，工作面上的热辐射强度就大约降低2千卡/米²·小时左右。

上述这些规律说明：屋盖内表面温度的高低是评价屋盖本身隔热性能好坏的指标。而不同高度的厂房对屋盖隔热程度的要求，应由厂房工作面所允许的热辐射强度来限制屋盖的内表面温度。

厂房中工作面允许的热辐射强度应该定多少合适呢？这是今后制定有关标准时需要研究的问题。根据我们的试验数据分析和实地访问的结果表明：当工作面最热五小时内的热辐射强度低于30千卡/米²·小时时，生产工人一般反映隔热尚可。为了使浅色降温措施能较合理地应用到轻薄屋盖上去，保证轻薄屋盖有一定的隔热效果。在目前没有统一规范的情况下，初步设想以低于热辐射强度为30千卡/米²·小时的要求来限制冷加工厂房不同层高的屋盖内表面温度：

1.当厂房层高在9~12米之间时，屋盖内表面最高温度不应超过 50°C 。相应地可选用反射率为0.35~0.45的浅色面层。

2.当厂房层高在6~9米之间时，屋盖内表面最高温度不应超过 45°C 。相应地可选用反射率为0.45~0.55的浅色面层。

3.当厂房层高在6米以下时，屋盖内表面最高温度不应超过 40°C ，相应地可选用反射率大于0.55的浅色面层。

对于层高为3米左右的民用建筑来说，其屋盖隔热要求可根据《民用建筑热工设计规程》中规定的屋盖隔热设计标准来确定：屋盖内表面最高温度不超过当地夏季室外最高温度计算值，即

$$[t_{n,mix}] \leq t_{w,mix} \quad (6)$$

因此，民用建筑的屋盖可根据这一标准，结合屋盖构造来选用不同反射效果的色泽面层。

五、屋面隔热防水涂料的研制

屋面面层浅色处理以达到减少吸收太阳辐射热，降低表面温度的办法，如果能广泛地应用到建筑工程中去，不仅能提高屋盖的隔热能力，而且可节约绝热材料，节省能源，因而具有重要的经济意义。然而，到目前为止应用甚少，其原因是国内没有供应适宜的材料，能经受春夏秋冬四季气候变迁和四周环境污染等因素的考验。为了解决推广这种浅色

面层处理的技术，由丹东轻化工研究所、建研院物理所、常州市建科所和苏州市建科所共同研制了一种新型的屋面隔热防水涂料。这种涂料既能有效地隔绝太阳辐射热，又能起防水作用。因此为广泛应用面层浅色降温的方法创造了有利条件。

(一) 技术路线的选择

性能好的屋面隔热防水涂层必须具有良好的抗裂性、耐老化性、耐污染性及较高的反射率。对于这些较难解决的问题，我们通过下列办法给予解决。

1. 抗裂性：涂膜的抗裂性是屋面防水涂料所必须具备的主要性能，目前国内屋面防水涂料的耐裂性均不理想。单层涂膜的抗裂性将随涂膜厚度而增大，但这将使涂层造价增高，当涂膜增厚到一定厚度后，其抗裂性增长缓慢，这不是行之有效的办法。我们采用了粘结性能适中的再生胶防水涂料做底层防水层，采用拉伸强度较大的太阳热反射涂料作面层，使面层与底层组成具有一定拉伸强度及弹性延伸能力的复合涂层。该复合涂层的弹性延伸能力将大大超过底层与屋面板的剪断粘着强度。当基层发生裂缝时，裂缝附近涂膜与基层的粘结被破坏，形成剥离区，从而使涂膜的抗裂性大大提高。

2. 反射率：白色涂膜的太阳光反射率较其它颜色的高。反射作用大小主要是依赖颜料粒子对太阳光的反射能力。颜料反射能力由其折射率所决定，两者关系可用(1)式表示

$$\gamma = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

γ ——反射率

n_1 ——颜料折射率

n_2 ——成膜物质的折射率

在 n_2 不变时， n_1 越大则 γ 也越高。为此，可采用高折射率的金红石型二氧化钛及其他反射率大的颜料。

3. 耐老化性：涂层的耐老化性能是涂层材性的重要标志，现采用耐老化性较好的丙烯酸树脂，尤其是苯乙烯—丙烯腈—丙烯酸丁脂三元共聚树脂因其共聚合分子内无不饱和键，故性能较稳定。据资料反应该树脂耐老化性能较好，树脂使用年限可达20年左右，此外，涂料的颜料选用耐候性好的金红石型二氧化钛和玻璃粉，该涂料具有较高的反射率，耐候性能也较好。

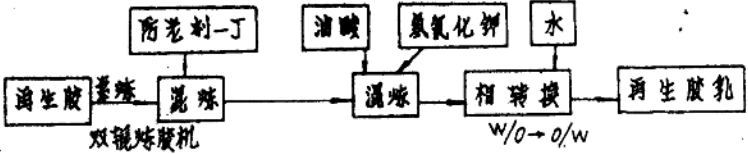
4. 耐污染性：涂层表面的耐污染性主要由涂层表面的硬度、疏水性、密实性、平滑程度等诸因素所决定。在涂料的配比中，选用一定细度的玻璃粉，以提高涂膜硬度，并加入消泡剂等使涂膜表面密实平滑，及在涂料内加入或涂层表面喷涂一定量疏水性树脂，上述方法均能有效地提高涂层的耐污染性能。

(二) 水乳性再生胶防水涂料

目前，国内较广泛使用的屋面防水材料仍以油毡、沥青为主，其他如再生胶沥青防水涂料等新材料，虽然防水效果尚可，但由于其颜色深黑，隔热性能很差。如在其涂层上做浅色涂料，成分中的沥青容易渗透到表面，影响面层对太阳光的反射，其他如抗张强度及

延伸率较小，粘接力过高等都不能满足屋面防水涂料的设计要求。为此，我们在水乳性再生胶沥青防水涂料的基础上进行了改进，利用再生胶乳配制防水涂料。

1. 再生胶水分散技术国内已有成熟的经验。其工艺流程如下：



2. 水乳性再生胶屋面防水涂料的配制

直接用再生胶乳进行屋面防水处理，耐水性并不理想，浸水后容易起泡，需在其中加入一定量的填料制成防水涂料，其强度和耐水性均有较大提高。试验情况见表 9。

再生胶乳液改性试验结果

表 9

数量 名称	编号	C-0	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6
再生胶乳(50%)		100	100	100	100	100	100	100
轻质碳酸钙		—	15	12.5	20	40	—	—
滑石粉		—	15	12.5	20	—	50	30
成膜情况		良	良	良	良	有裂纹	强度较低	良
浸水试验(72小时)		起 泡	完 好	完 好	完 好		起 泡	起 泡
浸碱试验(72小时)		起 泡	完 好	起 泡	完 好		起 泡	起 泡

试验情况表明，再生胶乳单独使用或者单独填加滑石粉或碳酸钙，其涂膜的耐水、耐碱性能均不好。其中C-1、C-2、C-3是加入混合填料，当填料较少时其耐碱性仍有问题。为了保持防水涂料良好的强度和延伸，确定水乳性再生胶防水涂料的配方如下：

水乳性再生胶涂料配方

表 10

材	料	重	量	比
再生胶乳液(50%)		100		
轻质碳酸钙		15		
滑石粉		15		
水		30		

3. 水乳性再生胶防水涂料技术性能

按上述配比所制成的防水涂料其性能见表 11：

水乳性再生胶防水涂料技术性能

表 11

序号	项 目	试 验 方 法	测 试 结 果	测 试 单 位
1	外 观		黑 色	
2	PH 值		8 ~ 10	苏州建科所
3	含 固 量	GB 1725-79	50%	苏州建科所
4	耐 碱 性	室温下饱和氢氧化钙溶液	一个月无变化	常州建科所
5	耐 热 性	80±2℃5小时	无 变 化	常州建科所
6	涂 刷 性		易	常州建科所
7	耐 裂 性	膜厚0.40毫米	≤0.6毫米	常州建科所
8	粘 结 性	“8”字模砂浆试件	2.7公斤/厘米 ²	常州建科所
9	贮存稳定性	≥0℃贮存	一年无变化	常州建科所
10	最低成膜温度	LT型成膜温度仪	0℃	杭州油墨厂
11	天然曝晒	朝南倾角32度	一年半无变化	常州建科所
12	抗拉强度		2.31公斤/厘米 ²	上海建科所
13	延 伸 率		143%	上海建科所
14	人工老化	6000瓦水冷式氙灯, 温度45±1℃相对湿度70~80%降雨周期12分/小时	384小时出现一次粉化, 二次裂纹	广州老化所

(三) 太阳热反射涂料

1. 丙烯酸丁酯—丙烯腈—苯乙烯共聚树脂合成

由于反射涂层直接暴露在大气中, 并处于太阳光的强烈照射下, 要求涂膜具有良好的耐候性、耐水性、耐碱性, 并要求有一定的抗拉强度及延伸率等。为此, 选择丙烯酸丁酯、丙烯腈、苯乙烯等单体聚合成的丙烯酸树脂(简称AAS树脂)为涂料的成膜物质。

①单体配比

AAS树脂是以丙烯酸丁酯为主要单体, 用部分丙烯腈和苯乙烯单体与其共聚, 其耐候性较纯丙烯酸丁酯要好些。所成涂膜抗拉强度、延伸率、硬度等都较好。调正三种单体的用量所合成的树脂, 其成膜情况见表12。

不同丙烯酸丁酯单体用量对涂膜影响

表 12

用 量 单 体 试验编号	丙烯酸丁酯	丙 烯 腈	苯 乙 烯	涂 膜 情 况
81—6—8	48	22	22	涂膜有裂纹
81—6—11	38	29	29	涂膜龟裂
81—6—15	60	18	18	涂膜较好
81—6—16	55	19.5	19.5	涂膜较好
81—6—22	50	23	23	涂膜较脆

上述说明决定AAS树脂成膜情况的关键是丙烯酸丁酯的用最, 当其用量低于55%, 树

脂乳液成膜不好。为了确定丙烯腈、苯乙烯的用量，在试验中适当降低了丙烯酸丁酯的数量具体见表13。

不同丙烯腈、苯乙烯单体用量对涂膜的影响 表 13

用 量 试验编号	单体	丙烯酸丁酯	丙 烯 腈	苯 乙 烯	成 膜 情 况
81-8-28		53	12	31	成膜较好强度较高
81-8-31		53	21	22	成膜较好强度较高
81-9-1		53	6	37	涂膜较软强度较低
81-9-2		53	31	12	涂 膜 较 脆
91-9-8		53	37	6	涂膜较好硬度较高

表13说明丙烯腈用量增加，树脂硬度增加，膜较脆。根据工艺要求，我们选定丙烯腈略低于苯乙烯的用量，所得到的树脂具有良好的抗张强度和延伸性，既有一定的硬度又不发脆，可以满足反射涂料的要求。

②反应温度和时间

AAS树脂的乳液聚合是在较低的温度下进行的，反应温度一般控制在70—90℃之间。反应温度过低，反应速度较慢，反应时间较长，特别是物料中会积存大量的未反应单体，往往易发生暴聚现象，造成溢料和其他事故，使整个反应过程很难控制。

由于该反应是放热反应，反应温度过高，单体和引发剂加料过快，也会产生暴聚现象。因此，反应中要严格掌握反应温度、加料速度，适当延长反应时间，使反应在较温和的条件下进行。

③分散剂的选择

分散剂对树脂的合成和稳定性都是非常重要的因素。乳液性合成树脂一般采用阴离子型和非离子型表面活性剂做乳化剂。我们在试验中发现，只采用阴离子型分散剂十二烷基硫酸钠，得到的树脂对机械振动，化学药品和贮存稳定性均较差。因此我们除了采用十二烷基硫酸钠等阴离子表面活性剂外，还添加一定数量的非离子型表面活性剂。

④AAS树脂与其它树脂的比较

以丙烯酸丁酯为主组成的AAS树脂水乳液，与国内已生产的一些其它水乳树脂比较，

AAS树脂与其它树脂耐碱性能比较

名 称	试 验 情 况	备 注
AAS乳液	浸泡饱和石灰水150小时无变化	
氯乙烯—偏氯乙烯乳液	浸泡饱和石灰水150小时无变化	
氯醋丙三元共聚乳液	浸泡饱和石灰水起大量小泡	
醋丙乳液	浸泡饱和石灰水72小时涂膜即破坏	