

水性工业涂料干燥速度的测定和数学建模分析

□ 王瑞涛^{1,2}, 魏 强², 赵 阳¹, 杜景怡¹

(1. 中远关西涂料化工(天津)有限公司, 天津 300457; 2. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 针对水性环氧涂料、水性丙烯酸涂料这两种工业涂料常见品种, 在不同喷涂膜厚、温度、相对湿度以及风速的条件下测试出干燥速度, 并根据实际测试获得的数据, 通过Lagarange插值法对干燥时间进行数学建模, 得出干燥时间 t_i 与温度 T 、湿度 W 、风速 S 的关系。为水性涂料在不同环境中实际应用干燥速度的测算提供了一种有效方法。

关键词: 水性; 工业涂料; 涂装应用; 干燥速度

中图分类号: TQ630.7⁺1

文献标识码: B

文章编号: 1006-2556(2016)09-0070-05

Determination and Mathematical Modeling Analysis of Drying Rate of Waterborne Industrial Coatings

WANG Rui-tao^{1,2}, WEI Qiang², ZHAO Yang¹, DU Jing-yi¹

(1. COSCO Kansai Paint & Chemicals (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300457, China; 2. School of Materials Science and Engineering Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The drying speeds for waterborne epoxy coatings and waterborne acrylic coatings in industrial applications were tested under different spraying film thickness, temperature, relative humidity and wind speed conditions. According to test results, mathematical modeling by Lagarange interpolation method to calculate the relation of the drying time (t_i) and temperature (T), humidity (W), wind speed (S) were established. An effective method for the calculation drying rate of the industrial coatings in different application conditions was found.

Key words: waterborne, industrial coatings, painting application, drying speed

0 前 言

近年来,随着国家对人民生活环境问题的重视,对环境污染治理力度的逐年加大。在涂料行业,国家各部门和地方政府也出台各项政策,限制对环境影响较大的传统溶剂型涂料,推广使用水性涂料等环境友好型品种。而水性涂料与溶剂型涂料在施工应用中的一大重要区别就是干燥较慢,而且水性涂料会随着干燥环境中温度、湿度、风速等各因素

的改变,干燥速度有明显的变化。这个干燥速度的变化对具有施工节奏要求的水性工业涂料有较大影响,这就需要有一个科学的方法来估算出水性涂料在不同施工环境下的干燥时间,为实际施工提供有效数据支持指导。

本论文针对水性环氧涂料、水性丙烯酸涂料这两种工业涂料常见品种,在不同喷涂膜厚、温度、相对湿度以及风速的条件下测试出干燥速度,并根据

收稿日期: 2016-05-26

作者简介: 王瑞涛(1980-),男,河北香河人。工程师,硕士研究生,主要从事水性工业涂料的技术开发工作。

实际测试获得的数据,通过Lagarange插值法对干燥时间进行数学建模,得出干燥时间 t_i 与温度 T 、湿度 W 、风速 S 的关系。

1 实验部分

1.1 实验原材料及设备

1.1.1 实验设备(见表1)

表1 实验设备
Table 1 Test Equipments

设备名称	作用	图片
无气喷涂设备	用于水性集装箱涂料的施工	
轴流送风机	用于对基材产生吹风,可调节风速	
风速侧测定仪	测定涂膜表面风速	
秒表	测定涂料干燥时间	
恒温恒湿箱	提供不同温湿度环境	
膜厚表	测定涂膜干膜膜厚	

1.1.2 基 材

本实验使用基材为500 mm×500 mm×2 mm的喷砂钢板,如图1。

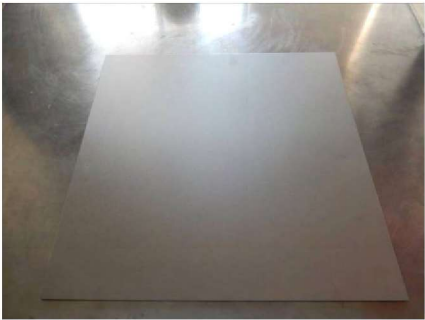


图1 测试用喷砂钢板
Fig. 1 Spraying Steel Panel for Test

1.1.3 测试涂料及主要成分(见表2)

表2 测试涂料名称及主要成分
Table 2 Test Paints and Major Compositions

涂料名称	主要成分
灰色水性环氧涂料	水性环氧乳液、胺类固化剂、钛白粉、滑石粉、去离子水等
褐色水性丙烯酸涂料	水性丙烯酸酯乳液、铁红颜料、钛白粉、滑石粉、去离子水等

注:表中涂料生产厂家为中远关西涂料化工(天津)有限公司。

1.2 实验方法

首先将风扇放入恒温恒湿箱中,调节实验所需的风速,并调节恒温恒湿箱到一定的温度、湿度。待风速、温度及湿度稳定后,将需要测试的水性涂料主剂、固化剂混合均匀,并按施工指导稀释到施工黏度,使用无气喷涂对喷砂钢板进行施工,喷涂结束后立即将钢板放入恒温恒湿箱,开始计时并观察涂料干燥情况,记录表干时间。待涂膜完全干燥后复核涂膜厚度。图2为喷砂板放入恒温恒湿箱照片。



图2 干燥速度测试过程照片
Fig. 2 Drying Speed Test Photo

2 实验结果

2.1 水性环氧涂料的干燥速度测试

按照上述实验方法,对灰色水性环氧涂料的干燥

速度进行测试,测试结果如表3所示。

表3 灰色水性环氧涂料干燥速度测试
Table 3 Test for Grey Waterborne Epoxy Coatings Drying Speed

风速/ (m/s)	湿度/%	表干时间/s							
		10 °C		20 °C		30 °C		40 °C	
		40 μm	80 μm	40 μm	80 μm	40 μm	80 μm	40 μm	80 μm
0	30	1 890	2 900	1 660	2 470	1 490	2 330	1 070	1 810
	50	2 100	3 320	1 860	2 750	1 750	2 580	1 380	2 250
	70	2 350	3 550	2 050	3 050	2 020	2 880	1 700	2 590
	90	2 520	3 930	2 250	3 500	2 370	3 590	1 920	3 190
1	30	1 060	1 390	800	1 140	950	1 420	540	910
	50	1 190	1 530	940	1 330	1 090	1 530	670	980
	70	1 300	1 720	1 020	1 420	1 150	1 620	800	1 130
	90	1 430	1 920	1 150	1 500	1 260	1 810	900	1 210
2	30	900	1 210	580	980	760	1 210	410	780
	50	1 060	1 370	770	1 150	900	1 370	500	880
	70	1 170	1 490	810	1 200	990	1 440	600	1 030
	90	1 270	1 630	920	1 350	1 100	1 570	650	1 110
3	30	710	1 030	480	790	590	1 030	320	570
	50	830	1 260	580	980	690	1 200	420	730
	70	1 000	1 400	770	1 100	860	1 310	530	900
	90	1 100	1 530	850	1 260	970	1 490	620	1 060

2.2 水性丙烯酸涂料的干燥速度测试 燥速度进行测试,测试结果如表4所示。
按照上述实验方法,对褐色水性丙烯酸涂料的干

表4 褐色水性丙烯酸涂料干燥速度测试结果
Table 4 Test Results of Drying Speed of Brown Waterborne Acrylic Coatings

风速/ (m/s)	湿度/%	表干时间/s							
		10 °C		20 °C		30 °C		40 °C	
		40 μm	80 μm	40 μm	80 μm	40 μm	80 μm	40 μm	80 μm
0	30	1 450	2 170	1 130	1 680	1 380	2 030	790	1 290
	50	1 640	2 400	1 350	1 930	1 590	2 300	1 030	1 460
	70	2 010	2 850	1 670	2 400	1 890	2 760	1 320	1 590
	90	2 330	3 320	1 860	3 000	2 190	3 120	1 590	1 890
1	30	910	1 560	730	1 190	910	1 470	460	990
	50	1 090	1 850	940	1 480	1 080	1 830	610	1 150
	70	1 410	2 220	1 110	1 710	1 270	2 170	770	1 260
	90	1 740	2 590	1 430	2 140	1 680	2 510	970	1 510
2	30	540	1 130	350	850	450	990	230	590
	50	790	1 380	520	1 080	720	1 350	320	780
	70	980	1 640	750	1 320	950	1 550	450	980
	90	1 190	1 990	1 010	1 590	1 130	1 800	780	1 170
3	30	350	760	210	480	300	550	150	370
	50	530	1 010	260	560	420	580	200	520
	70	810	1 160	420	770	750	1 080	220	660
	90	1 010	1 530	570	840	1 000	1 470	230	780

3 实验数据分析

3.1 灰色水性环氧涂料干燥速度的数学建模计算

选取灰色水性环氧涂料在不同的温度 T 、湿度 W 、风速 S 条件下,标准膜厚的干燥时间数据作为分析对象,通过Lagarange插值法对干燥时间进行数学建模,得出干燥时间 ti 与温度 T 、湿度 W 、风速 S 的关系,计算过程如下:

在温度 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、风速 $S=0\text{ m/s}$ 时,首先以湿度 W 为变量来考察干燥时间 ti 。

实际测得湿度 W 和干燥时间 ti 的对应关系如表5。

表5 实际测得湿度和干燥时间的对应关系
Table 5 Correlations between Humility and Drying Time

湿度/%	表干时间/s
30	1 890
50	2 100
70	2 350
90	2 520

根据Lagrange插值法,可以得出其一阶插值(表6)和二阶插值(表7)。

表6 湿度和干燥时间一阶插值
Table 6 One-stage Value of Humility and Drying Time

湿度/%	表干时间/s
40	1 995
60	2 225
80	2 435

表7 湿度和干燥时间二阶插值
Table 7 Second-stage Value of Humility and Drying Time

湿度/%	表干时间/s
50	2 110
70	2 330

最后得出在 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、风速 $S=0\text{ m/s}$ 时,表干时间 ti 和湿度 W 的Lagrange插值函数斜率 K :

$$K=(2\ 330-2\ 110)/(70-50)=11$$

故 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、风速 $S=0\text{ m/s}$ 时,表干时间 ti 和湿度 W 的Lagrange插值函数为:

$$ti=11W+1\ 560$$

同理 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、风速 $S=1\text{ m/s}$ 时,表干时间 ti 和湿度 W 的Lagrange插值函数为:

$$ti=6W+885$$

同理 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、风速 $S=2\text{ m/s}$ 时,表干时间 ti 和湿度 W 的Lagrange插值函数为:

$$ti=6W+747.5$$

同理 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、风速 $S=3\text{ m/s}$ 时,表干时间 ti 和湿度 W 的Lagrange插值函数为:

$$ti=7W+492.5$$

根据4组函数分析,其差商如表8所示。

表8 函数差商
Table 8 Difference Quotient of Function

斜率	一阶差商	二阶差商	三阶差商
11			
6	0.55		
6	1	1.8	
7	1.17	1.17	0.65

由于其三阶差商0.65和插值0.63近似,可认为后续的斜率变化的三阶差商均为0.65,即风速 $S\geq 3\text{ m/s}$ 时的变化对干燥速度的贡献约为恒定的,故其 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,干燥时间函数斜率系数修正后为:

$$S=0\text{ 时},K=11$$

$$S=1\text{ 时},K=6=11\times 0.55$$

$$S\geq 2\text{ 时},K=11\times 0.552\times 1.8\times (1.8-0.65)S-2=6\times (1.8-0.65)S-2$$

对于函数后缀系数见表9。

表9 函数后缀系数
Table 9 Suffix Coefficient of Function

系数	一阶差商
1 560	
885	0.57
747.5	0.84
492.5	0.65

其一阶差商加权平均数为0.69,故系数修正值: $1\ 560\times 0.69S$

因此,在 $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其干燥时间 ti 函数为:

$$S=0\text{ 时},ti=11W+1\ 560$$

$$S=1\text{ 时},ti=6W+885$$

$$S\geq 2\text{ 时},ti=6\times 1.15S-2W+1\ 560\times 0.69S$$

计算温度 T 对干燥时间 ti 的影响,以 $S=0\text{ m/s}$ 为基准,如表10。

表10 温度对干燥时间的影响
Table 10 Effect of Temperature on Drying Time

湿度/%	干燥时间/s			
	10 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$
30	1 890	1 660	1 490	1 070
50	2 100	1 860	1 750	1 380
70	2 350	2 050	2 020	1 700
90	2 520	2 250	2 370	1 920

其一阶插值见表11,二阶插值见表12,三阶插值见表13。

表11 温度和干燥时间一阶插值

Table 11 One-stage Value of Temperature and Drying Time

湿度/%	干燥时间/s			
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
40	1 995	1 760	1 620	1 225
60	2 225	1 955	1 885	1 540
80	2 435	2 150	2 195	1 810

表12 温度和干燥时间二阶插值

Table 12 Second-stage Value of Temperature and Drying Time

湿度/%	干燥时间/s			
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
50	2 110	1 857.5	1 752.5	1 382.5
70	2 330	2 052.5	2 040	1 675

表13 温度和干燥时间三阶插值

Table 13 Third-stage of Value of Temperature and Drying Time

湿度/%	干燥时间/s			
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
60	2 220	1 955	1 896.25	1 528.75

从表10~表13可以看出干燥时间 t_i 随温度的变化趋势,变化规律如表14所示。

表14 干燥时间随温度的变化规律

Table 14 Drying Time Change as Temperature

湿度/%	干燥时间/s		
	实测数据	一阶插值	二阶插值
10	2 220		
20	1 955	2 087.5	
30	1 896.25	1 925.625	2 006.6
40	1 528.75	1 712.5	1 819.1

其变化曲线斜率 $K'=(1\ 819.1-2\ 006.6)/(30-20)=-18.75$,此物理意义在于任意两个温度的干燥时间差比上温度差的比值约为-18.75。可见根据插值法得出温度 T 和干燥时间 t_i 的近似曲线方程为:

$$t_i' = -18.75T' + 2\ 381.6$$

外推 $t_i'=0$ 时, $T=127\text{ °C}$,由于上述干燥速度函数是以 $T=10\text{ °C}$ 为基础,所以干燥温度 t_i 调整系数为:

$$t_i/t_{i10\text{ °C}} = (127 - T)/(127 - 10)$$

$$\text{故 } S=0 \text{ 时, } t_i = (11W + 1\ 560)(127 - T)/117$$

$$S=1 \text{ 时, } t_i = (6W + 885)(127 - T)/117$$

$$S \geq 2 \text{ 时, } t_i = (6 \times 1.15S - 2W + 1\ 560 \times 0.69S)(127 - T)/117$$

3.2 水性丙烯酸涂料干燥速度的数学建模计算

同理可推出水性丙烯酸涂料干燥时间 t_i 方程:

$$S=0 \text{ 时, } t_i = (15.625W + 903.75)(178.2 - T)/168.2$$

$$S=1 \text{ 时, } t_i = (14.375W + 406.25)(178.2 - T)/168.2$$

$$S \geq 2 \text{ 时, } t_i = \{ [15.625 \times 0.92^S \times 0.79^{2S-3} \times 0.79(S-1)]W - 274S + 766 \} (178.2 - T)/168.2$$

4 结 语

从上述实验结果及数据分析可以得出不同的温度、风速、湿度及膜厚情况下,水性环氧涂料、水性丙烯酸面漆的表干时间,根据上述结果,其初步结论如下:

(1)保持温度、湿度不变的情况下,随着风速的增加,干燥速度加快;

(2)保持温度、风速不变的情况下,随着湿度的降低,干燥速度加快;

(3)保持湿度、风速不变的情况下,随着温度的降低,干燥速度减慢;

(4)随着膜厚的增加,干燥速度减慢。

同时,针对本实验采用的水性环氧涂料和水性丙烯酸涂料在不同施工环境下的干燥时间可以通过最后所得到的公式计算得出,为实际施工提供数据支持和指导。

