

摆杆法测定涂膜硬度的方法及评述

Pendulum Methods for Measuring Coatings Hardness

虞莹莹 (江苏鸿业涂料科技产业有限公司, 江苏常州 213016)

摘要:介绍了涂膜硬度的摆杆测定法,对双摆法、复摆法和摇摆法的测试原理、仪器构造及测定方法等进行了说明,并讨论了涂膜硬度测定时的影响因素。

关键词:涂膜硬度;摆杆测定法;硬度计

0 引言

硬度是用来衡量固体材料软硬程度的一个力学性能指标。用一个较硬的物体向另一个材料的表面压入,则该材料抵抗压入的能力叫做材料的硬度。硬度试验的方法不同,硬度值的物理意义也有所不同。涂膜硬度的测定实际上是各种性质的综合结果,不仅与底材性质和漆膜厚度有关,也与环境的温、湿度及涂层本身的弹性和黏弹性有关,测定的结果是一个比较值。涂膜硬度的大小在某种程度上还对耐磨性、抗污性、易洗性和抗冲击性等有影响。

在涂膜硬度的测定中,摆杆法是比较经典和使用时间最长的一种方法,其历史可追溯到上世纪的 30 年代。摆杆测定法又可分为双摆法、复摆法和摇摆法。双摆法为国内目前使用历史最长且仍在继续应用的一种方法,最初采用原苏联国家标准 OCT 5233-50 的 M-3 型摆杆硬度计,并以此制订了我国的部颁标准 HG2-507-57《漆膜硬度测定法(摆杆法)》。复摆法有科尼格(König)摆和珀萨兹(Persoz)摆,原分别为德国和法国的标准,并在欧洲广为使用,后提升为 ISO 标准,我国已等效采用并制订有国家标准 GB/T 1730-93《漆膜硬度测定法 摆杆阻尼试验》,该标准也包括了我国原有的双摆法。摇摆法系利用摇摆器来测定硬度,其代表性的仪器为斯华特(Sward)摇摆硬度计,美国有相应的标准 ASTM D 2134-93(2001)《用斯华特型硬度计测定有机涂层硬度》。国内以前不少单位曾引进斯华特硬度计,但实际应用的并不多。

1 双摆法

双摆法的测试原理是以一固定质量的双摆,通过摆杆

的横杆下面嵌入的两个钢珠接触漆膜表面,当摆杆在规定的摆动角范围内以一定周期摆动时,摆杆的质量通过钢珠与漆膜的接触点,对漆膜产生压迫,从而使漆膜产生抗力。根据摆杆摆幅衰减的阻尼时间,与在玻璃板上于同样摆动角范围内摆幅衰减的阻尼时间之比值即为该漆膜的硬度。

双摆硬度计由双摆、仪器座、标尺、底座等组成,为避免气流和振动,仪器还配有一个保护外罩。双摆的形状如图 1 所示。使用前应确保在未涂漆的标准玻璃板上摆杆从 5° 摆动到 2° 时的阻尼时间为 (440 ± 6) s。如果此值不在范围内,应同时调节前后摆杆上两个重锤的位置,使其符合要求。

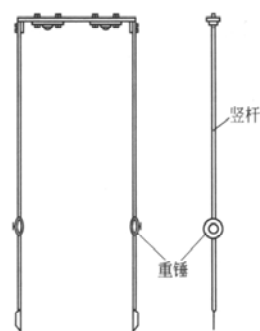


图 1 双摆示意图

测定时先将摆杆偏转至 5.5° 处,松开摆杆做自由摆动,当摆至 5° 时开始计时。记录摆幅由 5°—2° 的时间,以秒计。

$$\text{漆膜硬度按下式计算: } X = \frac{t}{t_0}$$

式中: X ——被测漆膜硬度值; t ——摆杆在漆膜上从 5°—2° 的摆动时间, s; t_0 ——摆杆在玻璃板上从 5°—2° 的摆动时间, s。

漆膜硬度以同一块试板上两次测量值的平均值表示。两次测量值之差不应大于平均值的 5%^[1]。

双摆硬度计的关键部件是双摆,当释放双摆进行自由摆动过程中,由于释放动作的轻微振动、双摆本身结构等原因会导致双摆的前后晃动,使钢珠与漆膜的接触点局部位移,另外由于摆条较长,且单薄,摆杆摆动的不稳定性,

这些因素均影响测试结果的精度。为了克服双摆的易抖动现象,原 M-3 型摆杆硬度计的摆杆,自上而下在杆中间加工成一条凹凸形的加强筋形式,以尽可能减少双杆的前后晃动,避免颤动现象。而目前不少国内的双摆硬度计,摆杆均加工成简单的扁平条形杆,虽有一定厚度,但由于摆杆较长且软,又无刚性结构,因此测试时稍一不慎,晃动现象仍时有出现,尤其是摆杆摆动的初始阶段。

2 复摆法

复摆法主要是采用科尼格(König)和珀萨兹(Persoz)两种摆杆式阻尼试验仪,摆杆的形状和尺寸见图 2 和图 3。由于其摆杆的复合结构,1981 年我国在采用 ISO 标准并制修订国家标准时,命名为复摆试验仪。复摆的优点是摆的结构稳定,刚性强,克服了双摆前后晃动的现象,提高了仪器的准确度。

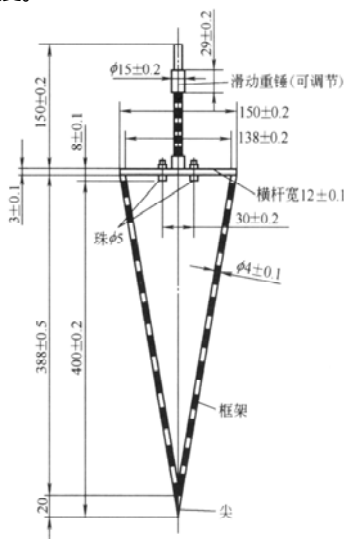


图 2 科尼格摆杆(尺寸单位: mm)

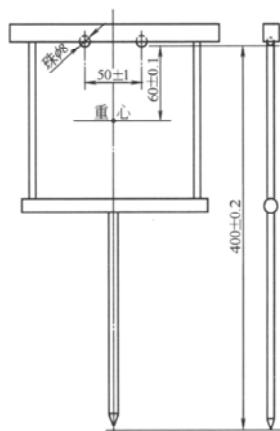


图 3 珀萨兹摆杆(尺寸单位: mm)

复摆仪的测定原理和测试方法与双摆硬度计基本相同,记录摆幅由 $6^\circ - 3^\circ$ (科尼格摆,简称 K 摆)及 $12^\circ - 4^\circ$ (珀萨兹摆,简称 P 摆)的时间,以秒计。对于有自动记录摆杆在规定角度范围内摆动次数的复摆仪,其阻尼时间可按下列式计算:

$$t = T \cdot n$$

式中: t ——漆膜阻尼时间, s; T ——摆的摆动周期, s/次; n ——规定角度范围内摆杆摆动的次数, 次。

漆膜阻尼时间是以同一块试板上 3 次测量值的平均值表示。

科尼格摆的摆动周期为 (1.4 ± 0.02) s, 珀萨兹摆的摆动周期为 (1 ± 0.001) s^[1]。

复摆的运动周期公式如下:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_1 I_1^2 + m_2 I_2^2}{g(m_1 I_1 - m_2 I_2)}}$$

式中: m_1 ——支承点下部摆的总质量, g; m_2 ——支承点上部摆的总质量, g; I_1 ——支承点下部摆长, m; I_2 ——支承点上部摆长, m; g ——重力加速度, m/s²。

从公式可知:将重锤上移, I_2 增加, 则摆动周期 T 增大, 反之, 则减小。以此来对仪器进行校正。

上述公式的复摆运动原理可以科尼格摆为例来说明,从图 4 可以看出,科尼格摆以它的支承点 O(钢珠与试板的接触点)为基准,可分为上下两个组成部分:下部分为主摆,上部分为副摆,两部分即组成复摆。为了对复摆在运动过程中作力学分析和数学推导,需将复摆简化。设: M_1 为主摆的质量集中质点,其质量为 m_1 , 距离支承点 O 的距离为 I_1 ; M_2 为副摆的质量集中质点,其质量为 m_2 , 距离支承点 O 的距离为 I_2 。经数学推导得到上述摆动周期公式。

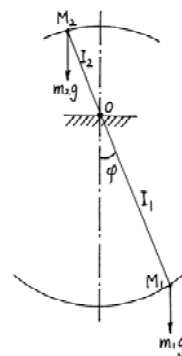


图 4 科尼格摆运动状态

已知摆的质量 m_1 、 m_2 是固定的,科尼格摆的总质量是 (200 ± 0.2) g, 重力加速度 g 在地球表面各地变化很小,对

摆动周期影响不大。因此,科尼格摆的摆动周期主要靠调节副摆上的滑动重锤来实现。

上面公式只限于理想(不计摩擦阻力)情况下成立,即摆杆在运动过程中,体系的能量(位能和动能)是守恒的。当钢珠在玻璃板上滚动时,因钢珠和玻璃板都是刚体,其滚动摩擦系数很小,此摩擦阻力可以略去不计,因此摆杆作等幅运动。当钢珠在漆膜上滚动时,由于漆膜的弹性和黏弹性,产生一定的摩擦力,使摆幅和能量逐渐减少,呈现出衰减摆动或者称为阻尼摆动^[2]。

珀萨兹摆的结构主要由一横杆与一开口框架相连,横

杆下面嵌入 2 个用作支承点的钢珠,框架下端成一个指针式的尖端。珀萨兹摆也具有复合结构,刚性强,总质量为 (500 ± 0.1) g,未提供平衡器。摆在静止时,其重心应在支点平面下方 (60 ± 0.1) mm 处,若重心位置有 1 mm 的偏差将导致硬度测定 1.6% 的误差。

珀萨兹摆在低摩擦系数的表面上操作时,摆杆有滑动倾向,由于其衰减时间比较长,这对测定较软的有机涂层的硬度很有用处,可以较灵敏地测量出柔软涂层间的微小差别^[3]。

科尼格摆、珀萨兹摆和 M-3 摆的主要参数对比见表 1。

表 1 科尼格摆、珀萨兹摆和 M-3 摆的主要参数对比

项目	科尼格摆	珀萨兹摆	M-3 摆
摆的总质量/g	200 ± 0.2	500 ± 0.1	120 ± 1
摆的总长度/mm	561 ± 1	418 ± 1	508 ± 1
钢珠支承点至摆尖长度/mm	400 ± 0.2	400 ± 0.2	500 ± 1
钢珠直径/mm	5 ± 0.005	8 ± 0.005	8 ± 0.01
钢珠硬度	HRC 63 \pm 3	HRC 59 \pm 1	HRC 64 \pm 2
钢珠间距/mm	30 ± 0.2	50 ± 1	54 ± 1
试板尺寸/(mm \times mm \times mm)	$100 \times 100 \times 5$	$100 \times 100 \times 5$	$90 \times 120 \times (1.2 \sim 2)$
摆动幅度/(°)	6 ~ 3	12 ~ 4	5 ~ 2
玻璃值/s	250 ± 10	420	440 ± 6
摆动周期/s	1.4 ± 0.02	1 ± 0.001	无规定

3 摇摆法

摇摆法是以金属环在漆膜上的来回摆动,从始点到终点所需要的摆动次数来表示漆膜的硬度。斯华特(Sward)硬度计是一个低重心摆轮,由两个直径为 100 mm 的扁平金属圆环所组成,两环通过跨距为 25 mm 的几根棒横向连接,构成一个整体。在环的下半部有两个玻璃的指示泡,以此来表示试验的开始和终了。从顶部延伸出一个带有螺纹的圆棍,棍上有一个可以提高或降低重心的小螺母,以调节摆动周期。在后环的铭牌上有游码,可左右移动以平衡摇摆器。仪器参见图 5。



图 5 斯华特硬度计

为校正仪器的摆动周期和摆动次数,可将左边指示泡调整为约 22.5° ,右边为 16° 。仪器摇摆开始后,以左边指

示泡中的气泡刚刚越过刻线为起点,开动秒表计数。仪器来回摇摆为一次,在玻璃板上应为 (50 ± 1) 次/min,把读数乘 2,即玻璃板的硬度值为 100。若摆动周期不在此范围,可以通过提升或降低小螺母来调节,摆动次数可以通过微调右边指示泡的角度来达到。

在漆膜上测定时,将摇摆式硬度计放在试样表面拨其摆动,先使左边指示泡内的气泡能超过刻线来回摆动 3 ~ 4 次,当气泡下降其边缘到达刻线时立刻开始计右边指示泡内气泡的摆动次数,一直数到右边指示泡内的气泡不超过其刻线时为止,将读数乘 2,即代表该漆膜的斯华特硬度值^[4]。

斯华特硬度计其摆动时所形成的两条轨迹约有 40 mm 长,因此与漆膜接触的面积比双摆和复摆的两个钢珠与漆膜接触的面积要大,因而摆动衰减明显,测定的灵敏度不如双摆法和复摆法的高。从实际应用来看,斯华特硬度计利用指示泡的来回摆动进行读数,观察比较方便,相对误差较少,测试速度较快,可在厂家生产中作为日常的质量控制手段。

4 摆杆法硬度测定的影响因素

以上 3 种方法在运动过程中均会受到各种因素的影响,现对以下几个方面的影响因素进行重点讨论。

4.1 摆杆本身固有性质的影响

摆杆或摆轮在运动过程中的摩擦阻力有两个：一是由摆的重力作用于支承钢珠或支承圆环对被测试板所产生的摩擦力，此摩擦力与摆(或环)的质量、钢珠的硬度和被测试板的摩擦系数大小有关，因此施于试板上的正压力，即摆与环的质量必须有严格的规定。另一个就是空气摩擦阻力，它与摆杆(或摆轮)的结构、形状、刚性、运动速度等因素有关，必须保证每个摆杆(或摆轮)其形状、材质、性能的均一性，才能保证测试结果的准确性。

4.2 重力加速度和空气密度的影响

不论是双摆、复摆或摆轮，它们均属于重力摆，重力加速度和空气密度对摆的运动有影响并与地理环境条件有关。重力加速度 g 实质上是对摆杆质量的影响，即质量 \times 重力加速度 $= mg$ ，但经计算或实测， g 在地球表面各处的变化很小。而空气密度却是随着海拔高度的升高而呈指数规律减少，尤其在地球浅表面，随着高度的升高，空气密度下降得更多。据简单计算，在海拔高度为 8 km、18 km 处的空气密度值要比海平面上的空气密度值分别减少 $1/e$ 和 $1/10$ (e 为无理数， $e = 2.718$)。因此同样的试板在沿海地区的广州、上海等地，其玻璃值为 178 次，而在兰州或其它海拔更高的地区，因空气稀薄，摆次将增加十几次。

4.3 环境温、湿度条件的影响

漆膜硬度测定时对周围环境的敏感性，更主要表现为温、湿度变化的影响。由于摆杆或摆轮是金属材料，会受到热胀冷缩的影响而改变摆杆的固有性质。另外温度会使斯华特硬度计指示泡内的气泡大小及来回速度有所变化，从而影响测试的数据。温、湿度对漆膜本身的影响更大，温度高会使漆膜变软，湿度大会使漆膜发涩，这些都会造成漆膜表面的摩擦阻力增大，导致摆杆或摆轮的摆动时间减少，因此漆膜硬度测定一般都在恒温恒湿室内进行。

4.4 操作手法准确性的影响

仪器在使用前如果没有认真地进行水平调整，会造成摆杆平衡位置与标尺的零位不符。若摆杆零位偏向标尺左侧，则同样振幅范围摆杆的阻尼时间将有所减少；反之，则增加。另外摆杆法硬度测定时，测量人员必须自始至终用肉眼观察标尺的刻度或计数，当样品数量较多，工作时间过长，容易造成疲劳，再加上不同人视力之差别，观测位置及角度的不同，对测试结果的准确性均会有所影响。为了消除人为误差因素，仪器发展方向都是采用光电计数装置，可自动记录试验数据和监视仪器工作状态。并且仪器均应放置在稳固的试验台上，以避免外界的一切干扰震动。试验除了保证控制的温、湿度条件外，还应在无气流情况下进行，一般仪器均配备有保护外罩。

5 结语

双摆法、复摆法和摇摆法 3 种方法虽然测试原理相同，但是在仪器的结构、尺寸、摆动周期及摆幅等方面各不相同，加之摆杆与涂层之间相互作用的复杂性，因此这 3 种方法测得的结果不可能建立统一的换算关系。在实际应用中，可根据产品标准规定的仪器和方法进行硬度指标的测试，并在以后的测试中继续使用同一方法，以便于产品数据的比较和得出有效的试验结论。

参考文献

- [1] 全国涂料和颜料标准化委员会. GB/T 1730-1993 中华人民共和国国家标准[S]//化学工业标准汇编. 涂料和颜料. 上. 北京：中国标准出版社，2003：38-44.
- [2] 制订国家标准“GB 1730-81 漆膜硬度测定法——摆杆阻尼试验”编制说明[R]. 化工部涂料研究所，1981.
- [3] ISO 1522：1998 色漆和清漆——摆杆阻尼试验[S]. 日内瓦：国际标准化组织，1998.
- [4] ASTM D 2143-93(2001)用斯华特型硬度计测定有机涂层硬度[S]. 费城：美国材料试验协会，2001.

第 3 届氟树脂及氟涂料培训班预告

中国化工学会氟涂料专委会先后于 2005 年 1 月、2007 年 1 月在常州召开第 1、第 2 届氟树脂及氟涂料培训班，由于每届培训内容均能在注重大家关注的热点问题基础上，理论联系实际全方位地介绍氟树脂及氟涂料有关内容，因此受到氟行业的广泛好评。

在广大会员单位的要求下，氟委会为了进一步提高氟行业从业人员的整体素质，拟定于 2008 年 1 月召开第 3 届氟树脂及氟涂料培训班。

联系单位：中国化工学会氟涂料专委会

地 址：江苏省常州市白云路北港路口（213016）

联系人：杜安梅(0519-83274974) 陈红(0519-83299523)

网 址：www.asiaccoat.com

传真：0519-83273017 E-mail:adu@asiacoat.com