



# 应用于水运工程混凝土涂层 测厚仪的精度分析

刘姝麟，廖家艳，陆秋平

(广西交通集团有限公司，广西 南宁 530007)

**摘要：**针对显微镜测厚仪和超声波涂层测厚仪在检测水运工程混凝土涂层厚度时都无法达到相关标准精度要求的问题，通过调研国内外相关规范对超声波涂层测厚仪精度的要求，选定 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 与 $\pm 5\%$ 两种精度要求，对实际厚度为 53、129、252、492、2 349  $\mu\text{m}$  的标准片进行厚度测量，并分析测量偏差值与精度要求间的关系。结果表明， $\pm 5\%$ 的精度要求更适用于水运工程混凝土涂层的厚度检测。

**关键词：**混凝土防腐涂层；涂层干膜测厚仪；超声波测厚仪；检测；精度

中图分类号：TH 873；U 654

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)04-0025-05

## Analysis for accuracy of coating thickness gage applied to concrete in port and waterway engineering

LIU Shu-lin, LIAO Jia-yan, LU Qiu-ping

(Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

**Abstract:** For the problem that the detection accuracy of the concrete coating thickness in port and waterway engineering by the microscope and ultrasonic dry-film thickness gages cannot meet the accuracy requirements of relevant standards, we investigate the accuracy requirements of ultrasonic coating thickness gauge in relevant specifications at home and abroad, select two accuracy requirements of  $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$  and  $\pm 5\%$ , measure the thickness of standard samples with the actual thickness of 53  $\mu\text{m}$ , 129  $\mu\text{m}$ , 252  $\mu\text{m}$ , 492  $\mu\text{m}$  and 2 349  $\mu\text{m}$ , and analyze the relationship between measurement deviation and accuracy requirements. The results show that the accuracy of  $\pm 5\%$  is more suitable for the thickness detection of concrete coating in port and waterway engineering.

**Keywords:** concrete coating; dry-film thickness gage; ultrasonic coating thickness gage; inspection; accuracy

混凝土耐久性不足可能导致结构在未达到设计使用年限时即发生腐蚀破坏，出现功能降低而影响使用等问题。水运工程尤其是海港码头等工程所处的环境比陆上工程恶劣，耐久性问题突出。混凝土表面涂层作为一种能够有效提高混凝土耐久性的技术手段，已经成为目前最为经济有效的防腐措施之一<sup>[1-2]</sup>。随着混凝土涂层材料在水运工程上的广泛应用，涂料的性能测试和质量评价越来越成为参建单位关心的问题。《海港工程混凝土

结构防腐蚀技术规范》<sup>[3]</sup>《水运工程混凝土结构实体检测技术规程》<sup>[4]</sup>（简称《实体检测规程》）和《水运工程水工建筑物检测与技术评估规范》<sup>[5]</sup>等水运工程相关规范对混凝土涂层干膜厚度提出了要求，将混凝土表面涂层的干膜厚度作为混凝土表面涂层质量判定的标准之一。

### 1 两种检测方法

测厚仪测试法是现场检测涂层干膜厚度的重

要技术手段。目前适用于混凝土涂层厚度检测的方法有两种,《实体检测规程》和《水运工程材料试验规程》<sup>[6]</sup>中给出混凝土涂层干膜厚度可采用超声波涂层测厚仪或涂层显微镜式测厚仪检测,明确仪器量程为 0~2 000 μm,精度为±2 μm。

1.1 涂层显微镜测厚仪

涂层显微镜测厚仪需要对涂膜进行划刻,是破坏性的试验方法。该试验方法是用一定角度的切割刀具从混凝土涂层至底材切出一个“V”形缺口,通过带有刻度盘的显微镜测量缺口处涂层的干膜厚度。每套显微镜测厚仪配备 3~4 种不同刀口角度的刀具,切割刀具与刻度系数一一对应,刻度盘读数与刻度系数相乘的结果即为干膜厚度。

目前市面上常见涂层显微镜测厚仪的性能参数大同小异,以德国品牌 ERICHSEN 的 PIG455 型和荷兰品牌 TQC 的 SP1100 型为例,仪器的技术参数见表 1。可以看出,使用的刀具刀口角度越小,对应的测量范围越小,刻度系数越小,即精度越高。

表 1 两种不同品牌涂层显微镜测厚仪的技术参数				
品牌	仪器型号	刀口角度/(°)	测量范围/μm	刻度系数/μm
ERICHSEN	PIG455	45.0	20 ~ 2 000	20
		26.6	10 ~ 1 000	10
		5.7	2 ~ 200	2
TQC	SP1100	45.0	20 ~ 1 800	20
		26.6	10 ~ 900	10
		14.0	5 ~ 450	5
		5.7	2 ~ 180	2

要满足规范对仪器的精度要求,最小刻度系数 2 μm 对应的测量范围只有 2~200 μm;要满足规范对仪器的测量范围,可选取测量范围 20~2 000 μm 的刀具,但对应的刻度系数为 20 μm。经调研,南方地区海港工程的混凝土涂层干膜厚度设计值范围为 360~430 μm,实际涂刷厚度值范围为 150~650 μm。对于 PIG455 型的涂层显微镜测厚仪,可选用测量范围 10~1 000 μm 刻度盘的相应刀具进行混凝土涂层厚度的测量,精度为 10 μm。因此无论从理论或实际应用分析,常见的涂层显微镜测量仪不能同时满足《实体检测规程》对于混凝土涂层厚度测量仪器“量程 0~2 000 μm,

精度±2 μm”的要求。

1.2 超声波涂层测厚仪

超声波涂层测厚仪应用的是非破坏性的超声波原理,是水运工程混凝土涂层干膜厚度现场检测常用的测量仪器。使用时,应选择合适的量程范围,将少量耦合剂涂抹于待测涂层表面,将探头平放在表面并按下就能得到该测点的厚度值。

目前市面上常见的适用于水运工程的混凝土涂层超声测厚仪有美国 DeFelsko 的 PosiTectoer200C 型、英国 Elcometer 的 T500C1 型和德国 ElektroPhysik 的 QuintSonic7 型,仪器参数对比见表 2。可以看出,这些仪器都能满足规范中最大测量范围 2 000 μm 的要求,但测量范围的下限和精度均不能满足规范要求。对于常见的南方沿海水运工程,以涂层厚度 500 μm 为例计算,这些仪器的测量精度分别为±17、±10 与±6 μm。则在正常使用范围内,市面上常见的超声波涂层测厚仪均不能满足规范精度±2 μm 的要求。

表 2 3 种不同品牌超声波涂层测厚仪的技术参数			
品牌	仪器型号	测量范围/μm	精度/μm
DeFelsko	PosiTectoer200C	50 ~ 3 500	±(2+3% <i>d</i> )
Elcometer	T500C1	150 ~ 2 500	±2% <i>d</i> 或±10
ElektroPhysik	QuintSonic 7	10 ~ 7 000	±(1+1% <i>d</i> )

注：*d* 为仪器测量时所显示的数值。

综上,应用于水运工程混凝土涂层干膜厚度检测的仪器,无论是涂层显微镜测厚仪还是超声波涂层测厚仪都无法同时满足《实体检测规程》中“量程 0~2 000 μm,精度±2 μm”的技术要求。

2 不同标准的精度要求

涂层干膜厚度的检测中,超声波涂层测厚仪因为其无损检测及方便快捷的优势在水运工程实体检测中的应用较广<sup>[7]</sup>。但混凝土由于内部不均匀、表面多孔和粗糙的特性,加上多次的涂装工艺过程等因素,均会影响超声法的检测结果<sup>[8]</sup>。行业规范的精度要求对于仪器本身特性又过于严苛,因此有必要对超声波测厚仪的技术参数进行研究,确定更实际、更合适的仪器精度要求。

2018 年 3 月交通运输部发布的《水运工程试验检测仪器设备检定/校准指导手册》<sup>[9]</sup> 中项目类别混凝土与钢筋表面防腐中超声波测厚仪检定依据为 JJF 1126—2004《超声波测厚仪校准规范》<sup>[10]</sup>。而《超声波测厚仪校准规范》适用于分辨力为 0.1 和 0.01 mm 超声波测厚仪的校准，该类测厚仪主要用于钢材、塑料、锦纶等材质的壁厚以及板材厚度的测量，显然不能用作微米级的混凝土涂层测厚仪的检定。实际上现阶段国内并没有相应的超声波涂层测厚仪检定标准，计量机构则一般选用《磁性、电涡流式覆层厚度测量仪》作为该类仪器的检定技术文件<sup>[11]</sup>，但对于原理不同的仪器检定规范不能混用。该规范中磁性和涡流涂层测厚仪的示值允许误差是用实际厚度的百分数来表示，如准确度级别 A 级的仪器示值最大允许误差为 $\pm(0.5\text{ }\mu\text{m}+1\%H)$ ， $H$  为标准厚度片的实际厚度值( $\mu\text{m}$ )。

现行标准《色漆和清漆漆膜厚度的测定》<sup>[12]</sup>，涂层干膜厚度检测方法囊括了机械法、光学法、磁性法等 7 种方法。规范对超声波测厚仪精密密度要求为系统误差为 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ ，再现性 5%。《漆膜厚度的测定超声波测厚仪法》并未直接给出超声波测厚仪的允许精度与误差值<sup>[13]</sup>，在仪器精密密度章节中只是给出了涂膜厚度 22~100  $\mu\text{m}$  的试样在不同基材上测试的重复性限和再现性限的检测示例供参考，示例的涂层厚度对于水运工程混凝土涂层来说不具参考性。而美国防护涂料协会标准 *Measurement of Dry Coating Thickness Using Ultrasonic Gages*<sup>[14]</sup>，其中详细说明混凝土涂层干膜厚度的检测方法、频率与结果判定的规程，明

确了对于仪器精度的要求：在非金属基材上涂膜厚度的检测，仪器的精度要求为 $\pm 5\%$ 。

国内外各规范对于超声波涂层测厚仪的精度要求的技术参数不同，要深究每种误差或精度表征方法之间的联系过于复杂。考虑各规范版本发布的时间、精度表征方式的直观性和对比的可操作性，本文选取行业规范《实体检测规程》的 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 与美国防护涂料协会标准的 $\pm 5\%$ 做对比。

3 标准片厚度测试试验

3.1 试验方案

为验证 $\pm 5\%$ 的精度要求是否更符合水运工程混凝土涂层厚度检测的实际应用，以 PosiTector200C 型超声波涂层测厚仪为例进行试验。仪器测量范围为 50~3 500  $\mu\text{m}$ ，仪器使用说明精度为 $\pm(2\text{ }\mu\text{m}+3\%d)$ 。用涂层测厚仪对 5 个仪器自带标准片进行厚度测量，标准片经检定合格，厚度分别为 53、129、252、492、2 349  $\mu\text{m}$ 。基底选用自制水泥净浆试件，尺寸为 10 cm×10 cm×0.5 cm (长×宽×厚)。将标准片置于试件表面，探头表面涂抹适量耦合剂对标准片进行测量。

3.2 试验数据

考虑到默认的限值适用于大部分测量情况，加上标准片厚度跨度较大，不对超声波仪器的上下限值进行调整，默认下、上限值分别为 51、3 759  $\mu\text{m}$ 。分批次对每个标准片进行重复测量。每批次每个标准片随机测量 5 次，共测量 3 个批次，每个标准片共测量 15 次。标准片的实际厚度值与测量值按升序排列见表 3，对应的实测值偏差见表 4。

表 3 标准片实际厚度与实测结果

标准片	实际厚度/ $\mu\text{m}$		1~15 次测试值/ $\mu\text{m}$														平均值/ $\mu\text{m}$	标准差/ $\mu\text{m}$
A	53	53	56	57	58	58	59	59	60	60	63	65	65	67	72	74	62	6
B	129	118	119	120	121	122	124	126	127	128	130	133	136	136	138	140	128	7
C	252	229	230	230	232	244	246	248	248	251	251	252	256	256	261	264	247	11
D	492	468	475	478	480	481	482	484	486	489	489	493	507	509	514	515	490	15
E	2 349	2 339	2 342	2 345	2 349	2 350	2 353	2 355	2 364	2 373	2 375	2 389	2 419	2 420	2 425	2 430	2 375	33

表 4 标准片实测偏差

测次	测量偏差值/ $\mu\text{m}$					测量相对偏差/%				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	0	-11	-23	-24	-10	0	-8.5	-9.1	-4.9	-0.4
2	+3	-10	-22	-17	-7	+5.7	-7.8	-8.7	-3.5	-0.3
3	+4	-9	-22	-14	-4	+7.5	-7.0	-8.7	-2.8	-0.2
4	+5	-8	-20	-12	0	+9.4	-6.2	-7.9	-2.4	0
5	+5	-7	-8	-11	+1	+9.4	-5.4	-3.2	-2.2	0
6	+6	-5	-6	-10	+4	+11.3	-3.9	-2.4	-2.0	+0.2
7	+6	-3	-4	-8	+6	+11.3	-2.3	-1.6	-1.6	+0.3
8	+7	-2	-4	-6	+15	+13.2	-1.6	-1.6	-1.2	+0.6
9	+7	-1	-1	-3	+24	+13.2	-0.8	-0.4	-0.6	+1.0
10	+10	+1	-1	-3	+26	+18.9	+0.8	-0.4	-0.6	+1.1
11	+12	+4	0	+1	+40	+22.6	+3.1	0	+0.2	+1.7
12	+12	+7	+4	+15	+70	+22.6	+5.4	+1.6	+3.0	+3.0
13	+14	+7	+4	+17	+71	+26.4	+5.4	+1.6	+3.5	+3.0
14	+19	+9	+9	+22	+76	+35.8	+7.0	+3.6	+4.5	+3.2
15	+21	+11	+12	+23	+81	+39.6	+8.5	+4.8	+4.7	+3.4
绝对值的平均值	9	6	9	13	29	16.5	4.9	3.7	2.6	1.2

3.3 试验结果分析

1)表 3 中 A 标准片的测试平均值为 62  $\mu\text{m}$ ，表 4 中 A 标准片的 15 个测点值中的最大偏差值为 +21  $\mu\text{m}$ ，对应的相对偏差为+39.6%。因为该标准片厚度小且接近测量范围下限，导致测量结果不准确<sup>[15]</sup>。而实际检测过程中很少出现混凝土涂层小于 100  $\mu\text{m}$  的情况，因此虽然在 53  $\mu\text{m}$  附近测量结果偏差较大，但从实际应用角度可以忽略该厚度段的测量。

2)根据表 4 中 B~E 标准片的测量偏差值可以看出，偏差值随着标准片厚度的增大而增大，偏差绝对值的平均值由 6  $\mu\text{m}$  增加至 29  $\mu\text{m}$ 。但 A~E 标准片的相对偏差绝对值的平均值随标准片厚度的增加而减小，由 16.5%、4.9%、3.7%、2.6% 逐级减少至 1.2%，说明待测涂层越厚，检测结果的相对偏差越小、精度越高。

3)表 4 中 B~E 标准片的测量偏差值结果，60 个测点偏差值能满足规范要求“ $\leq \pm 2 \mu\text{m}$ ”的测点数 9 个，仅占总点数的 15.0%；而对应的相对偏差百分比结果，60 个测点中能满足“ $\leq \pm 5\%$ ”的测点数 47 个，占总点数的 78.3%。其中 252  $\mu\text{m}$  标准片的测量满足“ $\leq \pm 5\%$ ”的测点数占总点数的 73.3%，而 492 及 2 349  $\mu\text{m}$  标准片的相对偏差结

果均 $\leq \pm 5\%$ 。因此从实用角度来看，在水运工程混凝土涂层厚度的检测中，超声波测厚仪完全能满足美国防护涂料协会标准对于仪器精度的要求。

3.4 显微镜涂层测厚仪的适用性

$\pm 5\%$  的精度同样适用于显微镜涂层测厚仪。对实际厚度 150~650  $\mu\text{m}$  的涂层选用测量范围为 10~1 000  $\mu\text{m}$  的刀具，相应的刻度系数为 10  $\mu\text{m}$ ，相对偏差为 1.5%~6.7%。实质上 200  $\mu\text{m}$  涂层的测量精度已能达到 5%，因此对于厚 200~1 000  $\mu\text{m}$  的涂层，显微镜涂层测厚仪能满足精度 $\pm 5\%$ 的要求。

4 结论

1)市面上常见的应用于水运工程混凝土涂层干膜厚度检测的仪器无法同时满足水运规范“量程 0~2 000  $\mu\text{m}$ ，精度 $\pm 2 \mu\text{m}$ ”的技术要求。

2)标准片厚度的测量试验结果表明，超声波测厚仪测量的绝对偏差值随着涂层厚度的增大而增大，相对偏差值随涂层厚度的增加而减小。

3)建议水运工程混凝土涂层测厚仪精度要求放宽至 $\pm 5\%$ 。

参考文献：

[1] 中交四航工程研究院有限公司,中交水运规划设计院



有限公司.水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[2] 倪静姁, 汤雁冰, 王胜年, 等.混凝土涂层保护效果的暴露试验及实体调研研究[J].材料保护, 2018, 51(12): 148-151, 156.

[3] 广州四航工程技术研究院.海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范: JTJ 275—2000[S].北京: 人民交通出版社, 2001.

[4] 中交天津港湾工程研究院有限公司.水运工程混凝土结构实体检测技术规程: JTS 239—2015[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[5] 交通运输部天津水运工程科学研究院, 中交四航工程研究院有限公司.水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

[6] 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 中交上海三航科学研究院有限公司.水运工程材料试验规程: JTS/T 232—2019[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

[7] 刘彬, 董世运, 徐滨士, 等.超声无损检测在再制造涂层质量评价中的研究与应用[J].无损检测, 2010, 32(3): 196-200.

[8] 秦铁男, 马化雄, 陈韬, 等.混凝土涂层超声波测厚的不确定度评定[J].建筑材料学报, 2016, 19(1): 177-180.

[9] 交通运输部.水运工程试验检测仪器设备检定/校准指导手册[R].北京: 交通运输部, 2018.

[10] 天津市计量技术研究院, 中国计量科学研究院.超声波测厚仪校准规范: JJF 1126—2004[S].北京: 中国计量出版社, 2005.

[11] 北京市计量检测科学研究院, 天津市计量技术研究所, 中国计量科学研究院.磁性、电涡流式覆层厚度测量仪检定规程: JJG 818—2005[S].北京: 中国计量出版社, 2006.

[12] 中化建常州涂料化工研究院.色漆和清漆漆膜厚度的测定: GB/T 13452.2—2008[S].北京: 中国标准出版社, 2008.

[13] 江苏兰陵高分子材料有限公司, 广州合成材料研究院有限公司, 标格达精密仪器(广州)有限公司, 等.漆膜厚度的测定超声波测厚仪法: GB/T 37361—2019[S].北京: 中国标准出版社, 2019.

[14] The Society for Protective Coatings. Measurement of dry coating thickness using ultrasonic gages: SSPC-PA9 (2018)[S]. Pittsburgh: The Society for Protective Coatings, 2018.

[15] 孙元媚.混凝土涂层测厚仪门槛值的设置[J].山东交通学院学报, 2009, 17(4): 79-82.

(本文编辑 王璁)

(上接第 19 页)

4)对于软土地质,土楔破坏角在 20°~25°之间时,横移锚抓地力最小。

5)三角宽鳍横移锚在软土地质下的锚抓力系数为 14 左右,故大型绞吸船可根据横移绞车额定拉力确定横移锚质量,4 500 m<sup>3</sup>/h 大型绞吸船通常可选用 9 t 三角宽鳍横移锚。

参考文献:

[1] 中交上海航道局有限公司.疏浚技术培训教材[R].上海: 中交上海航道局有限公司, 2001.

[2] 闫澍旺, 任宇晓, 孙立强, 等.砂土中的拖锚模型试验及锚抓力计算方法研究[J].中国造船, 2016, 57(1): 103-115.

[3] 蒋治强, 于洋.DA-1 型船用大抓力锚[J].航海技术, 2014, (2): 1-2.

[4] LELIEVRE B, TABATABAEE J.The performance of marine anchors with planar flukes in sand[J].Canadian geotechnical journal, 1981, 18(4): 520-534.

[5] 中交上海航道局有限公司.“新海豚 2”轮施工工艺[R].上海: 中交上海航道局有限公司, 2017.

(本文编辑 王璁)