

喷涂聚脲弹性体技术及其在材料保护领域的应用

黄微波 王宝柱 徐德喜 刘培礼 刘东晖 陈酒姜 杨宇润

(海洋化工研究院)

吕 平

(青岛建筑工程学院)

摘 要 “喷涂聚脲弹性体”(Spray Polyurea Elastomer 以下简称 SPUA)技术是国外近十年来继高固体份涂料、水性涂料、光固化涂料、粉末涂料等低(无)污染技术之后,为适应环保需求而研制、开发的一种新型无溶剂、无污染的绿色施工技术,在我国研发成功后,以其优异的综合性能和先进的施工工艺,引起了国内材料界和工程界的极大关注。本文从发展简史、化学原理、关键技术、材料性能、应用领域等方面,较系统、全面地介绍该技术的发展过程。

关键词 喷涂 聚脲 聚氨酯 弹性体 材料保护

前 言

“喷涂聚脲弹性体”(Spray Polyurea Elastomer 以下简称 SPUA)技术是国外近十年来,继高固体份涂料、水性涂料、光固化涂料、

粉末涂料等低(无)污染技术之后,为适应环保需求而研制、开发的一种新型无溶剂、无污染的绿色施工技术,与传统的低(或无)污染涂装及喷涂聚氨酯技术相比见表 1。

表 1 环保型施工技术之比较

项 目 \ 类 别	高固体份涂料	水性涂料	UV 涂料	粉末涂料	SPUA 材料
VOC 含量(g/l)	50 ~ 150	0 ~ 150	0	0	0
施工方法	常规	常规	新型	新型	新型
防腐性能	好	一般	一般	优秀	优秀
适用底材	不限	不限	木材为主	金属	不限
施工环境	不限	0 以上	厂房内	厂房内	不限
一次成膜厚度	< 150 μ m	< 100 μ m	< 50 μ m	< 800 μ m	无限制

SPUA 技术具有以下优点:

1. 不含催化剂,快速固化,可在任意曲面、斜面及垂直面上喷涂成型,不产生流挂现象,5 秒钟凝胶,1 分钟即可达到步行强度。
2. 对水分、湿气不敏感,施工时不受温度、湿度的影响。
3. 双组分,100%固含量,对环境友好;

可以 1:1 体积比进行喷涂或浇注,一次施工达到厚度要求,克服了以往多层施工的弊病。

4. 优异的物理性能,如抗张强度、柔韧性、耐磨性等。
5. 具有良好的热稳定性,可在 150℃ 下长期使用,可承受 350℃ 的短时热冲击。
6. 可加入各种颜、填料,制成不同颜色

的制品。

7. 配方体系任意可调,手感从软橡皮(邵 A30)到硬弹性体(邵 D65)。

8. 可引入短切玻璃纤维对材料进行增强。

9. 使用成套喷涂、浇注设备,施工方便,效率高。

10. 设备配有多种切换模式,既可喷涂,也可浇注。

可以这样讲:SPUA 技术是一种新型“万能”(国外称之为 versatile)涂装技术,它全面突破了传统环保型涂料技术的局限,因此,使得该技术一问世,便得到了迅猛的发展。

一、发展简史

喷涂聚氨酯/聚脲弹性体技术是在反应注射成型(Reaction Injection Molding 英文缩写 RIM)技术的基础上,于七十年代中后期发展起来的。德国、美国是喷涂弹性体技术的发源地,最早开发喷涂聚氨酯(简称 SPU)以及聚氨酯/聚脲(简称 SPU/SPUA)弹性体技术的是 Bayer、BASF、Futura 和 Uniroyal 公司。进入八十年代中期, Texaco (即现在的 Huntsman)公司在化学家 Dudley J. Primeaux

先生的带领下,在其 Austin 的实验室,率先研发成功喷涂聚脲弹性体 (SPUA) 技术,并于 1989 年首次发表研究论文,引起轰动^[1]。1991 年该技术在北美地区投入商业应用,立即显示出其优异的综合性能,受到用户欢迎;经过不断总结和提高,目前,北美地区已逐步淘汰 SPU/SPUA 体系,正全面推广 SPUA 体系^[2-6]。澳大利亚、日本和韩国分别于 1993、1995 和 1997 年引进该技术,并相继投入商业应用。由于研发 SPUA 技术配方

和工艺的难度很大,澳大利亚及东南亚国家基本上采取了从设备到原料全盘进口、或者与美方合资建厂的做法。

与澳大利亚及东南亚国家做法不同的是:在我国,海洋化工研究院于 1997 年只引进了关键的喷涂设备,靠自己的力量研发出具有自主知识产权的 SPUA 技术配方和施工工艺。目前,已成功推出 SPUA - 102 防水耐磨涂料、SPUA - 202 防滑铺地材料、SPUA - 301 阻燃装饰涂料、SPUA - 403 道具保护材料、SPUA - 502 耐磨衬里材料、SPUA - 601 柔性防撞材料六大系列产品,自 1999 年以来,已在青岛、北京、上海、广州、大连、沈阳等地区成功应用^[8~14],受到用户很高的评价,认为是传统涂料技术的革命性飞跃。

二、化学原理

正如聚氨酯/聚脲 RIM 技术的发展经历了纯聚氨酯(PU)、聚氨酯/聚脲(PU/PUA)、纯聚脲(PUA)三个阶段一样,喷涂聚氨酯(聚脲)弹性体技术也经历三个阶段(见表 2)。在体系 中,为了提高反应活性,必须加入催化剂;体系 则完全不同,它使用了端氨基聚醚和胺扩链剂作为活泼氢组分(以下简称 R 组分),与异氰酸酯组分(以下简称 A 组分)的反应活性极高,无需任何催化剂,即可在室温(甚至 0 以下)瞬间完成反应,从而有效地克服 SPU (包括 SPU/SPUA)弹性体在施工过程中,因环境温度和湿度的影响而发泡、造成材料性能急剧下降的致命缺点。

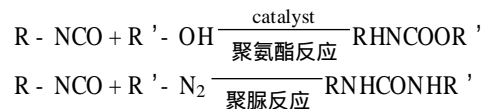


表 2 喷涂聚氨酯/聚脲弹性体技术的发展历程

阶段	体系	异氰酸酯组分	树脂组分	主要优/缺点
第一代	SPU	MDI 基	EO 封端多元醇、二醇扩链剂、催化剂	优点:价廉 缺点:对水敏感,极易发泡;力学性能差等。

阶段	体系	异氰酸酯组分	树脂组分	主要优/缺点
第二代	SPU/SPUA	MDI 基	EO 封端多元醇、芳香二胺扩链剂、催化剂	优点:价格适中 缺点:发泡、力学性能一般。
第三代	SPUA	MDI 基 m-TMXDI 基	端氨基聚醚、芳香二胺扩链剂。 端氨基聚醚、脂肪二胺扩链剂。	优点:对温、湿度不敏感,力学性能好,耐老化性能突出。 缺点:价高

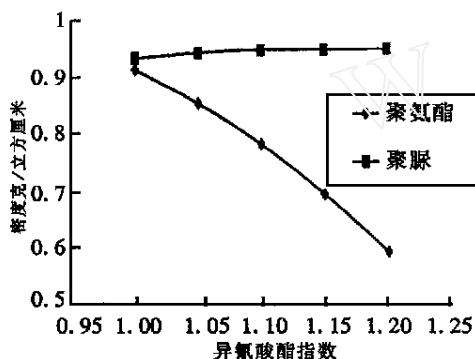


图 1 喷涂材料的密度随体系 NCO 指数的变化

图 1 是相对湿度在 85% 条件下,SPU 和 SPUA 材料密度随体系 NCO 指数的变化情况,从中可以看出:SPUA 材料对环境温、湿度有很强的容忍度,很受户外施工人员的欢迎。

三、关键技术

喷涂聚脲弹性体技术的关键主要有两方面:端氨基聚醚、液态胺扩链剂与异氰酸酯的反应原理及其工业化;喷涂所需要的专业化设备。

1. 原料

1.1 端氨基聚醚

Texaco(即现在的 Huntsman)公司在世界上率先开发成功了端氨基聚氧化丙烯醚,为喷涂聚脲弹性体技术的研究和开发奠定了“软件”基础。该产品(商品牌号为 JEFFAMINE)有二个系列见表 3:即三官能度的 T 系列(见图 2)和二官能度的 D 系列。

表 3 JEFFAMINE 系列聚醚

牌 号	官能度	分子量
T-5000	3	5000
T-3000	3	3000
T-4030	3	4000
D-4000	2	4000
D-2000	2	2000
D-2300	2	2300

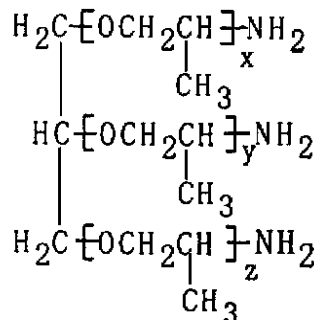


图 2 T 系列聚醚分子结构

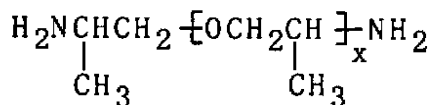


图 3 D 系列聚醚分子结构

1.2 液态胺扩链剂

SPUA 材料中常用的液态胺类扩链剂见表 4。在 R 组分中,最常用的液态胺扩链剂是二乙基甲苯二胺(diethyltoluene diamine 英文缩写 DETDA),制造商有美国 AlbemarleTM 公司(商品牌号为 ETHACURE 100)和 Lonza 公司(商品牌号为 DETDA 80)。DETD A 是一

种芳香族伯胺,其化学活性非常高,与 A 组分的反应速度极快,习惯上称之为“快体系”(fast - system),该体系因凝胶时间非常短,可实现 在垂直壁、天花板上喷涂,不产生流挂; 在平面上喷涂,可人为制造防滑粒子,很适合于一些要求尽快投入使用的场合,如停车场、隧道、游泳池、网球场、大型娱乐场所等。对于一些外观要求十分平整、光亮,或者

需要在 SPUA 材料表面铺撒防滑粒料(如金刚砂、橡胶粒、石英砂等)的场合,可选用不含 DETDA 的“慢体系”(slow - system),该体系中的胺扩链剂使用化学活性较低的仲胺或位阻型伯胺,以降低反应速度,延长凝胶时间,保证有足够的时间 使喷涂材料流平; 铺撒防滑粒料。

表 4 SPUA 材料中常用的液态胺类扩链剂

化学名称	商品牌号	制造商	备注
二乙基甲苯二胺	ETHACURE 100 DETD80	Albemarle™Co. Lonza	伯胺
二甲硫基甲苯二胺	ETHACURE 300	Albemarle™Co.	位阻型伯胺
N,N'-二烷基甲基二苯胺	UNILINK 4200	UOP Inc	伯胺

在 SPUA 技术中,A 组分又称为半预聚体(quasi - prepolymer),它是由 MDI 或 MDI 的改性物与聚合物二元或三元醇反应制得; R 组分又称为色浆,它是由 JEFFAMINE 系列聚醚、液态胺类扩链剂、颜填料、助剂等组成。因此,可根据用户的需要,通过调整 A、R 组分中软、硬段的比例,制得不同弹性、抗张强度及硬度的 SPUA 材料。表 5 是一个典型硬质 SPUA 材料的配方:

表 5 典型硬质 SPUA 材料配方

A 组分		R 组分	
改性 MDI	60	JEFFAMINE 聚醚	61.1
PPG - 2000	40	胺扩链剂	28.2
NCO %	16	颜、填料	10.2

注:A/R 体积比为 1.0,A/R 重量比为 1.04, NCO 指数为 1.05。

2. 设备

对喷涂所需的专业化设备的基本要求有: 平稳的物料输送系统; 精确的物料计量系统; 均匀的物料混合系统; 良好的物料雾化系统; 方便的物料清洗系统。根据这些要求并结合聚氨酯/聚脲 RIM 技术的设备工作原理,国外厂家陆续开发出用于喷涂聚脲弹性体技术的物料输送、计量设备其主

要品牌见表 6,以及用于喷涂的混合、雾化和清洗设备见表 7,这又为 SPUA 技术的研究和开发奠定了“硬件”基础。

表 6 喷涂聚脲弹性体技术物料输送、计量设备

公司名称	设备名称
Gas - Craft Co.	MINI ,MX
Graco Co.	Hydra - Cat
Gusmer Co.	H - 2000 ,H - 3500 ,MARKSMAN
Pro - Hydro Co.	Minimatic 230

表 7 喷涂聚脲弹性体技术物料混合、雾化和清洗设备

公司名称	设备名称
Binks CO.	43P
Gas - Craft Co.	Probler
Graco Co.	Foam Cat™
Gusmer Co.	GX - 7
Isotherm Co.	SP - 300
Tec - Mac Co.	AP/ X

通过调研、出国考察和邀请国外专家讲学^[4~7],我们认为美国 Gusmer 公司生产的 H 系列主机和 GX - 7 系列喷枪是本技术开发应用中较为合适的机型^[9,15]。

五、材料性能

1. 力学性能

SPUA 材料具有优异的综合力学性能, 见表 8。

2. 耐介质性

SPUA 材料的耐介质性能十分突出, 除二甲基甲酰胺、二氯甲烷、氢氟酸、浓硫酸、浓硝酸、浓磷酸等强溶解、强腐蚀介质外, 它可

耐受绝大部分腐蚀介质的长期浸泡见表 9。

表 8 SPUA 材料的力学性能

项 目	指 标
拉伸强度 (MPa)	最高达 27.5
硬度 (Shore)	A30—D65
伸长率 (%)	最高达 1000
撕裂强度 (KN/m)	43.9 ~ 105.4
100% 伸长模量 (MPa)	3.4 ~ 13.7

表 9 SPUA 材料的耐介质性能

介质名称	浸泡结果	介质名称	浸泡结果
醋酸 (10%)	良好	硝酸铵	良好
盐 酸 (10%)	良好	汽 油	良好
硫 酸 (20%)	良好	柴 油	良好
磷 酸 (10%)	良好	煤 油	良好
柠檬酸	良好	矿物油	良好
乳 酸	良好、轻微变色	液压油	良好
氢氧化钠 (20%)	良好	防冻液 (50% 乙醇)	良好
氢氧化钠 (50%)	良好、轻微变色	二甲苯	良好、轻微变色
氢氧化钾 (10%)	良好	正己烷	良好
氢氧化钾 (20%)	良好、轻微变色	异丙醇	良好
氨 水 (20%)	良好	饱和盐水	良好

3. 低温韧性

我们知道: 通过多年的研究和开发, 环氧材料的韧性得到了极大的改善, 已作为地坪涂料, 大规模用于工厂车间、医院手术室、无菌实验室等需要净化的场合; PVC 作为铺地材料 (无论型材, 还是卷材), 也早已进入千家万户。但在应用中, 这些材料都不同程度地出现低温脆性开裂、收缩、卷曲等不良热应力现象。而 SPUA 材料却完全不同, 它不仅具有在很宽范围内 (从邵 A30 到邵 D65) 调节硬度的能力, 而且能在高硬度情况下保持优异的低温韧性。其中尤以脂肪族异氰酸酯 (如 m-TMXDI) 与 JEFFAMINE 聚醚及 JEFFAMINE 低分子二元胺扩链剂 (如 D-

230、T-403) 制备的纯脂肪族 SPUA 材料的性能最为突出, 芳香族 SPUA 材料的低温韧性也不错, 但比脂肪族的要逊色一些, 见表 10。

曾有人做过一个有趣的实验: 分别在钢、混凝土、沥青表面喷涂脂肪族 SPUA 材料, 将 -196 的液氮距涂层 30.5 厘米处, 喷射到样品表面达 30 秒, 未见涂层任何破坏; 当喷射距离减小至 10.2 厘米时, 钢和混凝土表面的涂层出现轻微裂纹, 而沥青表面的涂层完好无损。另将涂有 SPUA 材料的混凝土样品从 1.8 米高处自由落下, 混凝土自身被震裂, 但 SPUA 材料毫无损坏, 并将混凝土的碎块牢牢地聚集在一起。

表 10 SPUA 材料的低温韧性

项 目	材 质	脂肪族		芳香族	
		(25)	(-20)	(25)	(-20)
拉伸强度 (MPa)		00 8.9	0 12.3	0 0 11.4	0 14.1
伸长率 (%)		420	180	350	130
撕裂强度 (KN/ m)		0 43.9	67.7	105	102
硬度 (Shore)		0 35 . 0	0 51 . 0	-	-

4. 户外耐老化性能

由于不含催化剂,SPUA 材料表现出优异的耐老化性能。虽然在芳香族的 SPUA 中,会出现泛黄和褪色,但决无粉化和开裂现象出现。表 11 是芳香族 SPUA 材料经过 50、3871h 人工加速老化实验前后的性能变化。脂肪族 SPUA 材料的耐老化性能则更是无与伦比。

表 11 芳香族 SPUA 材料的耐老化性能

项 目	老化前	老化后
拉伸强度 (MPa)	13.5	13.5
伸长率 (%)	137	110
撕裂强度 (KN/ m)	76.4	84.4

5. 附着力

SPUA 材料与金属、混凝土、塑料及木材等多种底材都有良好的附着力,通过适当的配方的筛选,可以得到附着力强度超过 SPUA 自身强度的体系。当然,由于 SPUA 材料的反应速度极快,对底材的润湿能力差,诸如 底材表面处理, SPUA 的配方组成, SPUA 的反应速度, 材料的使用环境等因素都会影响其附着力。因此,在配方研究和施工过程中,必须加以充分考虑。对于一些对附着力有特殊要求的场合,最好通过调整配方,降低反应速度,确保涂层有足够的“抓底”时间。表 12 列出了 SPUA 与几种材料的附着力数据(拉开法),从中可以看出:有些底材已被拉坏,这说明 SPUA 材料与底材的附着力是很好的。

表 12 SPUA 材料的附着力 (MPa)

底 材	分 类	
	芳香族	脂肪族
混凝土(纯材料)	>12.8	2.8
混凝土(带底漆)	>16.8	6.9
钢(喷砂至 Sa2.5 级)	>13.7	8.6
铝	>13.7	-
胶合板	>11.7	1.7

注: 指底材破坏; 指内聚破坏。

6. 施工性能

SPUA 材料能够在较短的时间里在国内外众多领域推广使用,与其具有优异的施工性能密不可分。它彻底改变了传统喷涂工艺中普遍存在的溶剂污染、厚度薄、流挂、固化时间长等缺点,给现场喷涂带来了革命性飞跃。

6.1 快速固化

SPUA 物料反应速度极快,5 秒钟凝胶,1 分钟即可达到步行强度,并可进行上层施工,施工效率高。解决了一般喷涂材料由于表干时间较长造成的施工进度慢、未干燥表面粘结杂物影响涂层质量以及涂层干燥前遇到风、雨等恶劣气候,必须重新施工等问题。

6.2 施工效率高

采用成套喷涂、浇注设备,输出量大,施工方便,可连续操作,喷涂 100m² 的面积(1.5~2.0mm 厚)仅需 30 分钟,施工效率非常高。特别适合于道路路面、建筑屋面、运动场地、车间地面、地下工程、游泳池等大型工程施工,以及工期要求紧的工程或抢修工程的使用。

6.3 对环境条件要求较低

SPUA 材料对水分、湿气不敏感,施工不受环境温度、湿度的影响。在基层干燥的情况下,无论是北方寒冷季节还是南方梅雨季节,都可以正常施工。

六、应用领域

SPUA 材料以其独特的组成和反应原理,在工程应用中显示出优越性。目前在通用的高固体份涂料、水性涂料、光固化涂料、粉末涂料等环保型涂料中,有的施工一道后,至少需要 12~24 小时的干燥时间,才能投入使用或进行下一道施工;有的一次施工的最大厚度 $< 800\mu\text{m}$,且不允许连续加厚。SPUA 技术则不同,由于其快速的固化反应,施工 100m^2 (1.5~2.0mm 厚) 的涂层,仅需 30 分钟即可完成施工,2~3 小时即可投入使用。由于层间施工间隔只需几分钟到十几分钟,即一道施工结束,就可立即进行下一道施工,对涂层最终的施工厚度没有限制,通常每道涂层的施工厚度在 0.3~0.6mm (视枪的移动速度而定)。

SPUA 技术还有一个显著特点就是 100% 固含量,无挥发性有机化合物 (0 VOC's),只要正确使用本技术,无论是施工期间,还是材料投入使用后,涂层均不产生有害物质和刺激性气味,对环境保护极为有益,属新型环境友好型材料。因此该技术在电子、医药、卫生、食品、机械、运输、建筑、造船以及娱乐等行业具有广阔的应用前景:

1. 工厂树脂墙面

长期以来,工厂地坪、墙面大多采用环氧或聚氨酯涂料。多年的应用经验告诉我们,这些涂料存在以下缺点:无论对环氧进行如何增韧改性,其自身的脆性仍然存在,在工厂车间,难免有工具、物品的意外砸落,造成环氧地坪涂料的开裂,甚至破碎;食品、制药车间还经常要用过热蒸汽消毒,一旦油水进入破碎区域,很快就会出现较大面积的开裂和破损。聚氨酯铺地涂料虽然克服了环氧

地坪涂料的脆性,但在工程应用中,对被施工场地的水分含量及相对湿度提出了严格要求,局限性较大。无论是环氧,还是聚氨酯,都难以在垂直面、顶面一次施工 2mm 左右的涂层材料。

SPUA 材料柔性好、强度高、凝胶速度快,对环境温度、湿度不敏感,一次施工可达到任意厚度,是施工高性能树脂墙、地、顶面的理想的材料。

2. 建筑屋面防水

通常的屋面防水材料 (如沥青、SBS、APP 等) 经日光老化后会出现开裂;即使防水材料自身不开裂,也会因混凝土的开裂 (由振动、应力、风化等因素引起) 而断裂。SPUA 材料则完全不同,因其自身优异的柔韧性、耐老化性和力学强度,即使在混凝土开裂的情况下,聚脲材料不但自身不会断裂,而且还能将混凝土紧紧“抓住”,起到防水和保护作用,特别适用于高档建筑的屋面防水处理,达到“一劳永逸”的目的。此外,SPUA 技术对环境温度、湿度的不敏感性,使其在我国寒冷的北方和潮湿、多雨的南方防水施工中,独领风骚。

3. 运动场地

SPUA 材料独有的抗湿性,可以在运动场地上大显身手。用它铺就的网球场、排球场、篮球场等运动场地,可有效地防止运动员因地面有汗水,而造成的滑倒,甚至摔伤。对消除运动员恐惧心理,提高运动成绩十分有益。

4. 工业重防腐

SPUA 材料不含有机溶剂,100% 固含量,涂层连续、致密、无针孔,并且一次成膜厚度大,因而在酸、碱、盐、地下和海洋等恶劣环境条件下,表现出优异的超重防腐性能;加之其先进的施工工艺,使得该材料在化工储罐衬里、隧道、海洋钢结构防腐等领域,有着广阔的应用前景。

5. 影视、娱乐业

SPUA 材料无毒、无污染,可广泛用于道

具和娱乐设施的制作。如美国迪斯尼乐园、好莱坞环球影城的道具和造型(国外称之为“Theme Park”即主题公园),绝大部分是在廉价的聚苯乙烯(或聚氨酯)泡沫表面,喷涂一层硬质 SPUA 材料,从而大大提高了道具、造型的可观赏性和保存价值。近年来,国内外娱乐界推出的大型水上运动节目——激流勇进,其滑道、浮萍表面,都喷涂了一层软质 SPUA 材料,使其外观整体性好,涂层连续、无接缝。

6. 耐磨衬里

工矿企业的研磨、输送设备,常常受到磨损的困扰而报废,给企业造成巨大的经济损失。有些设备外形结构十分复杂,制造成本高、维护困难。SPUA 技术独特的成型工艺和卓越的材料性能,使之成为理想的耐磨衬里材料。

七、结束语

SPUA 材料在我国研发成功后,以其优异的性能和工艺引起国内材料界和工程界的极大关注。目前,我院已掌握了该设备的操作、维护和保养,研制出了适合我国国情的 SPUA 系列组合产品,并已在青岛海豚表演馆水池防水、青岛天盾橡胶公司码头护舷、北京中央电视台舞台道具保护、上海沪东造船

厂船舶舱室地板防湿滑、广州潮流水上乐园娱乐设施防撞、大连理工大学精密设备隔水密封、沈阳普利司通(BRIDGESTONE)公司码头护舷等方面进行了应用,SPUA 材料优异的材料性能和施工工艺受到用户高度评价;同时,也为在我国全面推广、普及这一高新技术作好了充分的技术准备。

参考文献

- [1] D. J. Primeaux, Spray Polyurea Versatile High Performance Elastomer for the Polyurethane Industry In: Polyurethanes 89, Proceedings of the SPI 32nd Annual Technical/ Marketing Conference. San Francisco, 1989, 26
- [2] D. J. Primeaux, A Study of Polyurea Spray Syatem. High Solids Coatings, 1994, 15 2
- [3] D. J. Primeaux, Polyurea Spray Tachnoly in Commercial Applications. 60 Years of Polyurethanes: International Symposium and Exhibition, 1997
- [4] 黄微波、杨宇润、王宝柱等,喷涂聚脲弹性体技术及应用,第三届聚氨酯涂料暨第四届汽车涂料和涂装技术交流论文集·昆明·1999. 9
- [5] 黄微波、杨宇润、王宝柱,喷涂聚脲弹性体技术,聚氨酯工业, Vol. 14, No. 4, P7, 1999
- [6] 王宝柱、黄微波、杨宇润,喷涂聚脲弹性体技术的应用,聚氨酯工业, Vol. 15, No. 1, P39, 2000
- [7] 吕平、黄微波,喷涂聚脲弹性体在建筑中的应用,施工技术, 2000, 4
- [8] 吕平、黄微波,喷涂聚脲弹性体的特点及应用,建筑技术, 2000, 4, P247

(上接第 20 页)

七、讨论及结论

1. 弱极化是测试腐蚀体系参数的有力工具,本文建立的弱极化实验系统使复杂的弱极化测试及相关的数据处理变得简单、方便。

2. 当采用四位半 ADC, 电位分辨率 0.1mV, 电流分辨率 0.01 μ A 的测试工具时,对于 i_K 1 μ A 的腐蚀体系,处理结果将有比较大的误差。

参考文献

- 1 张明嘉,彭乔. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(3) 179

- 2 J. de Damborenea dt al., Br. Corros. J., 1984, 19 (2) 95
- 3 F. Mansfeld, Corrosion, 1973, 29(10) 397
- 4 N. D. Creenem, R. H. Candhi, Materials Performance, 1982, 7 34
- 5 L. F. Williams, J. Electrochem. Soc., 1980, 127 1706
- 6 L. F. Williams, Corrosion Science, 1997, 19 767
- 7 V. Feliv, S. Feliv, Corrosion, 1986, 42(3) 151
- 8 周伟舫主编. 电化学测量. 上海:上海科学技术出版社, 1985 265
- 9 曹楚南. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(1) 1
- 10 宋诗哲编著. 腐蚀与防护全书. 腐蚀电化学研究方法. 北京:化学工业出版社, 1988 28
- 11 李华主编. MCS-51 系列单片机实用接口技术, 北京:北京航空航天大学出版社, 1998 441