



# 城镇排水管渠原位固化 内衬管树脂浸渍特性研究

石东优<sup>1</sup>, 张军<sup>1</sup>, 曹井国<sup>1,2\*</sup>, 杨宗政<sup>1,2</sup>, 董泽樟<sup>2</sup>, 张大群<sup>3</sup>

(1.重庆克那维环保科技有限公司, 重庆 401147; 2.天津科技大学 化工与材料学院, 天津 300457;  
3.天津水工业工程设备有限公司, 天津 300070)

**【摘要】:**文章对比分析了3种原位固化内衬管基材无纺布与树脂的接触角变化规律及真空度对浸润速率的影响,利用 Owens-Wendt-Kaelble 法和 Young-Dupre 法分析了黏附功随温度的变化规律及树脂固化强度。结果表明:提高真空度,有利于无纺布与树脂的浸润,促进良好界面的形成;升高温度,树脂黏度(表面张力)降低,接触角减小,可有效改善树脂在无纺布表面的浸润性;在 Z455TV-901/TXC /PX16 树脂体系未发生固化反应之前,升温能有效提高树脂/基材无纺布的黏附特性,提高复合材料界面粘接强度。

**【关键词】:**排水管渠;原位固化(CIPP);内衬管;接触角;真空度;黏附特性;无纺布;树脂;浸渍特性

**【中图分类号】:**TU992.24 **【文献标志码】:**C **【文章编号】:**1008-3197(2021)03-01-06

**【DOI 编码】:**10.3969/j.issn.1008-3197.2021.03.001

非开挖技术是一种新型管道修复技术,具有开挖量小、无接口、费用低、寿命长等优点,近年来在城镇排水管道维修中被广泛应用。非开挖管道修复施工方法有穿插法、原位固化法(CIPP)、碎(裂)管法、折叠内衬法、缩径内衬法、螺旋缠绕法、局部修复法和喷涂法等<sup>[1-4]</sup>,其中原位固化法(CIPP)因质量易控制、操作简单、适应性广,在城镇排水管道修复中的应用越来越多。原位固化法(CIPP)是将浸透树脂的内衬管作为管道内衬材料,形成一层坚硬的“管中管”,使地下管道在原位得到修补和更新,其修复质量取决于内衬管与树脂浸润的效果。

在浸渍过程中,内衬管基材与树脂基体要经过接触、浸润<sup>[5]</sup>。内衬管基材与树脂之间的浸润直接影响固化管的各项性能,浸润与黏附作用好,界面黏结强度就高<sup>[6-7]</sup>;如果浸润与黏附作用差,界面出现空隙,黏结界面应力传递差,成为应力集中点,就会导致内衬管各项性能变差。因此,对内衬管基材与树脂基体间的浸润与黏附作用研究,有助于理解不同内衬管固化性能差异,提高原位固化法(CIPP)修复管道质量。

前期试验发现,真空度对内衬管及树脂的浸渍速率产生较大影响<sup>[8]</sup>,不同厂家的内衬管材料浸润效果差异很大。在此基础上,本文基于树脂及内衬管材料自身的特性(包括表面张力、黏度及表面能),在不同温度下测定树脂与内衬管材料接触角、黏附功,对比分析了3个厂家内衬管材料与树脂的浸润、黏附作用相关规律,以期为原位固化法(CIPP)内衬管选材、运用及研究提供参考和借鉴。

收稿日期:2021-02-04

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07309001)

作者简介:石东优(1991-),男,硕士,研究方向为管道检测、非开挖修复材料和技术。

通讯作者:曹井国(1980-),男,副教授,研究方向为水污染防治技术、管道非开挖修复技术及材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

3种涤纶材质的无纺布内衬管材料;Z455TV-901 不饱和环氧树脂、TXC 叔丁脂(催化剂)及PX16(固化剂),使用质量比100:1:0.8。见表1。

表1 不同内衬管无纺布材料参数

无纺布	实际质量/ (g·m <sup>-2</sup> )	厚度/ mm	单位厚度质量/ (100 g·mm <sup>-1</sup> )	抗拉强度/ MPa
国产A	816	4.95	1.65	8.16
国产B	720	4.41	1.63	7.77
进口C	728	4.63	1.57	7.29

T/CECS 559—2018《给水排水管道原位固化法修复工程技术规程》规定,内衬管主材的抗拉强度应>5 MPa。3种材料单位质量厚度相近,国产A无纺布的抗拉强度优于国产B和进口C无纺布,但均能满足使用要求。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 内衬管与树脂的浸润

内衬管一端插入真空管,两端密封,开启真空泵,达到设置真空度,一端继续抽真空,另一端打开密封胶带,灌入配制好的树脂,待内衬管浸润饱和。

#### 1.2.2 固化试验流程

内衬管充填树脂→扎口→固定在翻转架上→常温水翻转→循环水加热、树脂固化→切样检测。

#### 1.2.3 表征方法

采用Sigma 701全自动表面张力仪测试树脂表面张力,检测临界感应值为2 mg,测试速度为0.2 mm/s。

基于座滴法<sup>[5]</sup>,采用DSA30全自动接触角测定仪测试树脂与纤维前进接触角,检测临界感应值为0.15 mg,测试速度为0.01 mm/s。

纤维表面、色散及极性分量采用IGC<sup>[9]</sup>间接测定,用甲烷测量死体积,载气为氦气,流速为10 mL/min,探针箱温度35℃,柱温箱温度30℃,相对湿度为0。在注射探测液体小分子之前,先对样品预处理30 min,除去表面吸附的杂质。

用TH-060型土工布测厚仪测定无纺布厚度,孔隙率参考文献[10]进行测定;使用美国BROOKFIELD博力飞DV-III黏度计测试树脂黏度;按照GB/T 3923.1—2013《纺织品织物拉伸性能第1部分:断裂强度和断裂伸长率的测定(条样法)》,采用CCMT 4503万能电子拉力机进行抗拉强度测量;按照GB/T 9341

—2008《塑料弯曲性能的测定》进行弯曲强度和弯曲模量测试。

### 1.3 无纺布与树脂表面能及黏附功计算

无纺布与树脂的表面能和黏附功分别采用Owens-Wendt-Kaelble法和Young-Dupre法计算得到。

Owens-Wendt-Kaelble法<sup>[11-14]</sup>是1969年Owens and Wendt在Foukes法的基础上考虑极性部分。理论方程为

$$\gamma_l(1 + \cos \theta) = 2(\gamma_s^d \gamma_l^d)^{1/2} + 2(\gamma_s^p \gamma_l^p)^{1/2} \quad (1)$$

式中: $\gamma_s$ 、 $\gamma_s^d$ 、 $\gamma_s^p$ 分别为无纺布单丝表面能、色散分量和极性分量, $\gamma_l$ 、 $\gamma_l^d$ 、 $\gamma_l^p$ 分别为小分子测试液表面张力、色散分量和极性分量, $\gamma_l = \gamma_l^d + \gamma_l^p$ ; $\theta$ 为液体与固体的接触角。

Young-Dupre法<sup>[15-16]</sup>是Dupre在Young方程的基础上推导得到黏附功 $W_a$ 与接触角 $\theta$ 之间的关系

$$W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta) \quad (2)$$

式中: $\gamma_{LV}$ 为树脂表面张力; $\theta$ 为树脂与无纺布接触角。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同厂家内衬管与树脂浸润速率

对3种内衬管与树脂在不同真空度下浸润速率进行了研究。国产A、国产B及进口C3种内衬管无纺布的孔隙率相差不大,随着真空度的升高,浸润速率加快;在相同真空度下,进口C的浸润速率优于国产

表2 不同真空度下内衬管的浸润速率

无纺布	孔隙率/%	浸润速率/(mm·s <sup>-1</sup> )		
		50 kPa	60 kPa	70 kPa
国产A	85.1	0.148	0.17	0.218
国产B	85.7	0.143	0.18	0.198
进口C	85.9	0.205	0.242	0.303

A及国产B。见表2。

工程实践中,内衬管绝对真空度越高,说明无纺布内所含气体量越少;在浸润过程中,树脂与内衬管无纺布表面分子充分接触、链段间能够相互扩散,形成良好界面。

### 2.2 温度对树脂黏度及表面张力的影响

黏度是流体黏滞性的一种量度,是流体流动力对其内部的摩擦现象;根据Darcy定律可知,树脂在增强无纺布中的流动速率随黏度的增大而减小,在其他变量一致的情况下,浸润速率与树脂的黏度成反比。

Z455TV-901 树脂及 Z455TV-901 /TXC/PX16 树脂体系的黏度都随温度的升高而降低,有利于树脂与无纺布的浸润。见图 1。

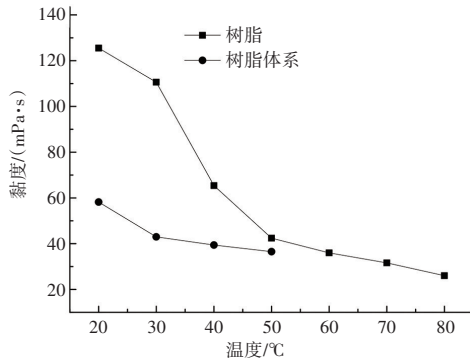


图 1 树脂及树脂体系的黏度随温度的变化曲线

布间的浸润。见图 1。

作为润湿现象中的一个重要物理量,在树脂与无纺布浸润过程中,树脂的表面张力越小,越有利于浸润。相同温度下 Z455TV-901/TXC/PX16 树脂体系的

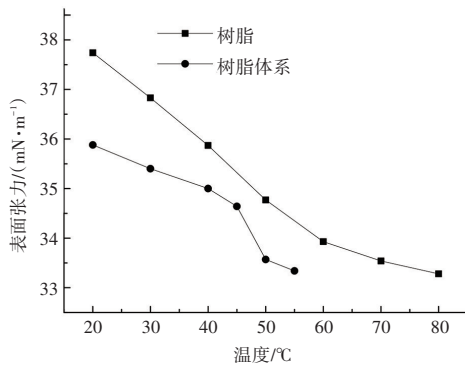


图 2 树脂及树脂体系的表面张力随温度的变化曲线

表面张力均比 Z455TV-901 树脂低,见图 2。

这是由于树脂体系的表面张力与其各自的化学组分密切相关,如:分子间的相互作用力;同时,小分子、低密度的固化剂,在热运动作用下自发的从能量高的位置迁移到能量低的位置,改变了 Z455TV-901/TXC / PX16 树脂体系的表面熵和表面内能,最终导致表面张力降低<sup>[5]</sup>。

### 2.3 无纺布表面能对比

表 3 小分子液体与无纺布的接触角

无纺布	$\theta/(^\circ)$		
	甲酰胺	甘油	去离子
国产 A	57.5	81.4	74.9
国产 B	53.4	80.8	72.0
进口 C	38.7	80.1	59.6

测出小分子液体与无纺布丝束接触角,见表 3。

3 种小分子液体的表面张力、色散及极性分量见

表 4 小分子液体的表面张力、色散及极性分量 mN/m

探测液体	$\gamma_l$	$\gamma_l^d$	$\gamma_l^p$
甲酰胺	57.19	41.63	15.56
甘油	62.54	25.13	37.41
去离子水	71.52	28.14	43.38

表 4。

将表 3 和表 4 检测的结果代入式(1),计算得出 3 种无纺布的表面能大小关系:进口 C > 国产 B > 国产

表 5 3 种无纺布的表面能、其色散及极性分量 mN/m

项目	国产 A	国产 B	进口 C
$\gamma_s^d$	27.8	31.0	34.6
$\gamma_s^p$	6.1	6.3	10.6
$\gamma_s$	33.9	37.3	45.2

A。见表 5。

常温下 Z455TV-901 树脂的表面张力高于 Z455TV-901/TXC/PX16 树脂体系的表面张力,因此,常温条件下 Z455TV-901 树脂和 Z455TV-901/TXC/PX16 树脂体系对进口 C 的浸润性较好。从浸润热力学角度分析,要获得良好的表面浸润和界面粘接性能,要求树脂的表面张力应低于无纺布的表面能,而且无纺布的表面能越高,越有利于浸润<sup>[9]</sup>;因此,进口 C 无纺布与树脂的浸润效果优于国产 A 和国产 B 无纺布。

无纺布的极性和色散分量也反映了分子键的极性与非极性相互作用,他们的大小同样会对树脂和无纺布的界面粘接产生一定影响<sup>[17]</sup>。

### 2.4 温度对无纺布与树脂接触角的影响

为进一步研究不同温度下树脂与无纺布的浸润特性,采用座滴法<sup>[5]</sup>对树脂与无纺布的接触形态进行分析。接触角是衡量液体对固体浸润能力的一个重要指标,是润湿程度的量度,液体对固体润湿程度可用接触角表示。

在 20 ~ 80 °C 条件下,树脂与无纺布束的表观接触角随温度的升高而减小,这主要是树脂表面张力和黏度随温度的变化导致<sup>[18-19]</sup>。随着温度的升高,树脂的表面张力减小,树脂对无纺布束的接触角也减小,接触角越小越有利于树脂与无纺布的浸润,因此升温(未发生固化反应)可以有效改善树脂与无纺布的浸润性;相同温度下 3 种无纺布与 Z455TV-901 树脂的接触角大于与树脂体系接触角,这是因为固化剂小分子的加入导致树脂体系黏度和表面张力降低,改善了树脂对无纺布的润湿性<sup>[20]</sup>;相同温度范围内,进口 C 无纺布与树脂的接触角小于国产 A 和国产 B 无纺布与

树脂的接触角,进口C无纺布与树脂的浸润效果优于

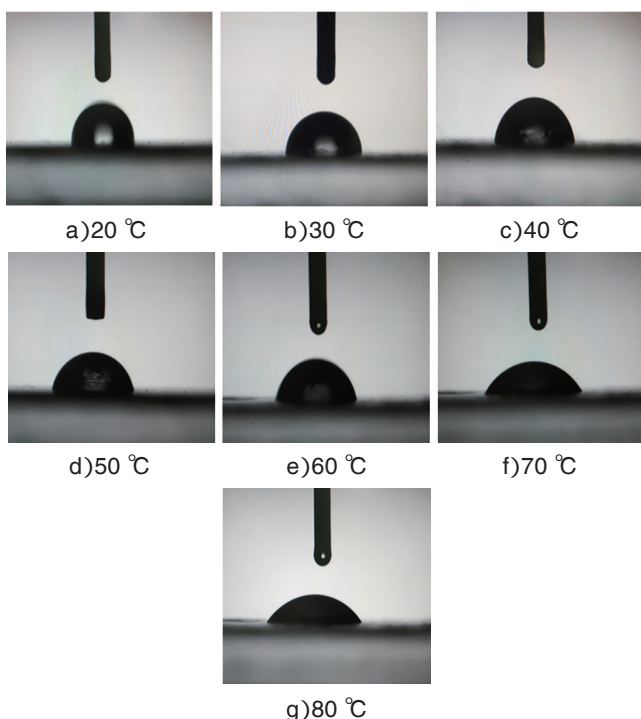
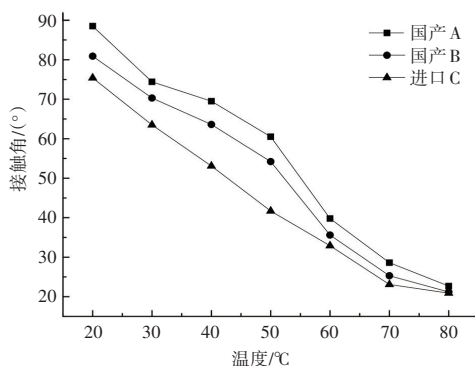
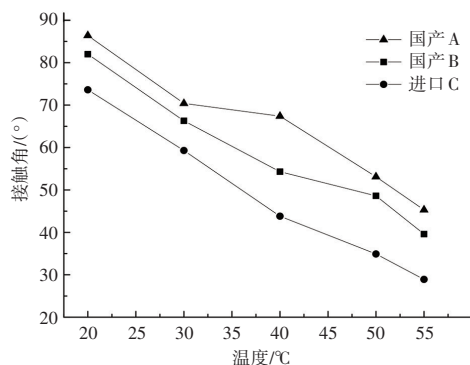


图3 不同温度下树脂与国产A无纺布束接触角的初始形态



a)树脂



b)树脂体系

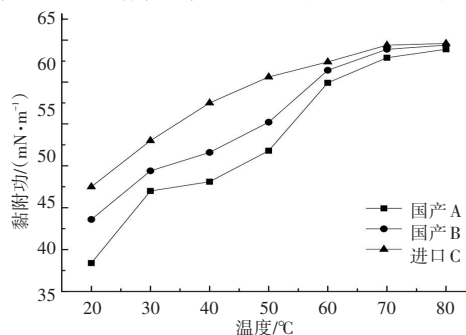
图4 不同温度下树脂和树脂体系与无纺布的接触角  
国产A和国产B无纺布。见图3和图4。

### 2.5 温度对无纺布与树脂黏附功的影响

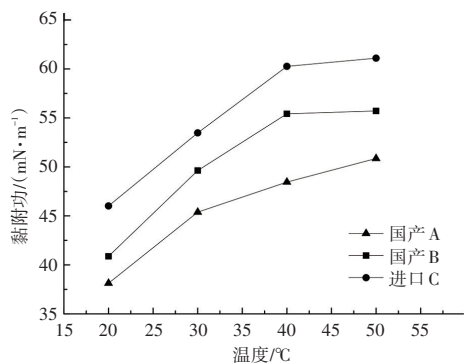
热力学黏附功是表征界面结合能力强弱的一种

热力学量度,是用来研究复合材料无纺布/基体界面粘接强度的重要参数;热力学黏附功越大,界面粘接强度越高<sup>[21]</sup>。

在试验范围内,3种无纺布与Z455TV-901树脂的黏附功均随温度的升高而逐渐增大,当温度达到60 °C以后,黏附功变化趋于平缓,与图1和图2对应的黏度和表面张力变化趋势相一致,因此60 °C以后,表面张力和黏度不是影响黏附功的主要因素。在固化反应并未发生前Z455TV-901/TXC/PX16树脂体系与3种无纺布的热力学黏附功以40 °C为界线,40 °C之前随温度的升高有明显的增大,40 °C以后趋于平缓。随着温度升高,小分子PX16固化剂极易迁移至体系表面,导致体系的表面张力降低,促进无纺布/树脂体系间的黏附性。进口C无纺布与树脂的黏附功高于国产A和国产B无纺布,进口C无纺布与树脂的黏附性强于国产A和国产B无纺布;此外,3种无纺布与树脂体系的黏附功低于相同温度下与树脂的黏附功;从黏附和扩散理论角度来分析,只有树脂与无纺布表面分子充分接触、链段间能够产生相互扩散时<sup>[22]</sup>才能获得较大的黏附强度,当树脂中加入小分子固化剂后,树脂体系中悬浮颗粒增多,导致树脂连续相组分与无纺布表面活性基团相互作用的比例降低,不利于树脂与无纺布表面分子



a)树脂



b)树脂体系

图5 不同温度下树脂和树脂体系与无纺布的黏附功

的相互接近,从而导致黏附性降低<sup>[10]</sup>。见图5。

研究表明,原位固化法(CIPP)修复管道过程中,热固化阶段(固化反应并未发生)升温有利于二次浸润,随着温度的升高,树脂的黏度与表面张力均降低,树脂与无纺布接触角减小,黏附性增强,有利于浸润及界面黏附;但温度升高致使树脂进入低黏度区间后,继续提高温度对无纺布/树脂的黏附作用效果不大。

良好的浸润使树脂更易于在无纺布表面铺展,保证分子间充分接触,是良好界面形成和黏附的先决条件。在无纺布/树脂浸润阶段,提高真空度及适当延长接触时间都可以保证充分浸润;在热固化过程中(固化反应并未发生),随着温度的升高,树脂的黏度、表面张力均降低,树脂与无纺布接触角降低、黏附作用增强,有利于浸润及界面黏附,可有效促进良好界面的形成。

### 2.6 3种内衬管复合材料性能

复合材料中基体与增强纤维通过界面发生结合,同时通过界面将荷载从基体传递到增强纤维上。因此,复合材料的性能不仅受纤维和基体性能的影响,还受界面性能的影响<sup>[23-24]</sup>。

无纺布增强复合材料弯曲强度、弯曲模量、抗拉强度、热变形温度4个指标可以作为评价复合材料的性能指标。国产A、国产B及进口C无纺布固化后的热变形温度:进口C>国产A>国产B;弯曲模量:国产A>进口C>国产B;弯曲强度:国产B>进口C>国产A;抗拉强度:国产A>进口C>国产B。除

表6 无纺布增强复合材料力学性能

无纺布	弯曲模量/ MPa	弯曲强度/MPa	抗拉强度/MPa	热变形温度/℃
国产A	2 113	39.4	19.9	90.4
国产B	1 886	62.6	18.3	89.3
进口C	2 035	59.8	17.9	93.0

注:真空度为70 kPa。

弯曲强度指标外,其他指标相差不大。见表6。

表6中,不满足标准要求的抗拉强度>21 MPa,主要是由于真空度较大,浸润速率较快。在实际树脂充填过程中,应以各项指标达标为前提,控制真空度条件,降低浸润速率。此外,进口C无纺布与树脂浸润和热力学黏附功都优于国产无纺布,说明界面粘接强度进口C无纺布优于国产无纺布;但复合材料的性能不仅受浸润及粘接界面性能的影响,还受到基材和基体性能的影响。

试验结果表明,进口C无纺布的浸润速率较快,理论上,浸润越快越有利于提高树脂充填速度,缩短浸润时间;但另一方面,有可能造成浸润不充分,降低固化强度。研究所用的2种国产无纺布密度较进口无纺布高,所以浸润速率相对较慢,浸润后,其固化性能差异并不十分明显,也就是说,国产无纺布在浸润、固化方面的性能与国外无纺布相差不大。

研究表明:可通过进一步优化,在保证抗拉强度的基础上,降低国产无纺布的密度,以提高树脂浸润量;或通过改性办法<sup>[25-29]</sup>,提高树脂浸润速率。

### 3 结论

1)3种无纺布孔隙率相差不大,提高绝对真空度可以加快无纺布与树脂的浸润速率,有利于无纺布与树脂的浸润,促进良好界面的形成;但较快的浸渍速率会减少树脂浸润量,从而降低固化效果。

2)Z455TV-901/TXC /PX16 树脂体系与3种无纺布的黏附功,随温度的升高呈现先增加、后趋于恒定的变化趋势。此外,升温固化阶段(固化反应并未发生),树脂与无纺布的接触角减小,有利于促进树脂与无纺布的二次浸润,促进良好界面的形成。

3)3种无纺布与Z455TV-901/TXC /PX16 树脂体系的润湿性优于纯Z455TV-901树脂,但黏附性恰好相反;进口无纺布表面能大于国产无纺布。因此,进口无纺布与树脂的浸润性和黏附性较好,但国产无纺布弯曲模量、弯曲强度固化性能要优于进口无纺布。

□■

### 参考文献:

- [1]王云江,陈爱潮.管道非开挖修复技术:原位固化法(CIPP)[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [2]成旭.城市排水管道非开挖修复技术探讨[J].建材与装饰,2017,(7):12-13.
- [3]孙剑斌.排水管道非开挖修复技术综述[J].河南建材,2019,(4):31-32.
- [4]陈建东.探讨城市排水管道非开挖修复技术[J].城市建筑,2019,16(11):131-132.
- [5]朱黎黎,张佐光,李敏,等.工艺温度下树脂与纤维的接触角及其粘附作用研究[J].复合材料学报,2010,27(5):41-46.
- [6]Jinyong Lee, Lawrence T. Drzal. Surface characterization and adhesion of carbon fibers to epoxy and polycarbonate[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 25(5):389-394.
- [7]Seo Min-Kang, Park Soo-Jin. Surface characteristics of carbon fibers modified by direct oxyfluorination[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 330(1):237-242.

- [8]张文宁.排水管道原位修复无纺布内衬软管制备与性能研究[D].天津:天津科技大学,2019.
- [9]曹芳维,李敏,王绍凯,等.碳纤维与环氧树脂润湿和黏附作用[J].复合材料学报,2011,28(4):23-28.
- [10]雷李娜,漆东岳,孙现伟,等.非织造布孔隙率测试方法研究[J].中国纤检,2017,(5):78-80.
- [11]李楠楠,李国祿,王海斗,等.表面自由能的计算方法及其对材料表面性能影响机制的研究现状[J].材料导报,2015,29(11):30-35+40.
- [12]刘红霞,张慧君,陈杰璐.远程氧等离子体改性聚四氟乙烯表面润湿性与表面结构的研究[J].西安交通大学学报,2010,44(3):120-125.
- [13]Man WANG, Jinsheng LIANG, Qingguo TANG, et al. Surface free energy of copper-zinc alloy for energy-saving of boiler[J]. Rare Metals, 2006, 25(6):324-327.
- [14]刘永明,施建宇,鹿芹芹,等.基于杨氏方程的固体表面能计算研究进展[J].材料导报,2013,27(6):123-129.
- [15]Poeius A V. Adhesion and adhesive technology: An introduction [M]. München: Hanser Verlag, 2002.
- [16]Finn R, Mccuan J, Wente H C. Thomas Young's surface tension Diagram: Its history, legacy, and irreconcilabilities[J]. Journal of Mathematical Fluid Mechanics, 2012, 14(3):445-453.
- [17]P. K Sharma, K Hanumantha Rao. Analysis of different approaches for evaluation of surface energy of microbial cells by contact angle goniometry[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2002, 98(3):341-463.
- [18]成荣,蒋世春,安立佳.环氧树脂在碳纤维表面的浸润行为[J].高分子学报, 2009, (4):352-357.
- [19]李帅,杨涛,磨昕月,等.液体成型用环氧树脂体系与碳纤维表面浸润性能研究[A].北京粘接学会第二十三届学术年会暨粘接剂、密封胶技术发展研讨会论文集[C]. 2014.
- [20]Stéphane A. Page, Raffaele Mezzenga, Louis Boogh, et al. Manson. Surface Energetics Evolution during Processing of Epoxy Resins [J]. Journal of Colloid And Interface Science, 2000, 222(1):55-62.
- [21]高巧春.聚合物基复合材料界面性能的实验设计[J].广东化工, 2015, 42(17):31-32.
- [22]Takahiro Okamoto, Mitsukazu Ochi. Effect on the toughness and adhesion properties of epoxy resin modified with silyl-cross-linked urethane microsphere[J]. Polymer, 2002, 43(3):721-730.
- [23]程海霞.碳纤维/环氧树脂复合材料界面粘接强度的温度效应[D].上海:东华大学, 2016.
- [24]张加贝. CNT/CF多尺度复合材料的界面结构与性能研究[D].大连:大连理工大学, 2018.
- [25]陈英,陈森,宋富佳.等离子体接枝反应对涤纶织物亲水性能的影响[J].纺织学报, 2010, 31(7):74-78.
- [26]刘雷良,顾伟.涤纶织物的壳聚糖亲水整理[J].印染, 2014, 40(2):37-39.
- [27]赵斯梅,贾高鹏.蚕丝蛋白对涤纶织物的亲水整理研究[J].丝绸, 2015, 52(7):24-27.
- [28]杨安明,刘娜.有机硅改性亲水聚酯整理剂在涤纶织物上的应用研究[J].染整技术, 2011, 33(12):40-43+7.
- [29]梁慧,张光先,张凤秀,等.紫外线-纳米二氧化钛改性高亲水涤纶织物的制备[J].纺织学报, 2013, 34(3):82-86.

## 建科资讯

## 中国土木工程学会水工业分会2021年城镇污水再生利用技术与装备研讨会顺利召开

**本刊讯** 2021年6月17—19日,由中国土木工程学会水工业分会主办,天津市政工程设计研究总院有限公司、义乌市水务建设集团有限公司、中国科学院生态环境研究中心(义乌)长三角中心、《天津建设科技》编辑部、《供水技术》编辑部承办的“中国土木工程学会水工业分会2021年城镇污水再生利用技术与装备研讨会”在浙江省义乌市召开。中国土木工程学会水工业分会理事长张悦,义乌市委常委朱有清,天津市政工程设计研究总院有限公司执行董事、法定代表人、总经理赵建伟出席会议并致辞。

大会以“提高社会用水效率,推动绿色高质量发展”为主题,围绕“污水资源化政策体系与价格机制;城市污水再生利用水质标准体系;城市分质供水技术

与管理;污水再生利用技术与工艺;污水再生利用装备研发与应用;再生水厂运行、维护与管理;膜法组合工艺在污水再生利用领域的研究与应用;工业园区废水梯级利用与循环利用”八大方向,采用“专家报告+技术研讨+展览展示+现场考察”的形式,全方位交流;同期还举办了GB/T 19923—2005《城市污水再生利用 工业用水水质》修编专题研讨会。

会议邀请了义乌市水务建设集团有限公司总经理鲍小龙、清华大学教授胡洪营、上海城市建设设计研究总院(集团)有限公司总工程师唐建国、中国人民大学教授王洪臣等二十多位行业专家做学术报告,为推动“十四五”期间我国再生水行业高质量发展建言献策!