

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.07.018

不同粒度泥沙对 PE-HD/愈创树脂材料摩擦性能影响^{*}

何奎霖¹, 郭智威^{1,2}, 常铁¹, 刘志强¹

(1. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 武汉 430063; 2. 国家水运安全工程技术研究中心可靠性工程研究所, 武汉 430063)

摘要: 尾轴承是船舶动力装置重要的组成部分, 起到支撑尾轴的作用, 其润滑性能好坏直接影响船舶的正常运行。以传统的水润滑尾轴承材料铁梨木为仿生对象, 研究在高密度聚乙烯 (PE-HD) 中添加不同比例的愈创树脂, 并在不同粒度泥沙环境中进行材料摩擦磨损性能实验, 从而探究该材料作为尾轴承材料的可行性。从实验结果可以得出, 愈创树脂对 PE-HD 材料的摩擦性能有影响, 材料的磨损量总体上随着砂粒变细而增加。

关键词: 水润滑尾轴承; 高密度聚乙烯; 愈创树脂; 泥沙颗粒度; 摩擦磨损性能

中图分类号: TQ325.1+ **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)07-0091-05

Effects of Different Grain Sized Sands on Tribology Performances of PE-HD/Guaiacum Composite

He Kuilin¹, Guo Zhiwei^{1,2}, Chang Tie¹, Liu Zhiqiang¹

(1. School of Energy and Power engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Reliability Engineering Institute, National Engineering Research Center for Water Transportation Safety, Wuhan 430063, China)

Abstract: The stern bearing is an important part of the ship's power plant, which plays the role of supporting the stern shaft, and its lubrication performance directly affects the normal operation of the ship. Taking traditional water lubricated bearing material lignumvitae as the bionic object, friction properties of high-density polyethylene (PE-HD) materials with different proportions of guaiac resin under different sediment conditions were studied, so as to explore the feasibility of this material as a stern bearing material. From the results of the test, it can be concluded that the guaiac resin has an effect on the frictional properties of PE-HD, and the amount of wear is generally increased as the sand becomes smaller.

Keywords: water-lubricated stern bearing; high-density polyethylene; guaiac resin; sand particle size; friction and wear performance

船舶传统的尾轴承主要使用金属材料, 同时使用润滑油润滑, 具有可靠性不高、振动大、摩擦磨损严重等缺点, 而且存在润滑油泄漏造成严重环境污染等弊端^[1]。一方面, 随着国家低碳发展战略的推出和环保的概念深入人心, 各种材料的水润滑轴承得到广泛研究, 如陶瓷、石墨、橡胶、赛龙、超高分子量聚乙烯等^[2]。超高分子聚乙烯作为水润滑材料之一, 由于具备耐磨损性、耐冲击性、耐腐蚀性、自润滑性以及摩擦系数小、耐低温性等特性使其成为轴套、轴承的良好材料^[3], 水润滑轴承在机械设备的使用数量将会不断增长^[4]。但是由于水润滑尾轴承在低速重载的情况下不易形成有效的水膜, 使其往往处于边界润滑甚至是干摩擦状态, 此种状况在船舶启停状态下尤为严重, 所以需要寻找有效的自润滑性能的材料。另一方面, 长江作为我国主要的东西运输枢纽通道, 其泥沙负荷在世界上占第4位^[5]。挖泥船在富含泥沙环境中工作, 其尾轴在前后防磨衬套、前后尾轴承出现严重的磨损, 其中主要是由疲劳

磨损和磨料磨损造成的, 以磨料磨损为主^[6]。

因此对于在含沙量很高的水域中航行的船舶而言, 对水润滑尾轴承材料在泥沙环境中摩擦磨损性能分析研究, 有助于缓解水润滑尾轴承的摩擦磨损, 从而提高船舶整机的动力性能。以传统的水润滑尾轴承材料铁梨木为仿生对象, 以高密度聚乙烯 (PE-HD) 为基体, 在其中添加不同比例的愈创树脂 (愈创树脂由愈创木脂酸、 β -愈创木脂酸、愈创木酸以及少量胶质、精油等组成)。通过摩擦系数、磨损量和表面形貌分析等方法表征复合材料的摩擦学性能, 探究该材料低速重载下在不同颗粒大小泥沙时的摩擦磨损性能, 为内河船舶的尾轴承材料选择提供参考。

^{*} 国家自然科学基金项目 (51509195), 武汉理工大学国家级大学生创新创业训练计划项目 (20161049705003)

联系人: 郭智威, 博士, 副教授, 主要从事船舶动力机械摩擦学及表界面技术研究

收稿日期: 2017-05-01

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-HD: 5000s, 株洲时代新材料科技股份有限公司;

愈创树脂: 郑州龙盛科技有限公司。

1.2 主要设备及仪器

本实验在 CBZ-1 船舶轴承摩擦磨损试验机上进行, 其原理图如图 1 所示。该试验机主要由主机旋转系统、控制与采集系统和水介质温控系统三部分组成。实验样品采用销盘式结构, 其中锡青铜盘 (ZCuSn₁₀Zn₂) (外径 60 mm, 孔径 9 mm, 厚度 10 mm) 尾轴在上旋转模拟尾轴, 如图 2 所示, 含愈创树脂的 PE-HD 制成的销试样在下固定 (浸没水中) 模拟轴承如图 3 所示。接触式表面轮廓仪为 LI-3 型, 华中科技大学自制。

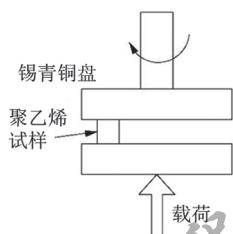


图1 CBZ-1 试验机原理图

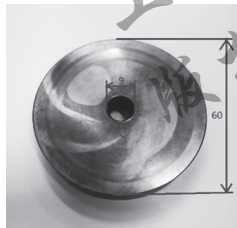


图2 锡青铜盘

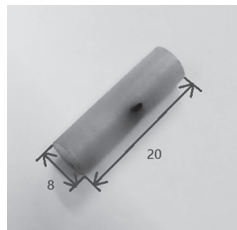


图3 PE-HD 销试样

1.3 试样制备

PE-HD/愈创树脂复合材料制备过程如下:

(1) 分别取适量的 PE-HD 和愈创树脂装入托盘, 用干燥机干燥 3 h, 冷却后取出待用;

(2) 将干燥好的 PE-HD 和愈创树脂按一定比例放入搅拌机中混合 (愈创树脂质量分数分别为 0.5%, 1%, 3%);

(3) 将按比例均匀混合后愈创树脂和 PE-HD,

加入到反应容器中, 加热到 $(160 \pm 5)^\circ\text{C}$; 抽真空脱水 10 min, 此段温度保持在 170°C 并持续 15 min 保证原料充分熔融;

(4) 将脱水后的温度保持在 $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$, 用双螺杆挤出样条;

(5) 使用循环水冷却挤出的样条, 用于切粒;

(6) 将样条切粒后干燥备用。

1.4 试验操作及数据获取

CBZ-1 试验机主机旋转系统布置了压力传感器、扭矩传感器, 通过电机的旋转来带动铜盘, 固定在承载盘上销和铜盘之间形成摩擦副。控制与采集系统主要由显示器和控制与采集装置组成, 布置在主机旋转系统的传感器实时处理记录摩擦副压力、扭矩信号, 计算摩擦系数, 基于虚拟仪器软件开发平台 Labview 的测试系统对其转速、摩擦系数及载荷等参数进行实时监测, 并将数据通过显示屏实时显示。本试验设计标准参考美国海军 MIL-DTL-17901C 大纲标准, 在外载 88 N (1.8 MPa)、转速 50 r/min (0.136 m/s) 的条件下运行 2 h, 获得相应的数据。

2 实验分析及结果

2.1 数据处理方式

本试验机每秒会产生一组数据, 两个小时会产生 7200 条数据。实验刚开始摩擦系数很高, 后逐渐减小最后趋于稳定, 实验结果和王家序^[7]的 PE-HD 实验结果类似。材料刚接触时, PE-HD 试样和铜盘的一部分粗糙峰直接接触。一方面磨损使接触面积逐渐增大, 另一方面摩擦处于边缘润滑状态, 因而摩擦系数逐渐升高^[8]。随着时间推移, 粗糙峰逐渐减少, 同时 PE-HD 和愈创树脂混合物润滑膜逐渐形成, 摩擦系数逐渐下降。最后润滑膜完全形成, 摩擦系数趋于稳定。实际工况中, 尾轴承和尾轴长期磨合, 粗糙峰被磨平, 为了更客观体现本材料摩擦磨损性能, 不考虑一开始数据的波动。笔者通过对摩擦系数作折线图 (图 4), 确定稳定的摩擦系数范围, 通过数据的合理筛选 (图 5), 以筛选后的摩擦系数值进行取均值作为参考的摩擦系数值。

2.2 愈创树脂含量对摩擦系数的影响

实验证明, 特定的愈创树脂添加量在固定泥沙环境下对摩擦系数的减小有积极作用。影响摩擦系数的因素有很多, 添加愈创树脂后材料表面物化结构、表面形貌、表面力学性能都发生了改变^[9]。在固定砂粒粗细 (200 目、300 目、3000 目, 即 $75\ \mu\text{m}$,

50 μm , 5 μm) 的情况下,随着愈创树脂添加量的增加,摩擦系数呈现出先增后减再增的变化规律,三组数据趋势总体上比较接近,如图6所示。其中在0.5%的添加量情况下,除了3000目(5 μm)砂出现较大的波动外,添加0%和3%时摩擦系数稳定在0.025左右,其余也稳定在0.027左右;在添加量为1%的情况下,摩擦系数稳定在0.023左右,为四种添加量中的最小值(见图6)。由曲线的变化趋势可以看出,本材料在泥沙环境中,其摩擦系数在0.025上下波动。在实验条件下摩擦系数随表面粗糙度减小而增大,随硬度增大而下降^[10]。愈创树脂在添加量为1%时相较添加量小于1%,具有更高的硬度。当愈创树脂含量为3%时,其表面粗糙度因为温度的原因出现下降,因此摩擦系数增大。

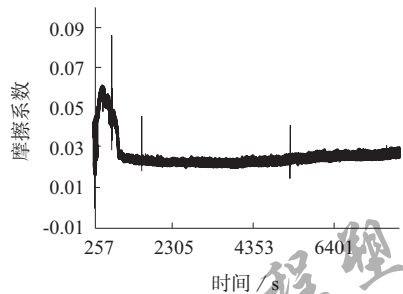


图4 数据处理前

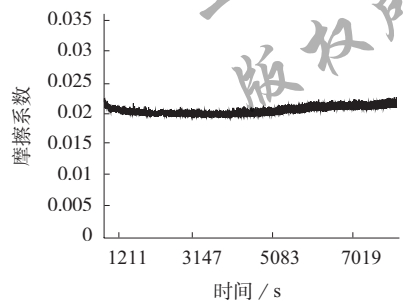


图5 数据处理后

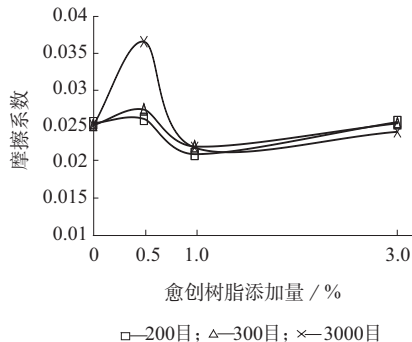


图6 不同愈创树脂含量时PE-HD/愈创树脂材料的摩擦系数

2.3 砂粒粗细对摩擦系数的影响

不同砂粒粗细及不同愈创树脂含量时PE-HD/愈创树脂材料的摩擦系数如图7所示。从图7可

以看出,除了0.5%愈创树脂在3000目砂时摩擦系数有跳跃式变化外,砂粒粗细对摩擦系数影响不是很大,这和陈战的实验结果相互吻合^[1]。出现该结果的原因一方面是因为润滑膜的形成以及载荷使材料的塑性变形增大降低了摩擦系数;另一方面载荷使砂粒的摩擦作用增强,加大了摩擦系数。两个原因的综合使得砂粒的粗细对摩擦系数影响不大。从这个角度分析,该材料对内河砂粒有很好的适应性。

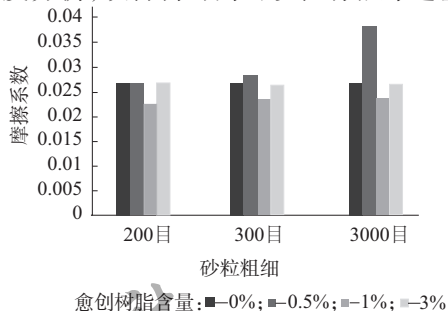


图7 不同砂粒粗细时PE-HD/愈创树脂材料的摩擦系数

2.4 愈创树脂含量和砂粒粗细对磨损量的影响

水润滑尾轴承与轴作为一对摩擦副,影响水润滑尾轴承摩擦磨损性能的主要因素为以下几点:轴的转动速度大小、轴承上承受的载荷大小、润滑水中夹杂其他物质的比例、轴系连续运转时间长短、轴颈的材料、轴承内衬表面的粗糙度等^[11],不同添加量的愈创树脂和不同粗细的砂粒对磨损量影响很大。

图8为不同愈创树脂含量时材料的磨损量变化曲线。

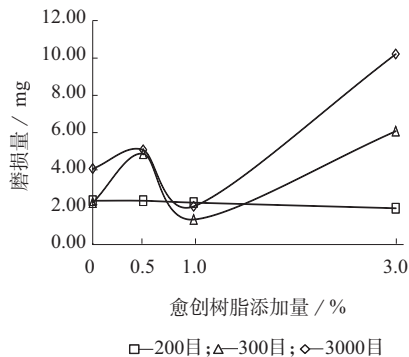


图8 不同愈创树脂含量时PE-HD/愈创树脂材料的磨损量

在200目情况下,愈创树脂添加量对磨损量影响不大,甚至有略微的下降趋势。一方面是因为200目砂粒较粗,对磨损量影响不大;另一方面,愈创树脂熔点为85 $^{\circ}\text{C}$,摩擦副间的温度使愈创树脂发生软化,随着添加量的增加,摩擦性能变好,因此降低了磨损量。300,3000目砂情况下,在树脂比例为0.5%时,树脂比例较低,对材料摩擦性能改善效果不明显,在300和3000目砂的作用下发生磨粒磨

损,随着树脂比例增至 1%,树脂对复合材料的润滑性改善效果加强。D. A. L. Alessandra 等^[12]等通过在 PE-HD 中添加耐磨损的 PE-UMHW 后,PE-HD 的磨损性能明显增强。该实验中,愈创树脂熔点只有 85~90℃,随着树脂比例继续增加,材料变软,材料表面力学性能变差,故在 300 及 3000 目砂作用下磨粒磨损严重,并且 3000 目上升幅度更大。不同砂粒粗细及不同愈创树脂含量时 PE-HD/愈创树脂材料的磨损量如图 9 所示。

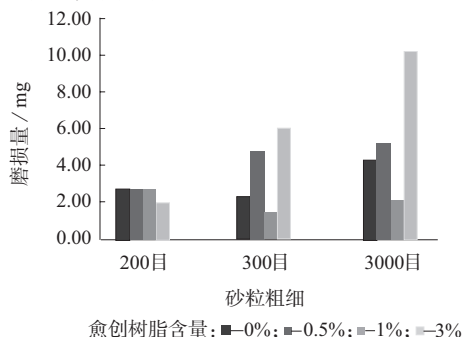


图9 不同砂粒粗细时 PE-HD/愈创树脂材料的磨损量

除了 1% 愈创树脂添加量,材料的磨损量随着砂粒变细而逐渐增大。愈创树脂添加量为 1% 时,由图 6、图 7 可知,材料摩擦性能最好。300 目砂有少量砂粒进入磨合面,使摩擦副面积减小,局部磨损严重,但总体磨损量反而下降。3000 目砂中更多砂粒进入磨合面,使得磨损加剧,但由于有较好的润滑性,虽然磨损量上升,但相较其他组别,磨损较轻。当愈创树脂添加量大于 1% 时,随着添加量的增加材料变软后不耐磨,故磨损量逐渐增加;当愈创树脂添加量小于 1% 时,砂粒越细,在边界润滑状态时进入接触面的砂粒变多,磨损增加。

2.5 表面形貌分析

为进一步研究愈创树脂比例与泥沙粗细对复合材料摩擦性能的影响,利用接触式表面轮廓仪对复合材料的粗糙度进行测量。图 10 为在外载 1.8 MPa、转速 0.136 m/s 工况下不同愈创树脂比例的复合材料在 300 目泥沙介质中的表面形貌。图 11 为在外载 1.8 MPa、转速 0.136 m/s 工况下,愈创树脂含量为 1% 的复合材料在不同目数泥沙介质中的表面形貌。

从图 10 可以看出,四种不同比例的愈创树脂对复合材料的表面形貌产生了明显的影响,并且粗糙度的优劣与前文中的摩擦系数展现出了一致性。0% 愈创树脂的复合材料表面出现了明显的犁沟现象,并且其表面相比于添加愈创树脂的划痕数目较

多。此外,在愈创树脂比例为 1% 时其表面形貌出现的划痕现象较轻,说明此时复合材料的摩擦性能较为优异,在 0.5% 及 3% 的愈创树脂表面的犁沟现象也较为严重,尤其是含量为 3% 愈创树脂的复合材料,其表面划痕较粗,这可能是由于在低速重载的工况下,过大比例的树脂使复合材料表面力学性能变差,使其与坚硬的砂粒出现磨粒磨损现象,最终导致严重的划痕现象。从图 11 可以看出,砂粒粗细对复合材料的表面形貌产生了显著影响,这主要归结于不同粗细的砂粒在低速重载所发生的磨粒磨损现象,对于较细的砂粒(3000 目),其相比于其他两种砂粒(200 目、300 目)更容易进入摩擦副之间,在重载的条件下,较大硬度的砂粒更易被楔入至复合材料内部,从而造成严重的磨粒磨损现象。

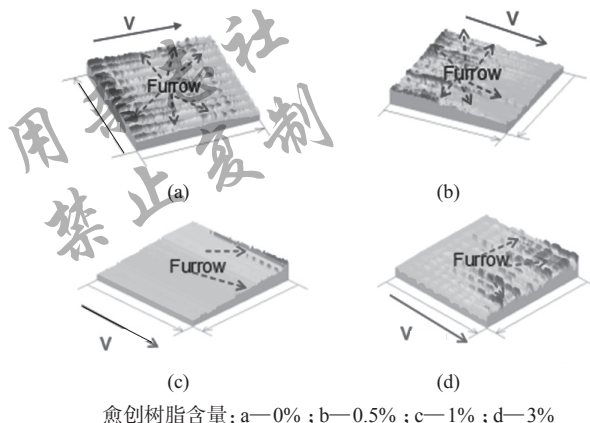


图 10 不同愈创树脂比例的复合材料在 300 目泥沙介质中表面形貌

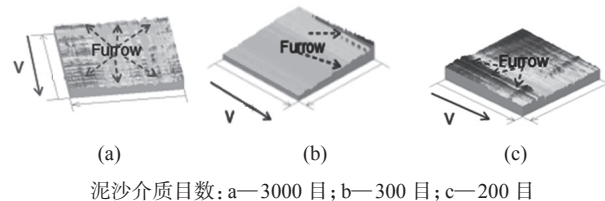


图 11 愈创树脂复合材料在不同目数泥沙介质中的表面形貌

3 结论

- (1) 砂粒粗细对试验材料的摩擦系数有一定影响,但不大;对材料的磨损性能有很大影响。
- (2) 愈创树脂的添加量会改变该材料的磨损性能,在细砂粒的情况下,当愈创树脂添加量大于 1% 时,磨损量随添加量的增加而上升,且砂粒越细,材料的磨损量越大。
- (3) 添加愈创树脂比例为 1% 时,PE-HD 有更加良好的摩擦磨损性能。

参考文献

- [1] 陈战. 水润滑轴承的摩擦磨损性能及润滑机理的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

- Chen Zhan. Study on friction and wear property and lubricant mechanism of water lubricated bearing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
- [2] 段海涛,王学美,吴伊敏,等. 水润滑轴承研究进展[J]. 润滑与密封, 2012, 37(9):109-116.
- Duan Haitao, Wang Xuemei, Wu Yinmin, et al. Present research status of water lubricated bearings[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(9):109-116.
- [3] 刘广建,李二英. 超高分子量聚乙烯在轴套、轴承上的应用[J]. 工程塑料应用, 1995, 23(5):22-24.
- Liu Guangjian, Li Erying. Application of UHMWPE in shaft and bearing[J]. Engineering Plastics Application, 1995, 23(5):22-24.
- [4] Litwin W. Properties comparison of rubber and three layer PTFE-NBR-bronze water lubricated bearings with lubricating grooves along entire bush circumference based on experimental tests[J]. Tribology International, 2015, 90:404-411.
- [5] 刘灿德,何报寅,李茂田,等. 利用 MODIS 反演长江中游悬浮泥沙含量的初步研究[J]. 地质科技情报, 2006, 25(2):99-102.
- Liu Cande, He Baoyin, Li Maotian, et al. Preliminary study on remote sensing of suspended sediment concentration in the middle yangtze river using MODIS[J]. Geological Science and Technol, 2006, 25(2):99-102.
- [6] 董从林,袁成清,陈源华,等. 基于层次分析法的挖泥船摩擦学系统分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(5):90-93.
- Dong Conglin, Yuan Chengqing, Chen Yuanhua, et al. Tribological system analysis of dredger using analytic hierarchy process[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(5):90-93.
- [7] 王家序,陈战,秦大同. 水润滑塑料轴承的摩擦性能研究[J]. 机械工程材料, 2002, 26(11):36-38.
- Wang Jiaxu, Chen Zhan, Qin Datong. Friction and wear characteristics of bearings under water lubrication[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002, 26(11):36-38.
- [8] Choa D H, Bhushana B, Dyessb J. Mechanisms of static and kinetic friction of polypropylene polyethylene terephthalate and high-density polyethylene pairs during sliding[J]. Tribology International, 2016, 94(2):165-175.
- [9] 谢东. 超高分子量聚乙烯的表面改性及其耐磨性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- Xie Dong. Surface modification of high molecular weight polyethylene and its wear-resistance[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2010.
- [10] 王琪,孔祥安,朱露山,等. 聚乙烯材料特性与摩擦系数的关系[J]. 高分子材料科学与工程, 1995, 11(6):119-123.
- Wang Qi, Kong Xiang'an, Zhu Lushan, et al. Effects of material characteristics of polyethylene on coefficient of friction[J]. Polymeric Material Science and Engineering, 1995, 11(6):119-123.
- [11] 刘凯. 复合超高分子量聚乙烯水润滑尾轴承材料摩擦学研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- Liu Kai. Tribological study on water lubricating bearing material in composite UHMWPE[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [12] Alessandra D A L. Abrasive wear of HDPE/UHMWPE blends[J]. Wear, 2011, 270(9):576-583.

信越与索尔维合作,

助其应对超薄高性能薄膜增长需求

全球领先的特种聚合物供应商,索尔维的 KetaSpire® 聚醚醚酮 (PEEK),帮助信越聚合物成功开发出厚度介于 3~9 μm 的超薄高性能 Shin-EtsuSeplaFilm® 膜,可作为移动设备、喇叭和其它相关消费品如耳机、麦克风等的扬声器隔膜。

“KetaSpire®PEEK 将出色的力学性能、耐高温性能、高纯度、阻燃性以及杰出的耐磨损、耐摩擦和抗老化性能结合在一起,满足了 Shin-EtsuSeplaFilm® 苛刻的应用性能要求,”索尔维特种聚合物日本公司总经理 Kazuhiro Kiroko 先生表示,“同时,索尔维 PEEK 加工方便,使得信越聚合物能优化自己的加工流程,开发出各种等级、不同尺寸的产品以推动终端应用的需求增长。”

Shin-EtsuSeplaFilm® 同样适用于各类工业用途,包括电气线路绝缘和漆包线、汽车零部件、电子线路板、航空航天、机器人、医疗器械在内的其它需要绝缘的场合。(中塑在线)

2020 年全国塑料管道总产量将超过 1 600 万 t

根据中国塑料加工工业协会发布的《中国塑料管道行业“十三五”期间发展建议》的预测,2020 年全国塑料管道的总

产量将超过 1 600 万 t,塑料管道在我国管道市场占有率将有望超过 55%。塑煤改气工程新增燃气管道需求。禁煤区覆盖面广,涉及保定、廊坊市 18 个县(市、区),包括 1 个城市建成区、14 个县城建成区(含 404 个城中村)和 3 345 个农村(约 105.4 万户)。在禁煤区内,集中供热率仅为 60% 左右,农村采暖仍以分散燃煤为主,燃气管道设施渗透率低。因此,“煤改气”工程的推进将新增大量燃气管道需求。

塑料管道按照材质可分为 PVC 管道、PE 管道、PP 管道等。其中, PVC 管道系统发展最早,市场份额也最大,达到 36%。而 PE 和 PP 管道起步较晚,但是发展迅速,国内塑料管材产品已形成三足鼎立态势。伴随着我国城市化率的提高,城市供水需求和供水规模逐年增长,加之老化供水管道的更新以及城市排水管道的铺设,供水和排水管道需求量大大幅度增长。根据国家统计局数据,2015 年我国供排水管道合计长度为 125 公里,同比增长 5.22%。凭借着质量轻、韧性好、耐低温、无毒、抗冲击强度高、价格低廉等独特优势, PE 管道大量应用于燃气管道、排水管道、饮水管道、工业耐腐蚀管道等,市场需求量巨大,市场份额有望进一步增加。(中塑在线)