

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.02.017

基于置换法碳纤维束摩擦特性与改性

孟颜颜, 贺磊, 王贤达, 薛德波

(山东理工大学机械工程学院, 山东淄博 255000)

摘要: 针对复合材料三维正交织造钢针置换工艺, 分别采用力学分析和试验研究的方法进行了钢针置换摩擦力模型的预测以及碳纤维束磨损程度的定量分析和改性研究。通过对钢针置换摩擦力预测模型的建立, 发现摩擦力与织造厚度、织造层密度成正相关并且摩擦力数值在预制体阵列中规律性分区呈现: 角部区域摩擦力最大, 边部区域摩擦力次之, 中部区域摩擦力最小; 通过对碳纤维束磨损与改性的实验研究, 发现碳纤维束磨损后的最大断裂强力与钢针置换摩擦力和钢针连续置换次数成负相关, 水溶性二甲基硅油可以解决碳纤维束摩擦磨损问题, 使碳纤维束最大断裂强力增大了 21.14%, 为降低 Z 向纤维束损伤的理想表面处理剂。

关键词: 钢针置换; 摩擦磨损; 表面改性; 摩擦力预测模型

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)02-0089-05

Friction Characteristics and Improvement of Carbon Fiber Bundles Based on Displacement Method

Meng Yanyan, He Lei, Wang Xianda, Xue Debo

(Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract : Aiming at the 3D orthogonal weaving steel needle replacement process of composite materials, the mechanical analysis and experimental research methods were used to predict the steel needle replacement friction model, and the quantitative analysis and improvement of the carbon fiber bundle wear. Through the establishment of the prediction model of the friction of the steel needle replacement, it is found that the friction force is positively related to the weaving thickness and the density of the weaving layer and the friction force value is regularly displayed in the preform array : The corner area has the largest friction force, and the edge area is the second, the friction in the middle region is the smallest. Through the experimental research on the wear and improvement of carbon fiber bundles, it is found that the maximum breaking strength after fiber bundle wear is inversely related to the frictional force of steel needle replacement and the number of continuous replacement of steel needles. Water-soluble dimethyl silicone oil can solve the problem of friction and wear of carbon fiber bundles, increase maximum breaking strength of carbon fiber bundles by 21.14%, and it is an ideal surface treatment agent to reduce the damage of Z-direction fiber bundles.

Keywords : steel needle replacement ; friction and wear ; surface modification ; friction prediction model

复合材料具有强度高、质量轻、抗疲劳、耐烧蚀、可设计性强等优点, 被广泛应用于航空航天、武器装备等领域^[1-6]。为了探究碳纤维的摩擦机制, 近年来一些学者进行了针对性的研究。潘月秀等^[7]通过自制的实验装置研究了摩擦角度、磨损次数等对碳纤维束摩擦损伤的影响; A. Edward 等^[8]为了定量分析碳纤维束在织造过程中的损伤, 对织造过程中不同区域内采样并进行拉伸实验。另外一些

学者对碳纤维束改性特性进行了研究。李张义等^[9]研究经过气相、液相以及气液相结合的方法表面处理后的碳纤维对复合材料磨损性能的影响; 程燕婷等^[10]采用低温等离子体技术对碳纤维表面进行改性处理以改善界面性能; 国内外的许多学者配制上浆剂对碳纤维进行上浆处理, 提高碳纤维的耐磨性和拉伸强度^[7-10]。

以上研究工作为碳纤维束在织造过程中的磨

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2017GGX203004)

通讯作者: 贺磊, 博士, 副教授, 从事碳纤维复合材料构件工艺及设备研究、柔性机构研究 E-mail : helei@sdut.edu.cn

收稿日期: 2019-12-06

引用格式: 孟颜颜, 贺磊, 王贤达, 等. 基于置换法碳纤维束摩擦特性与改性 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(2) : 89-93.

Meng Yanyan, He Lei, Wang Xianda, et al. Friction characteristics and improvement of carbon fiber bundles based on displacement method[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2) : 89-93.

损分析提供参考,但目前对复合材料三维正交织造钢针置换过程中纤维束摩擦磨损鲜有研究。笔者基于钢针置换工艺,进行摩擦力预测模型的建立以及碳纤维束磨损规律和改性的研究,其中摩擦力预测模型的建立能够为钢针置换机械化提供拉力参考,磨损规律和改性的研究能够宏观揭示碳纤维束磨损机制,提高了预制体质量,为工程化应用提供依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

Z向碳纤维: T700-6K, 日本东丽株式会社;

钢针: 直径 1 mm, 长 350 mm, 兴化市银龙不锈钢制品公司;

缝合针: 直径 1 mm, 长 300 mm, 兴化市银龙不锈钢制品公司;

二甲基硅油: 100 mL, 配置成 1 : 100 (处理剂 : 水) 的水溶液, 美国道康宁公司。

1.2 主要仪器与设备

拉力仪: NK-20 型, 东莞耀锋电子设备有限公司;

万能试验机: AG-Xplus SC 型, 岛津企业管理有限公司。

1.3 实验设计

(1) 钢针置换摩擦力测试实验。

基于置换法的三维正交织复合材料预制体成型过程如图 1 所示。一侧使用拉力仪将钢针从预制体中拉出, 另一侧使用缝合针携带 Z 向碳纤维束将钢针逐根替换。

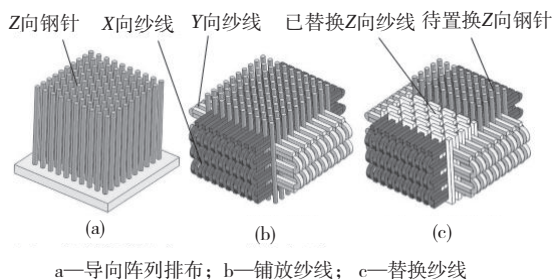


图1 置换法原理

(2) 碳纤维束磨损实验。

不经过任何处理的 Z 向碳纤维束作为对照组, 经过蒸馏水和二甲基硅油均匀喷洒、静置的碳纤维束作为实验组, 缝合针携带三种经过不同处理的碳纤维束穿过同一阵列孔进行多组钢针置换实验, 针头处经过磨损的碳纤维束作为拉伸试样的原料。

1.4 性能测试

(1) 摩擦力测试。

使用拉力仪水平匀速将钢针从预制体中拉出并记录摩擦力数值。

(2) 拉伸断裂强力测试。

根据 GB/T 3362-2005 制备磨损后的碳纤维束拉伸试样, 其中连续摩擦次数分别为 5, 10, 15, 20, 25, 有效拉伸长度为 150 mm 的碳纤维束各 6 个试样, 并在万能试验机上进行测试, 测得拉伸断裂强力后取平均值。

2 结果与讨论

2.1 钢针置换摩擦力理论与实验分析

(1) 钢针置换摩擦力理论模型建立。

由于纤维束宽度比导向阵列间隙距离大, 故在压实力作用下纤维束向上弯曲翻折, 钢针受到纤维束挤压并产生微小形变, 其受力分析如图 2 所示(图中 q 为正向压力), 以钢针变形逆向求出所受正压力进而推出摩擦力。

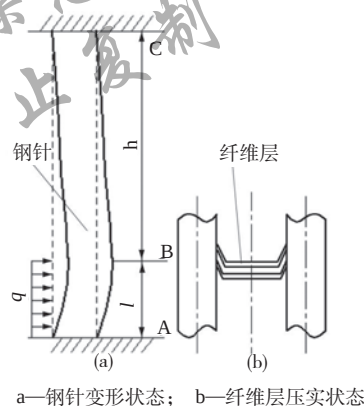


图2 钢针受力分析

每织造 10 层, 进行压实一次, 压实力为 6000 N。每织造 10 层压实后受力状态为:

AB 段:

$$EIW_1 = -\frac{qx_1^4}{24} + \frac{qlx_1^3}{6} - \frac{ql^2x_1^3}{12(1+h)} - \frac{ql^4x_1}{24(1+h)} - \frac{ql^2(1+h)x_1}{6} + \frac{ql^3x_1}{6} \quad (1)$$

$$q = EIW_1 / \left[-\frac{x_1^4}{24} + \frac{lx_1^3}{6} - \frac{l^2x_1^3}{12(1+h)} - \frac{l^4x_1}{24(1+h)} - \frac{l^2(1+h)x_1}{6} + \frac{l^3x_1}{6} \right] \quad (2)$$

BC 段:

$$EIW_2 = -\frac{ql^2x_2^3}{12(1+h)} + \frac{ql^2x_2^3}{4} - \frac{ql^4x_2}{24(1+h)} - \frac{ql^2(1+h)x_2}{6} + \frac{ql^4}{24} \quad (3)$$

$$q = EIW_2 / \left[-\frac{l^2 x_2^3}{12(1+h)} + \frac{l^2 x_2^3}{4} - \frac{l^4 x_2}{24(1+h)} - \frac{l^2(1+h)x_2}{6} + \frac{l^4}{24} \right] \quad (4)$$

每织造 10 层钢针受到的正向压力为:

$$q_i = EIW / \left[-\frac{x^4}{24} + \frac{l_i x^3}{6} - \frac{l_i^2 x^3}{12(1+h_i)} - \frac{l_i^4 x}{24(1+h_i)} - \frac{l_i^2(1+h_i)x}{6} + \frac{l_i^3 x}{6} \right] \quad (5)$$

对应抽拔导向棒时摩擦力 f_i 为:

$$f_i = \mu q_i \quad (6)$$

$$f_i = \mu EIW / \left[-\frac{x^4}{24} + \frac{l_i x^3}{6} - \frac{l_i^2 x^3}{12(1+h_i)} - \frac{l_i^4 x}{24(1+h_i)} - \frac{l_i^2(1+h_i)x}{6} + \frac{l_i^3 x}{6} \right] \quad (7)$$

则抽拔每根导向棒的摩擦力预测模型为:

$$f = \sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n \frac{\mu EIW}{\left(-\frac{x^4}{24} + \frac{l_i x^3}{6} - \frac{l_i^2 x^3}{12(1+h_i)} - \frac{l_i^4 x}{24(1+h_i)} - \frac{l_i^2(1+h_i)x}{6} + \frac{l_i^3 x}{6} \right)} \quad (8)$$

式中: x ——压实后纤维层位置;

n ——层数;

μ ——钢针与纤维束摩擦系数;

E ——钢针弹性模量;

I ——钢针惯性矩;

W ——钢针变形量;

l ——压实后纤维层高度 ($l=10t$, t 为层密度, mm/层);

h ——压实板与织造层顶部高度。

(2) 实验结果分析与验证。

使用拉力仪测得大量代表性试验数据后拟合出预制体摩擦力分布情况。设导向阵列为 m 排 n 列, 由于织造工艺具有重复性和对称性的特点, 故取预制体 1/4 部分的摩擦力作为研究对象, 图 3 为 210 层 (厚度 107 mm) 预制体摩擦力分布及区域划分。由图 3 发现摩擦力具有数值分区呈现的特点: 阵列角部区域的摩擦力普遍较大, 中部区域的摩擦力普遍较小, 依据该特点将阵列分为角部 (A)、边部 (B)、次边部 (C)、中部 (D) 四个区域并做以下规定见表 1, 并取平均值作为每个区域的摩擦力值。

为进一步验证前述理论模型的准确性及适用性, 分别选取预制体织造层数为 210 层 (厚度为 107 mm), 277 层 (厚度为 145 mm), 300 层 (厚度

为 165 mm) 的钢针置换摩擦力试验值对关系式 (8) 进行验证, 结果见表 2~表 4。结果表明钢针置换摩擦力的试验值与理论值的总体误差较小, 最大偏差率小于 10%, 验证了钢针置换摩擦力理论模型的准确性。

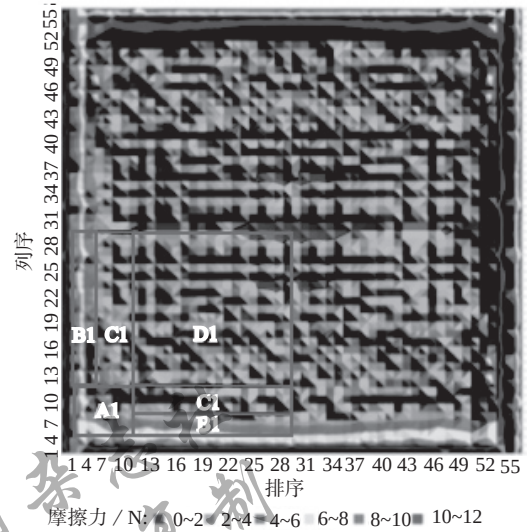


图3 210层 (厚度 107 mm) 预制体摩擦力分布及区域划分

表 1 区域的量化规定

宏观区域	量化区域-排	量化区域-列
角部	2.94%~16.67% m	6.86%~14.71% n
边部	2.94%~7.84% m	15.69%~50% n
次边部	8.82%~18.63% m	15.69%~50% n
中部	17.65%~50% m	6.86%~50% n

表 2 210 层钢针置换摩擦力理论值验证

项目	区域			
	中部	次边部	边部	角部
理论值 / N	3.02	3.78	6.04	6.80
实验值 / N	2.81	3.47	5.98	7.03
偏差率	6.88%	8.24%	1.09%	1.91%

表 3 277 层钢针置换摩擦力理论值验证

项目	区域			
	中部	次边部	边部	角部
理论值 / N	3.55	4.43	7.09	7.98
实验值 / N	3.48	4.54	7.46	8.06
偏差率 / %	2.01	2.48	5.13	1.03

表 4 300 层钢针置换摩擦力理论值验证

项目	区域			
	中部	次边部	边部	角部
理论值 / N	3.25	4.07	6.51	7.32
实验值 / N	3.56	4.16	6.78	7.56
偏差率 / %	9.39	2.29	4.20	3.25

2.2 Z 向纤维束磨损与改性分析

(1) 最大拉伸断裂强力数据分析。

钢针置换过程中发现 Z 向碳纤维束随摩擦力大小及连续置换次数而呈现不同的磨损状态, 为了定量研究钢针置换过程中的碳纤维束磨损, 转为研

究Z向碳纤维束拉伸断裂强力与摩擦力以及置换次数的关系,如图4所示,并将最大断裂强力与摩擦力的关系进行了线性拟合处理,线性拟合后的关系式见表5。

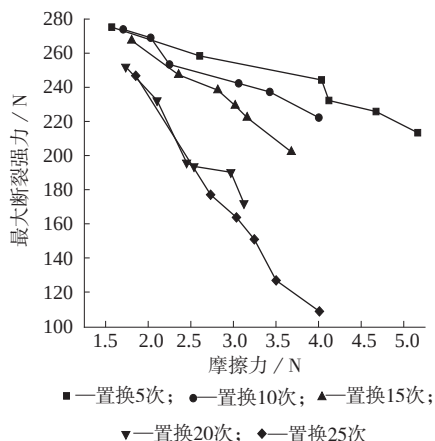


图4 不同置换次数下最大断裂强力与摩擦力的关系

表5 不同置换次数下最大断裂强力与摩擦力拟合关系式

摩擦次数 / 次	拟合关系式
5	$y = -17.809x + 302.097$
10	$y = -23.174x + 308.343$
15	$y = -36.258x + 329.627$
20	$y = -58.697x + 344.185$
25	$y = -69.771x + 364.541$

图4和表5显示Z向纤维束最大断裂强力随摩擦力增加而减小,摩擦次数较多时,Z向纤维束最大断裂强力变化较大、较快;摩擦次数较少时,变化趋势逐渐平缓。为了获得Z向纤维束最大断裂强力与摩擦力、置换次数的普遍规律,对表5直线条的斜率 k /截距 b 与置换次数 y 的关系分别进行指数函数和一次函数拟合分析,拟合结果如式(9)、式(10):

$$k = -13.27e^{0.06816y} \quad (9)$$

$$b = -17.80986y + 302.09765 \quad (10)$$

综上,不同连续置换次数下,Z向纤维束最大拉伸断裂强力与摩擦力的变化关系为式(11),通过该拟合模型调整连续置换次数以满足预制体抗拉强度要求。

$$Z = -13.27e^{0.06816y}x + 3.21944y + 281.41785 \quad (11)$$

式中: Z ——最大断裂强力;

x ——摩擦力;

y ——置换次数。

(2) 表面改性实验数据分析。

图5显示三种碳纤维束在进行钢针置换后拉伸断裂强力情况:未经处理的碳纤维束拉伸断裂强力最小,二甲基硅油处理的碳纤维束拉伸断裂强力最

大。这是因为经水处理或二甲基硅油处理的碳纤维涂覆了1层均匀的涂层,表面光滑度高,使得所受摩擦力较小。二甲基硅油处理的碳纤维束在表面形成的剂膜较厚,提高了碳纤维束的物理抱合力和化学结合力,导致耐磨性提高,使碳纤维最大断裂强力增大了21.14%。

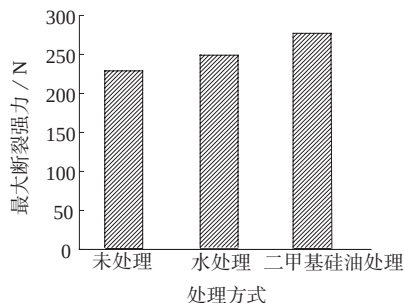


图5 三种纤维束拉伸断裂强力分布情况

3 结论

(1) 钢针置换摩擦力规律性分区呈现,摩擦力分布由大到小为:角部、边部、次边部、中部;钢针置换摩擦力与织造层数和层密度成正相关,依据力学分析建立了钢针置换摩擦力预测模型,与实验值的偏差率小于10%,为钢针置换机械化提供拉力参考。

(2) Z向纤维束最大断裂强力与钢针置换摩擦力成负相关;连续摩擦次数较多时,Z向纤维束最大断裂强力变化较大、较快,连续摩擦次数较少时,变化趋势逐渐平缓;依据实验数据分析建立了Z向纤维束最大断裂强力与摩擦力关系的拟合模型,通过该拟合模型调整连续置换次数以满足预制体抗拉强度要求。

(3) 水溶性二甲基硅油是理想的碳纤维表面处理剂,有效解决了碳纤维束摩擦磨损问题,最大断裂强力增大了21.14%,使得连续置换次数增大,增强了预制体连续性和稳定性。

参考文献

- [1] Kang Huairong, Shan Zhongde, Zang Yong, et al. Progressive damage analysis and strength properties of fiber-bar composites reinforced by three-dimensional weaving under uniaxial tension[J]. Composite Structures, 2016, 141(5):264-281.
- [2] 刘志云,单忠德,战丽,等.柔性导向三维正交结构复合材料预制体建模研究[J].工程塑料应用,2016,44(6):63-66,83. Liu Yunzhi, Shan Zhongde, Zhan Li, et al. Research on modeling of 3D orthogonal flexible weavon composite preform[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6):63-66,83.
- [3] Kumar D, Pagar D D, Kumar R, et al. Recent progress of reinforcement materials:A comprehensive overview of composite materials[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(6):6354-6374.
- [4] Shang T, Carolan D, Sprenger S, et al. Fracture and fatigue

- behaviour of carbon fibre composites with nanoparticle-sized fibres[J]. Composite Structures, 2019, 217(1):143–149.
- [5] Liu Gangshuo, Dai Shuxi, Zhu Baohua, et al. Third-order nonlinear optical properties of mose2-greph composite materials[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120(12):1–8.
- [6] Michel T, Marie B, Catherine J, et al. Influence of wear on the sizing layer and desizing of single carbon fibre-to-fibre friction[J]. Wear, 2018, 402(5):64–70.
- [7] 潘月秀,解锡明,吴宁,等. 碳纤维束间的摩擦磨损特性[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8):1 838–1 846.
- Pan Yuexiu, Xie Ximing, Wu Ning, et al. Frictional and worn behavior of inter-carbon fiber tows[J]. Acta Materiae Compositae sinica, 2019, 36(8):1 838–1 846.
- [8] Edward A, Saul B, Alistair M, et al. The effect of 3D weaving and consolidation on carbon fiber tows, fabrics, and composites[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2010, 29(16):3 162–3 170.
- [9] 李张义,胡以强,陈加云. 不同方法表面改性碳纤维对复合摩擦材料性能的影响[J]. 润滑与密封, 2013, 38(4):68–71, 86.
- Li Zhangyi, Hu Yiqiang, Chen Jiayun. The influence on composite friction material performance by carbon fiber with different surface modification methods[J]. Lubrication Engineering, 2013, 38(4):68–71, 86.
- [10] 程燕婷,孟家光,刘青. 碳纤维表面改性处理及其基本性能表征[J]. 纺织学报, 2016, 37(6):22–26.
- Cheng Yanting, Meng Jiaguang, Liu Qing. Surface modification and performance characterization of carbon fibers[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(6):22–26.
- [11] Luo Yunfeng, Zhao Yan, Duan Yuexin, et al. Surface and wettability property analysis of CCF300 carbon fibers with different sizing or without sizing[J]. Materials & Design, 2011, 32(2):941–946.
- [12] Yuan Haojie, Zhang Shouchun, Lu Chunxiang. Surface modification of carbon fibers by a polyether sulfone emulsion sizing for increased interfacial adhesion with polyether sulfone[J]. Applied Surface Science, 2014, 317(10):737–744.
- [13] Zhang Ruliang, Liu Yun, Huang Yudong, et al. Effect of particle size and distribution of the sizing agent on the carbon fibers surface and interfacial shear strength (IFSS) of its composites[J]. Applied Surface Science, 2013, 287(15):423–427.
- [14] Daniel M, Smerdova O, Michael S. Friction of carbon fibre tows[J]. Composites Part A, 2017, 93(2):185–198.
- [15] Hao Ruiting, Jiao Xiangwei, Zhang Xuejun, et al. Fe₃O₄/graphene modified waterborne polyimide sizing agent for high modulus carbon fiber[J]. Applied Surface Science, 2019, 485(15):304–313.

投稿须知

1 稿件内容

稿件应注重科学性、实用性及时效性,要求技术新颖,论点明确,论据可靠,数据准确,文字通顺、简练。稿件内容必须真实,避免抄袭,请作者文责自负。引用他人成果时,请按《著作权法》有关规定说明出处。内容应未曾发表过或被其他出版物刊载过,且无一稿多投。

2 稿件要求

凡属于重大科技获奖的论文和重点项目资助的论文,请在来稿第一页注明名称及批准号,本刊将优先刊登。

(1) 题目、作者署名及单位。题目力求简明、醒目,反映出文章的主题,一般不超过 20 个汉字。作者姓名在题目下按序排列,不同工作单位的作者,应在姓名右上角加注阿拉伯数字序号。作者单位须写全称并注明省份、城市和邮政编码。联系人信息(包括姓名,学历或职称,主要研究方向)注在第一页下方。

(2) 摘要及关键词。论文需要同时提供中文和英文摘要,摘要以提供论文的内容梗概为目的,不加评论和补充解释,应简明、确切地论述研究目的、原理和结论,具有相对独立性。中文和英文摘要均要求采用报道性摘要类型。具体要求:中英文摘要均为一段式,内容比较具体,一般需要列举关键数据。中英文摘要内容基本一致,中文摘要以 200~300 字为宜,英文摘要可略详。关键词要求 3~8 个。

(3) 正文。正文各部分都应简洁明了。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号,尽量减少层次;不同层次的数字之间用小圆点相隔,末位数字不加标点符号。如“1”,“1.1”等。文中量、单位及符号的使用应符合国际标准和国家标准。

(4) 图表。图表要设计合理,简单自明。每一幅图都应有图序和简短确切的图名,横纵坐标均要注明物理量及其单位,线条图要用矢量格式的图,或将 *.opg, *.dwg, *.eps 等格式的图打包压缩随投稿一起上传。表格请使用三线表,每一表格都应有表序和简短确切的表题。图表标题一律用中文表达。

(5) 参考文献。以作者亲自阅读过的主要原始文献为限,不可引用非公开出版或发表的文献,不能引用其他文章中引用的但未经核对原文的文献,要注意引用最新的文献。参考文献要有一定的数量,研究性论文至少 15 篇。参考文献的著录按文章中引用的顺序依次排列,中文参考文献要有对照英文部分(英文部分不编号)。无论中外文的作者,一律采用姓前名后的形式著录;作者不超过 3 人时可全部著录,超过 3 人时,只著录前 3 位,其后加“等”或“et al”。综述类论文的参考文献著录项目适当简化,可参见本刊相关栏目文章样式。作者对所引文献的准确性和完整性负责。

3 投稿方式

请作者登陆“工程塑料网”(http://www.epa1973.net),进入杂志社之页,点击“网上投稿”后投稿。来稿请注明详细地址、电话、邮箱等信息,便于通知联系。一般一个月左右可以查询稿件审理意见,超过 3 个月未收到修改意见或回复的可自行处理。

4 注意事项

为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已编入国内外著名数据库。稿件一经录用,将同时被数据库收录,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意收录,请在投稿时声明,否则将视为同意。