

# 硅灰石纤维填充超高分子量聚乙烯基复合材料干滑动摩擦磨损的 BP 神经网络分析

马云海, 闫久林, 佟 金

(吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 生物与农业工程学院, 长春 130025)

**摘 要:** 超高分子量聚乙烯及其复合材料由于其优良的自润滑和防黏性能可用于农业工程装备中的滑动接触部件和触土部件。基于神经网络在复杂系统建模问题上的优越性, 考察了几种因素对硅灰石纤维增强复合材料的摩擦和磨损性能影响的模型。考虑到输入、输出数据个数, 调试设计了一个  $3 \times 10 \times 2$  的 BP 神经网络, 其输入层由 3 个神经元构成, 分别为硅灰石纤维的处理方法、硅灰石纤维的加入量和试验过程中的法向载荷。隐含层有 10 个神经元。输出层 2 个神经元分别为材料的摩擦系数和磨损量。基于上述 BP 神经网络对硅灰石纤维增强超高分子量聚乙烯基复合材料的干滑动摩擦磨损性能进行了模拟和预测。对神经网络的训练和检验表明该 BP 神经网络能够较好地预测影响因素对复合材料的干滑动摩擦和磨损的作用, 大部分数据的预测值与试验值的误差在 10% 以内, 其仿真精度能够满足实际的摩擦磨损预测要求。

**关键词:** 超高分子量聚乙烯基; 硅灰石; 填充复合材料; 摩擦磨损; 神经网络

中图分类号: TB 332

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)07-0090-04

马云海, 闫久林, 佟 金 硅灰石纤维填充超高分子量聚乙烯基复合材料干滑动摩擦磨损的 BP 神经网络分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 90- 93

Ma Yunhai, Yan Jiulin, Tong Jin BP neural network analysis of dry sliding friction and wear of UHMW PE composites [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 90- 93 (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

超高分子量聚乙烯(UHMW PE)由于其较多的优良性能而获得广泛应用。例如: 由于高的化学稳定性和与人体组织的相容性而用于人工关节<sup>[1-3]</sup>。在工程领域, UHMW PE 被用于农业工程、化工、纺织、食品加工、造纸、制药、煤炭生产、陶瓷生产等领域的机械设备上, 因其良好的耐化学腐蚀性能、疏水功能、防黏功能、自润滑及高的抗冲击性能等, 被用于代替碳钢和青铜等材料<sup>[4,5]</sup>。例如: 用 UHMW PE 制作农用收割机的齿轮, 比钢制品便宜  $1/3$ , 而寿命则提高 2 倍; 制作煤粉、水泥、石灰、矿粉、盐、谷物等粉体材料的料斗、料仓、滑槽的衬里, 由于其优良的自润滑性和不黏性, 可使这些粉体材料对部件表面不发生黏附现象, 保证稳定输送。UHMW PE 自润滑性能优异, 泥土在其表面容易滑动, 不易发生黏附, 而且其耐冲击性、耐磨损性优良, 用它来制作农业工程装备和建筑机械的零部件, 可大幅度提高工作效率, 减少能耗。利用 UHMW PE 的自润滑性和耐磨性及耐寒性, 可用以制造滑冰、滑雪、水上运动等体育器材的滑动部件<sup>[4,5]</sup>。UHMW PE 的干滑动摩擦系数低于除了聚四氟乙烯以外的几乎所有的聚合物材料, 干滑动条件下的耐磨性高于碳钢和青铜等材料, 磨料磨损条件下的耐磨性高于尼龙-66、碳钢、陶瓷和搪瓷涂层等材料<sup>[6,7]</sup>。在 UHMW PE 基体中填充无机材料粒子或纤维

形成复合材料是一种进一步改进 UHMW PE 耐磨性的有效的方法, 因此, 有许多关于粒子或纤维增强的 UHMW PE 复合材料的制备和摩擦学性能研究报导<sup>[8-15]</sup>。硅灰石纤维已被用来作为尼龙-6-聚丙烯<sup>[16]</sup>, 聚甲基丙烯酸甲酯<sup>[17]</sup>和聚乙烯<sup>[18,19]</sup>基复合材料的增强体。研究表明适量硅灰石纤维增强的 UHMW PE 基复合材料具有机械性能和摩擦学性能的良好配合<sup>[20]</sup>。为了发挥 UHMW PE 的自润滑功能和硅灰石纤维的增强作用, 制备了硅灰石纤维填充 UHMW PE 基复合材料, 研究了复合材料的摩擦磨损性能。

评定各种因素对材料耐磨性的影响比较复杂, 针对不同的摩擦接触模式需建立不同的模型, 使摩擦和磨损的预测缺乏有效性。人工神经网络对于复杂系统建模具有其优越性, 使其在复杂系统研究领域获得较多的应用。BP 神经网络是应用较普遍的一种人工神经网络, 目前其应用实例约占神经网络应用实例的 80%, 成为人工神经网络的经典代表<sup>[21]</sup>。BP 神经网络已经成功的用于材料数据试验处理、摩擦磨损行为分析、图像处理、模式识别、自动控制等领域<sup>[22,23]</sup>。本工作应用 BP 神经网络模型预测了硅灰石纤维偶联处理方式、纤维加入量及法向载荷等因素对硅灰石纤维增强 UHMW PE 基复合材料的干滑动摩擦磨损性能的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 复合材料制备

用于制备复合材料的 UHMW PE 粉末具有分子量  $2.5 \times 10^6$ 。作为增强材料的针状硅灰石纤维具有  $15:1$  的长径比, 针状硅灰石纤维的成分为:  $SiO_2$ , 50.9% (w. t.);  $Al_2O_3$ , 0.25% (w. t.);  $TiO_2$ , 0.05% (w. t.);  $CaO$ , 43.9% (w. t.);  $MnO$ , 0.10% (w. t.); L. O. I.

收稿日期: 2004-06-12 修订日期: 2005-05-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50025516); 国家自然科学基金资助项目(50275037)

作者简介: 马云海(1970-), 男, 博士, 讲师, 长春市人民大街 5988 号吉林大学南岭校区生物与农业工程学院, 130025。Email: myh@jlu.edu.cn

0.5% (w. t.); FeO, 0.55% (w. t.); MgO, 0.1% (w. t.)。

为了改进针状硅灰石纤维与 UHMW PE 基体的结合强度, 对硅灰石纤维分别进行硅烷偶联剂表面改性、钛酸酯偶联剂表面改性以及硅烷-钛酸酯复合表面改性。在粉体接触角测量仪上进行测试, 考察了水在未改性和三种表面改性的硅灰石纤维表面上的接触角, 发现三种改性处理均明显提高硅灰石纤维表面的疏水性, 当将未改性的硅灰石纤维表面的接触角设定为零, 则硅烷偶联剂表面改性、钛酸酯偶联剂表面改性以及硅烷-钛酸酯复合表面改性处理的硅灰石纤维表面上水的接触角分别为 89.9°、88.5° 和 90°, 表明三种改性处理能够较明显改进复合材料界面的结合强度。

复合材料试样制备过程: 将硅灰石纤维与 UHMW PE 粉末在混料机上进行混合, 装入模具型腔内在液压机上进行压制, 压力 100 MPa, 之后在 190 进行烧结, 并在 20 MPa 压力下进行热压。

### 1.2 滑动摩擦磨损试验

采用图 1 所示的环-块接触方式进行摩擦磨损试验, 复合材料试块尺寸 10 mm × 10 mm × 14 mm, 配副环为直径 50 mm 的灰铸铁 HT200。试验过程中的法向载荷 40~160 N, 滑动速度 0.53 m/s。

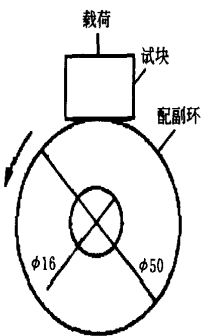


图 1 用于摩擦磨损试验的环-块接触方式示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of a block-on-ring apparatus for sliding friction and wear

## 2 BP 神经网络分析

### 2.1 网络模型

考虑到输入、输出数据个数, 根据实际程序调试设计了一个 3 × 10 × 2 的 BP 神经网络, 如图 2 所示。其中输入层由 3 个神经元构成,  $x_1$  为硅灰石纤维的处理方法, 分别为未处理、钛酸酯偶联剂处理、硅烷偶联剂处理、硅烷-钛酸酯复合处理, 分别用 1、2、3、4 来代表。 $x_2$  为硅灰石纤维的加入量, 分别为 5% (w. t.)、10% (w. t.)、15% (w. t.) 和 20% (w. t.)。 $x_3$  为试验过程中的法向载荷, 分别为 40 N、80 N、120 N 和 160 N。这三个向量构成了 BP 神经网络的输入层。隐层有 10 个神经元, 输出层有 2 个神经元,  $y_1$  和  $y_2$  分别表示材料的摩擦系数和磨损量, 输入层与隐层间的传递函数采用 Sigmoid 函数, 隐层与输出层间的传递函数采用 purelin 函数。

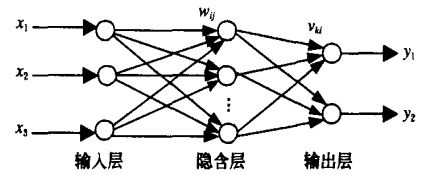


图 2 用于复合材料摩擦磨损性能分析的 BP 神经网络结构  
Fig. 2 BP neural network structure for analysis of friction and wear of UHMW PE-wollastonite composites

### 2.2 训练样本数据的建立

表 1 列出了 UHMW PE 复合材料摩擦系数和磨损量的试验结果和网络样本数据, 表示出了试验因素对摩擦磨损性能的影响。其中: 输入数据为  $x_1, x_2, x_3$ ; 输出数据为  $y_1$  和  $y_2$ ;  $y_1$  和  $y_2$  分别为 BP 神经网络仿真预测的摩擦系数和磨损量;  $|y_1 - y_1|$  和  $|y_2 - y_2|$  分别是摩擦系数和磨损量的预测值与实际测量值的绝对误差;  $|y_1 - y_1|/y_1$  和  $|y_2 - y_2|/y_2$  分别是摩擦系数和磨损量的预测值与实际测量值的相对误差。对表 1 中  $R_1-R_{16}$  所列数据进行训练。

### 2.3 归一化处理样本数据

为使网络快速收敛, 提高精度, 需要对样本数据进行归一化处理, 亦即将训练样本中各列的数据变为 0~1 之间的量。例如: 对输入数据  $x_1$ , 先求出  $x_1$  的最大值  $x_{1max} = \max(x_{1i}) (i = 1, 2, \dots, 16)$  和最小值  $x_{1min} = \min(x_{1i}) (i = 1, 2, \dots, 16)$ , 再对  $x_{1i}$  进行归一化处理, 公式如下:

$$\bar{x}_{1i} = \frac{x_{1i} - x_{1min}}{x_{1max} - x_{1min}} \quad (1)$$

$\bar{x}_{1i}$  即为对应于  $x_{1i}$  的归一化处理后的数据,  $\bar{x}_{1i} \in [0, 1]$ 。

重复上述过程, 可得到输入数据  $x_2$  和  $x_3$  及输出数据  $y_1$  和  $y_2$  的相应的归一化数据。将归一化数据代入网络进行训练。

### 2.4 网络训练

用表 1 样本数据对神经网络进行训练。设定初始权值和阈值取 (0, 1) 之间的随机数, 初始学习率为 0.02, 根据误差平方和的下降速率进行自适应调整, 目标误差为 0.0005, 进行训练。该网络进行 386 次迭代以后, 误差平方和为  $1 \times 10^{-5}$ 。

### 2.5 仿真计算

BP 网络训练结束后, 就可以使用了。在代入网络仿真计算前也需用式 (1) 进行归一化, 使得仿真数据和训练样本数据相一致。仿真得出的数据是归一化数据, 使用时须依据式 (1) 进行反归一化处理, 使数据还原。

### 2.6 网络检验

为检验网络的泛化能力, 将网络训练样本数据中的输入数据代入网络进行仿真计算, 结果见表 1。摩擦系数绝对误差的最大值仅为 0.0004, 磨损量绝对误差的最大值仅为 0.0204, 摩擦系数相对误差的最大值仅为 0.83%, 磨损量相对误差的最大值仅为 6.59%。表明该网络能够很好地对训练样本数据进行泛化。

为检验网络对样本以外的数据进行泛化的能力,选取  $x_3$  (法向载荷) 为 120 N 的试验数据作为检验样本 (记为  $A_1$ — $A_{12}$ ) 进行检验, 结果见表 2。从表 1 和表 2 的试验结果可以发现, 随着硅灰石纤维加入量的增加, 复合材料摩擦系数逐渐变大。UHMW PE 基复合材料随载

荷的增加复合材料的摩擦系数降低, 磨损体积损失随载荷的升高而略有增大。填料经过复合偶联处理后, 摩擦系数要小于其它处理方式时复合材料的摩擦系数。经过偶联处理后的复合材料的耐磨性能大大高于未经处理的复合材料和纯 UHMW PE 材料。

表 1 训练样本数据

Table 1 Sample data for training

样本	$X_1$	$X_2$ /% (w. t.)	$X_3$ /N	$y_1$	$y_2$ /mm <sup>3</sup>	$y_1$	$y_2$ /mm <sup>3</sup>	$ y_1 - y_1 $	$ y_2 - y_2 $ /mm <sup>3</sup>	$ y_1 - y_1 /y_1$ /%	$ y_2 - y_2 /y_2$ /%
$R_1$	1	5	40	0.057	0.2308	0.0571	0.2357	0.0001	0.0049	0.18	2.12
$R_2$	1	10	80	0.055	0.7561	0.0549	0.7625	0.0001	0.0064	0.18	0.85
$R_3$	1	15	120	0.052	1.552	0.0520	1.5498	0	0.0022	0	0.14
$R_4$	1	20	160	0.047	2.4505	0.0471	2.4476	0.0001	0.0029	0.21	0.12
$R_5$	2	5	80	0.048	0.4349	0.0484	0.4145	0.0004	0.0204	0.83	4.69
$R_6$	2	10	40	0.056	0.1325	0.0558	0.1402	0.0002	0.0077	0.36	5.81
$R_7$	2	15	160	0.043	1.9807	0.0429	1.9919	0.0001	0.0112	0.23	0.56
$R_8$	2	20	120	0.051	1.3101	0.0510	1.319	0	0.0038	0	0.29
$R_9$	3	5	120	0.045	0.9987	0.0477	1.1568	0.0003	0.0152	0.67	1.52
$R_{10}$	3	10	160	0.042	1.9773	0.0422	1.9654	0.0002	0.0119	0.48	0.60
$R_{11}$	3	15	40	0.057	0.1365	0.0572	0.1286	0.0002	0.0079	0.35	5.79
$R_{12}$	3	20	80	0.055	0.5208	0.0551	0.5235	0.0001	0.0027	0.18	0.52
$R_{13}$	4	5	160	0.039	1.6586	0.0391	1.6551	0.0001	0.0035	0.26	0.21
$R_{14}$	4	10	120	0.045	0.5208	0.0449	0.5312	0.0001	0.0104	0.22	1.99
$R_{15}$	4	15	80	0.053	0.4179	0.0532	0.4066	0.0002	0.0113	0.38	2.70
$R_{16}$	4	20	40	0.058	0.1289	0.0579	0.1374	0.0001	0.0085	0.17	6.59

表 2 检验样本数据

Table 2 Sample data for testing

样本	$X_1$	$X_2$ /% (w. t.)	$X_3$ /N	$y_1$	$y_2$ /mm <sup>3</sup>	$y_1$	$y_2$ /mm <sup>3</sup>	$ y_1 - y_1 $	$ y_2 - y_2 $ /mm <sup>3</sup>	$ y_1 - y_1 /y_1$ /%	$ y_2 - y_2 /y_2$ /%
$A_1$	1	5	120	0.049	1.3101	0.0516	1.3232	0.0026	0.0130	5.30	0.99
$A_2$	1	10	120	0.051	1.1765	0.0503	1.2710	0.0007	0.0945	1.37	8.03
$A_3$	1	20	120	0.055	1.6001	0.0535	1.3910	0.0015	0.2091	2.72	13.06
$A_4$	2	5	120	0.047	1.1923	0.0483	1.2033	0.0013	0.011	2.76	0.92
$A_5$	2	10	120	0.048	1.0300	0.0477	1.1288	0.0003	0.0988	0.62	9.59
$A_6$	2	15	120	0.049	1.1136	0.0487	1.1029	0.0003	0.0107	0.61	0.96
$A_7$	3	10	120	0.048	0.9815	0.0471	1.0414	0.0009	0.0599	1.88	6.10
$A_8$	3	15	120	0.049	1.1066	0.0482	0.9902	0.0008	0.1164	1.63	10.52
$A_9$	3	20	120	0.050	1.1429	0.0492	1.0368	0.0004	0.1061	0.80	9.28
$A_{10}$	4	5	120	0.044	0.7817	0.0452	0.9518	0.0012	0.1761	2.73	22.53
$A_{11}$	4	15	120	0.048	0.7561	0.0485	0.8800	0.0005	0.1239	1.04	16.39
$A_{12}$	4	20	120	0.049	0.8316	0.0501	0.9320	0.0011	0.1004	2.24	12.07

由表 2 可知, 预测结果与试验值有差别。产生这种差别的原因可能有: 由于材料的磨损是一个复杂的过程, 影响材料磨损的因素非常多, 各种因素之间存在交互作用, 材料的磨损是一个典型的非线性映射问题, 而预测模型只能考虑影响磨损的主要因素, 且未考虑各因素之间的交互作用; 模型使用的学习样本值本身存在着系统误差和随机误差。神经网络的工作性能在一定程度上受到所选择的训练数据集的限制, 如果选择的数据不够典型和完备, 会使预测模型性能不好, 且神经网络的结构和学习参数的选择也会影响预测效果。这些都还有待进一步研究。预测结果虽然存在误差, 但大部分数据的预测值与试验值的误差  $|y - y|/y$  在 10% 以内, 摩擦系数绝对误差的最大值为 0.0026, 磨损量绝对误差的最大值为 0.2091。其预测的总体结果对把握材料磨损性能的总体变化趋势仍具有指导意义。对磨损状况进行预测, 不仅充分利用现有数据, 而且为合理进行磨

损的试验研究提供了科学依据。本研究结果表明采用 BP 神经网络能够很好地对正交试验训练样本的其余样本进行预测和评估, 精度较高, 弥补了正交试验方法的不足, 其仿真精度能够满足实际的摩擦磨损预测的要求, 且其网络对样本以外的数据也有较好的泛化能力。

## 4 结 论

制备了硅灰石纤维增强的超高分子量聚乙烯基复合材料。应用 BP 神经网络模型预测了硅灰石纤维偶联处理方式、纤维加入量及法向载荷等因素对硅灰石纤维增强超高分子量聚乙烯基复合材料的干滑动摩擦磨损性能的影响。结构为  $3 \times 10 \times 2$  的 BP 神经网络较有效的预测了硅灰石纤维增强超高分子量聚乙烯基复合材料干滑动摩擦磨损性能。经样本检验表明, 该网络模型对磨损量和摩擦系数的预测具有较高的精度, 大部分数据的预测值与试验值的误差在 10% 以内。

## [参 考 文 献]

- [1] McGloughlin T M, Kavanagh A G. Wear of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW PE) in total knee prostheses: a review of key influences[J]. Proc Inst Mech Eng, 2000, H214: 349- 359.
- [2] Wang A, Essner A, Polineni V K, et al. Lubrication and wear of ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacements[J]. Tribol Int, 1998, 31: 17- 33.
- [3] Yoshinori S, Teruo M, Jian C. Effect of synovia constituents on friction and wear of ultra-high molecular weight polyethylene sliding against prosthetic joint materials[J]. Wear, 1998, 216: 213- 219.
- [4] 袁俊霞. 超高分子量聚乙烯的性能[J]. 化工新型材料, 2003, 31(3): 19- 21.
- [5] 陈战, 王家序, 秦大同. 超高分子量聚乙烯的性能及在机械中的应用[J]. 机械工程材料, 2001, 25(8): 1- 3.
- [6] Tong J, Ren L, Chen B, Qaisrani A R. Characteristics of adhesion between soil and solid surfaces[J]. J Terramech, 1994, 32: 93- 105.
- [7] Tong J, Ren L, Yan J, et al. Adhesion and abrasion of several materials against soil[J]. Int Agric Eng J, 1999, 8: 1- 22.
- [8] Cenna A A, Allen S, Page N W, et al. Modelling the three-body abrasive wear of UHMW PE particle reinforced composites[J]. Wear, 2003, 254: 581- 588.
- [9] Cenna A A, Doyle J, Page N W, et al. Wear mechanism in polymer matrix composites abraded by bulk solids[J]. Wear, 2000, 240: 207- 214.
- [10] Chang N, Bellare A, Cohen R E, et al. Wear behavior of bulk oriented and fiber reinforced UHMW PE [J]. Wear, 2000, 241: 109- 117.
- [11] Cohen Y, Rein D M, Vaykhansky L. Novel composite based on ultra-high molecular weight polyethylene [J]. Comp Sci Tech, 1997, 57: 1149- 1154.
- [12] 何春霞. 超高分子量聚乙烯及其纳米  $Al_2O_3$  填充复合材料摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(1): 32- 35.
- [13] Hofste J M, Schut J A, Pennings A J. Effect of chromic acid treatment on the mechanical and tribological properties of aramid fiber reinforced ultra-high molecular weight polyethylene composite[J]. J Mater Sci Mater Med, 1998, 9: 561- 566.
- [14] Liu C, Ren L, Arnell R D, et al. Abrasive wear behaviour of particle reinforced UHMW PE composites [J]. Wear, 1999, 225- 229: 199- 204.
- [15] Suwanprateeb J. Binary and ternary particulated composites: UHMW PE/ $CaCO_3$ /HDPE [J]. J Appl Polym Sci, 2000, 75: 1503- 1513.
- [16] Wang Q, Liu C, Chen Y. Studies on PA6-PP-wollastonite composite compatibilised by PP-graft maleic anhydride prepared via panning [J]. Plast Rub Comp, 2001, 30: 363- 369.
- [17] Hanumantha R K, Forssberg K S E, Frosling W. Interfacial interactions and mechanical properties of mineral filled polymer composites: wollastonite in PMMA polymer matrix [J]. Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects, 1998, 133: 107- 117.
- [18] Zhuang G, Yang Y, Li B. Reinforced effect of wollastonite on phenolphthalein poly(ether ketone) [J]. J Appl Poly Sci, 1997, 65: 649- 653.
- [19] Fu S, Wu P, Han Z. Tensile strength and rupture energy of hybrid poly(methylvinylsiloxane) composites reinforced with short PET fibers and wollastonite whiskers[J]. Composite Sci Tech, 2002, 62: 3- 8.
- [20] Tong J, Ma Y, Jiang M. Effects of the wollastonite fibre modification on the sliding wear behavior of the UHMW PE composites[J]. Wear, 2003, 255(1- 6): 734- 741.
- [21] Fukuda Toshio, Ghibata Takanori. Theory and applications of neural networks for industrial control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, 39(6): 472- 489.
- [22] 李春好, 李立辉, 杨印生. 人工神经网络BP算法的数据处理方法及应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, (7): 106- 109.
- [23] 杨会志. 基于BP网络和遗传算法的正交实验分析[J]. 计算机工程与应用, 2001, (20): 16- 18.

## BP neural network analysis of dry sliding friction and wear of UHMW PE composites

Ma Yunhai, Yan Jiulin, Tong Jin

(Key laboratory of Terrain Machine Bionics Engineering, Ministry of Education, College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University (Nanling Campus), Changchun 130025, China)

**Abstract** Ultra high molecular weight polyethylene (UHMW PE) and its composites can be used for the sliding contact parts and soil-working components of agricultural engineering equipment since their excellent self-lubrication and anti-adhesion. Dry sliding friction and wear of UHMW PE composites filled with wollastonite fibers were simulated and estimated based on BP neural network. The BP neural network with a  $3 \times 10 \times 2$  structure was designed, trained and checked. It is shown that the designed neural network can estimate the effects of the coupling treatment method of wollastonite fibers, fiber content in the composites and the normal load during tests on the dry sliding friction and wear properties of the composites effectively. Mostly, the estimated values of the friction coefficients and worn volumes were close to the corresponding experimental data and the errors between the estimated values and the corresponding experimental data were less than 10%.

**Key words:** UHMW PE; wollastonite; filled composite; friction and wear; neural network