

# 基于数量关系研究铝合金船体点蚀对 拉伸性能的影响

亓云飞, 孙丹丹, 董彩常

(钢铁研究总院, 北京 100095)

**摘要:** **目的** 通过点蚀与拉伸性能的数量关系, 为 5083 铝合金船体不同腐蚀状态板材相应修换要求的提出提供数据支持。**方法** 对服役 10 a 的某型艇船体 5083 铝合金板, 进行点蚀特征参数统计, 并测试其拉伸性能。对四个点蚀参数与拉伸强度损失的关系进行拟合回归分析及相关性分析, 找出相应的数量关系。**结果** 由拟合回归分析可知, 最大点蚀深度数据样本与拟合曲线较契合, 与拉伸性能的相关度最高。另外得出了点蚀参数与拉伸强度损失之间的函数关系, 可以估计相应的指标。由相关性分析可知, 最大点蚀深度与拉伸强度的相关系数大于 0.9, 属于强相关。自变量中, 最大点蚀深度和平均点蚀深度这两个指标出现一定程度的冗余。**结论** 点蚀特征及拉伸性能数量关系的研究可以为铝合金船体板的拉伸性能进行相关预测, 并可为铝合金船体板的耐蚀寿命研究提供依据。

**关键词:** 数量关系; 5083 铝合金; 点蚀; 拉伸性能; 拟合回归分析; 相关性分析

**中图分类号:** TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2021)12-0059-06

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.010

## Study on the Effect of Pitting Corrosion of Aluminum Alloy Hull on Tensile Properties Based on Quantitative Relationship

QI Yun-fei, SUN Dan-dan, DONG Cai-chang

(Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100095, China)

**ABSTRACT:** The quantitative relationship between pitting corrosion and tensile properties can be used to provide data support for the proposal of the corresponding repair and replacement requirements for the 5083 aluminum alloy hull plates in different corrosion conditions. For a certain type of boat hull 5083 aluminum alloy plate that has been in service for ten years, the pitting corrosion characteristic parameter statistics and the tensile performance test are carried out, and the fitting regression analysis and correlation analysis of the four parameters of pitting corrosion and the loss of tensile strength are carried out to find the corresponding quantitative relationship. According to the fitting regression analysis, the maximum pitting depth is most correlated with the tensile property. In addition, the function relation between pitting parameters and tensile strength loss is obtained, and the corresponding indexes can be estimated. According to the correlation analysis, the correlation coefficient between the maxi-

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-05-21

Received: 2021-04-23; Revised: 2021-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0702303)

Fund: Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0702303)

作者简介: 亓云飞(1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: QI Yun-fei(1987—), Female, Master, Engineer, Research focus: majoring in corrosion and protection.

引文格式: 亓云飞, 孙丹丹, 董彩常. 基于数量关系研究铝合金船体点蚀对拉伸性能的影响[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 059-064.

QI Yun-fei, SUN Dan-dan, DONAG Cai-chang. Study on the effect of pitting corrosion of aluminum alloy hull on tensile properties based on quantitative relationship[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 059-064.

mum pitting depth and tensile strength is greater than 0.9, which is a strong correlation. In the independent variables, there is a certain degree of redundancy in the two indicators of pitting depth. The study based on the pitting corrosion characteristics and the quantitative relationship of tensile properties can be used to predict the tensile properties of aluminum alloy hull plates and provide a basis for the replacement and repair of hull plates.

**KEY WORDS:** quantity relationship; 5083 aluminum alloy; pitting; tensile property; fitting regression analysis; correlation analysis

铝合金材料因其比重轻、强度高等优点,近年来被广泛应用于各类中小型高速船舶中,如军用小型舰艇、水翼艇和穿浪双体船等<sup>[1-3]</sup>。但铝在海水中受氯离子作用,会破坏氧化膜,容易产生点蚀现象。相关研究表明<sup>[4-5]</sup>,相对于其他铝合金,海水中的氯离子对5000系铝合金的腐蚀程度较低。5083铝合金具有较高的强度、良好的塑性及加工性,是一种很常见的船用铝合金<sup>[6-7]</sup>。船用铝合金耐蚀性研究是船用铝合金全寿命周期中不可或缺的一部分。铝合金在海水环境中常见的腐蚀现象为点蚀,腐蚀缺陷会影响船体铝合金板的机械性能,进而影响铝合金船体的耐用性及寿命。数据分析法现已应用于各个领域,其中,数量关系分析可以依据得到的自变量和因变量,得出相关的经验公式和相关关系,对相关性能进行判断及评价。

基于数量关系分析法对点蚀及铝合金船体板的机械性能进行分析研究,利用数量关系分析的特点获得相关经验公式,可用于研究铝合金船体板的耐蚀寿命。本试验载体为服役10a的某型艇船体Al-Mg5083合金板,船体板点蚀严重,对其进行拉伸性能研究,将不同测试试样的点蚀数据与拉伸强度等拉伸性能损失数据进行拟合回归分析及相关性分析,寻找铝合金板的点蚀特征和其拉伸性能的联系,找到它们之间的线性或非线性关系。即可通过铝合金板的点蚀特征统计数据来预测样品的拉伸性能,为5083铝合金船体耐蚀寿命研究提供数据支撑。

## 1 试验与分析方法

### 1.1 试验材料与试验方法

试验材料为Al-Mg5083合金,筛选点蚀样板,制备尺寸为200 mm×30 mm×3.5 mm的哑铃状试样,尽量使点蚀集中在拉伸试验段内<sup>[8]</sup>,如图1所示。拉伸试验参照GB/T 228.1—2010进行,在WDW3200万能电子试验机上进行,拉伸速度为1.0 mm/min,记录拉伸强度。

由图1可知,试验板点蚀形貌较清晰,容易统计分辨点蚀的数量及大小。参照GB/T 18590—2001《金属和合金的腐蚀 点蚀评定方法》,每块板的点蚀覆盖面积通过6 mm<sup>2</sup>的网格板进行测量统计;将所有点蚀深度通过测微计进行测量统计,得出最大点蚀深度,

并计算平均点蚀深度;统计点蚀覆盖面积及点蚀深度最大的点蚀部位,用锥形体积公式估算得出最大点蚀体积。

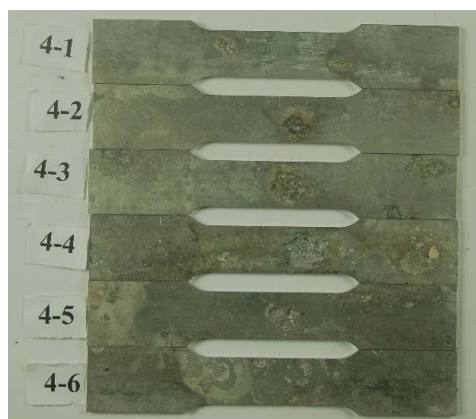


图1 点蚀区样板拉伸试样  
Fig.1 Pitting zone sample tensile specimen

### 1.2 拟合回归分析

根据试验数据,拟合自变量(点蚀覆盖面积、最大点蚀深度、平均点蚀深度、最大点蚀体积)与因变量间(抗拉强度)的函数关系,并计算拟合结果的指标,绘制相应的图像。

运用线性和多项式拟合技术探讨每对自变量、因变量之间的关系。选择一组自变量、因变量,组成数据集 $D = \{(x, y) | x \in X, y \in Y\}$ , $X$ 、 $Y$ 分别是自变量和因变量的数据集,在数据集 $D$ 上运用多项式拟合技术获得函数关系 $y = f(x)$ 。

拟合回归分析流程如图2所示,首先输入数据集 $D$ ,从 $D$ 中获取数据 $X$ 、 $Y$ ,运用多项式拟合算法求得 $f(x) = \text{polyfit}(X, Y, c)$ ( $c$ 代表多项式的阶数,具体值依据实际情况确定),计算MSE和 $R^2$ 衡量拟合效果,最后输出 $f(x)$ 、MSE和 $R^2$ 。

每对自变量、因变量为一次实验,共四组研究。通过拟合函数 $f(x)$ ,得到相应指标的估计值。MSE为均方误差,它可以评价数据的变化程度,MSE值越小,预测模型对实验数据描述的精确度更好。 $R^2$ 为拟合优度,最大值为1, $R^2$ 的值越接近1,说明回归直线对观测值的拟合程度越好;反之, $R^2$ 的值越小,说明回归直线对观测值的拟合程度越差<sup>[9-10]</sup>。

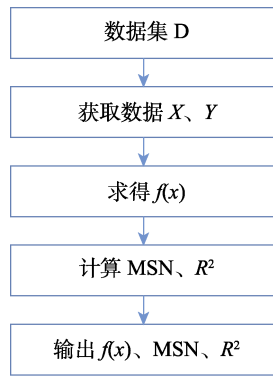


图 2 拟合回归分析流程  
Fig.2 Flow chart of fitting regression analysis

### 1.3 相关性分析

相关性分析流程如图 3 所示。对自变量与因变量、自变量自身的相关性进行研究，主要通过计算 Pearson 系数来表示各变量间的相关强度。Pearson 相关系数是用来衡量两个数据集合是否在一条线上，衡量定距变量间的线性关系。相关系数的绝对值越大，越接近于 1 或-1，相关性越强；相关系数越接近于 0，相关性越弱<sup>[11-14]</sup>。选择要计算相关系数的变量，重复图 3 中的过程即可。

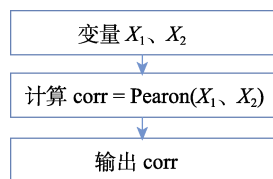


图 3 相关性分析流程  
Fig.3 Flow chart of correlation analysis

## 2 试验结果与分析

### 2.1 腐蚀形貌与物理性能试验结果

点蚀区域有 6 块平行样，分别编号为 4-1、4-2、4-3、4-4、4-5、4-6。表 1、表 2 为点蚀区域的点蚀形貌统计及拉伸性能试验数据，拉伸性能测试曲线如图 4 所示。

表 1 点蚀区点蚀特征参数值  
Tab.1 Pitting characteristic parameter value in the pitting area

试样编号	点蚀覆盖面积/cm <sup>2</sup>	最大点蚀深度/mm	平均点蚀深度/mm	最大点蚀体积/cm <sup>3</sup>
4-1	1	1.13	0.87	0.038
4-2	1.5	1.88	1.56	0.063
4-3	3.5	1.27	1.0	0.085
4-4	4	3.07	2.58	0.205
4-5	1.5	1.64	1.53	0.055
4-6	2	1.18	1.0	0.039

表 2 点蚀区样板拉伸试验数据  
Tab.2 Tensile test data of sample plate in pitting area

样品编号	抗拉强度/MPa	备注
4-1	291	断点蚀处
4-2	215	断点蚀处
4-3	226	断点蚀处
4-4	145	断点蚀处
4-5	215	断点蚀处
4-6	264	断点蚀处

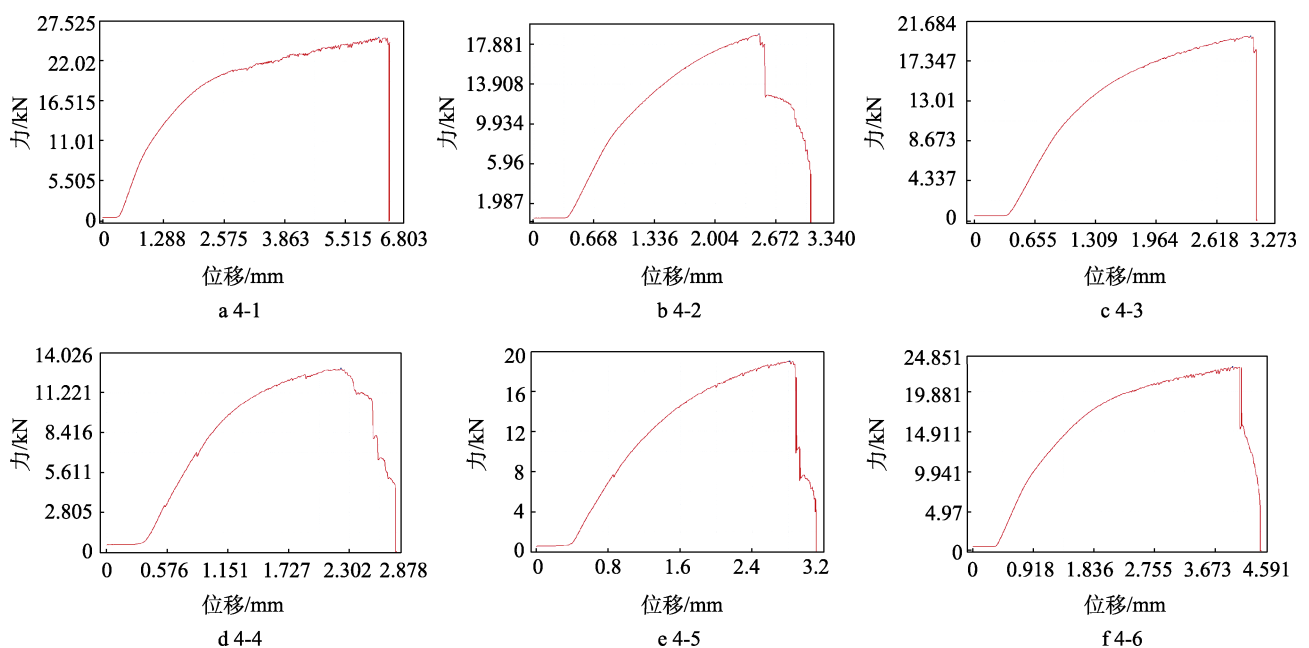


图 4 拉伸性能测试曲线  
Fig.4 Test curve of tensile property

对点蚀船体板试样的点蚀参数及其拉伸强度(见表1、表2、图4)进行分析,比较了点蚀船体板平行样的点蚀形貌,发现点蚀最严重的样品为4-4,点蚀最轻微的样品为4-1。拉伸试验结果表明,样品4-4的抗拉强度最小,仅为145 MPa;样品4-1的抗拉强度最大,为291 MPa。样品4-2、4-3、4-5、4-6的拉伸强度由大到小排序为:4-6>4-3>4-2=4-5。由点蚀数据可知,样品4-2、4-5的点蚀深度较大,样品4-6的

点蚀深度较小,说明腐蚀深度越深,拉伸强度越小,材料越容易断裂失效。

### 2.2 拟合回归分析

点蚀参数值(点蚀覆盖面积、最大点蚀深度、平均点蚀深度、最大点蚀体积)与抗拉强度损失数据的拟合如图5所示,以此研究四个参数与抗拉强度之间的关系。

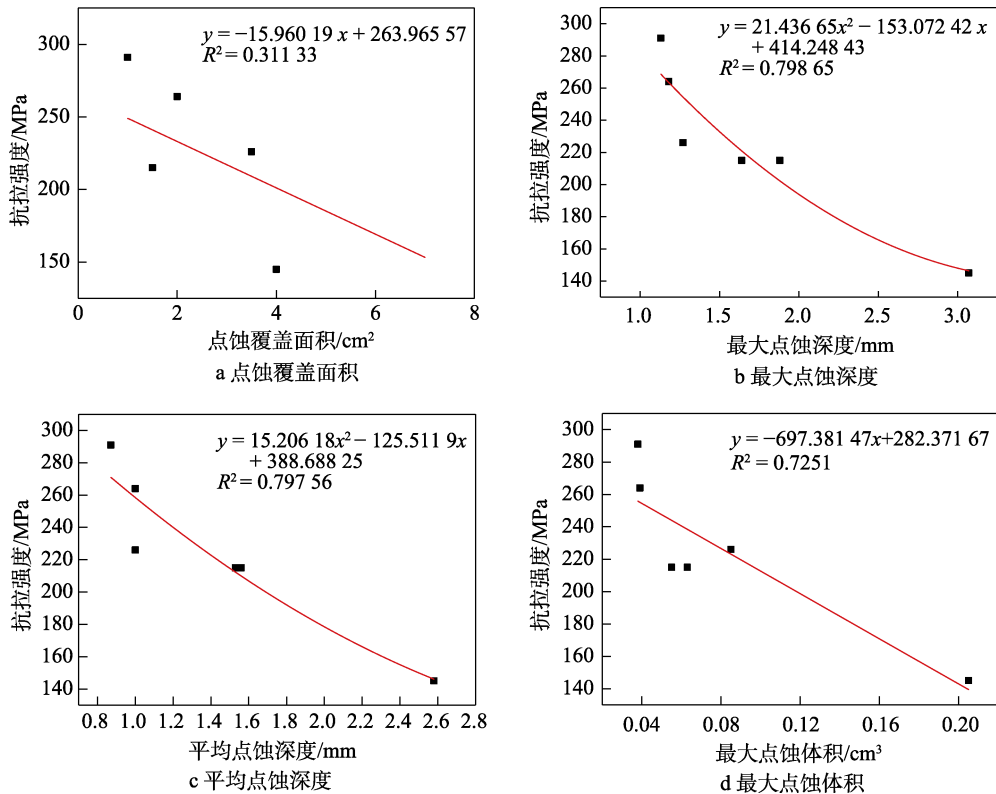


图5 点蚀参数值与抗拉强度损失数据拟合图

Fig.5 Fitting graphs of pitting parameter value and tensile strength loss data: a) area covered by pitting; b) maximum pitting depth; c) average pitting depth; d) maximum pitting volume

图5a中,横坐标为点蚀覆盖面积,纵坐标为抗拉强度,黑点为原始数据,直线代表拟合函数。可以明显看出,点蚀覆盖面积和抗拉强度为负相关。拟合函数为  $f(x) = -15.96x + 263.96$ , 其中,  $R^2$  为 0.311。

图5b中,横坐标为最大点蚀深度,纵坐标为抗拉强度,黑点为原始数据,曲线代表拟合函数。可以明显看出,最大点蚀深度和抗拉强度为负相关。拟合函数为  $f(x) = 21.44x^2 - 153.07x + 414.25$ ,  $R^2$  为 0.799。

图5c中,横坐标为平均点蚀深度,纵坐标为抗拉强度,黑点代表原始数据,曲线代表拟合函数。可以明显看出,平均点蚀深度和抗拉强度为负相关。拟合函数为  $f(x) = 15.206x^2 - 125.51x + 388.69$ ,  $R^2$  为 0.798。

图5d中,横坐标为最大点蚀体积,纵坐标为抗拉强度,黑点代表原始数据,直线代表拟合函数。可以明显看出,最大点蚀体积和抗拉强度为负相关。拟合函数为  $f(x) = -697.38x + 282.37$ ,  $R^2$  为 0.725。

从图5可以看出,点蚀覆盖面积的样本点与拟合曲线的平均距离较大,最大点蚀深度、平均点蚀深度、最大点蚀体积与抗拉强度的负相关性更加明显,点蚀深度很好地描述了腐蚀对材料的影响。

### 2.3 相关性分析

自变量与因变量的 Pearson 相关系数见表3,可以看到,自变量与因变量总体呈现负相关性。其中,点蚀覆盖面积与因变量的相关性一般;最大点蚀深度与因变量的相关系数大于 0.9,属于极强相关,可见最大点蚀深度对于材质的影响相当大;其次最大点蚀体积、平均点蚀深度与抗拉强度相关系数均较大,对材料的抗拉强度影响较大。

自变量间的相关性见表4,可以看到,点蚀覆盖面积和深度之间的相关性不大,最大点蚀体积与最大点蚀深度的相关性最大,与点蚀覆盖面积具有一定的

表 3 自变量与因变量的 Pearson 相关系数  
Tab.3 Pearson correlation coefficient of independent variable and dependent variable

因变量	自变量			
	点蚀覆盖面积	最大点蚀深度	平均点蚀深度	最大点蚀体积
抗拉强度	-0.611 506 837	-0.924 602 157	-0.833 687 44	-0.872 639 133

表 4 自变量之间的 Pearson 相关系数  
Tab.4 Pearson correlation coefficient between independent variables

	点蚀覆盖面积	最大点蚀深度	平均点蚀深度	最大点蚀体积
点蚀覆盖面积	1	0.511 623 066	0.331 744 175	0.829 640 68
最大点蚀深度	0.511 623 066	1	0.946 531 374	0.851 897 066
平均点蚀深度	0.331 744 175	0.946 531 374	1	0.736 397 672
最大点蚀体积	0.829 640 68	0.851 897 066	0.736 397 672	1

相关性。最大点蚀深度和平均点蚀深度相关性系数达到 0.95，极强相关，说明二者信息具有一定的冗余性<sup>[15]</sup>。

### 3 结论

1) 由拟合回归分析可知，最大点蚀深度与因变量的相关性最强，其数据样本与拟合曲线也更加契合；反观点蚀覆盖面积，最大点蚀体积样本点分布较为散乱，与因变量相关性较弱。因此，可以断定最大点蚀深度对材质的影响更大。

2) 通过回归拟合分析得到不同自变量与因变量间的函数关系，描述了腐蚀特征参数对材质带来的影响，利用这些函数可以估计相应的指标。

3) 自变量中的腐蚀指标与因变量具有明显的负相关关系，点蚀深度的影响大于点蚀面积及点蚀体积的影响；自变量之间最大点蚀深度和平均点蚀深度的相关性系数为 0.95，存在信息冗余。

#### 参考文献：

[1] 林学丰. 铝合金在舰船中的应用[J]. 铝加工, 2003, 148(1): 10-11.  
LIN Xue-feng. The application of aluminum alloy in ships[J]. Aluminum Processing, 2003, 148(1): 10-11.

[2] 魏梅红, 刘徽平. 船舶用耐蚀铝合金的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(12): 6-8, 51.  
WEI Mei-hong, LIU Hui-ping. Research progress of corrosion resistant aluminum alloys for ship applications[J]. Light alloy fabrication technology, 2006, 34(12): 6-8, 51.

[3] 梁岩, 王国军. 舰船用 Al-Mg 系铝合金[J]. 黑龙江冶金, 2007, 27(3): 3-6.  
LIANG Yan, WANG Guo-jun. The Al-mg series of aluminum alloys applied in vessels[J]. Heilongjiang metallurgy, 2007, 27(3): 3-6.

[4] 刘永翔, 许骥, 王鹏. 某型快艇船体外板腐蚀点焊补工

艺研究[J]. 设计与研究, 2015, 4(6): 25.  
LIU Yong-xiang, XU Ji, WANG Peng. Research on the corrosion spot welding process of the hull plate of a speedboat[J]. Design and research, 2015, 4(6): 25.

[5] 鲁聪聪. 铝合金在船舶与海洋工程中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2019(4): 29-30.  
LU Cong-cong. Application research of aluminum alloy in ship and ocean engineering[J]. Scientific and technological innovation, 2019(4): 29-30.

[6] 杨铁军, 李国明, 陈珊, 等. 船用铝合金点蚀及阴极保护研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 88-91.  
YANG Tie-jun, LI Guo-ming, CHEN Shan, et al. Study of hull aluminum alloy pitting and its protection potential[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(2): 88-91.

[7] 侯健, 张彭辉, 郭为民. 船用铝合金在海洋环境中的腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 59-63, 80.  
HOU Jian, ZHANG Peng-hui, GUO Wei-min. Study on corrosion of aluminum alloys for ship applications in marine environment[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(2): 59-63.

[8] 亓云飞, 董彩常, 李超. 点状腐蚀对铝壳船船体板材力学性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(1): 98-101.  
QI Yun-fei, DONG Cai-chang, LI Chao. Effect of pitting corrosion on mechanical properties of pull plates on aluminum ship[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(1): 98-101.

[9] 邱竹贤, 邱天爽, 王兆文, 等. 铝电解实验数据的回归分析和经验公式拟合[J]. 东北大学学报, 2003, 24(4): 352-357.  
QIU Zhu-xian, QIU Tian-shuang, WANG Zhao-wen, et al. Regression analysis of aluminum electrolyte data and their empirical expressions[J]. Journal of Northeastern University, 2003, 24(4): 352-357.

[10] 俞海峰, 杨美桂, 胡征宇. 用 LabVIEW 进行曲线拟合和回归分析[J]. 国外丝绸, 2007, 22(6): 14-15.

- YU Hai-feng, YANG Mei-gui, HU Zheng-yu. Curve fitting and regression analysis with Labview[J]. Silk textile technology overseas, 2007, 22(6): 14-15.
- [11] 牛鲁娜, 兰正贵, 胡海军. 常压塔塔顶腐蚀关键参量相关性分析与预测[J]. 安全技术, 2020, 20(3): 21-23.  
NIU Lu-na, LAN Zheng-gui, HU Hai-jun. Correlation analysis and prediction of key parameters of atmospheric tower top corrosion[J]. Safety technology, 2020, 20(3): 21-23.
- [12] 林慧, 李慧宇, 杜国强, 等. 城市道路交通影响因素相关性分析[J]. 山西建筑, 2019, 45(8): 23-24.  
LIN Hui, LI Hui-yu, DU Guo-qiang, et al. Correlation analysis of influencing factors in urban road traffic[J]. Shanxi architecture, 2019, 45(8): 23-24.
- [13] 张豪杰, 郝心愿, 周超等. 富硒区茶树鲜叶中硒素积与土因子的相关性分析[J]. 茶叶科学, 2020, 15(4): 465-466.  
ZHANG Hao-jie, HAO Xin-yuan, ZHOU Chao, et al. Correlation analysis of selenium accumulation and soil factors in fresh tea leaves in selenium-enriched areas[J]. Tea Science, 2020, 15(4): 465-466.
- [14] 郝玉珠, 石岚, 冯凯宁. 测风塔与风机风速数据的相关性分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2018(9): 47-49.  
HAO Yu-zhu, SHI Lan, FENG Kai-ning. Correlation analysis between wind measurement tower and wind speed data of wind turbines[J]. Inner mongolia science technology & economy, 2018(9): 47-49.
- [15] 肖支才, 王康, 赵学远, 等. 导弹装备测试性数据相关性分析研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2019, 34(2): 223-227.  
XIAO Zhi-cai, WANG Kang, ZHAO Xue-yuan, et al. Research on correlation analysis of missile equipment testability data[J]. Journal of naval aeronautical and astronautical university, 2019, 34(2): 223-227.