

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.06.006

基于层次分析法的柔性基板材料评价

官坤,林建德

(福建工程学院 设计学院,福建 福州 350118)

摘要: 柔性基板材料种类多样并且存在各自的优缺点,筛选最优材料存在一定困难。为此,提出了层次分析法,对柔性基板材料进行评价。通过了解柔性基板材料的属性与性能,提取重要因素作为决策的准则,构建层次结构模型与判断矩阵,进行层次单排序与一致性检验及层次总排序。利用柔性基板材料的具体案例详细介绍了层次分析的运算过程,用 MATLAB 软件编写程序,减少了层次分析法的计算量。评价结果,层次分析法只是筛选出备选方案中的最优者并不能为决策者提供新的思路,获得更优的方案得综合考量各种因素。

关键词: 基板材料;层次分析法;MATLAB 程序

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2020)06-0543-06

Evaluation of flexible substrate materials based on AHP

GUAN Kun, LIN Jiande

(School of Design, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: There are various kinds of flexible substrate materials with their own advantages and disadvantages, so it is difficult to select the best materials. For this reason, the analytic hierarchy process (AHP) is proposed to evaluate the flexible substrate materials. By understanding the properties and performances of flexible substrate materials, important factors were extracted as the decision criteria, hierarchical structure model and judgment matrix were constructed, and then single hierarchical arrangement and consistency test were carried out, and total hierarchical arrangement was conducted. Then the operation process of AHP was introduced in detail with the case of flexible substrate materials, and the program was written with MATLAB software to reduce the calculation of AHP. AHP can only help select the best of the alternatives; it cannot provide decision-makers with new ideas. Therefore, to get a better solution, a variety of factors should be considered comprehensively.

Keywords: substrate materials; analytic hierarchy process(AHP); MATLAB program

柔性基板材料是柔性显示器件的重要组成部分。目前,国内对于柔性基板材料筛选方法的研究较少,一般根据材料特性进行单项打分,由于无法知道每个特性的权重,这种方法存在较大误差。国外 Myeon-CheonChoi 等人^[1]根据柔性基板材料的化学结构进行筛选,这种方法筛选出来的材料与其它元器件匹配度不高。Kalluri R. Sarma 等人^[2]从工业生产的角度讨论柔性基板材料的制造成本问题,虽然能够提高经济效益,但是选材的性能达不到预期效果。DustinSimon 等人^[3]通过动态机械分析和热重分析对柔性基板材料进行优选,这种筛选方式对实验设备及实验人员的要求非常高,操作难度较大。基于此,本文提出层次分析法对柔性基板材料进行筛选。此方法计算简便,结果明确,降低了柔性基板材料筛选的工作量,便于决策者操作。分析过程采用定性与定量相结合的方式,能更科学地筛选出最优的柔性基板材料。

1 柔性基板材料的分类及特点

目前研究较多的基板材料主要是:聚合物基板、超薄玻璃基板和不锈钢基板。

1.1 超薄玻璃基板

传统玻璃本身是硬质型材料,应用于柔性基板,需要将其超薄化,才具有可挠性。超薄玻璃基板相对于普通平板玻璃而言,它们的厚度小于 0.1 mm,具有一定的弯曲性能,可以称为柔性玻璃,作为理想的柔性显示基板材料,超薄玻璃基板具有较好的化学稳定性、热稳定性、高透明性和电绝缘性,水汽透过率较低、热膨胀系数低和良好的平整度等。

2012 年,美国康宁公司采用高温高压和熔融溢流下拉技术,生产出一种超薄柔性玻璃“willow-glass”,厚度为 0.1 mm,经钢化处理后,具有优良的强度,并且耐高温和可弯曲^[4]。超薄玻璃作为新型显示材料,越薄(0.3 mm 以下)越难生产。一方面,在生产超薄玻璃时,特别在成型、退火和切割过程中,要对上千个生产工艺数据进行精密控制,一丝一毫的差异,将导致玻璃基板的破裂,良品率低,也必然达不到较好经济效益;另一方面,超薄玻璃基板远距离运送一体化技术亟待突破,远距离运送会导致薄玻璃的表面划伤,同时破损率也大,玻璃基板越薄越难运送,特别是 0.3 mm 以下的超薄玻璃。因此,超薄玻璃基板长距离运输一直是基板制造商亟待解决的问题^[5]。

1.2 聚合物基板

由于聚合物具有高电阻率、低介电常数和易加工等优点,常被用作基板材料。但它们的耐热性能较差,不适用于产生高热的高集成度和高功率的电路^[6]。聚合物基板必须具备良好的光学透明度、优异的耐热性能、优良的阻水阻氧能力及一定的机械特性,如柔韧性、表面硬度和机械强度,以及表面粗糙度、聚合物基板的化学稳定性^[4]。

目前用于聚合物基板的材料有很多种,根据聚合物基板材料的结晶性、耐热稳定性和加工性能,可以分为 3 种类型:热塑性半结晶聚合物,具有良好的透明度、较低的热膨胀系数、良好的阻水阻氧性能,而且价格比较低,但是它们的耐高温性较差。温度升高时,聚合物基板会发生收缩,表面粗糙度较大,薄膜容易产生缺陷;非结晶热塑性聚合物,采用溶剂注造或熔融注塑,具有较好的光学透明度和较高的玻璃化转变温度,但是耐溶剂性

较差;非结晶耐高温聚合物,具有优异的耐热稳定性、化学稳定性和机械性能,但在可见光范围内透过率低^[4]。

1.3 不锈钢基板

不锈钢基板也是一种常见的柔性基板,当金属材料的厚度达到 100 μm 以下时,会表现出优异的弯曲性能,而金属材料具有较好的耐热性,能够承受器件加工过程中高温。与聚合物基板比较,不锈钢基板的热膨胀系数很低,更加接近玻璃的热膨胀系数,而且也不存在水汽透过率的问题,因此在柔性显示领域具有一定的应用价值^[7]。阻挠不锈钢基板在柔性显示领域应用的主要原因是其粗糙的表面,因此,表面粗糙度(R_a)是衡量不锈钢基板质量的关键指标。目前,不锈钢基板的 R_a 大约在 0.6 μm 左右,TFT 器件无法直接在其表面制作,可以采用抛光的方法来改善不锈钢基板表面的粗糙度,大致方法有电化学抛光、机械抛光及化学抛光等^[8]。

2 层次分析法模型介绍

层次分析法是指将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统,将目标分解为多个目标或准则,进而分解为多指标的若干层次,通过定性指标模糊量化方法算出层次单排序和总排序,以作为多方案优化决策的系统方法。

选择材料是一个复杂的系统工程,要考虑很多因素,所以要寻找一种科学的判断和选择方法。信息决策领域的层次分析方法具有仅利用较少的定量信息就能计算出各个因素对系统影响程度大小的优点,故将层次分析法用于柔性基板材料的选取^[9]。

2.1 建立层次结构模型

构造出一个层次结构模型,在这个结构模型下,复杂问题被分散成元素组成部分。这些元素又按照其属性分为若干组,形成不同层次。同一层次的元素作为准则对下一层次元素起支配作用,同时它又受到上一层元素的支配。这些层次一般可以分为 3 类:最高层只有一个元素,一般它是分析问题的预定目标或理想结果,因此也称为目标层;中间层包括为了实现目标所涉及的中间环节,它由若干个层次组成,包括所需考虑的准则、子准则,因此也称为准则层;最低层表示为实现目标可供选择的各种措施、决策方案,因此也称

为方案层。通过上述分析,将柔性基板材料的评价构建为 3 层,分别为目标层、准则层、方案层。

将聚合物基板、超薄玻璃基板和不锈钢基板作为方案层。从光学透明度、柔韧性、热稳定性、阻水阻氧性能等方面对这 3 种基板材料的性能进行比较,将这些性能指标作为准则层。利用数学方法计算反映每一层次元素的相对重要性次序的权值,通过所有层次之间的总排序计算所有元素的相对权重,依据总排序权重选出最优方案,因此将最佳材料作为目标层。

将决策的目标、考虑因素和决策对象按它们

之间的相互关系分为:目标层、准则层和方案层,绘制层次结构图。依据层次分析法,将目标层设定为选择适用于应用需求的最优柔性基板材料,将准则层定义为柔性基板材料的不同属性,包括光学透明度、柔韧性、热稳定性、阻水阻氧性,则柔性基板材料评价方案层可以定义为 $Y = \{F_i \mid i = 1, 2, 3\}$, F_i 表示第 i 种方案材料;准则层为柔性基板材料的不同属性功能,则 $C = \{C_i \mid i = 1, 2, 3, 4\}$, 其中 C_i 可以定义为影响准则层排序的不同因素。图 1 为依据上述方法构建的不同层级柔性基板材料的评价体系。

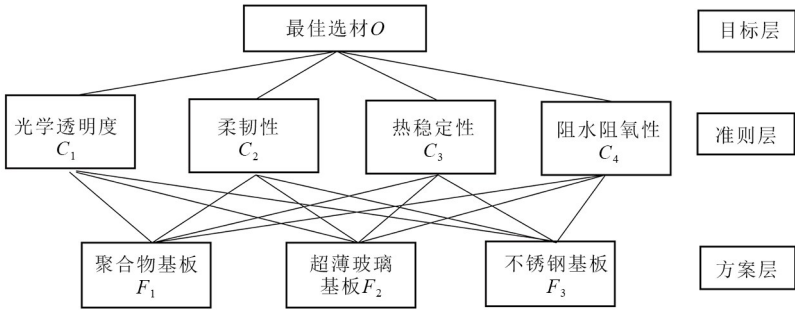


图 1 柔性基板材料评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of flexible substrate materials

2.2 构建判断矩阵

在确定各层次各因素之间的权重时,如果只是定性的结果,则常常不容易被别人接受,因而Santy 等人提出一致矩阵法,即不把所有因素放在一起比较,而是两两相互比较,采用相对尺度,以尽可能减少性质不同的诸因素相互比较的困难,以提高准确度。如对某一准则,对其下的各方案进行两两对比,并按其重要性程度评定等级。 a_{ij} 为要素 i 与要素 j 重要性比较结果,表 1 列出Santy 给出的 9 个重要性等级及其赋值。按两两比较结果构成的矩阵称作判断矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

表 1 判断矩阵互补标度取值及其含义

Tab.1 Values of complementary scale of judgment matrix and their meanings

因素 i 比因素 j	量化值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
两相连判断的中间值	2,4,6,8

2.3 层次单排序及其一致性检验

对应于判断矩阵最大特征根的特征向量,经归一化(向量中各元素之和等于 1)后记为 W 。 W 的元素为同一层次因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值,这一过程称为层次单排序。当 A 为一致性矩阵时,满足 $MW = \lambda_{\max} W$, 其中 λ_{\max} 是 A 的最大特征根, W 是相应的权重向量。

接着需要对判断矩阵的一致性进行检验,检验一致性指标为 CI,其计算为:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

然后计算一致性比率 CR,其计算公式为:

$$CR = CI/RI$$

其中,随机一致性指标 RI 和判断矩阵的阶数有关,一般情况下,矩阵阶数越大,则出现一致性随机偏离的可能性也越大,其对应关系如表 2。当 $CR < 0.01$ 时,认为判断矩阵的一致性可以接受,否则应对判断矩阵作适当的修正。

表 2 平均随机一致性指标 RI 标准值

Tab.2 RI standard values of mean random consistency index

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

2.4 层次总排序

计算某一层次所有因素对于最高层(总目标)相对重要性的权值,称为层次总排序。这一过程从最高层次到最低层次依次进行。最后根据总排序权重的大小选择出最佳材料。

3 柔性基板材料的选择

3.1 构建柔性基板材料判断矩阵

由构建柔性基板材料的评价体系,构建判断矩阵并算出各要素的优先向量级。以第一层要素为依据对第二层要素建立最佳选材 $O-C$ 判断矩阵见表 3。

表 3 判断矩阵 $O-C$

Tab.3 Judgment matrix $O-C$

最佳选材 O	C_1	C_2	C_3	C_4	优先级向量
C_1	1	1/3	1/5	1/5	0.062 4
C_2	3	1	1/3	1/5	0.122 8
C_3	5	3	1	1/3	0.274 5
C_4	5	5	3	1	0.540 3

以判断矩阵 4×4 阶为例,计算矩阵各行元素的 4 次根:

$$\sqrt[4]{1 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{5}} = 0.339\ 8$$
$$\sqrt[4]{3 \times 1 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5}} = 0.668\ 7$$
$$\sqrt[4]{5 \times 3 \times 1 \times \frac{1}{3}} = 1.495\ 3$$
$$\sqrt[4]{5 \times 5 \times 3 \times 1} = 2.942\ 8$$

将上述结果正交化,累加得到 $\sum_{j=1}^n a_{ij} = 5.446\ 6$,
优先级向量

$$C_1 = \frac{0.339\ 8}{5.446\ 6} = 0.062\ 4; C_2 = \frac{0.668\ 7}{5.446\ 6} = 0.122\ 8;$$
$$C_3 = \frac{1.495\ 3}{5.446\ 6} = 0.274\ 5; C_4 = \frac{2.942\ 8}{5.446\ 6} = 0.540\ 3$$

再以第 2 层要素为依据,对第 3 层要素建立判断矩阵。由于此时有 4 个准则,故有 4 个判断矩阵。

光学透明度 C_1-F 判断矩阵见表 4。

表 4 判断矩阵 C_1-F

Tab.4 Judgment matrix C_1-F

C_1	F_1	F_2	F_3	优先级向量
F_1	1	1/7	1/5	0.071 9
F_2	7	1	3	0.649 1
F_3	5	1/3	1	0.279 0

柔韧性 C_2-F 判断矩阵见表 5。

表 5 判断矩阵 C_2-F

Tab.5 Judgment matrix C_2-F

C_2	F_1	F_2	F_3	优先级向量
F_1	1	5	3	0.648 3
F_2	1/5	1	2	0.122 0
F_3	1/3	1/2	1	0.229 7

热稳定性 C_3-F 判断矩阵见表 6。

表 6 判断矩阵 C_3-F

Tab.6 Judgment matrix C_3-F

C_3	F_1	F_2	F_3	优先级向量
F_1	1	2	3	0.540 0
F_2	1/2	1	2	0.297 0
F_3	1/3	1/2	1	0.163 3

阻水阻氧性 C_4-F 判断矩阵见表 7。

表 7 判断矩阵 C_4-F

Tab.7 Judgment matrix C_4-F

C_3	F_1	F_2	F_3	优先级向量
F_1	1	3	5	0.648 3
F_2	1/3	1	2	0.229 7
F_3	1/5	1/2	1	0.122 0

3.2 一致性检验

A 为一致性矩阵时,满足 $MW = \lambda_{\max} W$,其中 λ_{\max} 是 M 的最大特征根, W 是相应的权重向量。

判断矩阵 $O-C$ 一致性检验:

$$MW = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} \\ 3 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 5 & 3 & 1 & \frac{1}{3} \\ 5 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.062\ 4 \\ 0.122\ 8 \\ 0.274\ 5 \\ 0.540\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.266\ 4 \\ 0.509\ 6 \\ 1.135\ 1 \\ 2.290\ 1 \end{bmatrix}$$
$$\lambda_{\max} = \frac{1}{4} \left[\frac{0.266\ 4}{0.062\ 4} + \frac{0.509\ 6}{0.122\ 8} + \frac{1.135\ 1}{0.274\ 5} + \frac{2.290\ 1}{0.540\ 3} \right] = 4.198\ 2$$
$$CI = \frac{4.198\ 2 - 4}{4 - 1} = 0.066\ 1, \text{ 计算一致性比率}$$

$CR=CI/RI$ 。当 $CR<0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性可以接受。此时, $CR=0.066\ 1/0.9=0.073\ 4<0.1$,故一致性可接受。

同理可得:

判断矩阵 C_1-F 一致性检验结果: $CI=0.032\ 0$, $CR=0.055\ 1<0.1$,故一致性可接受。判断矩阵 C_2-F 一致性检验结果: $CI=0.002\ 0$, $CR=0.034\ 5<0.1$,故一致性可接受。判断矩阵 C_3-F 一致性检验结果: $CI=0.046\ 0$, $CR=0.007\ 9<0.1$,故一致性可接受。判断矩阵 C_4-F 一致性检验结果: $CI=0.001\ 8$, $CR=0.003\ 2<0.1$,故一致性可接受。

3.3 计算各层元素对目标层的总排序权重

上面计算的是一组元素对其上层次中某元素的权重向量,而最终要得到方案层对于目标层的排序权重。计算公式如下:

$$W = \begin{bmatrix} 0.071\ 9 & 0.648\ 3 & 0.540\ 0 & 0.648\ 3 \\ 0.649\ 1 & 0.122\ 0 & 0.297\ 0 & 0.229\ 7 \\ 0.279\ 0 & 0.229\ 7 & 0.163\ 3 & 0.122\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.062\ 4 \\ 0.122\ 8 \\ 0.274\ 5 \\ 0.540\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.582\ 6 \\ 0.261\ 1 \\ 0.156\ 4 \end{bmatrix} = (0.582\ 6\ 0.261\ 1\ 0.156\ 4)$$

得到选择结果。根据总权重排序: $F_1>F_2>F_3$,因此所用最佳材料应为 F_1 ,聚合物基板。

4 提高选择的效率

由于计算过程较为繁琐,人工手动计算量大,而采用层次分析法的程序能够很大程度上提高效率。只需输入相应的判断矩阵,就能够得到向量的权重,进行一致性检验。具体运行的程序:

```
clc;
clear;
disp('请输入判断矩阵 A'); %输入矩阵
A=input('A=');
[m,n]=size(A); %获取指标个数
RI=[0 0 0.58 0.90 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45 1.49 1.51];
R=rank(A); %求判断矩阵的秩
[V,D]=eig(A); %求判断矩阵的特征值和特征向 D 特征向量;
tz=max(D);
B=max(tz); %最大特征值
[row,col]=find(D==B); %最大特征值所在位置
C=V(:,col); %对应特征向量
CI=(B-n)/(n-1); %计算一致性检验指标 CI
CR=CI/RI(1,n);
if CR<0.10
disp('CI=');disp(CI);
disp('CR=');disp(CR);
disp('对比矩阵 A 通过一致性检验,各向量权重向量 W 为:');
W=zeros(n,1);
for i=1:n
W(i,1)=C(i,1)/sum(C(:,1)); %特征向量标准化
end
W %输出权重向量
else
disp('对比矩阵 A 未通过一致性检验,需对对比矩阵 A 重新构造');
end
程序界面见图 2。
```

点击运行按钮,在命令窗口输入判断矩阵,即计算出相应权重并且进行一致性检验,见图 3。

5 结论

1)基于层次分析法的柔性基板材料评价方案,相较于传统筛选方式更加科学、高效。层次分析法主要是从评价者对评价问题的本质、要素的理解出发,比一般的定量方法更讲求定性的分析和判断。由于层次分析法是一种模拟人们决策过

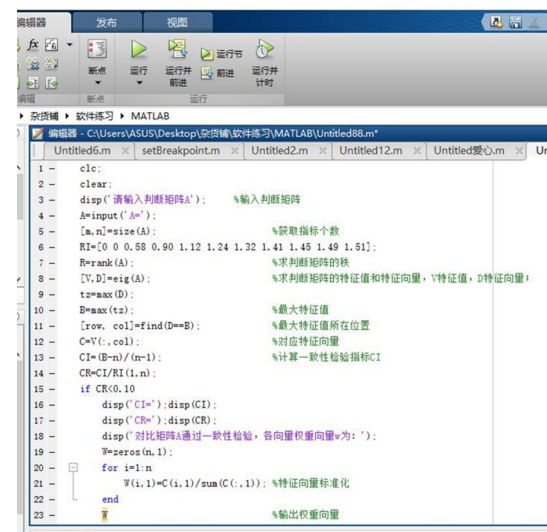


图 2 程序界面

Fig.2 Program interface

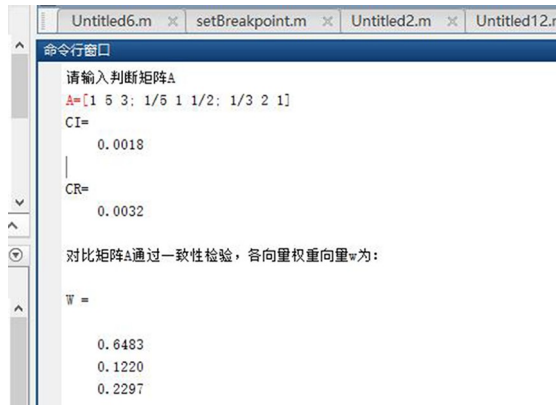


图 3 运行结果界面

Fig.3 Operation result interface

程思维方式的一种方法,把判断各要素的相对重要性步骤留给了大脑,只保留人脑对要素的印象,化为简单的权重进行计算。这种思想能处理许多用传统的最优化技术无法着手的实际问题。

2)层次分析法是一种带有模拟人脑决策方式的方法,因此必然带有较多的定性色彩。在解决较普遍的问题时,指标的选取数量也就随之增加。指标的增加就意味着构造层次更深、数量更多、规模更庞大的判断矩阵。也就需要对许多指标进行两两比较。由于一般情况下对层次分析法的两两比较是用 1~9 来说明其相对重要性,如果有越来越多的指标,那么对每两个指标之间重要程度的判断可能就会出现困难,甚至会对层次单排序和总排序的一致性产生影响,使一致性检验不能通过。为了避免这种情况发生,在构建判断矩阵时尽量选择专业人员进行评判,以减少人为因素对结果造成影响。

3)柔性基板作为柔性显示器件的支撑组件,它的性能优劣对于器件的质量和寿命具有重要影响,因此,在众多柔性材料中选择符合设计要求的基板对产品的加工制造有重要意义,而层次分析法作为一种较成熟的系统能够解决这一问题,同时利用层次分析法的算法程序能够提高运算的准确性和效率。未来可以从判断矩阵的建立深入研究,尽量降低人为因素的干扰,同时利用 MATLAB 或者 Python 编写出更加优秀的程序,提高计算效率也是值得研究的问题。

参考文献:

[1] CHOI M C, KIM Y, HA C S. Polymers for flexible displays: From material selection to device applications[J]. Progress in Polymer Science, 2008, 33(6): 581-630.

[2] SARMA K R. Flexible displays: substrate and TFT technology options and processing strategies[M]//Handbook of Visual Display Technology. Cham: Springer International Publishing, 2016: 1389-1429.

[3] SIMON D, WARE T, MARCOTTE R, et al. A comparison of polymer substrates for photolithographic processing of flexible bioelectronics[J]. Biomedical Microdevices, 2013, 15(6): 925-939.

[4] JUNGHÄHNEL M, GARNER S. Glass meets flexibility[J]. Vakuum in Forschung Und Praxis, 2014, 26(5): 35-39.

[5] 蒋文玖. 超薄基板玻璃材料面临柔性化趋势的挑战[J]. 玻璃与搪瓷, 2015, 43(6): 34-36.

[6] 张洁, 王伟, 曾宪华, 等. 氮化铝颗粒增强聚合物基板材料的制备及介电性能研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 341-342.

[7] HUNG J, LIU Y, TSUI H, et al. Electrode insulation layer for electrochemical machining fabricated through hot-dip aluminizing and microarc oxidation on a stainless-steel substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378: 124995.

[8] 王玥, 满瑞林, 梁永煌, 等. 不锈钢表面抛光技术的研究进展[J]. 电镀与环保, 2012, 32(2): 1-4.

[9] 余龙, 华丽霞. 工业设计中选择材料的层次分析法应用及程序设计[J]. 江南大学学报, 2003(6): 581-584.

(责任编辑: 陈雯)