

文章编号:1000-6893(2010)01-0131-05

# 基于图像的腐蚀损伤及疲劳寿命研究

胡家林<sup>1</sup>, 陈跃良<sup>2</sup>, 张玓<sup>1</sup>, 杨茂胜<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院 研究生队, 山东 烟台 264001)

(2. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

## Analysis of Corrosion Damage and Fatigue Life Based on Corrosion Image

Hu Jialin<sup>1</sup>, Chen Yueliang<sup>2</sup>, Zhang Ding<sup>1</sup>, Yang Maosheng<sup>1</sup>

(1. Postgraduate Team, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

(2. Qingdao Branch, Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, China)

**摘要:** 在实验室环境下,对航空 LY12CZ 铝合金试件进行了腐蚀试验,然后采用图像处理的方法,提取了孔蚀率、点蚀坑分形维数、点蚀坑半径 3 种腐蚀形貌特征值,通过灰色预测方法对腐蚀形貌特征值与腐蚀损伤之间的关系进行了研究,得到了基于形貌特征值的 GM(1,3) 腐蚀损伤预测模型。在此基础上,利用 AFGROW 软件建立了断裂力学模型,对不同腐蚀形貌特征条件下 LY12CZ 试件的疲劳寿命进行了计算与讨论。结果表明,试件的疲劳寿命与其表面腐蚀形貌密切相关,3 种腐蚀形貌特征值均与试件的疲劳寿命负相关。此外,基于腐蚀形貌特征值计算得到的疲劳寿命值与利用实测点蚀坑深度计算得到的疲劳寿命值吻合较好,平均相对误差为 8.84%。

**关键词:** 腐蚀图像; 数字图像处理; 腐蚀形貌特征; 腐蚀损伤; 疲劳寿命; 灰色模型; 铝合金

**中图分类号:** V252; TG171 **文献标识码:** A

**Abstract:** Corrosion morphology image is one of the most important features for the evaluation of the corrosivity of a material. By means of an optical microscope, the corrosion morphology images as well as the pit depths of LY12CZ samples exposed to experimental environments are captured. After digital image processing, the color types of these images are transformed, and then three kinds of corrosion morphology characteristics are extracted. By using a GM (1,3) grey model, the relationship between the features of corrosion morphology images and pit depths are studied, and a model based on the morphology characteristics is established which can predict the pit depth. Based on this model, a fracture mechanics method which treated pitting as cracks is established by the software AFGROW, which is used to predict the fatigue life of LY12CZ samples. The results show that there is good agreement between the measured pit sizes and the predicted data based on the grey model. Moreover, the fatigue lives calculated based on corrosion morphology characteristics are reasonable as compared with the results calculated according to experimental data, the average relative error being 8.84%.

**Key words:** corrosion image; digital image processing; corrosion morphology characteristic; corrosion damage; fatigue life; grey model; aluminum alloys

腐蚀是飞机结构的一种主要损伤形式,是飞行故障及灾难的主要原因之一,特别是在中国沿海地区,服役过程中发现飞机机体腐蚀问题相当严重。以大量应用于飞机结构件的 LY12CZ 铝合金材料为例,它对腐蚀比较敏感,在腐蚀环境下容易形成点蚀坑,而点蚀坑的存在会加速形成疲劳裂纹并扩展,从而影响飞机结构疲劳寿命<sup>[1-3]</sup>。

作为记录了金属材料表面形貌重要载体的

腐蚀图像,反映了腐蚀引起的材料表面形貌变化和腐蚀损伤度,而表面腐蚀损伤影响着结构材料的疲劳断裂特性<sup>[4-6]</sup>。故对腐蚀图像加以研究,找出其中包含着的腐蚀信息,并建立适当的方法,将这些信息用于疲劳寿命的预测是非常必要的。本文以试验为基础,通过对腐蚀图像的数字化处理得到了其数字特征,在此基础上,建立了基于灰色理论了点蚀坑深度预测模型,以预测得到的点蚀坑深度作为初始裂纹,利用 AFGROW 软件对预腐蚀试件的疲劳寿命进行估算,初步建立起了一种基于腐蚀图像的疲劳寿命研究方法。

收稿日期:2009-05-11; 修订日期:2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(50675221); 航空科学基金(2008ZH85001)

通讯作者: 胡家林 E-mail: hu-jia-lin@sohu.com

## 1 预腐蚀试验

### 1.1 试件

试件采用平板状,由 LY12CZ 铝合金材料制成,其尺寸如图 1 所示。

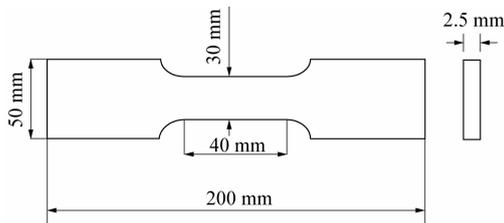


图 1 试件几何尺寸

Fig.1 Specimen details

在腐蚀试验前对非试验区进行保护(涂硅胶),待硅胶完全固化后再进行预腐蚀试验。

### 1.2 试验方案

考虑到本文的研究对象是腐蚀形貌变化明显的点蚀试件,设计试验方案如下:采用 EXCO 溶液对试件进行浸泡,具体的配比是:NaCl, 234 g/L;  $\text{KNO}_3$ , 50 g/L; 浓度为 68% 的  $\text{HKO}_3$  溶液, 6.8 mL/L。最终 EXCO 溶液的  $\text{pH}=0.4$ , 试验温度  $T=15\text{ }^\circ\text{C}$ 。在试验最初的 22 h 中,每隔 2 h 利用 KH-7700 数字显微镜对试件进行一次拍照,之后分别以 4 h 和 12 h 为间隔对试件进行拍照,整个试验周期为 64 h,此时试件尚处于点蚀阶段。

### 1.3 试验结果

通过上述预腐蚀试验,共获得了 17 组不同腐蚀时间试件的腐蚀表面照片和腐蚀形貌三维照片。其中,腐蚀表面照片和三维形貌照片均通过 KH-7700 数字显微镜拍摄得到,如图 2 所示,腐蚀 14 h 的试件形成的点蚀坑,表面积较小且分布稀疏,与之相应,点蚀坑的深度也较小。腐蚀 30 h 的试件形成的点蚀坑,表面积明显增大,部分相邻点蚀坑之间发生了相互交错结合的情况,此时点蚀坑的深度也明显增加。上述现象反映了腐蚀表面形貌与腐蚀损伤程度(点蚀坑深度)之间在发展趋势上确实存在着某种内在联系和一致性。此外,本文还利用 KH-7700 数字显微镜的实时三维图像合成功能,并结合该设备自带软件计算得到了不同腐蚀时间的最大点蚀坑深度,其基本测量原理为 GB/T 18590—2001 所述的点蚀坑深度变

焦显微测量法。

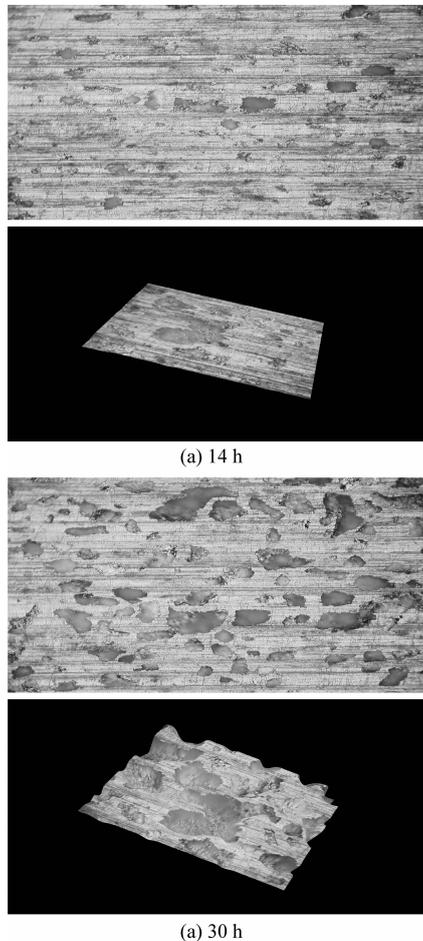


图 2 腐蚀损伤显微镜照片(放大 300 倍)  
Fig.2 Microscope photographs of corrosion damages (300 times amplification)

## 2 计算结果与分析

### 2.1 腐蚀图像特征值的提取

腐蚀表面照片包含了材料表面的点蚀坑情况和腐蚀面积大小等信息,反映了腐蚀形貌的起伏变化和腐蚀程度,本文通过数字图像处理技术从拍摄得到的腐蚀照片中提取了孔蚀率、点蚀坑分形维数、点蚀坑半径 3 种腐蚀图像特征值,如表 1 所示。

在腐蚀图像特征值的提取过程中,首先将原始腐蚀表面照片进行数字化处理,转换为 256 级灰度图像,图像的数据矩阵大小为 1 200 像素 $\times$ 1 600 像素。随后,通过灰度阈值处理将灰度图像分割成对象(点蚀孔)和背景(铝合金基体)两部分,使得精确计算腐蚀区域面积成为可能,在此基础上计算得到了孔蚀率和点蚀坑半径。

表 1 腐蚀图像特征值和点蚀坑测量结果

Table1 Corrosion morphology characteristics and measured values of pit sizes

腐蚀时间/h	孔蚀率	点蚀坑分形维数	点蚀坑半径/mm	点蚀坑深度/ $\mu\text{m}$
8	0.052 0	1.178 0	0.030	35.92
10	0.066 6	1.136 1	0.030	40.25
12	0.096 6	1.142 8	0.037	46.70
14	0.119 9	1.121 1	0.038	50.40
16	0.143 9	1.108 0	0.039	50.79
18	0.149 7	1.096 0	0.040	52.00
20	0.172 7	1.093 4	0.040	54.11
22	0.168 8	1.092 6	0.040	55.06
26	0.240 9	1.086 0	0.041	55.12
30	0.227 0	1.074 4	0.043	57.15
40	0.290 1	1.079 0	0.043	58.00
52	0.350 1	1.068 0	0.046	58.06
64	0.420 8	1.062 2	0.047	61.10

点蚀坑的分形维数则可利用图像增强后的原始腐蚀照片直接计算,考虑到在腐蚀表面二维照片中点蚀坑边缘实际上是平面曲线,因此,本文采用结构步测法计算点蚀坑分形维数。

需要说明的是,在腐蚀的最初阶段,点蚀坑深度很浅且难以计算其分形维数,故表 1 仅列出了腐蚀 8 h 以后的图像特征值数据。

### 2.2 基于腐蚀图像特征值的腐蚀损伤预测模型

考虑到腐蚀图像特征值和腐蚀损伤量之间存在的内在联系比较复杂,可以将其视为部分信息已知,部分信息未知的不确定性系统,本文采用灰色预测方法对两者之间的关系加以研究,寻找“系统”变动的规律,从而建立模型对腐蚀损伤的发展加以预测。所建模型为多变量灰色预测模型GM(1,3)和GM(1,4),其中,作为变量的是 3 种腐蚀图像特征值以及腐蚀时间  $t$ 。计算结果如图 3 所示。

图 3(a)中先是以 3 种腐蚀图像特征值作为变量建立了 GM(1,3)模型,对经过了 10,12,14,16 h 腐蚀后试件点蚀坑的深度进行预测(计算时在灰色模型中将表 1 中其余 9 组数据作为已知量),之后引入时间变量  $t$ ,建立了GM(1,4)模型对试件点蚀坑的深度再次进行预测。从图中可以看出,与实际测量值比较,无论是 GM(1,3)模型还是 GM(1,4)模型对点蚀坑深度的预测都是合理的,最大相对误差为 17%。其中,GM(1,3)模型预测值的平均误差为 16.4%,GM(1,4)模型预测值优于 GM(1,3)模型,平均误差为 13.4%。

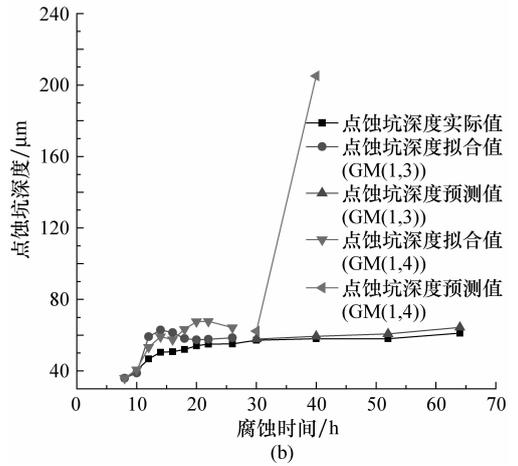
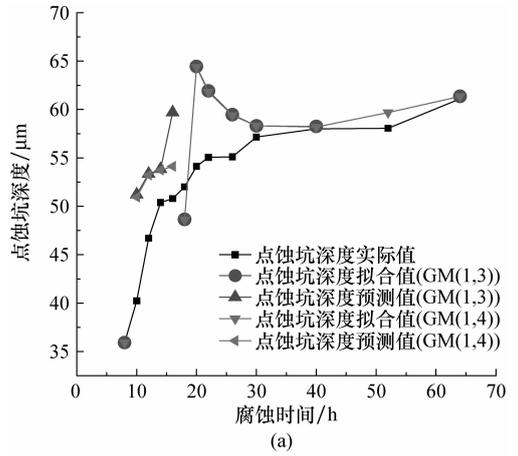


图 3 灰色模型计算值

Fig. 3 Calculated results of grey model

为了考察腐蚀时间继续增加时,所建灰色模型是否依然有效,将腐蚀时间小于等于 26 h 的表 1 中 9 组数据作为已知变量,利用所建模型对腐蚀时间大于 26 h 试件的点蚀坑深度进行预测,计算结果如图 3(b)所示。从图中可以看出,此时 GM(1,3)模型的预测结果与真实值吻合较好,平均相对误差仅为 3.2%,而引入了时间变量  $t$  后的 GM(1,4)模型的预测结果明显偏大,图中仅给出了腐蚀时间为 30 h 和 40 h 情况下的计算结果,实际上,当腐蚀时间达到 64 h 后,计算结果与实际值的相对误差高达 +629%。出现这种情况的主要原因可能是点蚀坑深度的发展是非线性的,因此直接将腐蚀时间作为模型的输入参量,并将腐蚀前期点蚀坑深度与腐蚀时间的关系用于腐蚀后期的点蚀坑深度预测,得到的计算结果出现错误。

为了分析腐蚀图像特征值变化对点蚀坑深度的影响,本文计算了孔蚀率、点蚀坑分形维数、点蚀坑半径分别增加和减小 10% 时,GM(1,3)模型计算得到的点蚀坑深度,如图 4 所示。从图中看

出,点蚀坑深度与 3 种图像特征值均存在正相关关系,这也符合铝合金材料腐蚀时的实际情况,即当腐蚀表面的孔蚀率和点蚀坑半径较大时,点蚀坑深度通常也较大。具体的计算结果表明,点蚀坑分形维数对点蚀坑深度的影响最大,点蚀坑半径次之,孔蚀率的影响最小。

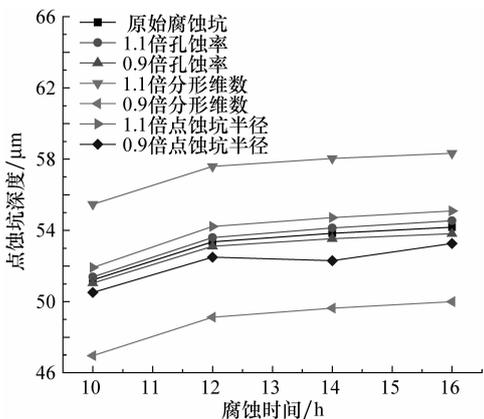


图 4 不同图像特征值对点蚀坑深度的影响

Fig. 4 Effect of different morphology characteristics on pit size

### 2.3 基于腐蚀图像特征值的疲劳寿命预测模型

将腐蚀图像特征值作为输入参量,利用 GM(1,3)模型估算出与之相对应的最大点蚀坑深度,之后将该点蚀坑当量成以点蚀坑深度为长半轴,以实际测得的点蚀坑半径为短半轴的半椭圆形表面裂纹,如,腐蚀时间为 16 h 时实际测得的点蚀坑半径为 39 μm,利用 GM(1,3)模型估算得到的点蚀坑深度为 59.7 μm,此时就认为试件上含有半径为 39 μm、深度为 59.7 μm 的半椭圆形表面裂纹,并将其作为初始裂纹计算试件的预腐蚀疲劳寿命。

疲劳寿命的计算利用的是基于断裂力学模型的 AFGROW 软件。文献[7]和文献[8]分别对该软件的计算结果与试验结果进行了对比,验证其具有较高的精度。考虑到本文研究的对象是等幅载荷下试件的疲劳寿命,不用考虑裂纹的闭合效应,所以与文献[9]和文献[10]相同,本文选择了基于线弹性断裂力学的 NASGRO 裂纹扩展速率模型

$$da/dN = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (1)$$

式中: $C$ 、 $n$ 、 $p$  和  $q$  为材料常数; $f$  为裂纹张开函数; $\Delta K$  和  $\Delta K_{th}$  分别为应力强度因子变程和应力

强度因子变程门槛值; $K_{max}$  和  $K_{crit}$  分别为最大应力强度因子和临界应力强度因子; $R$  为所用载荷应力比。计算所用载荷应力比  $R=0.4$ ,最大应力为 360 MPa。

图 5 比较了基于点蚀坑实际深度和基于图像特征值预测的点蚀坑深度计算所得的疲劳寿命。从图 5 中可以看出,与将实际测得点蚀坑深度作为初始裂纹计算得到的试件疲劳寿命相比,将腐蚀图像特征值预测得到的点蚀坑深度作为初始裂纹计算得到的试件疲劳寿命与其比较吻合,但普遍偏小,平均相对误差为 8.84%。造成这一误差的主要原因是,基于 GM(1,3)模型得到的最大点蚀坑深度普遍大于实测的点蚀坑深度(如图 4 所示)。

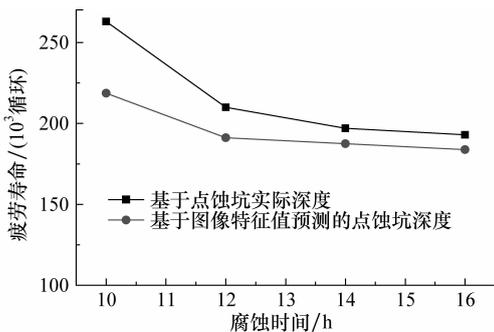


图 5 疲劳寿命计算结果比较

Fig. 5 Comparison of calculated results of fatigue lives

为了分析腐蚀图像特征值对试件疲劳寿命的影响,本文计算了孔蚀率、点蚀坑分形维数、点蚀坑半径分别增加和减小 10% 时试件的疲劳寿命,如图 6 所示。从图中看出,疲劳寿命与 3 种图像特征值均存在负相关关系,即随着孔蚀率、点蚀坑分形维数、点蚀坑半径的增加,疲劳寿命出现下降的趋势。造成这一现象的主要原因是 3 种图像特

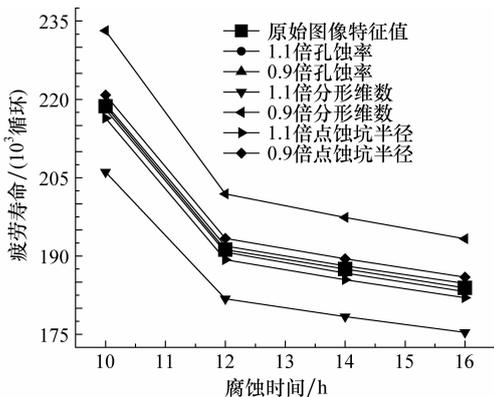


图 6 不同图像特征值对疲劳寿命的影响

Fig. 6 Effect of different morphology characteristics on fatigue life

征值均与点蚀坑深度正相关,具体来说就是,腐蚀图像特征值增加,点蚀坑随之深度增加,导致疲劳寿命减小。

### 3 结 论

(1) 随着腐蚀时间的增加,试件的表面图像和腐蚀损伤也不断变化,它们的变化趋势存在某种内在联系和一致性。

(2) 孔蚀率、点蚀坑分形维数和点蚀坑半径这 3 种图像特征值反映了腐蚀表面的起伏变化和材料的腐蚀程度,将其作为输入参数对腐蚀损伤程度(点蚀坑深度)进行预测是可行的,预测结果也较为合理。

(3) 从腐蚀图像出发,将适当的腐蚀损伤预测模型同裂纹扩展模型结合起来,对疲劳寿命进行估算,这一技术路径是可行的,计算结果也较为合理。

(4) 孔蚀率、点蚀坑分形维数和点蚀坑半径这 3 种腐蚀形貌特征值均与点蚀坑深度正相关,与试件的疲劳寿命负相关。

(5) 所得灰色预测模型在腐蚀 20 h 左右时拟合得到的点蚀深度误差较大,造成这一现象的原因可能是作为模型输入的数据点不足,这还需要进行补充试验加以进一步的研究。

### 参 考 文 献

- [1] Carl E J. Analysis of fatigue, fatigue-crack propagation and fracture data[R]. NASA CR-132332, 1973.
- [2] 张有宏, 吕国志, 陈跃良. LY-12CZ 铝合金预腐蚀及疲劳损伤研究[J]. 航空学报, 2005, 26(6): 779-782.  
Zhang Youhong, Lu Guozhi, Chen Yueliang. Predicting fatigue life from pre-corroded LY-12CZ aluminum test [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(6): 779-782. (in Chinese)
- [3] 张有宏, 吕国志, 任克亮. 不同环境下 LY-12CZ 铝合金表面腐蚀演化规律研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 142-145.  
Zhang Youhong, Lu Guozhi, Ren Kelian. The evolution rhythm of surface corrosion damage of LY-12CZ aluminum in varied environments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 142-145. (in Chinese)

- [4] 宋诗哲, 王守琰. 图像识别技术研究有色金属大气腐蚀早期行为[J]. 金属学报, 2002, 38(8): 893-896.  
Song Shizhe, Wang Shouyan. Atmospheric forepart corrosion behaviors of nonferrous metal based on image recognition[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(8): 893-896. (in Chinese)
- [5] 王守琰. 金属材料自然环境腐蚀的图像识别[D]. 天津: 天津大学, 2003.  
Wang Shouyan. Research on corrosion of metals in nature environment based on image recognition [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese)
- [6] 张玮. 金属腐蚀形貌特征提取用于腐蚀诊断的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.  
Zhang Wei. Characteristics extraction of metallic corrosion morphology for corrosion diagnosis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [7] Dolley E J. The effect of pitting corrosion on fatigue life [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2000, 23(7): 555-560.
- [8] Harlow D G. Probability approach for prediction of corrosion and corrosion fatigue life[J]. AIAA Journal, 2004, 32(10): 2073-2079.
- [9] 卞贵学, 陈跃良, 张丹峰. 基于 IDS 的铝合金预腐蚀疲劳寿命研究[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1526-1530.  
Bian Guixue, Chen Yueliang, Zhang Danfeng. Study on fatigue life of pre-corroded aluminium alloy based on IDS [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1526-1530. (in Chinese)
- [10] Yu D Z, Chen Y L, Hu J L, et al. Effects of pitting corrosion on fatigue life of aluminum alloy LY12CZ based on initial discontinuity state[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(5): 1319-1322.

#### 作者简介:

**胡家林**(1982—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 腐蚀环境下飞机结构可靠性。

Tel: 13165036798

E-mail: hu-jia-lin@sohu.com

**陈跃良**(1962—) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 腐蚀环境下飞机结构疲劳寿命及剩余强度。

Tel: 0532-51833624

E-mail: cyl0532@sina.com

(编辑: 徐晓)