

# 几种不同大气腐蚀预测模型的比较

马小彦 汪轩义 屈祖玉 李长荣 王光雍

北京科技大学材料与科学学院腐蚀与防护中心 北京 100083

**摘要** 分别运用腐蚀速率与暴露时间关系的指数模型( $D=AT^n$ ,  $D=AT^ne^{CT}$ )、“灰色系统”的GM(1, 1)模型和环境综合因子模型预测碳钢和低合金钢的大气腐蚀率, 并与挂片暴露试验结果进行比较。结果表明, 相同材料在不同的大气环境下有着不同的腐蚀规律, 碳钢和低合金钢的大气腐蚀预测可选择不同的预测模型。

**关键词** 大气腐蚀; 模型; 预测

**分类号** TG 172.3

近20年来, 一些科技工作者<sup>[1,2]</sup>进行了金属材料大气腐蚀的模拟与预测模型的研究。用于对碳钢和低合金钢的大气腐蚀预测的指数模型 $D=AT^n$ 和 $D=AT^ne^{CT}$ <sup>[3,4]</sup>最为被人们关注; 近年来新发展的灰色系统GM(1, 1)模型<sup>[5]</sup>和神经网络预测模型<sup>[6]</sup>也成为研究的热点; 一些学者将环境因素引入大气腐蚀预测<sup>[1,7,8]</sup>, 进一步深入地揭示了大气腐蚀的本质。

本工作根据我国大气腐蚀网站积累的环境数据和材料腐蚀数据(大气腐蚀数据汇编, 1996年), 运用指数模型、灰色系统模型和大气环境综合因子模型对我国北京、青岛、江津、广州等地区常用的碳钢、低合金钢材料的8年大气腐蚀率进行了预测, 并对预测结果进行了比较, 获得了对选择大气腐蚀预测模型有参考价值的结论。

## 1 几种大气腐蚀模型的预测结果

### 1.1 $D=AT^n$ 模型(指数模型 1)

$$D=AT^n \quad (1)$$

式中,  $D$ 表示年平均腐蚀深度( $\mu\text{m/a}$ );  $T$ 表示暴露时间(a);  $A, n$ 表示待定系数, 特别地当 $T=1\text{a}$ 时,  $D=A$ , 即 $A$ 具有第1年腐蚀量的意义。

运用北京、青岛、江津、广州等地区常用的碳钢、低合金钢材料第1, 2, 4年的暴露试验数据拟合的模型预测第8年的平均腐蚀率, 见表1~4(加“\*”为接近测量值)。

### 1.2 $D=AT^ne^{CT}$ 模型(指数模型 2)

$$D=AT^ne^{CT} \quad (2)$$

式中,  $D$ 表示年平均腐蚀深度( $\mu\text{m/a}$ );  $T$ 表示暴露时间(a);  $A, B, C$ 表示待定系数。运用北京、青岛、江津、广州等地区常用的碳钢、低合金钢材料第1, 2, 4年的暴露试验数据拟合的模型预测第8年的平均腐蚀率, 见表1~4(加“\*”为接近测量值)。

### 1.3 GM(1, 1)模型

灰色系统的GM(1, 1)模型<sup>[9]</sup>能对一系列数据建立一个或一群数学函数, 模型的数学表达式为:

$$F(k+1)=Ae^{-nk}+B \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

式中,  $F$ 表示 $k-1, k-2$ 个对应时间的年平均腐蚀深度之和( $\mu\text{m/a}$ );  $A, B, n$ 为待定系数。将(3)式进行变换<sup>[9]</sup>, 可得:

$$D=A(1-e^n)e^{(1-n)} \quad (4)$$

GM(1, 1)模型要求各处理点的试验时间间隔相等, 以实现能够预测非处理点的功能, 即可以预测任一点的腐蚀率。运用北京、青岛、江津、广州等地区常用的碳钢、低合金钢材料第1, 2, 4年的暴露试验数据拟合的模型预测第8年的平均腐蚀率见表1~4(加“\*”为接近测量值)。

### 1.4 环境综合因子预测模型

环境因素对金属材料大气腐蚀的影响是极其复杂的, 研究工作者提出了影响大气环境腐蚀性综合因子<sup>[10]</sup>, 大气环境腐蚀性综合因子由湿润因子 $f_1$ 、侵蚀因子 $f_2$ 、雨水酸度因子 $f_3$ 组成。大气环境腐蚀性综合因子 $N=f_1+f_2+f_3$ , 可以由文

表 1 北京地区钢的第 8 年腐蚀率暴露实验值与计算值的比较  
Table 1 Values of exposed test and the values of the models calculated in Beijing (the 8th year)  $\mu\text{m/a}$

材料	暴露实验	模型 1 $AT^n$	模型 2 $AT^ne^{CT}$	模型 3 $GM(1,1)$	模型 4 $(A\log N+B)T^n$
06CuPCrNiMo	6.600 0	5.909 6	7.301 7	1.858 1	6.516 7*
09CuPCrNiA	7.100 0	5.629 3	7.566 3*	10.111 1	5.731 4
09CuPCrNi	7.000 0	5.884 1	6.533 4*	4.339 4	6.148 2
09CuPTiRE	8.400 0	6.821 2	7.350 3*	4.702 3	6.900 2
10CrCuSiV	7.200 0	6.004 2	5.792 1	3.401 0	6.303 7*
10CrMoAl	7.200 0	6.636 7	6.784 1	3.705 5	7.099 1*
15MnMoVN	8.900 0	6.511 5	7.600 2*	4.821 9	6.780 7
14MnMoNbB	9.700 0	8.064 3	8.760 1	5.638 4	8.841 3*
12CuMnCu	9.700 0	8.064 3	8.760 1	5.444 0	8.955 2*
D36	10.000 0	8.263 5	9.392 2	5.914 5	9.456 1*
16MnQ	10.100 0	7.892 4	6.713 9	5.312 6	9.004 8*
3C	12.600 0	8.088 8	9.546 1*	5.470 6	9.277 6
A3	9.900 0	8.088 8	9.546 1	5.470 6	10.182 2*
09MnNb(s)	10.700 0	9.932 7*	9.695 7	6.942 4	12.206 2
16Mn	11.000 0	8.727 8	10.681 7 *	6.928 9	10.445 7
20	10.600 0	7.730 9	8.992 9	5.646 1	9.124 4*
08Al	12.000 0	10.361 0	12.703 8*	8.193 2	13.197 3

表 2 青岛地区钢的第 8 年腐蚀率暴露实验值与计算值的比较  
Table 2 Values of exposed test and the values of the models calculated in Qindao (the 8th year)  $\mu\text{m/a}$

材料	暴露实验	模型 1 $AT^n$	模型 2 $AT^ne^{CT}$	模型 3 $GM(1,1)$	模型 4 $(A\log N-B)T^n$
06CuPCrNiMo	14.700 0	12.154 3*	10.106 7	6.286 4	9.418 2
09CuPCrNiA	17.100 0	13.642 6	14.701 3*	8.363 0	10.079 9
09CuPCrNi	14.800 0	12.778 4*	17.323 7	10.778 0	10.227 6
09CuPTiRE	18.500 0	15.360 1	19.213 4*	-1.578 6	11.539 6
10CrCuSiV	14.600 0	12.286 7	16.792 5*	9.951 5	9.497 2
10CrMoAl	12.400 0	10.152 2	12.772 8*	8.137 6	8.589 8
15MnMoVN	15.500 0	13.298 6	16.804 5*	11.224 0	11.544 4
14MnMoNbB	17.600 0	15.767 3*	19.855 5*	12.811 0	14.624 5
12CuMnCu	19.600 0	15.325 7	23.425 8*	15.432 9	13.054 7
D36	21.800 0	20.800 5*	24.335 6	16.674 4	17.976 4
16MnQ	22.200 0	19.412 0	23.724 4*	17.102 4	16.359 8
3C	23.900 0	21.203 7	22.533 8*	16.454 8	17.053 9
A3	24.900 0	19.390 3	21.403 0*	15.826 3	16.401 2
09MnNb(s)	25.300 0	21.188 7	25.262 1*	18.715 7	17.221 5
16Mn	24.300 0	22.345 9	23.297 0*	17.943 3	20.473 5
20	29.500 0	25.902 5	30.672 9*	21.520 4	21.457 0
08Al	62.200 0	50.750 8	58.511 7*	41.710 2	33.418 4

献<sup>[1]</sup>给出的方法计算大气环境腐蚀性综合因子  $N$  值. 腐蚀深度  $R$  与大气环境腐蚀性综合因子  $N$  满足下列关系式:

$$R=A\log N+B \tag{5}$$

式中:  $R$  表示碳钢或低合金钢的第一年腐蚀率 ( $\mu\text{m/a}$ );  $N$  表示大气环境腐蚀性综合因子;  $A, B$  表示待定系数.

用  $R$  代替指数模型 1(式(1))中的  $A$ , 可得到

根据环境因子和腐蚀时间进行预测碳钢和低合金钢大气腐蚀的关系式:

$$D=(A\log N+B)T^n \tag{6}$$

运用北京、青岛、江津、广州等地区常用的碳钢、低合金钢材料第 1 年的暴露试验数据拟合的模型预测第 8 年的平均腐蚀率, 见表 1~4(加“\*”为接近测量值).

表 3 江津地区钢的第 8 年腐蚀率暴露实验值与计算值的比较  
Table 3 Values of exposed test and the values of the models calculated in Jiangjin (the 8th year)  $\mu\text{m/a}$

材料	暴露实验	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
		$AT^n$	$AT^ne^{CT}$	GM(1,1)	$(A\log N+B)T^n$
06CuPCrNiMo	15.400 0	16.262 7*	12.959 6	9.451 6	11.883 1
09CuPCrNiA	14.500 0	18.487 4	12.645 8	9.780 1	13.203 1*
09CuPCrNi	15.900 0	17.625 9*	10.908 5	7.893 1	12.154 8
09CuPTiRE	14.800 0	15.277 0 *	11.119 1	7.980 2	10.993 9
10CrCuSiV	18.500 0	18.339 8*	13.289 5	9.879 2	13.414 3
10CrMoAl	22.400 0	26.342 2	18.888 3*	14.677 4	18.136 4
15MnMoVN	17.100 0	17.764 0*	18.673 6	13.318 1	12.702 7
14MnMoNbB	19.400 0	21.270 0*	22.261 6	15.783 2	14.664 3
12CuMnCu	21.000 0	23.049 1*	14.419 1	11.185 1	16.764 1
D36	18.300 0	20.086 6*	15.069 5	9.939 8	14.212 1
16MnQ	18.000 0	20.599 0*	14.805 5	11.214 7	14.740 4
3C	18.400 0	20.635 7*	13.718 4	10.432 4	15.049 5
A3	21.700 0	22.696 8*	17.136 6	12.660 8	15.783 7
09MnNb(s)	20.000 0	20.928 2*	20.844 5	13.860 9	14.459 5
16Mn	26.600 0	25.218 5*	15.153 4	11.196 3	15.310 5
20	25.300 0	27.751 5*	19.329 3	11.247 0	18.353 6
08Al	66.400 0	54.391 9	32.421 9	25.288 4	32.137 7

表 4 广州地区钢的第 8 年腐蚀率暴露实验值与计算值的比较  
Table 4 Values of exposed test and the values of the models calculated in Guangzhou (the 8th year)  $\mu\text{m/a}$

材料	暴露实验	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
		$AT^n$	$AT^ne^{CT}$	GM(1,1)	$(A\log N+B)T^n$
06CuPCrNiMo	12.700 0	13.858 9*	14.599 3	10.358 9	10.388 7
09CuPCrNiA	11.900 0	13.649 1	14.784 3	10.855 5*	9.971 8
09CuPCrNi	13.100 0	15.921 1	13.845 5*	10.660 8	12.563 9
09CuPTiRE	13.000 0	16.160 3	14.610 8	10.604 2	12.795 7*
10CrCuSiV	14.000 0	15.867 3*	16.329 4	11.222 7	11.936 1
10CrMoAl	17.700 0	20.453 9	22.226 4	17.907 9*	15.221 3
15MnMoVN	15.300 0	16.659 6	16.450 2	11.717 3	12.188 9
14MnMoNbB	15.300 0	18.727 8*	18.807 0	13.570 7	14.057 7
12CuMnCu	18.100 0	20.498 4*	20.701 6	15.915 3	15.000 1
D36	17.200 0	18.662 9	17.982 6*	12.066 1	13.309 9
16MnQ	16.800 0	20.717 7	17.427 3	13.226 0	16.763 2*
3C	16.600 0	17.397 4*	18.207 2	12.100 9	12.928 0
A3	16.500 0	17.551 8*	18.846 2	12.572 6	13.130 1
09MnNb(s)	18.100 0	19.188 8*	21.056 4	14.990 4	14.015 1
16Mn	20.000 0	20.064 8*	20.860 7	14.926 2	14.062 8
20	17.400 0	18.934 5	17.704 9*	12.507 1	14.930 3
08Al	27.000 0	28.733 2*	31.123 3	23.095 0	22.653 1

2 分析与讨论

表 1~4 的模型计算出的碳钢和低合金钢第 8 年腐蚀率与暴露试验测量第 8 年腐蚀数据比较表明：相同的预测模型在不同的地区其预测结果与暴露试验测量值相吻合程度不一样，不同的预测模型在同一地区其预测结果与暴露试验测量值相吻合程度差别较大。指数模型一在

江津(表 3)、广州(表 4)等地区的预测结果与其他模型预测结果相比，多数材料的腐蚀率与实际值较吻合；指数模型 2 在青岛(表 2)地区的预测结果大多数与实际值相吻合；灰色系统模型总体来说预测结果与实际测量值接近的比较少；环境综合因子预测模型在北京(表 1)地区的预测结果与其他模型预测结果相比，多数材料的预测值与实际值较吻合。

同一种材料在不同地区运用不同的模型预测结果与该地区实测值接近程度不同。如材料 06CuPCrNiMo 在北京(表 1)地区环境综合因子预测结果与实测值较吻合;在青岛(表 2)、江津(表 3)、广州(表 4)等地区指数模型 1 预测结果与实测值较吻合。

又如材料 08Al 在北京(表 1)、青岛(表 2)地区运用指数模型 2 预测其结果与实测值较吻合,在江津(表 3)、广州(表 4),等地区指数模型 1 预测结果与实测值较吻合。

不同种材料在同一地区运用不同的模型,预测结果与该材料的暴露试验值相接近的程度不同。如表 1,北京地区 06CuPCrNiMo, 10CrCuSiV, 10CrMoAl, 14MnMoNb, 12CuMnCu, D36, 16MnQ, A3, 20 号钢等材料适合于运用环境综合因子模型进行预测; 09CuPCrNi, 09CuPTiRE, 09CuPCrNiA, 15MnMoVN, 3C, 16Mn, 08Al 等材料适用于运用指数模型 2 进行预测; 09MnNb(s) 钢运用指数模型一较为精确。

灰色系统的 GM(1,1) 模型,要求各处理点的试验时间间隔相等。而我国大气腐蚀网站所提供的碳钢及低合金钢的材料数据腐蚀数据时间为 1 年, 2 年, 4 年, 8 年, 其时间间隔不相等, 它的应用有一定的局限性。

环境综合因子模型将环境因素引入大气腐蚀预测, 并且只需要第 1 年的腐蚀数据便可实现大气腐蚀预测, 这是其他预测模型没有能够实现的。如果完善模型中的环境综合因子  $N$ , 使其更接近实际情况, 大气腐蚀环境综合因子的预测模型将会有更高的应用价值。

### 3 结束语

本工作对常用的大气腐蚀预测模型的预测结果进行了分析比较, 结果表明相同的材料在不同的大气环境下存在着不同的大气腐蚀预测模型, 相同环境下的不同材料也有不同的大气腐蚀预测模型。建立计算机大气腐蚀预测智能选择系统, 方便、准确选择模型, 以实现金属材料的大气腐蚀预测, 是非常必要的。

致谢: 作者衷心感谢全国大气腐蚀网站为积累环境腐蚀数据而长期工作的全体科研工作者, 感谢国家自然科学基金委员会对本工作的资助。

### 参 考 文 献

- 1 Cole L S. Recent Progress in Modeling Atmospheric Corrosion. In: Publication of Vietnam Corrosion & Metal Protection Association. Proceedings of the 11th Asian-Pacific Corrosion Control Conference. Hochiminh City: Vietnam, 1999. 94
- 2 Farrow L A, Graedel T E. Gildes Model Studies of Aqueous Chemistry: II - The Corrosion of Zinc in Gaseous Exposure Chambers. Corrosion Science, 1996, 38(12): 2181
- 3 侯文泰, 于敬敦, 梁彩凤. 碳钢及低合金钢的大气腐蚀. 中国腐蚀与防护学报, 1993, 13(4): 291
- 4 Hou W T, Liang C F. 8-Year Atmospheric Corrosion Exposure of Steels in China. Corrosion, 1999, 55(1): 65
- 5 唐其环. 用 GM(1,1) 模型拟合大气腐蚀数据. 腐蚀与防护, 1993, 14(1): 40
- 6 蔡建平, 柯伟. 应用人工神经网络预测碳钢、低合金钢的大气腐蚀. 中国腐蚀与防护学报, 1997, 17(4): 304
- 7 李牧铮, 张军. 环境因子与大气腐蚀关系的数学模型和大气腐蚀预测. 中国腐蚀与防护学报, 1993, 13(1): 10
- 8 汪轩义, 王光雍. 环境因子对碳钢和低合金钢大气腐蚀的影响. 中国腐蚀与防护学报, 1995, 15(2): 125
- 9 邓聚龙著. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992. 104

## Comparison of Several Different Models in Atmospheric Corrosion Prediction

MA Xiaoyan, WHAG Xiumei, QU Zuyu, LI Changrong, Wang Guangyong

Material Science and Engineering School, UST Beijing, Beijing, 100083, China

**ABSTRACT** Atmospheric corrosion rates of carbon steel and low alloy steel were predicted by using different models: two regressive models ( $D=AT^n$ ,  $D=AT^ne^{CT}$ ), GM(1,1) model of "Gray system", and synthetic factors model of atmospheric corrosion. By comparing the calculated values with exposed test values, it indicated that same materials have different corrosion rules in different environments at the same time for different materials have different prediction models in the same environment.

**KEY WORDS** atmospheric corrosion; model; prediction