

铝合金棒材电导率涡流测试中曲面修正系数的研究

北京航空材料所 徐可北

【摘要】 本文介绍了麦道航空公司的差值修正系数、波音公司的比值修正系数以及国内庆安宇航设备公司提出的一种 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(\frac{b}{\phi}\right)$ 标准指数函数形式的修正系数曲线方程。在此基础上, 又介绍了一个作者根据自己测试的大量数据求得的 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(s + \frac{t}{\phi}\right)$ 复合指数函数形式的经验公式。最后的偏差分析表明, 按公式 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(s + \frac{t}{\phi}\right)$ 得到的修正结果较精确。

关键词: 涡流检测 电导率 铝合金棒材 曲面修正

A RESEARCH ON CONVEX SURFACE CORRECTION FACTORS FOR THE MEASUREMENT OF ALUMINUM ALLOYS CONDUCTIVITY WITH EDDY CURRENT METHOD

Xu Kebei

(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

【Abstract】 Two kinds of convex surface corrected factors used by McDonnell Douglas Aircraft Company and Boeing Company and the correction equation $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(\frac{b}{\phi}\right)$ put forward by Qing An Space Navigation Equipment Company for measuring aluminum alloy conductivity of round bars are described. The empiric formula $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(s + \frac{t}{\phi}\right)$ is also given by the author. The error analysis shows clearly that the conductivity values corrected according to the equation $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(s + \frac{t}{\phi}\right)$ is more accurate.

前 言

用涡流方法测定铝合金的电导率来评价铝合金材料或零件的热处理状态(组织均匀性, 过热、过烧状况)以及与此相关的某些机械性能, 是一种十分有效且非常经济的无损检测方法。

涡流方法只能在一定大小且有相当厚度的平面上测出试件的真实电导率值, 而在曲面试样上测得的电导率读数与真实的电导率值是有差异的。这就需要对面测量值加以修正, 以获得真实的电导率值。实际测量发现, 使用不同型号的电导仪测量得到的修正系数是不同的。本文是依据目前国内使用最多的西德 FÖRSTER 公司制造的 Sigmatest 2.067 和厦门第二电子仪器厂生产的 FQR7501 两种电导仪所测得的数据对 $\phi 20 \sim 120\text{mm}$ 铝合金圆棒的电导率测量提出一种新的修正方法和修正系数公式。

不同的修正方法和修正系数

美国军标 MIL-STD-1537 中 4.2.2.1 条规定: 凹面曲率半径大于 20in. (508mm), 凸面曲率半径不小于 4in. (102mm), 试件的电导率可直接在曲面上测量, 而不考虑探头与曲面耦合间隙的影响。对于曲率半径小于 4in. 的圆棒, 则应考虑对实际测量值加以修正。如何修正, 军标中未作进一步的说明。

麦道公司 (The McDonnell Douglas Aircraft Company) 有关文件 DPS1.05-8 中提出一种差值修正方法, 即分别测出化学成分, 组织结构以及表面机加工状态均相同的平面、曲面试样的电导率值 $\sigma(\infty)$ 、 $\sigma(\phi)$, 以 $\sigma(\infty) - \sigma(\phi)$ 作为同类批量待检试件曲面电导率的修正系数。这种差值修正系数不仅与曲率大小有关, 而且随试件本身电导率不同而不等。因此测试时需要针对具体的材料、不同的热处理状态建立相应

的修正系数,可见差值修正系数的适用性是很狭隘的。

波音公司(The Boeing Company)有关文件 BAC 5946 中的圆棒曲面修正系数是以曲面测量值与平面真实值之比的形式给出的,这样在很大程度上消除了电导率因素对修正系数的影响,在工程测试精度要求范围内,可以不考虑铝合金材质(牌号、热处理状态)的不同。

修正系数曲线

波音公司 BAC5946 给出的比值修正系数可不再考虑电导率的影响,但该表只列出了 12 个特殊尺寸的修正系数值,而对除此之外的尺寸,却没有说明修正的方法。实际测量时,需要加工试样以确定相应尺寸曲面的修正系数或根据表中数据凭主观近似确定,这样必然增加工作量或产生较大的偶然误差。

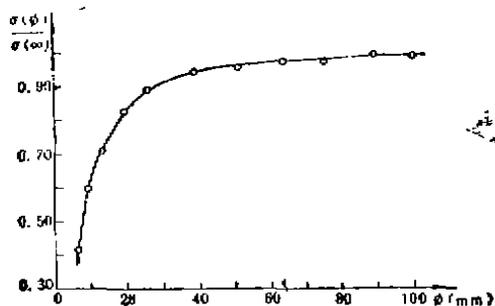


图1 BAC5946所给修正系数描点及连线

图1是波音公司修正系数的描点和根据这些点连成的一条曲线。国内曾有学者根据曲线的变化趋势,假设电导率 $\sigma(\phi)$ 按指数函数规律随直径 ϕ 变化,即

$$\sigma(\phi) = a \cdot \exp\left(\frac{b}{\phi}\right) \quad [3]$$

式中 a, b ——取决于试验值的待定常数。

$$\begin{aligned} \text{令} \quad \sigma' &= \ln \sigma \\ \phi' &= \frac{1}{\phi} \\ a' &= \ln a \end{aligned}$$

于是指数函数变换为 $\sigma' = a' + b\phi'$ 的线性函数,然后利用试验数据进行最小二乘法拟合,求出 a, b 常数。

下列两个函数式分别为对两种热处理状态的Ly12铝合金棒材测试得到的数据,采用最小二乘法拟合求出的曲线方程:

$$\sigma_1(\phi) = 25.94 \exp\left(-\frac{4.997}{\phi}\right)$$

$$\sigma_2(\phi) = 17.09 \exp\left(-\frac{4.154}{\phi}\right)$$

按参考文献[3],当 $\phi \rightarrow \infty$ 时,得出试样平面上的真实电导率,上式中 $\sigma(\infty)$ 值分别为 $25.94 \text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $17.09 \text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

修正系数曲线方程求出后,可在一定尺寸范围内 ($\phi 10 \sim 100 \text{mm}$)^[3],由任意尺寸曲面上的电导率读数计算出该棒材的真实电导率值。我们可以看到,两个方程中决定修正系数的参量 b 不相同 ($b_1 = -4.997, b_2 = -4.154$),这说明该修正系数方程虽然解决了有限连续区间所有尺寸(而不是波音公司的十几个特殊点)的曲面修正的问题,但又陷入了类似道格拉斯公司修正系数“受制”于电导率的困境。

BAC5946文件给出的修正系数保留了两位有效数字。如果假设这两位有效数字都是经过对千分位数字四舍五入得到的,那么可以认为波音修正系数变化的上、下限可扩展到 $\left[\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)}\right] \text{BAC} + 0.04$ 和

$$\left[\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)}\right] \text{BAC} - 0.05, \text{修正系数的容许变化区间为}$$

0.9%。无论是测量系统本身(仪器分辨率、灵敏度、校准以及标块的标定)的系统误差,还是操作人员的偶然误差,都很容易超出该误差限。那么为什么误差容限这么严格的修正系数却能够列在标准文件中应用于实际工程测量呢?我们认为这主要是因为由修正系数误差造成的修正结果的误差远小于工程测量中的容许偏差,因而被掩盖了。

该问题弄清楚后,接下来便会提出新的疑问:是不是根据波音公司 BAC5946 提出的修正系数得到的修正结果偏差最小呢?前面曾经提到, BAC5946 中只给出了 12 个特殊尺寸的曲面修正系数,一为测量带来不便,二会因主观臆想造成偏差。

下面我们试图依据实际测试数据求出精度更高的修正系数曲线。

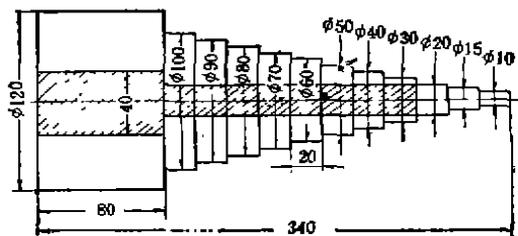


图2 测不同曲面、平面电导率的铝合金塔形试样

图2是为测试不同尺寸曲面、平面电导率加工的塔形试样(图上画阴影部分为铣削平面,尺寸如图所示),分别测出曲面上、平面上的电导率读数,计算出比值修正系数。电导率不同的铝合金棒,相同尺寸的修正系数并不完全相等,电导率对比值修正系数的这

表 1 不同曲面电导率修正系数

直径 (mm)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
修正系数 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)}$	0.816	0.894	0.933	0.950	0.965	0.973	0.978	0.979	0.987

表 2 不同曲面函数 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(\frac{b}{\phi}\right)$ 的 b 值

直径 (mm)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
b	-4.067	-3.361	-2.774	-2.655	-2.318	-1.916	-1.780	-1.910	-1.309

种微小的影响在工程测量中允许不考虑。我们先后用 4 台涡流电导仪 (3 台西德的 Sigmatest 2.067, 1 台厦门的 FQR7501) 对 3 种牌号共 8 个不同状态的铝合金试样进行了测试, 积累了数千个、上百组数据。表 1 是根据多次测试得到的大量数据求出的修正系数的平均值。

假设修正系数是标准指数函数 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(\frac{b}{\phi}\right)$

理论上说, 对于不同的 ϕ 值, b 是一个不变的常数。由于测试值并不完全依指数函数关系变化, 分别将不同的 ϕ 值及实测的相应的修正系数值代入上式中, 我们发现得出的 b 值是变化的, 其值如表 2。

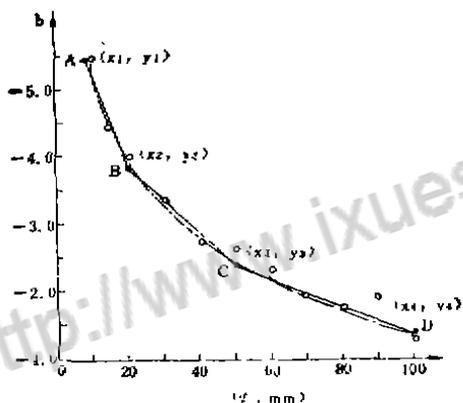


图 3 ϕ, b 关系

在坐标纸上描出各尺寸对应的 $[b(\phi), \phi]$ 点, 用曲线连接各点。用 AB、BC、CD 三条线段拟合曲线 (如图 3)。3 条线段始末端对应的坐标分别为 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$ 、 $D(x_4, y_4)$ 。(x_i, y_i) ($i=1, 2, 3, 4$) 的具体值可以从图上根据坐标尺寸查出。利用线段始末端点的坐标, 可分别求出 AB、BC、CD 的直线方程

$$b(\phi) = s \cdot \phi + t$$

这样修正系数曲线方程不再是标准指数函数形式, 而是一个与线性函数复合而成的复合指数函数:

$$\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(s + \frac{t}{\phi}\right)$$

表 3 中 s, t 值是对该方法求出的曲线方程并加以经验修正得到的, 其适用范围为 $\phi 20 \sim 120 \text{mm}$ 铝合金棒材。实际测量表明, 采用检定合格的仪器、标块及标准测试环境、方法进行测试, 修正系数公式适用于 $\phi 100 \sim 120 \text{mm}$ 这段扩大的测试范围。

表 3 不同曲率范围 s, t 的取值

直径 ϕ (mm)	20~50	50~120
s	0.050	0.018
t	-4.87	-3.28

偏差分析

前两节曾对道格拉斯航空公司、波音公司以及国内庆安宇航公司测试铝合金棒材电导率的修正方法和修正系数作了介绍, 其中的一些分析表明:

1. DPS1.05-8 文件提出的差值修正系数与试件的电导率有很大关系, 因此适用性很狭隘;

2. 文献[3]提出的 $\sigma(\phi) = a \cdot \exp\left(\frac{b}{\phi}\right)$ 修正公式是在确定区间 ($\phi 10 \sim 100 \text{mm}$) 得出的, 而棒材电导率的真实值 a 是在 $\phi \rightarrow \infty$ 条件下求得的。按照数理统计理论, 这种推算方法是不够严密的。实际测量亦表明, 测试值与推算结果之间有较大差异, 此外, 由于修正系数参量 b 与电导率有关, 其适用性也受到一定的限制。

鉴于以上分析, 下面将两组曲面电导率的测试数据分别仅按波音公司 BAC5946 的修正系数和本文提出的修正系数公式这两种方法进行修正, 修正结果分别记作 $\sigma_1(\infty)$ 、 $\sigma_2(\infty)$, 并与平面上实际测量的电导率的真实值 $\sigma(\infty)_{\text{真}}$ 进行比较。分别算出前两者与后者的差值, 记做 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ 。具体值见表 4、5。

以直径尺寸 ϕ 为横轴, 电导率差值 $\Delta\sigma$ 为纵轴, 分别描出这两种修正方法对两组曲面电导率测试值修正

表 4 曲面修正结果与实测值的偏差

直径 ϕ (mm)	20	40	60	80	100
$\sigma(\phi)$ 实测 (MS·m ⁻¹)	20.1	23.0	23.78	24.42	24.8
$\sigma(\infty)$ 实测 (MS·m ⁻¹)	24.5	24.5	24.5	24.75	25.0
$\sigma_1(\infty)$ (MS·m ⁻¹)	23.96	24.39	24.43	24.83	25.05
$\Delta\sigma_1$ (MS·m ⁻¹)	-0.54	-0.11	-0.10	+0.08	+0.05
$\sigma_2(\infty)$ (MS·m ⁻¹)	24.39	24.71	24.67	24.99	25.17
$\Delta\sigma_2$ (MS·m ⁻¹)	-0.11	+0.21	+0.17	+0.24	+0.17

表 5 曲面修正结果与实测值的偏差

直径 ϕ (mm)	30	50	70	90
$\sigma(\phi)$ 实测 (MS·m ⁻¹)	14.82	15.75	16.14	16.23
$\sigma(\infty)$ 实测 (MS·m ⁻¹)	16.7	16.7	16.7	16.7
$\sigma_1(\infty)$ (MS·m ⁻¹)	16.32	16.41	16.47	16.39
$\Delta\sigma_1$ (MS·m ⁻¹)	-0.38	-0.29	-0.23	-0.31
$\sigma_2(\infty)$ (MS·m ⁻¹)	16.56	16.52	16.61	16.53
$\Delta\sigma_2$ (MS·m ⁻¹)	-0.14	-0.18	-0.09	-0.17

结果的偏差图(见图 4、5)。每个图上都给出了 $\pm 0.5\%$ IACS ($\pm 0.3 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$) 和 $\pm 1.0\%$ IACS ($\pm 0.6 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$) 两个变化区间。工程测试要求严格时,偏差不得超过 $\pm 0.5\%$ IACS; 一般要求时,偏差允许在 $\pm 1\%$ IACS 范围内。从图 4、5 可见,以波音 BAC5946 提出的修正系数得到的修正结果与实测值偏差虽然能较好地满足工程测量要求,但总体偏差偏低。以本文提出的修正系数公式修正的结果与实测值偏差更小,且偏差较均匀地分布在 $\Delta\sigma=0$ 这一直线上,下两侧。平均偏差和偏差的方均根值亦表明复合指数函数形式的修正系数公式的修正结果更精确。

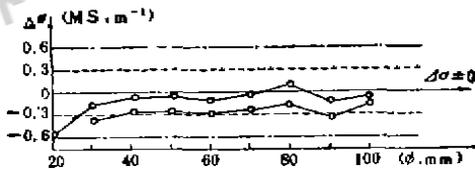


图 4 BAC5946修正系数修正结果的偏差

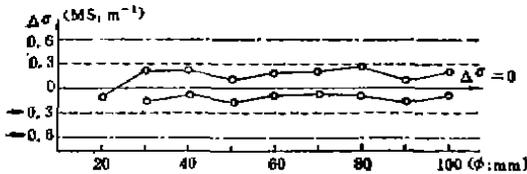


图 5 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(s + \frac{t}{\phi}\right)$ 公式修正结果的偏差

波音公司 BAC5946 修正系数的修正结果与实测结果的偏差为:

$$\begin{aligned} \text{平均偏差 } \Delta\bar{\sigma}_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_{1i} \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \\ &= \frac{1}{17} \sum_{i=1}^{17} \Delta\sigma_{1i} = -0.187 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{方均根偏差 } s_1 &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_{1i}^2} \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \\ &= \sqrt{\frac{1}{17} \sum_{i=1}^{17} \Delta\sigma_{1i}^2} = 0.241 \end{aligned}$$

该公式的修正结果与实测结果的偏差为:

$$\begin{aligned} \text{平均偏差 } \Delta\bar{\sigma}_2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_{2i} \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \\ &= \frac{1}{17} \sum_{i=1}^{17} \Delta\sigma_{2i} = 0.018 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{方均根偏差 } s_2 &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_{2i}^2} \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \\ &= \sqrt{\frac{1}{17} \sum_{i=1}^{17} \Delta\sigma_{2i}^2} = 0.147 \end{aligned}$$

结 论

1. 由铝合金棒材曲面电导率的测试值按不同的修正方法(如差值修正系数法,比值修正系数法)均可得到棒材的“真实”电导率值。差值修正系数随铝合金电导率不同而不同,这种修正系数适用性较狭隘;在工程实际测量的容许偏差范围内,比值修正系数可不考虑电导率因素的影响,在一定尺寸范围内,适用于不同牌号状态铝合金棒材曲面电导率的修正。

2. 根据公式 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(s + \frac{t}{\phi}\right)$ 得到的修正结果不仅比波音公司 BAC5946 所给出修正系数的修正结果偏差小,而且实现了由有限个特殊尺寸的修正到连续区间任意尺寸的修正。

3. 修正系数公式 $\frac{\sigma(\phi)}{\sigma(\infty)} = \exp\left(s + \frac{t}{\phi}\right)$ 在不同尺寸范围的测试。 s, t 取值不同,文中给出的两组 s, t 值仅适用于西德 Sigmatest 2.067 和厦门 FQR7501 两种型号的电导仪(仪器、标块均检定合格)测试 $\phi 20 \sim 120 \text{ mm}$ 铝合金棒材。

4. 被测试件化学成分、组织结构均匀,表面(包括平面、曲面)粗糙度优于 $Ra 6.3 \mu\text{m}$, 表面非导电层(氧化膜、涂层等)不得超过 $10 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 BAC5946 Temper Inspection of Aluminum Alloys
- 2 DPS1.05-8 Eddy Current Conductivity Testing Equipment and Procedures
- 3 孙建武: 无损探伤, 1989: (3): 6



论文写作，论文降重，
论文格式排版，论文发表，
专业硕博团队，十年论文服务经验



SCI期刊发表，论文润色，
英文翻译，提供全流程发表支持
全程美籍资深编辑顾问贴心服务

免费论文查重：<http://free.paperyy.com>

3亿免费文献下载：<http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重：http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载：<http://ppt.ixueshu.com>

阅读此文的还阅读了：

- [1. LC9—CgSI棒材的工艺研究](#)
- [2. 未焊透缺陷深度对LY12铝合金搅拌摩擦焊焊缝电导率的影响](#)
- [3. 射频搭接阻抗测试方法的修正](#)
- [4. 电磁浓度计在丝光碱液检测中的应用](#)
- [5. 变形铝合金零件热处理状态的涡流电导率—布氏硬度...](#)
- [6. 铝合金管棒型线材生产技术与装备发展概况](#)
- [7. 中段切断称量法测棉纤维细度之误差浅析](#)
- [8. 涡流法检测铝合金电导率的研究](#)
- [9. 通风机压缩性修正系数的理论依据及应用](#)
- [10. 铝合金棒材反挤压金属流动特点及中心粗晶形成机理的探讨 \(1\)](#)
- [11. 从涡旋电流谈电磁炉锅具的选择](#)
- [12. 电磁浓度计在丝光碱液检测中的应用](#)
- [13. 活性炭电导率测试及其相关因素试验](#)
- [14. 铝合金化学镀镍磷合金和性能](#)
- [15. 金属芯棒对阵列感应测井仪器的影响](#)
- [16. 空调水泵扬程的现场测试方法及分析](#)

17. 铝合金的淬火系数分析法(2)
18. 曲面型频率选择面的设计与测试
19. 飞机铝合金结构热损伤的涡流检测
20. 2007合金高精度棒材生产工艺研究
21. 环芯法A、B释放系数的有限元计算
22. 生物组织电导率磁感应测量原理及系统研究
23. 高电导率高屈服强度铝合金的研制
24. 掌上型数字显示涡流导电仪的研制
25. 在ITS—90下PSS—78最修正系数的研究
26. AlZnMgCu合金的回归和再时效处理
27. 曲面型频率选择面的设计与测试
28. 聚乳酸纤维混纺织物含量测试中修正系数的研究
29. 不同品种的铝及铝合金材料在高压隔离开关上的具体应用
30. 天然气压缩因子的计算与体积计量
31. 宁波市道路机动车综合排放因子
32. 主风流量修正方法
33. 钢丝网架聚苯板导热系数修正研究
34. 停放时间对7B04铝合金性能的影响
35. 第四专题 涡流法测量铝合金电导率
36. 应用涡流电导率检测技术评定铝合金的热损伤
37. 第四专题 涡流法测量铝合金电导率
38. SiO₂质量分数对Al合金非晶质粉末挤压超细晶棒材耐磨性的 …
39. 基于光纤Bragg光栅传感器的铝合金堆焊应力测试
40. 原油流量计系数交接及其应用的规范
41. 铝合金早拆模板体系试验测试
42. 掌上型数字显示涡流导电仪的研制
43. 铝合金的力学性能及其电导率
44. 一种实用的铝合金棒材超塑预处理方法
45. pH值和电导率测试的进展
46. LY12铝合金热处理工艺,电导率和机械性能关系的试验研究
47. 高电导率高屈服强度铝合金的研制
48. 铝合金微弧氧化磷酸盐体系电解液研究及陶瓷层分析
49. 铝液在多孔介质中流动的水力模拟测试
50. 曲线、曲面的广度Offset及其性质