

电导率测量在民航飞机维修中的应用

郑勇 国航工程技术分公司成都维修基地

摘要: 本文通过作者在电导率测量工作中所遇见的实际问题,结合电导率测量基本理论,探讨了电导率测量在目前的民航飞机维修中的应用和注意事项。本文在民航飞机维修中的电导率测量中具有一定的参考和指导意义。

关键词: 电导率 测量

一. 前言

在飞机各级维修过程中,对飞机结构损伤的检查及修理成为必不可少的维修手段,随着飞机维修级别的不断提高和结构维修深度的不断深入,热损伤作为结构损伤的一种已成为结构检查和修理的对象,对飞机机体而言,热损伤的具体表现形式为雷击损伤,在雷雨季节,飞机一些电阻值大或尖锐部位极易遭受雷击,特别在紧固件和紧固件相邻的周围蒙皮常常容易造成热损伤,从而构成裂纹源,为蒙皮开裂埋下隐患,严重的雷击甚至会烧蚀紧固件和击穿蒙皮;对飞机部件而言,飞机某些高速运转的部件如轮毂、刹车毂和轮轴等运转中的突然终止,会造成这些部件局部表面骤然升至较高温度,引起其材质发生变化,热损伤主要表现为部件局部的过热、过烧。

金属结构所受的热损伤在一定程度上可以理解为局部的热处理,而这种热处理对金属结构来说是有害的,它改变了金属结构本身原有的我们所需的强度、硬度等机械性能和抗腐蚀性等化学性能,从而可能使金属结构在局部的强度、硬度或抗腐蚀的下降而形成事实上的不连续性(通常所指的缺陷),导致此处的结构容易产生裂纹,腐蚀或断裂等影响飞机安全的结构损伤,对飞机的结构完整性造成潜在的破坏性危害。这类热损伤可凭借目视检查进行判断,观察其外表面是否有热损伤痕迹如颜色变化,但不能确定热损伤量度、

判断该零部件是否可用以及该受损蒙皮是否需要修理等。再者，热损伤的危害在初期一般表现不出来，但由于热损伤已经造成材质变化，会因此影响相关结构的继续使用，因此确定飞机结构或零部件热损伤程度尤为重要。电导率是金属的重要性能参数之一，对一种性能稳定的金属而言，它的电导率值总在一个相对固定的范围之内，而产生热损伤的金属在热损伤区域及周围区域的电导率值会发生相应的变化，通过对比测量值与参考值，就很容易定量地判断金属的性能是否发生了改变。电导率计准确性高，工作效率高，操作简单且携带方便，对飞机结构的电导率测量非常有效，因此使用电导率计对金属结构件进行电导率值的测量是飞机结构热损伤检查的有效手段和重要手段之一。

由于现在绝大多数结构热损伤检查修理的对象是铝合金结构，现结合个人在实际工作中的电导率测试就铝合金结构电导率测试原理方法及在民航飞机维修中的应用和注意事项作一简要介绍和总结。

二. 电导率测试基本原理

电导率测试和涡流检测的基本原理是基本相同的，都是根据电磁场理论的电磁感应现象，即利用载有交变电流的检测线圈接近导电试件时，周围空间的交变磁场会使试件中会感生出涡旋电流（涡流），涡流的大小、相位及流动形式受试件的性能参数等因素的影响，而涡流产生的磁场又使得检测线圈的阻抗发生变化，因此通过测定检测线圈阻抗的变化，就可以得出被检试件的导电性差异的结论。

1. 电导率的物理意义

材料按其导电性能可分为：绝缘体、半导体、导体、超导体（一种特殊条件下的导体）。

金属材料能够导电是因为在金属中，原子最外层的电子受原子核的束缚很弱，在常温下它们就能挣脱原子核的束缚而成为自由电子，在金属内自由运动。通常情况下，任一瞬间通过导体任一截面的电量可以相互抵消，即导体中没有电流流过，若在导体两端提供电位差，即导体中产生电场，自由电子就会在电场作用下从低电位向高电位移动，由于在导体中自由电子数量很多，很容易发生电子流（电荷）的移动，所以导体就会很容易导电。在这种情况下，导体的任何截面都将有一定的电流流过。

金属材料中由于自由电子在运动过程中与原子或其他自由电子相互碰撞，自由电子的运动速度就会减慢，对电流的通过存在一定的阻力，称为电阻 R 。

$$R = \rho * L / S$$

ρ ：电阻率，是一个仅与导体材料有关的物理量，在涡流检测中经常用电导率 σ 来表示导电材料的导电性能。

$$\sigma = 1 / \rho$$

为了方便计算，我们通常用国际退火铜标准（IACS）表示导电材料的导电性能。

三. 影响材料电导率的因素

1. 单晶或经过充分退火的高纯度金属，电导率会达到极大值；
2. 金属中掺入杂质成为合金使得其晶格发生畸变，引起电导率相应变化。

一般情况下，电导率随杂质含量增加成比例减小，并且与杂质元素种类有关；

3. 金属经过冷加工（机械加工）、热处理后，由于内应力使晶格发生畸变，电导率减小。飞机某些部位遭受雷击和某些高速运动部件的突然终止，在一定程度上相当于经过了局部热处理；
4. 当温度升高时，自由电子碰撞机率增加，电导率减小。

四. 电导率的测试方法

根据波音规范，要确定飞机某个部位的电导率是否发生变化首先应该通过目视检查，观察其外表面是否有热损伤痕迹，比如金属颜色变化、漆层烧蚀等外部特征，以此来确定需要测定电导率的区域。测试前，应做好表面准备工作：打磨干净该区域的毛刺和去除已被破坏的松散漆层，油污以及密封剂，以便电导率仪的测试探头和被检表面接触良好，使测值准确。现以 Hocking 公司的 Autosigma3000DL 电导率计为例介绍电导率的测试方法。

1. 设备及附件：根据波音 NDT 手册要求，仪器操作频率为 50K-300KHz 范围，精度要求 $\leq 0.5\%IACS$ ，探头必须与仪器匹配。

试块：根据波音 NDT 手册和 BAC5946 要求，需经检定合格的一套至少三个试块，电导率标称值一般分别为 $16 \pm 3\%IACS$ 、 $29 \pm 3\%IACS$ 、 $42 \pm 3\%IACS$ ，此范围是英制飞机结构常用铝合金材料的电导率范围。

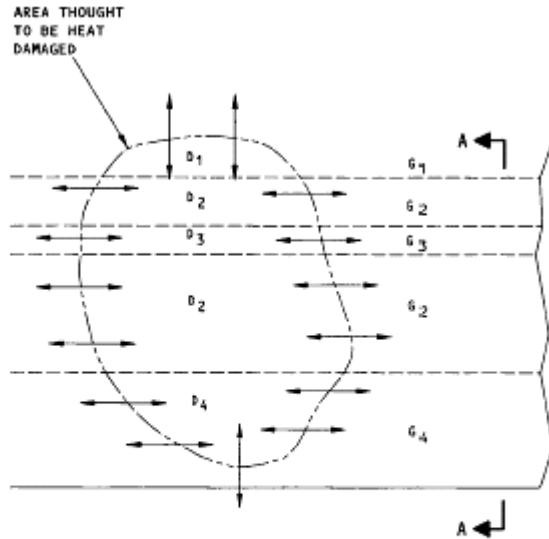
2. 仪器校准。校准时，要求仪器、探头、试块和待检区域处于同样的环境温度水平，我们用两个参考试块（一个试块的电导率标称值要高于待检零件/区域的 IACS 值，另一个试块的电导率标称值要低于待检零件/区域的

IACS 值)。波音 NDT 手册推荐，大多数铝合金材料的电导率范围为 29 ~ 42%IACS。根据电导率设备操作手册调节好仪器和 NDT 规范校准好设备：选择与探头匹配的频率（有些仪器是自动识别探头），如果仪器内部没有自动提离调节功能，需要一厚度与被测区域表面非导电层厚度相同的非导电薄膜。波音规范要求，校准时仪器对试块电导率的测得值与试块电导率的标称值相差不超过 0.5%IACS。

3. 测量步骤。

- A. 将探头放置在已知无热损伤区域的表面，测得一基准值。如果检测区域内有不同的外形，则应在不同的外形处测得相应的基准值。
- B. 将探头放置在认为有热损伤区域的表面中心位置，测得该处的电导率值。波音 NDT 手册要求，测得的电导率值与相应的基准值比较，如大于或等于 1%IACS，则认为该处有热损伤，不论其能否被接受。
- C. 如果仅仅是要求测量一定区域的电导率数值，则在测量完数值后将测量数值与 NDT 或 BAC 规范给出的标定数值范围相比较，得出是否超出给定范围的结论报相关部门。

4. 标注出好区与热损伤区的边界。（见附图）



NOTES:

- G - GOOD AREA (NOT DAMAGED)
- D - AREA THOUGHT TO BE HEAT DAMAGED

五. 影响电导率测值准确度的因素及实际测量过程中的注意事项

测量电导率时，其准确度要受到各种外界因素的影响，在测量过程中主要有以下值得注意的几个方面：

1. 测量前的技术准备：在进行具体电导率测量以前，应查阅相关资料了解所测量区域的参数条件，例如非导电涂层厚度，被测铝合金厚度，紧固件分布等，这对判断评估最后的测量结果是很重要的。

2. 位置的影响：

2.1 在试块上面校准设备时，试块的尺寸不应过小，波音手册要求，试块的尺寸不应小于 1.2in*1.2in；探头放置位置不应距离结构边界或邻近结构太近。否则会减小电导率值，波音 NDT 手册要求，由于边界引起的电导率值变化应 $\leq 0.2\%$ IACS。

2.2 待测区域内紧固件间距不应太近，至少要满足波音 NDT 手册对由于边界

引起的电导率值变化要求，否则会急剧减小电导率值。

2.3 被测部件表面的凹凸变化会影响电导率测量的结果；为保证探头与被测表面充分接触，被测部件表面的粗糙度应至少为 150Ra。

2.4 被测区域曲率的影响。曲率太大，会减小电导率值。波音 NDT 手册要求，由于曲率引起的电导率值变化应 $\leq 0.2\%$ IACS。

3. 厚度的影响

3.1 被测表面非导电涂层的厚度不能太厚，否则会影响测量结果的准确性。

可以通过测量所使用设备的最大剥离厚度来确定，即与光面标准试块相比较，当粘贴在标准试块上面使导电率值产生 $\pm 0.3\%$ IACS 变化时的非导电薄膜厚度值就是被测表面非导电涂层的最大允许厚度。

3.2 结构厚度变化影响电导率值准确度。波音 NDT 手册要求标准试块的厚度最小应为 3 倍标准渗透深度 δ ，同时波音 NDT 手册认为，结构厚度如小于 2.66 倍标准渗透深度 δ ，会减小电导率值。下图为波音 NDT 手册中给出的各种频率的最小渗透深度。

CONDUCTIVITY % IACS (MS/m)		MINIMUM THICKNESS OF THE CONDUCTIVITY STANDARD, INCHES (MILLIMETERS)*							
		INSTRUMENT TEST FREQUENCY							
		60 kHz		100 kHz		250 kHz		500 kHz	
25.0	(14.5)	0.056	(1.43)	0.044	(1.11)	0.028	(0.70)	0.020	(0.50)
30.0	(17.4)	0.052	(1.31)	0.040	(1.01)	0.025	(0.64)	0.018	(0.45)
35.0	(20.3)	0.048	(1.21)	0.037	(0.94)	0.023	(0.59)	0.017	(0.42)
40.0	(23.2)	0.045	(1.13)	0.035	(0.88)	0.022	(0.56)	0.015	(0.39)
45.0	(26.1)	0.042	(1.07)	0.033	(0.83)	0.021	(0.52)	0.015	(0.37)
50.0	(29.0)	0.040	(1.01)	0.031	(0.79)	0.020	(0.50)	0.014	(0.35)
55.0	(31.9)	0.038	(0.97)	0.029	(0.75)	0.019	(0.47)	0.013	(0.33)
60.0	(34.8)	0.036	(0.93)	0.028	(0.72)	0.018	(0.45)	0.013	(0.32)

* The minimum thickness of a conductivity standard must be equal to 2.66 times the standard depth of penetration.

值得注意的是，在我们的实际工作中，我们所测量的部位特别是飞机蒙皮

的厚度由于化学铣切而造成变化，有的厚度甚至小于波音 NDT 手册中所要求的最小厚度，此时的测量值可能会超出 NDT 手册的给定范围值，此时我们应该按照波音手册的要求查阅 BAC5946 的相关内容，因为波音 NDT 手册上面给出的电导率值仅仅是一个材料范围很广的电导率值。

4. 温度的影响

4.1 结构/区域温度影响

波音手册要求电导率的测量应该在 4.5℃ 至 32.2℃ 的环境温度范围内进行，并且不能在阳光直射和寒冷的室外环境中进行测量。在测量过程中的环境温度不能有变化，设备、探头、试块和被测件的温度应该相同，温差不超过 2℃，这一切都是为了消除温度的影响，材料温度的增加会导致电导率的下降，在我们实际工作中，温度的影响是比较大的。

4.2 手-探头温差的影响

波音手册要求电导率测量探头应该与设备相匹配，能够接触被测件的平面，对接触被测表面的压力不敏感，对手与探头以及探头与被测表面的热传导不敏感，但在实际工作中，手与探头之间的温差对电导率的影响是比较大的，一般的电导率探头有两种，一种是带压力弹簧的，由于手接触的是弹簧套而不与探头直接接触，可以消除温差的影响，另一种是不带弹簧套的探头，手与探头直接接触，手的温度会影响电导率值的测量结果，特别是手指越靠近测量线圈，这种影响就越明显。因此需要在手指与探头之间适当增加一层薄的隔热材料来消除这种影响。

以上因素都会引起电导率测值不准确，其原因在于：涡流形成原理可知，探头放置在结构/区域表面时，会在其内部一定深度激励出涡流环，

除了温度影响因素外，其他因素都使涡流环发生畸变（或不完整），从而影响了探头接收的电磁能。

六. 实际应用

1. 2003 年，我公司 B2586 机大翼下蒙皮遭雷击，有关技术要求测量雷击点附近蒙皮的电导率，以便确认其热损伤能否被接受。我们依据 B737NDT 手册 Part6 51-00-00 Figure3 和 Figure 20 要求，先将受损漆层打磨干净，露出金属本体。我们使用 Autosigma3000DL 电导率计进行测量，测量频率为 60KHz，测量区域 5 处，每处测量 3 点，测得相应无热损伤区域的电导率为 32% IACS，而五处目视有热损伤区域的电导率均为 31.8%~31.9% IACS，由下表可见，有热损伤区域的电导率未超过波音规定的标准。

热损伤区域	测试值% IACS			均值 % IACS	波音标准
I	31.8	31.9	31.8	31.83	测试值与 32%IACS 差值 ≤ 1%IACS
II	31.9	31.9	31.8	31.88	
III	31.8	31.8	31.8	31.80	
IV	31.8	31.9	31.9	31.88	
V	31.9	31.9	31.9	31.90	

2. 2004 年，我基地在对上海航空公司 B757/2842 飞机 8C 检过程中按照相关技术要求需要对 STA1450 站位 4L 至 4R 之间的怀疑雷击蒙皮区域进行电导率测量，该处蒙皮材料为 2024-T3，经查阅相关 SRM 手册和 B757NDT 手册 Part6，

51-00-18, 2024-T3 的电导率范围为 28.5-32%IACS, 我们使用 Sigmatest 2.067 电导率计对该区域进行测量, 测量频率为 60KHz, 测量点数量为 90 个, 每个测量点测 3 次取均值, 最后测量结果为最大值为 34%IACS, 最小值为 32.2%IACS, 从测量结果看, 已经超出了 SRM 手册和 NDT 手册要求的范围值, 根据 SRM 手册, 我们了解到该处蒙皮为化铣蒙皮, 厚度为 0.4 到 0.9in, 最小厚度已经低于 NDT 手册中的最小材料厚度了, 但是根据 NDT 手册的要求, 我们查阅了 BAC5946, 找到了 2024-T3 在 0.4-0.9in 范围内的蒙皮厚度所对应的电导率值范围为 29.5-34.2% IACS, 因此我们的测量结果完全满足手册的要求。

因此, 电导率测试将随着飞机维修工作的深入或特殊意外情况的出现, 应用将越来越多, 民航电导率测量人员应清楚其测试原理、方法、影响因素和相关标准规范。

七. 参考文献

- | | | |
|------------------------------|---------|------|
| 1. 《电磁检测》 | 航空工业出版社 | 1995 |
| 2. 《涡流检测》 | 机械工业出版社 | 2004 |
| 3. 波音 B737NDT 手册及 B757NDT 手册 | 波音公司 | 2004 |
| 4. 空客 A340NTM 手册 | 空客公司 | 2004 |
| 5. 波音 BAC 手册 | 波音公司 | 2004 |
| 6. 波音 BSS 手册 | 波音公司 | 2004 |