

材料·热工艺

# 应用涡流电导率检测技术评定铝合金的热损伤

韩亚利, 陈勇, 周志平

(空军航空维修技术学院, 湖南长沙 410124)

[摘要] 综述了铝合金产品在现代航空工业中的重要作用, 举例说明了涡流电导率检测技术在评定铝合金热损伤方面的潜在用途, 指出这种检测方法是今后铝合金质量控制的有效手段, 特别是在飞机结构件烧伤的检测中有独特的优越性。

[关键词] 铝合金; 热损伤; 电导率; 检测

[中图分类号] TG146.2\*1

[文献标识码] B

[文章编号] 1003-5451(2006)03-0037-04

## Evaluating of Heat Damage of Aluminum Alloy With the Test Method of Electric Conductivity

HAN Ya-li, CHEN Yong, ZHOU Zhi-ping

(Air Force Aeronautical Service Technical College, Changsha 410124)

[Abstract] The important function of aluminum alloy and its products in modern air industry are reviewed. The potential applications of evaluating the heat damage of aluminum alloy with the test method of electric conductivity are concluded. The method will be an effective means of controlling the quality of aluminum alloy and its products. It has apparent advantage in testing burned aircraft components.

[Keywords] aluminum alloy; heat damage; electric conductivity; testing

### 前言

在航空维修企业, 对航空金属产品的质量监控是极为重要的。近20年来, 现代航空材料取得了重大发展。由于铝合金具有质轻、抗蚀、导电、导热等特点, 以及无低温脆性、易加工成形等优点, 因而在现代先进的军用及民航飞机结构材料中, 仍保持着统治地位。如F-22战机采用了当时(20世纪80年代初)最先进的高纯铝合金7075和2124用作机体内部的框架、大梁、桁架、加强肋、腹板、接头件及某些蒙皮等主要受力结构件, 其重量占前机身的50%, 中机身的35%, 后机身的22%, 中央翼的23%。20世纪90年代以来, 航空铝合金有了重大突破, 7175、

2524、7055、2197等高性能铝合金在第四代战机上得到应用。1995年开始研制、2000年首先使用的F-35战机上采用了这几种最先进的铝合金, 其总用量占30%以上, 仍占主体地位。从国外干线客机及军用飞机各类材料结构质量分数占比表中(见表1、表2)可以看出, 不管是军用飞机还是民用飞机, 铝合金的用量都是最大的。因此, 在评定飞机材料的热损伤方面, 文献中涉及较多的是铝合金。

### 1 涡流电导率检测法评定铝合金热损伤的研究概况

用涡流检测法评定铝合金热损伤, 国内外很多

表 1 国外干线客机各类材料结构所占比例 (w%)

机型	铝合金	结构钢	钛合金	复合材料	其他
B747	81	13	4	1	1
B757	78	12	6	3	1
B767	80	14	2	3	1
B777	70	11	7	11	1
DC10	78	14	5	1	2
MD11	76	9	5	8	2
A-320	76.5	13.5	4.5	5.5	-
A-340	75	8	6	8	3

学者进行了大量的研究,如美国的 Harvey V 和 Pellegrini 对 7075-T6 铝合金的温度与机械性能的关系进行了测试。该试验是以厚度为 1.6mm 的 7075-T6 铝合金板为试验材料,测试材料在 205、260、315 和 400 温度下的室温性能<sup>[3,4]</sup>。试验发现:温度低于 315 时较高的温度和增加保温时间,都导致机械性能降低,电导率增高。在温度为 315 和 400 时,机械性能有所回升,电导率下降。研究认为,这是由于可溶性组分的部分重新溶解,通过快速冷却在室温下产生淬火效应所造成。同时,试验还对热处理铝合金的电导率与强度的关系进行了研究。研究发现,退火材料的电导率最高。这是因为在退火状态下,可溶性组分大部分从固溶体中析出,形成一种高导电性能的铝晶体。当固溶热处理时,硬化组分再次固溶,电子散射量增加,以致电导率降低。可见金属材料的电导率与组织状态是密切相关的。

电导率检测具有简便、灵敏、无损等优点,可以弥补硬度或强度检测必须破坏零件或受零件形状、重量及材料表面状态限制的缺点。在生产中将金属材料的电导率检测和硬度或强度检查结合起来,用于检测铝合金零件或产品的热处理状态,控制航空金属产品的内部质量,在许多发达国家早已广泛采用。目前,电导率检测已成为国外控制铝合金材料及其热处理质量不可缺少的检测手段。如美国的军标、宇航标准及波音标准 BAC5946 中明确规定了不同型号的铝材在不同热处理状态下的电导率与硬度的范围,并制定了相应的检测标准(见表 3)。

表 2 国外军用飞机各类材料结构所占比例 (w%)

机型	铝合金	结构钢	钛合金	复合材料
F-14	39	17	24	1
F-15	36	6	27	2
F-16	64	3	3	2
F-18	49	15	12	10
Oy-27	60	8	18	2
F-117	20	5	25	10
B-2	27	6	23	37
YF-22	35	5	24	23
F-22	15	5	41	24

表 3 美国波音公司对几种牌号铝合金在不同热处理状态下的电导率与硬度的规定指标 (BAC5946)

合金牌号	热处理状态	电导率量值范围		洛氏硬度 RB1)
		MS/m	%IACS	
2014	0	28.1~29.6	48.5~51.0	-
	T3,T4	18.3~20.3	31.5~35.0	68.0~80.0
	T6	20.3~23.2	35.0~40.0	78.5~89.5
	0,F	26.4~28.4	45.5~49.0	-
2024	T3	16.5~18.6	28.5~32.0	70.0~83.5
	T4	16.5~18.6	28.5~32.0	70.0~86.0
	T6	20.9~23.2	36.0~40.0	77.0~86.0
	0,F	27.3~32.5	47.0~56.0	-
6061	T4	20.9~26.4	36.4~45.5	-
	T6	23.2~29.6	40.0~51.0	53.5~80.0
	0,F	25.5~27.6	44.0~47.5	-
	W	16.5~17.7	28.5~30.5	24.0~34.0
7075	T6	17.4~20.3	30.0~35.0	83.5~94.0
	T73.5	22.0~24.7	38.0~42.5	79.5~89.0
	T76	21.5~24.4	37.0~42.2	83.5~91.0

注:1) 所用设备难以准确绘出 RB 20 的洛氏硬度,故未列出。F——加工状态 O——退火状态 W——非稳定的固溶热处理状态 T——稳定的固溶热处理状态 T3、T4——固溶热处理+自然时效状态 T6——固溶热处理+人工时效状态 T7 xx——固溶热处理+过时效状态

从表 3 中可以看出:铝合金电导率因其热处理状态及合金成份的不同而不同。按表中给出的电导率值可以作为判定相应牌号、状态铝合金材料或零件热处理质量是否合格的参考依据。

由参考文献可以知道,相同材料的试件经过不同的热处理,电导率是有差异的,例如金在经800淬火之后,电导率比退火状态要下降35%;钛合金Ti6Al4V的电导率随着加热温度的变化而变化,温度越高变化越大。在应用电导率检测技术来控制铝合金热处理质量方面,我国起步较晚,进入九十年代,国内一些科研单位和高校才开展这方面的研究工作。如成都飞机工业公司采用压痕硬度检测和电导率检测来鉴定零件的材质,取得了较好的效果<sup>[10]</sup>。多年来,针对航空产品的材料特点,经过广泛的试验研究和大量的生产积累,在金属材料或零件的电导率检测中取得了长足进步,并取得了一些成果。如北京航空材料研究所徐可北的《涡流法测量铝合金电导率》、《铝合金棒材电导率涡流测试中曲面修正系数研究》、郑州工业大学的《一种检测电导率的新方法》;哈尔滨理工大学的《金属热处理状态的快速鉴别与分选》、孙建武的《变形铝合金零件热处理状态的涡流电导率-布氏硬度法检验》等。哈尔滨飞机制造公司关伟平等以10mm厚的板材变形铝合金LY12为试验材料,进行了LY12铝合金在不同热处理工艺下的电导率测量<sup>[9]</sup>。对LY12铝合金的电导率、机械性能、显微组织、热处理工艺等方面之间的关系进行了较为详细的试验研究。

上述研究发现:

① LY12铝合金厚板经不同淬火温度(470、480、490、497、503、507、512、520)固溶处理后再进行自然时效,合金电导率与淬火温度有良好的线性关系,并且,电导率随淬火温度的增加而下降。这是因为随着淬火加热温度的升高,合金中的强化相溶解更完全,合金元素在固溶液中的分布亦更均匀,电子散射几率增加,使合金电导率下降。

② LY12铝合金在不同热处理制度下的电导率和性能之间的关系如图1所示。由图1可知,LY12铝合金的电导率值及性能和显微组织有着良好的对应关系。这是因为热处理是铝合金强化的过程,而合金的电导率又是合金导电能力大小的度量,电导率主要与合金内部的晶体结构、散射电子能力和自由电子数量有关。

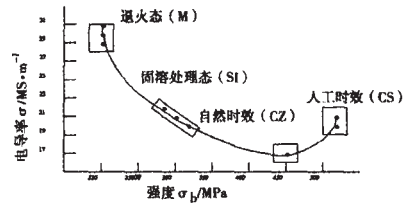


图1 铝合金热处理状态与电导率及强度的关系曲线<sup>[9]</sup>

③ 铝合金电导率的高低,主要取决于合金基体中析出相的类型和弥散分布的程度,合金的宏观机械性能硬度和强度也主要由微观组织决定。

哈尔滨理工大学樊景云等用WJF-D型金属材料分选仪检测LC4铝合金的热处理状态,检测结果见表4。

由表4中可见,按电导率数值大小可快速鉴别出退火、正常时效和过时效3种状态,而用HRB硬度值,无法鉴别过时效态和正常时效态。北京飞机维修工程有限公司对硬铝LY12材料的日常淬火态、超温淬火态的电导率、硬度及金相组织进行了试验研究<sup>[1]</sup>。研究发现,对硬铝LY12材料进行淬火热处理时,由于炉子异常超温,由金相检查结果知道材料已经过烧,但硬度值却符合标准要求。硬度及电导率数值见表5。金相检查结果见图2和图3。

表4 铝合金LC4热处理状态检测结果

热处理状态	硬度值/HRB	WJF仪数显值	美国7075电导率值/%ACS
正常时效态	81.0~90.7	3328~3642	30.0~35.0
过时效态	87.8	3735~3815	38.0~42.5
退火态	<25	4399~4518	44.0~47.5

表5 铝合金LY12淬火热处理检测结果

热处理状态	硬度值/HRB	电导率值/%ACS	金相检查结果
日常淬火	69.8~71.3	31.5	正常
超温状态	70.2~71.6	28.2	过烧

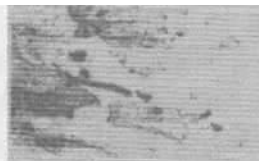


图2 LY12日常淬火温度(493℃±3℃)金相组织形貌<sup>[1]</sup>(500×)

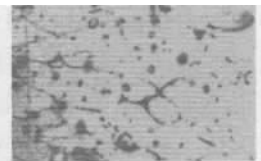


图3 LY12超温状态下(520℃±3℃)金相组织形貌<sup>[1]</sup>(500×)

图3表明材料已发生明显的过烧迹象,出现晶界加粗、共晶复熔球及复熔三角形等。但过烧状态与未过烧状态的硬度却是近似的,分别为HRB69.8~71.3和HRB70.2~71.6,电导率却有很大区别,分别为31.5%IASC和28.2%IACS。研究表明,正常状态与烧伤状态的硬度值基本符合技术要求,而电导率前者符合要求,后者则超出规定值。

综上所述,这些研究成果得出结论是:

①一个确定的硬度值无法找到它对应的一个电导率值。硬度值与电导率值之间并非存在对应的函数关系。但是硬度值、电导率值与热处理状态存在着一定的线性关系,即当热处理状态确定时即可找到电导率与硬度之间的对应关系。因此可以通过加热温度作为一个中间量来寻找硬度与电导率之间的一个分布关系。反之,通过硬度、电导率与加热温度的特定关系可以准确地确定工件被加热以后的组织状态,从而可以了解到材料内部组织是否均匀或正常。

②铝合金的电导率值在一般情况下可以灵敏地反映出铝合金零件的热处理情况及显微组织是否正常。

③试验证明,电导率值可以作为判断金属材料或零件热处理质量是否合格的参考依据。

④不能用硬度测定法作为唯一指标来判断某构件是否过烧。对于过伤构件,单独使用硬度测定法判断金属材料是否过伤存在一定的局限性,必须与电导率检测法相结合才能确定某构件是否存在过烧现象。

电导率检测铝合金热处理质量的研究工作和成果使我国在有关非磁性金属的热处理质量的评定方面提高到一个新阶段,同时也为我们检测烧伤飞机提供了一个较好的思路。对于被烧之后的飞机构件而言,其强度和组织均匀状况是工程应用上十分关心的技术指标。在检测手段上,由于硬度、目视、金相检查等传统的检测法存在着很多弊端,且硬度测定法也不能作为唯一指标来判断某构件是否过烧;对于保持飞机完整性的重要承力构件而言,用金相法更不可取。因此,从理论上来说,可以通过电导率的测量间接地评价飞机构件被烧之后的组织状况。据

调查,美国、俄罗斯等先进发达国家已采用涡流电导率检测法检测烧伤飞机,在国内,飞机火烧构件的检测研究及应用研究已经取得了一些成果。

## 2 结束语

涡流电导率法评定铝合金热损伤,具有不破坏构件,不受构件形状限制,操作简单,成本低廉、效率高等许多优点,该方法对材质的鉴定、热处理状态的鉴定及冷加工后的材料组织和力学性能的测定等都有重要意义,尤其在对飞机框、梁等重要构件的检测中具有独到的优越性。其应用结果证明,该检测方法有着良好的经济价值及应用前景。

参考文献:

- [1] 石峰. 航空铝合金热处理的质量控制 [J]. 航空制造工程, 1995, (6): 37-38
- [2] 颜鸣皋. 航空材料技术的发展现状与展望[J]. 航空制造技术, 2003, (12): 19-25
- [3] Harvey v, Pellegrini. Heat damage of alnico materials are tested by using eddy current. Metal Progress [J], 1980, 117(4): 60-63
- [4] METCALFE G R. The use of eddy current flaw detectors with meter display for measuring the conductivity of aluminum alloy structures[J]. British of NDT, 1988, (5): 164-169
- [5] 关伟平, 包俊成. LY12 铝合金热处理工艺电导率和机械性能关系的实验研究[J]. 航空工艺技术, 1998, (4): 34-36
- [6] Taleff E M. The High Temperature Deformation [J]. Tensile Ductility of Al Alloys, 1999, 51(1): 34-36
- [7] 许可北. 涡流法测量铝合金电导率[J]. 无损检测, 1996, 18(4): 116-120
- [8] 任吉林. 电磁无损检测[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989: 132-144
- [9] 孙震. 常用铝合金材料和钢制件成形后性能检测方法 & 热处理变形的控制[J]. 航空制造工程, 1997, (12): 34-36
- [10] 王新掌, 雷银照. 一种检测金属电导率的新方法[J]. 郑州工业大学学报, 2001, 22(2): 62-63

(收稿日期 2005-11-02)