



## 第四专题 涡流法测量铝合金电导率

徐可北

(北京航空材料研究所 100095)

### MEASUREMENT OF ELECTROCONDUCTIVITY OF ALUMINUM ALLOY BY EDDY CURRENT TECHNIQUE

Xu Kebei

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

铝合金以其良好的“强度/重量”比和“性能/价格”比,在航空航天及机电行业中得到大量应用。铝合金的高强度、高硬度需要经过适当的热处理工艺获得,不论是大尺寸构件,还是小规格零件,热处理后其有关性能,如硬度、组织均匀性、时效状态、过烧程度及抗应力腐蚀性等,均可通过电导率的测量予以评价。涡流法测量铝合金电导率简便、快速、可靠,已成为国内外控制铝合金材料及制件热处理质量不可缺少的检测手段。

#### 1 电导率测量的物理基础

金属的导电能力与其原子核外自由电子的数目及被核束缚的状态有关。物理学上是用电阻率  $\rho$  来描述金属的这种导电能力的,单位为  $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ,电阻率的倒数为电导率  $\sigma$ ,单位为 S/m,由于 S/m 是一个很小的电导率单位,常见金属及合金的电导率值一般在  $10^6 \sim 10^8 \text{S/m}$ ,为方便起见,实际上也常用兆西门子每米和国际退火铜标准的百分数来表示电导率量值的单位,即 MS/m 和 1%IACS 或 PIACS(Percentage of International Annealed Copper)来表示,上述两种电导率单位之间存在明确的换算关系,即  $1\% \text{IACS} = 0.58$

表1 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

合金 牌号	热处理 状态	电导率量值范围		洛氏硬度 <sup>1)</sup> RB
		MS/m	%IACS	
2014	O	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
2024	O, F	26.4~28.4	45.5~49.0	—
	T3	16.5~18.6	28.5~32.0	70.0~83.5
	T4	16.5~18.6	28.5~32.0	70.0~83.5
	T6	20.9~23.2	36.0~40.0	77.0~86.0
6061	O, F	27.3~32.5	47.0~56.0	—
	T4	20.9~26.4	36.0~45.5	—
	T6	23.2~29.6	40.0~51.0	53.5~80.0
7075	F, O	25.5~27.6	44.0~47.5	—
	W	16.5~17.7	28.5~30.5	24.0~34.0
	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	37.0~42.0	83.5~91.0

注:1)所用设备难以准确给出  $\text{RB} \leq 20$  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 T6——固溶热处理+人工时效 T7××——固溶热处理+过时效

MS/m, 或  $1 \text{MS/m} = 1.724\% \text{IACS}$ 。

纯铝在工程上应用较少,其电导率约为 62% IACS,相当于 36MS/m,铝合金电导率因其热处理状态及合金成分的不同而不同,具体数值见表 1。

为了更清楚地看出铝合金硬度与电导率之间的关系,根据表 1 数据可绘出图 1 所示的关系曲线。

当载有交变电流的线圈接近导电材料时,线圈内交变电流产生的交变磁场会在导电材料表层感应生成

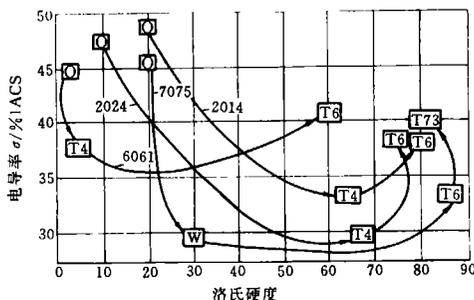


图1 几种美国牌号铝合金的热处理状态、电导率及硬度关系曲线

涡旋状流动的电流,该涡旋电流的大小除了与激励场大小及交变频率有关外,还与导电材料的电、磁特性及尺寸等参数密切相关。对于非铁磁性的铝合金,其相对磁导率  $\mu_r = 1$ ,因此其磁特性参量  $\mu = \mu_0 \mu_r$  可视为常数。对确定的仪器线圈紧密接触无限大铝合金平板来说,决定涡流场大小的就只有材料电导率这一个参数。为了精确测量出电导率的微小变化,通过复杂的阻抗分析、计算和比较试验,确定了电导率在 1%IACS~100%IACS 范围的金属及其合金最合适的测试频率为 60kHz 左右,铝及铝合金的电导率范围大致为 24% IACS~62%IACS。

## 2 铝合金电导率测量及硬度检验

铝合金材料或制件的硬度和热处理均匀状况是工程应用上十分关心的技术指标。由于硬度检验是一种破坏性测量方法,且设备通常也比较大,对试件大小及硬度又有一定的要求,因此铝合金热处理质量检验一般不采取直接打硬度的办法,而是通过电导率的测量间接地评价。由图 1 可见,同一电导率值对应各牌号铝合金的硬度或状态并不相同,仅据电导率值尚不能对硬度加以评价,还要明确测试对象的牌号与状态。

表 1、表 2 给出的电导率量值是判定相应牌号、状态铝合金材料或零件热处理质量是否合格的参考依

据。若测得的电导率值在给定的取值范围内,则可由电导率进一步推断其硬度合格与否,从而判定该试件是否合格;当测得的电导率值超出给定的量值范围,特别是在超出量又比较小的情况下,决不能因电导率不合格而推断该试件为不合格品,而须对电导率不合格的试件(或部位)补充硬度试验,并以该试验结果作为最终判定的依据。表 2 是几种国产常用牌号、状态铝合金的电导率和硬度极限,可供铝合金电导率测试和热处理状态检验参考使用。

## 3 电导率测量的技术要求

铝合金电导率测量通常是指变形铝合金,而不包括铸造铝合金。以原材料种类分,有铝合金棒材、板材、管材、型材,相应的有各种形状、规格、尺寸的变形合金制件。正由于材料和零件在形状、尺寸上的千差万别,在电导率测试过程中,就需要结合涡流技术的一些特点,采取相应手段以减小或消除各种因素的影响。

首先要考虑涡流透入深度的影响。涡流仪激励线圈周围的交变磁场在铝合金板表层产生涡流,试件表面的涡流密度最大,随着深度增加,涡流分布密度按负指数函数逐渐减小。在形状、组织成分均匀的导体内涡流密度降至表面密度值的  $1/e$  处的深度称为涡流的标准透入深度,其计算公式一般表述为  $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$ 。

表 2 国产常用牌号、状态铝合金电导率和硬度极限

合金牌号	状态	电 导 率				硬 度			
		MS/m		%IACS		HRB		HB 最小值	
		最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	模锻件	自由锻件
LY12	M	27.0	29.9	46.5	51.5	—	—	—	—
	CZ	16.5	19.4	28.5	33.5	66	82	100	—
	CS	20.9	23.2	36.0	40.0	76	86	120	—
LD5	M	27.3	29.9	47.0	51.5	—	—	—	—
	CZ	20.6	22.3	35.5	38.5	59	68	95	—
	CS	22.0	24.6	38.0	42.5	62	82	100	95
LD10	M	26.1	29.3	45.0	50.5	—	—	—	—
	CZ	18.3	20.3	31.5	35.0	69	80	100	—
	CS	19.7	22.6	34.0	39.0	71	85	120	120
LD7	M	23.2	26.1	40.0	45.0	—	—	—	—
	CS	19.4	22.6	33.5	39.0	65	79	110	110
LC4	M	23.5	26.7	40.5	46.0	—	—	—	—
	CS	17.7	20.6	30.5	35.5	82	93	140	125
LC9	M	24.9	27.6	43.0	47.5	—	—	—	—
	CS	17.7	20.6	30.5	35.5	83	94	140	125
	CGS1	22.0	24.7	38.0	42.5	78	89	130	—
	CGS3	19.7	—	34.0	—	—	—	130	125

在用 60kHz 频率测量非铁磁性的铝合金时,上述公式可简化为  $\delta = 2.05/\sqrt{\sigma}$ , 式中电导率  $\sigma$  的单位取 MS/m, 得出的标准透入深度  $\delta$  的单位为 mm。在引出标准透入深度概念后,有效透入深度概念往往被人们所忽视,实际测量中,有效透入深度的确定则更具应用价值。因为在标准透入深度以下还有相当一部分能量的涡流存在,这部分涡流的再生磁场对检测线圈的反作用是不可忽略不计的。理论上说,按负指数函数递减的涡流,其密度仅在无穷远处趋于零,工程应用上,定义标准透入深度的 2.6 倍为有效透入深度,即有效透入深度处涡流密度为表面的  $e^{-2.6}$  倍,即约为 7.4%,因而该深度以下的涡流能量允许被忽略不计。

图 2 是选用工作频率为 60kHz 的电导仪,对 0.4~2.0mm 范围内不同厚度的四种电导率值铝合金板电导率进行测量获得的试验曲线。可以看到,板材厚度大于标准透入深度而小于有效透入深度时,电导率测量的视在值与板材的实际值有较大差异,只有厚度达到或超过有效透入深度,电导仪的视在读数才能反映出材料的真实电导率值。

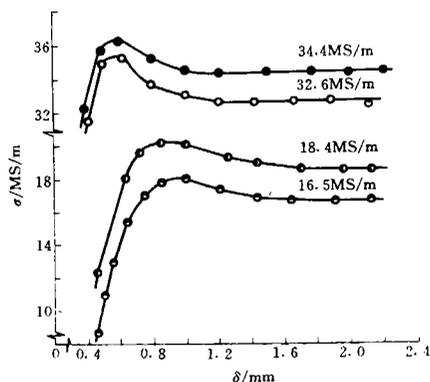


图 2 60kHz 涡流仪的电导率测量读数与板厚关系

因此实际测量时,被测件厚度应大于有效透入深度,否则需要采取叠加测量的办法。叠加测量时,可采取两张板叠加,亦可采取三张板叠加,原则上要求叠加后的厚度大于涡流有效透入深度,并要求各层必须贴紧,各层上、下位置如互换,前后测量结果应一致。

其次要考虑检测线圈与试件耦合状况影响。主要存在两类耦合不良的情况:一类是试件表面有漆层或其它非导电层;另一类是管、棒材或其它凹、凸状曲面试件。对于第一种情况,常用的涡流电导仪(探头未出现严重磨损)一般允许有不大于  $75\mu\text{m}$  的提高间隙,否则须去除,或根据预先确定的电导率补偿系数,采取比较测量的办法加以修正。对于第二种情况,通常不允许在棒材横端面直接进行测量,这是因为与铝合金电导

率相关的技术标准给出的数据均是在平行于铝合金轧制方向的平面上获得的。对于曲率半径小于 250mm 的内凹状试件,不能在凹面上直接测得其真实电导率值;对于曲率半径大于 60mm 的外凸状试件,才能在凸面上直接测得其真实电导率值,否则需要加工平整的测试面或采取修正测量方法。

对于直径在  $\varphi 20\sim 120\text{mm}$  范围的棒材,按下述公式对实测数据加以修正后可得到铝合金棒材的真实电导率值:

$$\sigma(\infty) = \sigma(\varphi) / \exp\left(S + \frac{t}{\varphi}\right)$$

式中  $\sigma(\varphi)$ ——直径为  $\varphi$  的棒材上测得的视在电导率读数

$\sigma(\infty)$ ——材料的真实电导率值,即最终期望获得的电导率值

$S, t$ ——与试件直径  $\varphi$  有关的修正系数  
不同直径范围内  $S, t$  的取值见表 3。

表 3 不同直径范围内  $S, t$  的取值

直径 $\varphi(\text{mm})$	$S$	$t$
20~50	0.050	-4.87
50~120	0.018	-3.28

举例说明:在  $\varphi 40$  和 90mm 铝合金棒材柱面上测得的电导率值分别为 32%IACS 和 37%IACS,根据表 3 选择对应的  $S, t$  值分别代入修正系数计算式中,可分别得到  $\varphi 40$  和 90mm 铝棒的真实电导率值:

$$\begin{aligned} \sigma(\infty)_{\varphi=40} &= \sigma(40) / \exp\left(0.05 - \frac{4.87}{40}\right) \\ &= 32\% \text{IACS} / 0.931 \\ &= 34.4\% \text{IACS} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma(\infty)_{\varphi=90} &= \sigma(90) / \exp\left(0.018 - \frac{3.28}{90}\right) \\ &= 37\% \text{IACS} / 0.982 \\ &= 37.7\% \text{IACS} \end{aligned}$$

采用上述修正方法可不必在试件柱面上加工测试平面而获得比较准确的电导率。

其它要考虑的主要影响因素还有边缘效应、包铝层及测试环境。由于试件几何形状的突变(如边界、孔洞、台阶等)会引起涡流扰动,因此测试部位最好是具有  $\varphi 30\text{mm}$ (或  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ )、粗糙度  $R_a \leq 6.3\mu\text{m}$  的平整面。各种牌号、厚度规格的铝合金板材,在生产轧制过程中,为预防表面出现挤压裂纹,一般均采取包铝工艺,包铝层厚度为板材厚度的 3%~5%。以美国生产的铝合金板来说,由于其轧制设备与加工工艺都比较先进,板材的包铝层厚度及均匀性都能严格控制,包铝层对电导率测试的影响也就相对均匀一致,因此美

国的铝合金材料的有关标准在考虑了包铝层影响后提出了包铝板材电导率的修正测量值。受轧制设备及加工工艺水平的限制,国产铝合金板的包铝层厚度及均匀性都难以严格控制,由于包铝层多为纯铝或不可固溶强化的铝合金,其电导率一般要比基体合金板的电导率高,其影响不容忽视,这就给国产包铝板材电导率的准确测量带来困难,该问题的解决只有通过包铝工艺的突破方能最终解决,否则只有采取去除包铝层的办法进行测量。需要说明的是,带包铝层的薄板材不允许采取叠加方式测量其电导率,即使是包铝层均匀的薄板。环境影响主要来自周围可能存在的电磁场干扰和温度差异。电导率测试过程中,探头、仪器、标准试块及试件相互间的温度差应不超过 $3^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4 涡流电导仪及电导率标准试块

德国 Förster 研究所在 60 年代初研制生产的 Sigmatest 2.067 型指针式涡流电导仪最早为工程测量所接受,70~80 年代在世界各国得到广泛应用。该仪器工作频率为 60kHz,根据不同电导率测试范围制成两台仪器。一台测试范围为 0.774~4.59MS/m,另一台的测试范围为 9.18~58.2MS/m,后者适用于铝合金的电导率测量。70 年代中期,原航空工业部 621 所最早引进了上述两种仪器,并通过测绘、试验,仿制出性能与之相近的 FQR 7501 型和 FQR 7502 型涡流电导仪。目前国内各工业部门使用最多的电导仪即为 Sigmatest 2.067 型和 FQR 7501 型。80 年代末期,德国 Fischer 公司和 Förster 公司相继推出 Sigmascope SMPI 型和 Sigmatest 2.068 型数字式涡流电导仪,国内已有数家研究单位和企业引进了这两种新型仪器。与指针式仪器相比,数字式电导仪除了具有数据存储、处理、打印等新功能外,在提高抑制补偿性能方面有极大改善,从  $100\mu\text{m}$  提高到  $500\mu\text{m}$ ,此外, Sigmatest 2.068 电导仪还增设了 120、240 和 480kHz 三档检测工作频率,因此可用于更薄板材电导率的测量。

利用涡流电导仪测量材料或制件电导率之前,首先要用电导率标准试块校准仪器的测量范围,以铝合金电导率测量的仪器为例,该仪器配备了电导率值分别为 9.18 和 58.2MS/m 的标准试块。从该型号电导仪的指示盘可以看到,在不同的量值范围内等量的电导率变化引起指针的偏移量并不相等,这是因为电导仪指示被测试件电导率值的刻度盘与仪器内某平衡电桥电路上的可调电容相联接,电导率变化量与电桥平衡过程中电容改变量之间存在近似的对数函数关系,而不是线性关系。美国波音公司在 60 年代末期最早发现,以仪器配备的标准试块校准仪器量限的高、低端,测试铝合金得到的电导率读数与其真实电导率值有较

大偏差,这是因为模拟对数函数变化规律标记的刻度盘不能在很宽测试范围内准确反应电导率变化,为此增补了量值分别约为 11.6、16.7、25、34.9 和 49MS/m 的电导率标准试块。各标准试块量值间隔为 10~15MS/m。选用与被测件电导率最接近的两块标准试块校准仪器相应的测量范围,按如此方法测得的铝合金电导率结果要比采用仪器配备的标准试块校准后测量结果精确得多。70 年代之后,美、德、英、俄及中国先后开展了电导率标准试块的研究与制造,试块不再仅仅是仪器的附属品,而成为独立于商售仪器之外的专卖的标准物质,因此用户在订购电导仪的同时,应根据其测试对象购置相应范围的电导率标准试块。

#### 5 标准试块的量值传递及电导仪的性能检定

严格地讲,涡流电导仪属计量器具,校准仪器用的试块属于标准物质范畴,因此需要按照计量技术管理原则开展标准块量值溯源、传递及仪器周期检定工作。早期校准块的量值基本上采用机械加工手段将数据刻印在其表面上,而且许多试块的量值不具可溯源性。美国波音公司在 60 年代末最早开始研究标准块量值的计量溯源问题,他们首先在大量合金材料中选择均匀性好、稳定性佳的板材,经过精密机械加工制成尺寸为  $1524\text{mm}\times 50.8\text{mm}\times 12.6\text{mm}$  条形板,在能够精确控温的油槽内向长条板输入定值直流电,并在固定长度位置上(间隔 1m)精确测量电压降,经过电阻  $R$ 、电阻率  $\rho$  的计算,最终导出电导率  $\sigma$  值,并定义该组长条板为 I 级电导率标准。以 I 级电导率标准的定值校准专用的涡流电导率测量装置,再测量尺寸为  $30\text{mm}\times 30\text{mm}\times 5\text{mm}$  试块的电导率值。以该方法及装置测得的量值作为试块的标准值,并定义其为 II 级电导率标准。美国国家标准技术研究院(简称 NIST,即原美国国家标准局 NBS)在 70 年代中期开始建立原理方法与波音公司基本相同的 I 级电导率标准,并以此作为美国国家电导率最高基标准,向波音公司等企业或部门的最高标准进行量值传递,其传递量值得到世界许多国家认可。我国铝合金电导率标准的制定工作起步于 80 年代初,当时国家最高计量技术机构——中国计量科学研究院尚未建立电导率的最高基标准,航空工业部门的北京航空材料研究所研制的电导率标准试块的定值跟踪、溯源到美国波音公司,再由此向航空、航天、民航、有色金属等部门进行标准试块量值传递。由于电导率标准试块在使用过程中会磨损,保存不当还会出现腐蚀,更由于铝合金材料的时效特性,所以标块制造、供应商在标块表面上刻印电导率量值的做法是不科学、不合理的;正确的做法是在标准试块初售时出具包含标块量值的检定证书,每次周期检定后再出具

新的检定证书。对于同一标准试块,各次检定的结果并不完全相同,这种标块量值在规定范围内变化的情况是正常的、允许的;如果标块量值的变化量超出规定范围,则须予以修复或报废。美国波音、麦道公司及我国有关标准规定铝合金电导率标准试块的检定周期为1a(年)。

即使电导率标准试块的量值非常精确,如果涡流电导仪性能不合格,则仍不能准确测量铝合金材料或零件的电导率,因此须对可能影响仪器测量准确度的有关性能定期校验,如仪器的测试稳定性、准确度、灵敏度及提高抑制性等。稳定性是指仪器在一定时间内持续测量同一试件时指示值的变化;准确度是指仪器在校准范围内测量结果的正确程度;灵敏度是指仪器能够测量出电导率的最小差值或变化;提高抑制性是指仪器消除或减小探头与试件间微小间隙影响的能力。测试铝合金过程中,对于涡流电导仪的性能指标要求及校验方法在相应的国家标准中均有具体规定。

## 6 结束语

以电磁感应原理为基础的涡流检测技术可用于金属导电材料表面及近表面缺陷的检验、非铁磁性金属基体上非导电涂层的厚度测量和材料的导电性能测

定。涡流法测试铝合金电导率技术属于材料导电特性测定技术的分支内容。由于铝合金电导率与热处理状态、硬度之间存在着明确的对应关系,故该技术在工程上得到最为广泛的应用;由于其它金属及其合金不具有铝合金的这种特性,故电导率测量一般仅用于非铁磁性金属的材质鉴别或混料分选。对于铁磁性材料,由于检测线圈在被检材料中产生的附加磁场远大于感生涡流所再生的磁场,因此这类材料的分选试验不属于涡流检测技术,而应归类于电磁检测技术。

## 7 参考文献

- 1 美国金属学会. 金属手册(Vol. 11 无损检测与质量控制). 第8版, 1976.
- 2 任吉林. 电磁无损检测. 航空工业出版社, 1989.
- 3 陈小泉. 涡流电导仪和标块的定期检定. 中国机械工程学会无损检测学会第五届年会论文集, 1991: 302-305
- 4 徐可北. 铝合金棒材电导率涡流测试中曲面修正系数研究. 无损检测, 1991, 13(8): 218-221
- 5 BAC 5946(R). Temper Inspection of Aluminum Alloys
- 6 GB/T 12966-91 铝合金电导率涡流测试方法
- 7 HB 7063-95 铝合金电导率和硬度

收稿日期: 1995年10月

(上接第109页)

的缺陷因剩磁引起的漏磁信号。由于剩磁引起的漏磁场相对较弱,检测到缺陷的灵敏度也要低些,见图6c所示。但是,由于不存在磁化场的影响,干扰信号则很小。而且,这种探头与磁化装置分离,探头尺寸更小,探头与磁化场的位置关系也可随意改变。例如,对于钢板表面缺陷的检测,将磁轭置于远表面上磁化,而探头置于近表面,检测近表面上的缺陷,见图6b。这样,既能保证有足够的磁化场,维持足够的检测灵敏度,也能减少干扰信号,提高分辨力。

## 3 结束语

漏磁通无损检测装置的基本要求,是磁敏器件相对漏磁场做有规律扫描。采用不同的扫描方式,构成适于不同形状工件的检测装置。采用点状磁敏器件以及磁敏器件同时相对磁化场和工件做有规律扫描的探头结构,使漏磁通检测装置小型化,易于携带,并能手动检测,以适于不易做自动检测的场合。

## 4 参考文献

- 1 Mackintosh DD et al. Mater Eval, 1992, 50(1): 13-17
- 2 Jiles PC. NDT International, 1990, 23(2): 83-92

收稿日期: 1995年5月

(上接第110页)

## 3 计算机软件保密及病毒的防治

近年来,计算机病毒无孔不入,所以“孔探”软件的备份也很重要,因此有必要将数据库备份到软盘上。在“孔探”软件中,我们增加了备份功能。在补充完数据后,软件会提示是否需要存盘。如果需要,就放入软盘,按“Y”,机器会自动删除过去的数据库,再补充新的数据库。

为了适应用户的需要,软件中还增设了将全部记录转换为WPS文件的功能,不过转换大约需要几十秒钟。由于WPS文件编辑和打印功能强、字体多,所以转换WPS文件后可以全部打印。事实上软件也提供了打印功能,方法也很简单,在查询飞机号之后,直接按空格键即可。

为了避免不必要的操作,软件设置了密码。假如输入错误,软件会提醒使用者。软件的背景采用青绿色,清新淡雅,有别于FOX一贯的黑面孔。菜单采用立体式,没有以往的呆板和单调。

该软件完成后,经试用一年来,反映良好。

收稿日期: 1995年10月