

# 铜及铜合金带材导电率的涡流测试方法

李湘海

(洛阳铜加工集团有限责任公司, 洛阳 471039)

**摘要:**采用涡流法选择不同的测试频率,分别对不同厚度不同叠加层的几种铜带材进行了导电率测试试验,并与双电桥法进行了对比。结果表明,只要测试频率和叠加层数合适,用涡流法完全适合对铜及铜合金带材进行导电率测量,非常适用于规模化生产铜及铜合金带材导电率快速检验的需要。

**关键词:**铜及铜合金;涡流法;导电率;叠加;快速检验

中图分类号:TB302.1 文献标识码:A 文章编号:1001-4012(2005)08-0407-03

## THE METHOD FOR ELECTRICAL CONDUCTIVITY MEASUREMENT OF COPPER AND COPPER ALLOY STRIP BY USE OF EDDY CURRENT

LI Xiang-hai

(Luo Yang Copper (Group) Co. Ltd., Luoyang 471039, China)

**Abstract:** After choosing different test frequency, make an test experiment by use of the eddy current method for the strip of copper and copper alloys which were different thickness and folding layer, and compare it with the method of Kelvin electricity bridge. The result proved that if only the test frequency is fit for the number of folding layer, the eddy current method is very suitable for the test of electrical conductivity for the strip of copper and copper alloys. The method fully supplies the demands of fast examination for the electrical conductivity of the strip of copper and copper and copper alloys by scale-producing.

**Keywords:** Copper and copper alloys; Eddy current method; Electrical conductivity; Fold; Fast examination

## 1 引言

铜及铜合金产品具有优良的导电性能,广泛应用于国民经济的各个领域。导电率是该材料最主要的物理性能指标之一。测量导电率通常采用双电桥法<sup>[1,2]</sup>,其优点是测量精度高,但由于该方法需要测量试样长度、厚度和读数电阻等诸多参数,测量周期长,而且对环境温度要求苛刻,不适用于大规模工业化生产的需要。笔者采用涡流法对铜及铜合金进行了大量的导电率测量试验。结果表明,对于厚度 $>0.3\text{mm}$ 的铜材可以直接在材料上进行测量<sup>[3]</sup>,对于厚度 $<0.3\text{mm}$ 的铜带材,如果直接在试样上进行测量,由于其厚度小于有效趋肤深度,测量误差很

大。笔者通过对不同厚度的几种铜带材进行叠加,然后进行涡流法导电率测试试验,并与双电桥法进行了对比,实验表明只要选择适当的叠加层和测试频率,完全可以采用涡流法对铜及铜合金带材进行导电率测量,特别适用于规模化生产铜及铜合金带材导电率的快速测量。

## 2 基本原理

当载有交变电流的线圈(也称探头)接近导体表面时,由于线圈交变磁场的作用在导体的表面及近表面感应出旋涡状电流称为涡流,感生涡流的磁场反作用于线圈,这种反作用的大小与导体表面及近表面的导电率有关,通过涡流导电仪可直接测量非磁性导体的导电率。

由变化磁场而感生的涡流主要集中在导体表面的现象称为趋肤效应,其涡流密度随着深度按指数

收稿日期 2005-01-17

作者简介 李湘海(1965-),男,高级工程师,学士。

规律衰减,当涡流密度为表面的  $1/e$  时的深度称为趋肤深度。对于非铁磁性材料,其趋肤深度可用公式表示为:

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1)$$

式中  $\delta$ ——趋肤深度, mm

$\rho$ ——材料的电阻率,  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$

$f$ ——测量频率, Hz

测量导电率用的探头为表面式线圈,在试件内感应出的涡流流动路径平行于试样表面,见图1。当试样内部缺陷平行于探头线圈(如层状缺陷)时,缺陷并不能阻碍涡流的流动,因此只要材料厚度大于有效趋肤深度(通常取涡流密度降至表面的5%时的深度,其值约为3倍的趋肤深度)时,就可以用涡流法在材料表面直接进行导电率测量<sup>[4]</sup>。基于上述原理,笔者进行了铜及铜合金带材的叠加层导电率涡流法测试试验。不同导电率的试样采用不同测试频率时的最小取样厚度(有效趋肤深度)见表1。

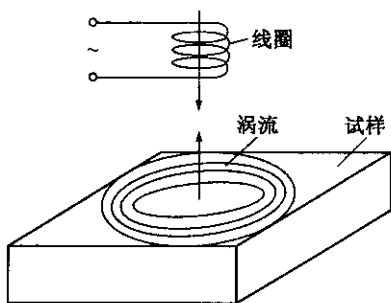


图1 导体中涡流的流动

Fig. 1 The eddy current fluxion inside conductor

### 3 试验条件与结果

试验仪器采用美国产的涡流综合测试仪,型号为D2.068,仪器带有四种测试频率,分别为60,120,240和480kHz。

试验材料采用常用的  $T_2$ , C10200 和  $T_{Fe0.1}$  三种导电用铜进行试验,三种材料的状态均为退火态,每种材料都取常用的三种厚度0.25mm,0.20mm和0.10mm进行叠加;另取同状态厚度为0.5mm的试样直接测量,并与双电桥法进行比较。

对上述材料进行了涡流法和双电桥法试验,结果分别列于表2和表3。

### 4 分析与讨论

#### 4.1 叠加层的影响

一般情况下,C10200的导电率在101% IACS左右, $T_2$ 导电率在97% IACS左右, $T_{Fe0.1}$ 的导电率在90% IACS左右。由表1可以看出,采用涡流法使用频率为480kHz进行导电率测量时,C10200的最小取样厚度为0.282mm, $T_2$ 的最小取样厚度为0.291mm, $T_{Fe0.1}$ 的最小取样厚度为0.300mm。

从表2中可看出,采用频率为480kHz进行导电率测量时,厚度分别为0.25mm和0.20mm的C10200试样叠加一层及厚度为0.10mm的C10200试样叠加两层其厚度就大于有效趋肤深度(即最小取样厚度)。在满足最小取样厚度的前提下,叠加层数越少,测量的导电率数值越接近双电桥法的测量结果(这在表3对比中可以看出),所测量的结果才真实可靠。叠加层厚度小于有效趋肤深度或叠加层数太多,其测量结果都与双电桥法相差太多,同样  $T_2$  和  $T_{Fe0.1}$  试样的测试结果也是如此。这是因为根据涡流趋肤效应的原理,如果叠加层厚度小于有效趋肤深度,其内部的磁通量衰减到最下层时不至于降到零,磁场还会穿过最下层延伸到空中,势必影响导电率的测量结果。如果叠加层太多,层与层之间的叠加难以保证紧贴,层间有间隙,如同材料内部有缺陷,从而引起涡流发生畸变,影响材料的导电性能,测量结果也不真实。因此在满足厚度大于有效趋肤深度的前提下,尽可能减少叠加层数,一般不超过三层,这样测量出的结果才真实可靠。

#### 4.2 频率的影响

由表2可以看出,在保证叠加层厚度大于有效趋肤深度而且叠加层数不大于三层的前提下,对三

表1 不同导电率的试样的最小取样厚度

Tab. 1 The experiment material minimum thickness of different electrical conductivity

导电率 % IACS	趋肤深度/mm			试样的最小厚度/mm				
	480kHz		120kHz	480kHz		120kHz		
	240kHz	60kHz	240kHz	60kHz	240kHz	60kHz	60kHz	
102	0.094	0.133	0.188	0.266	0.282	0.399	0.564	0.798
100	0.095	0.134	0.190	0.268	0.285	0.402	0.570	0.804
95	0.097	0.138	0.194	0.276	0.291	0.414	0.582	0.828
90	0.100	0.141	0.200	0.282	0.300	0.423	0.600	0.846
85	0.103	0.145	0.206	0.290	0.309	0.435	0.618	0.870
80	0.106	0.150	0.212	0.300	0.318	0.450	0.636	0.900
75	0.109	0.155	0.218	0.310	0.327	0.465	0.654	0.930
70	0.113	0.160	0.226	0.320	0.339	0.480	0.678	0.960
65	0.118	0.166	0.236	0.332	0.354	0.498	0.708	0.996
60	0.122	0.173	0.244	0.346	0.366	0.519	0.732	1.038
55	0.128	0.181	0.256	0.362	0.384	0.543	0.768	1.086

表 2 涡流叠加法的测试结果

Tab. 2 The test result of folding layer by use of eddy current method

牌号	厚度 /mm	叠加层数	导电率/ % IACS			
			480kHz	240kHz	120kHz	60kHz
C10200	0.50	0	101.3	101.2	101.0	101.0
		0.25	0	103.2	110.8	105.2
	0.20	1	101.4	101.5	101.0	108.5
		2	101.3	101.1	100.5	98.52
		3	101.1	100.8	100.1	97.86
		4	100.8	100.5	100.1	99.63
	0.10	0	102.8	105.3	100.9	72.55
		1	101.2	101.6	100.6	107.2
		2	101.2	100.7	100.2	100.8
		3	100.8	100.4	100.0	99.65
	0.05	0	103.5	109.4	106.3	69.43
		1	102.6	105.6	106.8	72.38
		2	101.0	101.3	100.9	103.6
		3	100.8	100.7	100.1	68.95
	T <sub>2</sub>	0	100.5	100.1	98.65	73.21
		0.50	0	97.30	97.28	97.32
0.25		0	101.2	108.3	103.2	63.65
		1	98.12	98.64	98.70	105.6
	2	97.41	97.32	96.55	93.23	
	3	97.00	96.22	94.32	93.62	
0.20	0	96.86	95.56	92.36	94.85	
	1	103.0	102.8	99.88	68.59	
	2	97.40	99.36	99.43	105.6	
	3	97.36	97.65	97.00	96.55	
0.10	0	96.85	96.53	95.53	94.21	
	1	96.22	95.61	94.48	94.18	
	2	78.41	48.26	68.63	53.46	
	3	102.6	103.0	102.8	69.73	
T <sub>Fe0.1</sub>	0	97.25	102.3	102.5	103.5	
	0.50	0	88.53	88.39	88.12	87.38
	0.25	0	96.34	103.2	101.6	56.19
		1	89.35	89.63	90.33	97.35
2		88.98	88.48	88.12	85.26	
3		88.36	87.69	85.37	84.34	
0.20	0	87.61	86.94	83.64	83.67	
	1	97.56	100.2	98.37	57.38	
	2	89.00	88.78	88.25	96.86	
	3	88.89	88.36	87.61	85.44	
0.10	0	88.76	87.85	85.18	82.37	
	1	87.32	86.29	83.27	80.69	
	2	87.32	86.29	83.27	80.69	
	3	87.32	86.29	83.27	80.69	
0.05	0	65.33	46.38	55.98	60.11	
	1	96.62	96.33	95.43	62.86	
	2	89.46	95.86	95.85	96.82	
	3	89.10	89.25	86.29	60.13	
0.02	0	88.26	88.31	84.34	59.87	
	1					

表 3 电桥法的测试结果

Tab. 3 The test result by use of Kelvin electricity bridge method

牌号	厚度 /mm	导电率 /% IACS	牌号	厚度 /mm	导电率 /% IACS
	0.25	101.30		0.10	97.28
	0.20	101.15	T <sub>Fe0.1</sub>	0.50	88.35
	0.10	100.97		0.25	89.21
T <sub>2</sub>	0.50	97.24		0.20	88.98
	0.25	97.36		0.10	89.33

种材料不同厚度的叠加层进行导电率测量,采用的测试频率越高,其测量数值越接近双电桥法的测量结果,这是由于测试频率越高,有效趋肤深度越小,能减少试样的叠加层数,检测结果更准确。

### 4.3 注意的问题

(1) 边缘效应的影响。测量仪器对边界有电磁屏蔽作用时,试样尺寸只要大于探头的直径就可以了,如果没有电磁屏蔽作用,则探头必须离试样边缘 5mm,以避免边缘效应的影响。

(2) 需叠加测量的带材每片尺寸应该相同,上下表面平整且能互换测量。

(3) 测量温度应尽量保证在 20℃ 左右。

## 5 结论

采用涡流法对铜及铜合金带材进行导电率测量时,采用较高的测试频率,被测材料通过适当的叠加,通常叠加层数不应超过三层,保证叠加层厚度大于有效趋肤深度,能真实地反映带材的导电性能,非常适用于规模化生产的快速检验。目前国内外生产的涡流导电仪最高测试频率是 480kHz,能测量铜带材的最小厚度是 0.1mm,如果测试频率能再提高 1 倍,最小测量厚度能达到 0.05mm,仪器就能基本满足所有铜及铜合金板带材导电率的测量要求,应用前景更为广阔,应尽快开发出此类仪器,以适应生产发展的迫切需要。

### 参考文献:

- [1] GB/T 351-1995,金属材料电阻系数测量方法[S].
- [2] GB 3248-1982,铜、镍及其合金电阻系数测定方法[S].
- [3] 董福伟. 双电桥法与涡流法测量导电率的对比实验[J]. 铜加工, 2002(2): 37-40.
- [4] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002. 393-402.