

测试导电复合材料直流电阻的四端电极法

韩宝忠¹, 韩宝国², 王艳洁¹, 蒋慧¹

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 工程电介质及其应用技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150080, hbzhj@163.com;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为了探讨基于网状或环状电极的直流四端电极法在导电复合材料电阻测试中应用的可行性, 比较了应用于不同基体、不同导电填料的导电复合材料直流电阻测试的两端电极法和四端电极法, 提出了网状或环状电极与导电复合材料之间接触电阻的计算方法并进行了验证. 研究表明: 基于网状或环状电极的直流四端电极法可消除在直流两端电极法测试中存在的电极与导电复合材料之间的接触电阻; 电极与导电复合材料之间接触电阻是非欧姆性的, 接触电阻的大小与被测导电复合材料自身性质有关, 其数值是可求解的. 基于网状或环状电极的直流四端电极法适用于测试导电复合材料的电阻.

关键词: 导电复合材料; 四端电极法; 两端电极法; 网状/环状电极; 电阻

中图分类号: TB34; TB33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)10-1677-04

DC four-electrode method for electrical resistance measurement of conductive composites

HAN Bao-zhong¹, HAN Bao-guo², WANG Yan-jie¹, JIANG Hui¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Ministry of Education, Harbin 150080, China, hbzhj@163.com;
2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of applying DC four-electrode method based on embedded gauze or loop electrode in electrical resistance measurement of conductive composites, DC four-electrode method and DC two-electrode method for electrical resistance measurement of composites with different matrices and conductive fillers were compared, and the calculation method of contact resistance between electrode and conductive composites was proposed and verified. Research results show that DC four-electrode method can eliminate contact resistance between electrode and conductive composites, which exists in DC two-electrode method. The contact resistance is non-ohmic and can be calculated, and its value depends on the property of measured conductive composites. DC four-electrode method based on embedded gauze or loop electrode is suitable for electrical resistance measurement of conductive composites.

Key words: conductive composites; four-electrode method; two-electrode method; gauze/loop electrode; electrical resistance

导电复合材料主要包括导电高分子复合材料和导电无机复合材料, 其研究历史已有 50 多

年^[1-2]. 导电复合材料不仅具有良好的导电性能, 而且具有压敏、温敏、湿敏和气敏等智能特性, 目前, 导电复合材料已被广泛应用于电子、电气、航空航天等领域^[3-6].

导电复合材料的性能测试、应用时均要涉及电极的使用, 电极是连接导电复合材料与外界的桥梁. 导电复合材料的电极形状主要包括柱状(或针状)、环状、网状和片状, 电极布置形式主要

收稿日期: 2009-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(50808055), 高等学校博士学科点专项科研基金新教师基金资助项目(20070213080), 哈尔滨理工大学优秀拔尖创新人才培养计划资助项目.

作者简介: 韩宝忠(1970—), 男, 博士, 教授.

包括两电极和四电极,电极的设置方式主要包括粘贴式、电镀式和埋入式.对于粘贴式电极,性能主要受粘贴材料的导电性、粘贴能力和抗老化性等因素决定,其主要特点是制作成本高、耐久性差、与复合材料的结合能力较差;对于埋入式电极,柱状电极测试结果精度较差,片状电极对复合材料本体的力学和其他性能影响较大;对于电镀式电极,主要缺点是制作相对复杂、成本较高.基于上述电极的形式,目前应用于导电复合材料直流电阻测试的方法主要包括两端电极法和四端电极法,前者简单方便,后者具有更高的测试精度.电极主要采用粘贴或电镀形式制作,电极材料多为片状或环状,但基于埋入式网状或环状电极的直流四端电极法报道还比较少^[7-12].

本文提出了基于网状或环状电极的直流四端电极法,并应用于不同基体、不同导电填料的导电复合材料的电阻测试,验证了应用该方法测试导电复合材料电阻的可行性,并给出了网状或环状电极与导电复合材料之间接触电阻的计算方法.

1 原材料与实验方法

1.1 原材料

本实验采用两种基体的导电复合材料,有机基体选用环氧树脂,无机基体选用水泥石,导电填料包括粒子状的炭系导电填料中的炭黑和金属系导电填料中的镍粉,以及纤维状的炭系导电填料中的碳纤维.钢网、铜网和铜环被用于制作电极.各组试件的组别编号如表1所示.

表1 试件编号

组别	电极材料	导电复合材料基体	导电复合材料填充材料
1	钢网	环氧树脂	炭黑
2	铜环	环氧树脂	炭黑
3	铜环	环氧树脂	镍粉
4	铜网	水泥石	碳纤维(高掺量)
5	铜网	水泥石	碳纤维(低掺量)
6	铜环	水泥石	镍粉

1.2 测试方法及设备

电阻测试采用伏安法.主要测试设备包括FLUKE45数字万用表、JWY-30F直流稳压电源和C65型电流计.

2 直流两端电极法与直流四端电极法的测试原理

对于具有中、高电导率的材料,简单的电阻测试方法是直流两端电极法,而为消除电极非欧姆接触对测量结果的影响,精确的电阻测试通常采

用直流四端电极法^[12].

具有中、较高的电导率的导电复合材料作为一种非均质材料,其电导率测试值受电极接触电阻的影响较为显著.本文提出了如图1所示的测试导电复合材料直流电阻的基于埋入式网状电极和埋入式环状电极的直流两端电极法与直流四端电极法(实际上还可以将环状电极和网状电极进行组合).这两种方法的差别在于:在直流两端电极法测试中,网状或环状电流极同时也是电压极,即电压极和电流极重合;而在直流四端电极法测试中,外侧两个网状或环状电极充当电流极,内侧的两个网状或环状电极充当电压极,即电流极和电压极没有重合.

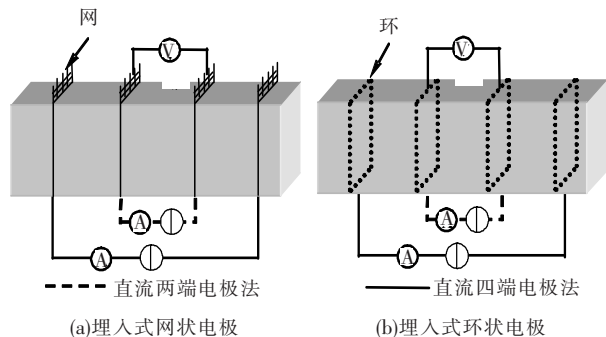


图1 基于网状或环状电极的直流四端电极法和两端电极法示意图

3 实验结果与分析

3.1 直流两端电极法与直流四端电极法的比较分析

采用直流四端电极法和直流两端电极法测试表1中各组试件(试件形状如图1)的电阻,结果见表2.对于不同基体、不同导电填料的导电复合材料试件,直流四端电极法测得的电阻值均小于直流两端电极法测得的电阻值,除第3组试件外,其他各组试件采用两种方法测得的结果相差皆较大.

表2 电阻测试结果

组别	直流四端电极法	直流两端电极法
1	66.67	514.68
2	57.58	338.37
3	214.15	216.89
4	0.86	2.37
5	26.20	80.10
6	589.48	7230.15

两种测试方法的等效电路如图2.由图2(a)可见,直流两端电极法中电极、接触电阻和试件电阻串联后与电压表并联,其测试的电压是3部分电压的叠加,包括电极上的电压 U_E 、测试电阻两端的电

压 U_R 和接触电阻两端的电压 U_J . 此时若由公式 (1) 计算被测试件电阻 R , 由于电极导电性良好, 电极两端的电压降 U_E 可以忽略, 故式 (1) 可表示为式 (2). 由式 (2) 可知, 对于应用直流两端电极法所测得的电阻值, 计算时采用的电压已含有接触电阻两端的电压. 由图 2(b) 可见, 直流四端电极法中电压表测得的仅是试件两端的电位差 U_R , 由公式 (3) 便可计算出试件的真实电阻 R .

$$R = (U_R + U_J + U_E) / I, \quad (1)$$

$$R = (U_R + U_J) / I, \quad (2)$$

$$R = U_R / I. \quad (3)$$

式中: R 为被测试件电阻 (Ω), U_R 为被测试件两端电压 (V), U_J 为接触电阻两端电压 (V), U_E 为电极两端电压 (V), I 为测试电流 (A).

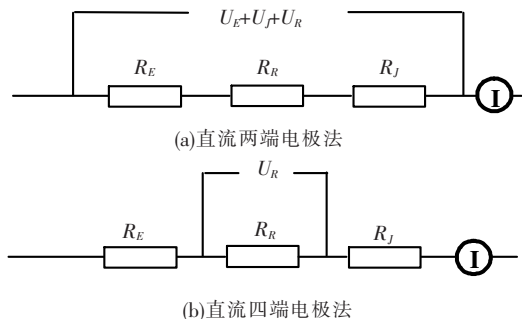


图 2 直流四端电极法和直流两端电极法的等效电路图

由表 2 测试结果及以上分析可知, 在电阻的测试中, 埋入铜网或铜环电极的不同基体、不同导电填料的导电复合材料的电阻测试结果受电极接触电阻影响较大, 应用直流四端电极法可以有效消除采用直流两端电极法测试时接触电阻对试件电阻测量准确度的影响. 此外, 接触电阻的大小与导电复合材料基体和填料的种类, 即导电复合材料本身的性质有关, 例如第 3 组镍粉填充环氧树脂导电复合材料与电极之间的接触电阻较小.

图 3 为第 6 组试件在不同测试电流下的电压 - 电流关系曲线. 不同测试电流下, 直流两端电极法测试的电压 - 电流关系表现出非线性, 即为非欧姆特性, 而直流四端电极法测试的电压 - 电流关系呈现出线性, 即欧姆特性. 由此可验证电极与导电复合材料的接触电阻具有非欧姆特性.

3.2 接触电阻的计算

为求解接触电阻, 依照表 2 中的第 4 组材料制作如图 4 的埋入式网状电极布置形式的试件. 应用直流两端电极法测试的 B、C 和 B + C 的电阻值分别为 $R_{2B} = 77.30 \Omega$, $R_{2C} = 80.12 \Omega$, $R_{2(B+C)} = 99.41 \Omega$; 应用直流四端电极法测试的对应电阻值分别为 $R_{4B} = 24.57 \Omega$, $R_{4C} = 26.19 \Omega$, $R_{4(B+C)} = 50.80 \Omega$. 该实验结果表明, 直流两端电极法的电阻

值不符合串联关系, 直流四端电极法的测试结果符合电阻串联关系, 这进一步证明了直流四端电极法可以消除在直流两端电极法测试中所存在的电极与导电复合材料之间的接触电阻.

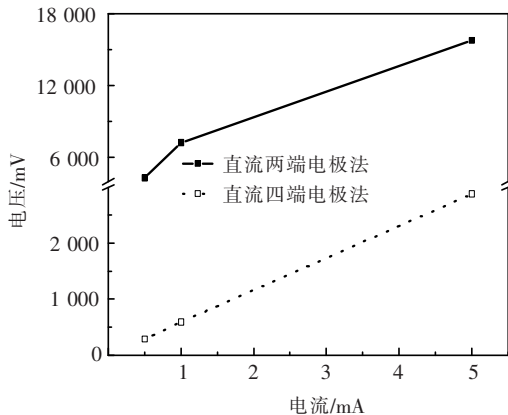


图 3 第 6 组试件在不同测试方法下的电压 - 电流关系

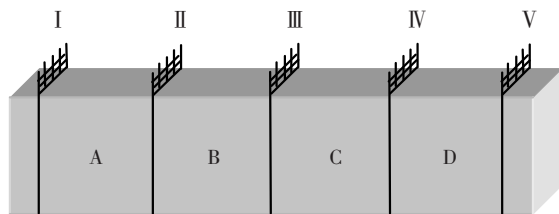


图 4 试件电极布置示意图

利用以上的数据, 根据方程组 (4) 可计算出电极 II、III 和 IV 与导电复合材料之间的接触电阻值分别为 $R_{II} = 23.71 \Omega$, $R_{III} = 29.02 \Omega$, $R_{IV} = 24.89 \Omega$.

$$\begin{cases} R_{II} + R_{4B} + R_{4C} + R_{IV} = R_{2(B+C)}, \\ R_{II} + R_{4B} + R_{III} = R_{2B}, \\ R_{III} + R_{4C} + R_{IV} = R_{2C}, \\ R_{4B} + R_{4C} = R_{4(B+C)}. \end{cases} \quad (4)$$

为校验以上计算的正确性, 以及上述计算方法在不同电极形式、不同基体导电复合材料中的普适性, 又按照表 2 中的第 2 组材料制作如图 5 的埋入式环状电极布置形式的试件. 图 5 中给出了一种与两端电极法和四端电极法不同的接线方式, 这种方式的特点是有个电流极和一个电压极是重合的, 本文定义为直流三端电极法.

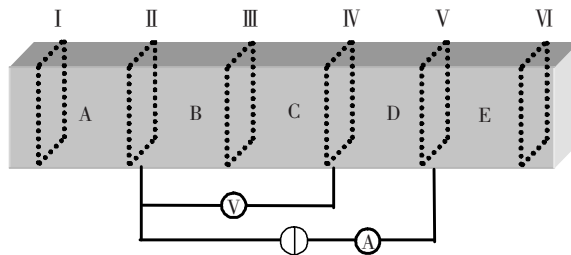


图 5 试件电极布置示意图

应用直流四端电极法和直流两端电极法可测

得表3中的电阻值,根据方程组(4)可计算出电极Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ与导电复合材料之间的接触电阻值分别为 $R_{II} = 180.56 \Omega$, $R_{III} = 100.23 \Omega$, $R_{IV} = 83.07 \Omega$, $R_V = 220.19 \Omega$. 这说明上述计算接触电阻的方法同样适合有机基体的导电复合材料.

表3 电阻测试结果 Ω

被测试件	四端电极法	两端电极法
A	380.61	
B	338.37	57.58
C	243.98	60.68
D	361.83	58.57
E	480.77	

由图5的接线方式及图2的测试原理可知,直流三端电极法和直流两端电极法相比,万用表测试的电压包括被测试件电阻和被测试件一端电极与导电复合材料之间的接触电阻. 直流三端电极法测试的电阻值 R_{3X} 可表示为

$$R_{3X} = R_{4X} + R_Y = R_{2X} - R_Y \quad (5)$$

式中 R_{4X} 和 R_{2X} 为第 X 试件分别应用直流四端电极法和直流两端电极法测试电阻值(Ω); R_Y 为三电极法中电压极与电流极重合的电极 Y 与导电复合材料之间的接触电阻.

应用直流三端电流法可测出 R_{3X} , 同时根据表3和利用式(4)计算出的电极与导电复合材料之间的接触电阻值,以及式(5),可计算出 R_{3X} , 结果如表4所示. 由表4可见,计算及测试的 R_{3X} 数值是一致的. 这进一步验证了接触电阻的计算公式的正确性以及直流两端电极法和直流四端电极法的实质.

表4 直流三端电极法测试电阻与计算电阻比较 Ω

被测试件	测试电阻	计算电阻
A	200.02	200.05
B	237.95/157.22	238.14/157.81
C	160.52/141.65	160.91/141.64
D	142.06/279.05	141.64/278.76
E	260.67	260.58

4 结 论

1) 对于不同基体、不同导电填料的导电复合材料,基于网状或环状电极的直流四端电极法均可消除在直流两端电极法测试中存在的电极与导电复合材料之间的接触电阻.

2) 电极与导电复合材料之间接触电阻是非欧姆性的,接触电阻的大小与被测导电复合材料

自身性质有关,其数值通过测试是可求解的.

3) 基于网状或环状电极的直流四端电极法适用于测试导电复合材料的电阻,其可用于导电复合材料(包括橡胶、塑料、环氧树脂等高分子基导电复合材料以及陶瓷、水泥、玻璃等无机基体的导电复合材料)的性能测试以及导电复合材料器件与结构的测试和应用中.

参考文献:

- [1] 张佐光. 功能复合材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:3-15.
- [2] 吴人杰. 复合材料[M]. 天津:天津大学出版社, 2000:2-12.
- [3] LUNDBERG B, SUNDQVIST B. Resistivity of a composite conducting polymer as a function of temperature, pressure, and environment: Applications as a pressure and gas concentration transducer [J]. Journal of Applied Physics 1986, 60(3): 1074-1079.
- [4] ZHENG Qiang, ZHOU Jianfeng, SONG Yihu. Time-dependent uniaxial piezoresistive behavior of high-density polyethylene/short carbon fiber conductive composites [J]. Journal of Materials Research, 2004, 19(9):2625-2634.
- [5] WANG Xiaojun, CHUNG D D L. Piezoresistive behavior of carbon fiber in epoxy [J]. Carbon, 1997, 35(10-11):1649-1651.
- [6] LI Junrong, XU Jiarui, ZHANG Mingqiu, et al. Carbon black/polystyrene composites as candidates for gas sensing materials[J]. Carbon. 2003,41(12):2353-2360.
- [7] CHUNG D D L. Cement-based Electronics [J]. Journal of Electroceramics, 2001, 6(1): 75-88.
- [8] WANG Guoquan. Electrical resistance measurement of conductive network in short carbon fibre-polymer composites [J]. Polymer Testing, 1997, 16(3):277-286.
- [9] 潘玉珣,于中振,欧玉春,等. 尼龙6/石墨纳米导电复合材料制备与性能[J]. 高分子学报, 2001, (1):42-47.
- [10] REZA F, BATSON G B, YAMAMURO J A, et al. Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(1): 25-35.
- [11] 韩宝国. 压敏碳纤维水泥石性能、传感器制品与结构[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [12] 关振铎,张中太. 无机材料物理性能[M]. 北京:清华大学出版社,1992:208-211.

(编辑 赵丽莹)