



Study on the Causes of the Failure of the Insulation Resistance of Molded Inductors with Soft Magnetic Materials

Guo Feng¹, Li wei-jian¹, Yan liang-ming^{2,*}

¹Global Vision Trading Ltd, Kunshan City, Jiangsu Province, China

²Material Science and Engineering College, Inner Mongolia University of Technology, Material Science and Engineering Institute, Hohhot, China

Email address:

bruce_guo@mazotech.com (Guo Feng), lwjv587@163.com (Li wei-jian), 57374138@qq.com (Yan liang-ming)

*Corresponding author

To cite this article:

Guo Feng, Li wei-jian, Yan liang-ming. Study on the Causes of the Failure of the Insulation Resistance of Molded Inductors with Soft Magnetic Materials. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 56-60. doi: 10.11648/j.sd.20160401.20

Received: March 8, 2016; Accepted: April 1, 2016; Published: May 4, 2016

Abstract: In this paper, the cause of the insulation resistance of molded inductor in low temperature baking is discussed, and the method to improve the insulation resistance is found. It was found that the surface bonding force between the metal soft magnetic powder and the coating layer increased first and then decreased with the increase of temperature, and the coating layer was brittle with the increase of temperature. The results show that the change of the volume change of the coating layer and the change of the surface binding force between the coating layer material in the curing process, and the higher the degree of curing the coating layer is brittle, and the interaction between the two and the coating layer can produce the peeling or even fall off.

Keywords: Soft Magnetic Powder, Insulation Resistance, Coated

一体成型电感用软磁粉末绝缘失效的研究

郭峰¹, 李伟健¹, 闫亮明^{2,*}

¹昆山磁通新材料科技有限公司, 江苏省苏州市, 中国

²材料科学与工程学院, 内蒙古工业大学, 内蒙古呼和浩特市, 中国

邮箱

bruce_guo@mazotech.com (郭峰), lwjv587@163.com (李伟健), 57374138@qq.com (闫亮明)

摘要: 本文主要研究一体成型电感用软磁粉末绝缘失效。实验主要探讨了一体成型电感在低温烘烤后绝缘阻抗突变的原因, 并试图找到改善绝缘阻抗的方法。通过研究发现金属软磁粉末及其包覆层之间的表面结合力随着温度升高先升高后降低, 且该包覆层物质随着温度的升高而脆化。研究结果证明绝缘阻抗突变的原因在于包覆层物质在固化过程中的体积变化和固化产物引起表面结合力的变化, 且固化程度越高包覆层越脆, 二者相互作用后使得包覆层产生剥皮甚至脱落, 从而造成模压电感在烘烤后绝缘阻抗失效。

关键词: 软磁粉末, 绝缘阻抗, 包覆

1. 前言

软磁粉芯是由铁磁性粉末与绝缘介质混合并压制而成且具有分布式气隙的一种金属软磁材料,在此基础上将线圈在成型前埋入粉末中并随后一起压制成型而成的器件叫做一体成型电感[1-3] (以下简称电感)。电感在电路中的基本作用:滤波、振荡。在电子线路中,电感可以像导线一样通过直流电,但是对交流有限流作用,它与电阻器或电容器能组成高通或低通滤波器、移相电路及谐振电路等。电感的另一个作用是阻碍电流的变化,但是这种作用与电阻阻碍电流流通作用是有区别的。电阻阻碍电流流通作用是以消耗电能为其标志,而电感阻碍电流的变化则纯粹是不让电流变化,当电流增加时电感阻碍电流的增加,当电流减小时电感阻碍电流的减小。电感阻碍电流变化过程并不消耗电能,阻碍电流增加时它将电的能量以磁场的形式暂时储存起来,等到电流减小时它也将磁场的能量释放出来,以结果来说,就是阻碍电流的变化。感值、直流偏置特性、损耗、绝缘阻抗等参数是衡量电感的重要参数;这些参数决定了金属软磁粉芯的具体应用领域及市场规模,例如其被广泛地作为功率BUCK或BOOST电感等。通常应用端首要关注的是器件的强度和可靠性,包括耐腐蚀性、耐电压击穿或绝缘性,还有就是老化问题,因此如何开发粉末的包覆层成为至关重要的技术;包覆层物质通常为有机高分子粘结剂和无机粘结剂,包覆层要兼顾粘结强度和绝缘阻抗、防腐蚀特性[4-5]。无论是无机粘结剂还是有机高分子粘结剂,采用其压制而成的电感通常都存在绝缘阻抗在烘烤后大幅降低的问题,虽然其本身的绝缘特性并无明显变化,但是也极大的降低了其使用稳定性、安全性[6-9]。因此找到这种变化的原因对于电感行业而言具有现实的指导意义。本文就是针对磁问题开展研究,旨在找到绝缘阻抗失效的原因并给出解决方法。

2. 试验材料及方法

2.1. 材料制备

本文实验金属软磁材料为一种铁基软磁金属粉末,其名义成分为 $\text{Fe}_{92}\text{Cr}_{4.5}\text{Si}_{3.5}$,并采用水雾化方法制备而得,粉末平均粒径D50为 $10\mu\text{m}$,之后将其进行造粒。

模压电感之造粒粉末的制备方法如下:

(1) 将1kg金属粉末用丙酮清洗并随后将丙酮在烤箱内以 $60^\circ\text{C} \times 60\text{min}$ 的方法干燥;

(2) 选用E51环氧树脂体系、氨基固化剂和氰酸脂作为粘结剂,其比例为2:1:8,总的加入量为粉末重量的3%,并加入粉末重量10%的丙酮作为稀释剂;

(3) 将粘结剂液体与金属粉末混合并在搅拌机中搅拌30分钟;

(4) 采用造粒机将混合物进行造粒,造粒后的粉末进行干燥处理,处理制度都是 $60^\circ\text{C} \times 60\text{min}$;

(5) 采用机械式粉末自动压机将造粒粉末压制为圆环形,下面简称为“磁环”,成型压强为 600Mpa 。

2.2. 材料测试

本文测试所需的包覆有粘结剂层的磁性材料以及粘结剂本体均采用外径14mm、内径8mm、高度3.5mm的环形样品。另外,将制备的磁环按照以下方法进行特性测试:

(1) 磁导率、直流偏置和品质因数用Agilent4285A测试,参数为 $3\text{mA}@100\text{kHz}$,电源功率为50W。

(2) 差示扫描量热法(DSC)采用耐驰TG 209 F3 Tarsus测试,升温速率升降温速率: $0.001\text{ K/min} - 200\text{ K/min}$,温度范围: $20-500^\circ\text{C}$ 。

(3) 粘结剂体积膨胀率和磁环体积膨胀率利用阿基米德原理测试固化前后的体积变化。

(4) 利用 $R=U/I$ 原理,使用点接触式测试磁环绝缘阻抗,仪器为Chroma HIPOT TESTER19053,参数为 $\text{DC}100\text{V}@3\text{s}$ 。

(5) 粘结剂与 $\text{Fe}_{92}\text{Cr}_{4.5}\text{Si}_{3.5}$ 金属的结合强度采用剥离法测试,试样为合金成分 $\text{Fe}_{92}\text{Cr}_{4.5}\text{Si}_{3.5}$ 的两根外径为30mm圆棒,圆棒表面涂覆粘结剂后粘结在一起,随后进行固化处理,将固化处理后的样品进行拉伸测试,从而得到拉伸断裂强度。

3. 试验及讨论

3.1. 固化温度对粘结剂绝缘阻抗特性的影响

如图1所示,粘结剂树脂随着固化温度的升高绝缘阻抗降低,在此过程中粘结剂逐渐地发生固化交联,由粘滞态逐渐转变为固态,在 $100-130^\circ\text{C}$ 间发生第一次固化反应生成三嗪环结构[10],在其热分析曲线上对应有一个放热峰(如图3所示),该反应后绝缘阻抗从 $720\text{M}\Omega$ 下降到 $660\text{M}\Omega$;当温度达到 $140-170^\circ\text{C}$ 之间发生第二次固化反应生成网络结构[11],在其热分析曲线上对应有一个放热峰(如图3所示),在相应的其绝缘阻抗特性下降到 $400\text{M}\Omega$ 以上。

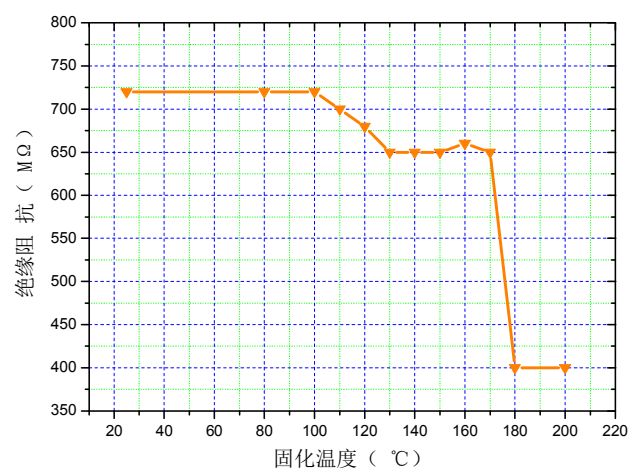


图1 粘结剂树脂固化温度与绝缘阻抗之间的关系。

3.2. 固化温度对磁环绝缘阻抗特性的影响

如图2,粘结剂随着固化温度的升高绝缘阻抗降低,在此过程中粘结剂逐渐地发生固化交联,在 $100-130^\circ\text{C}$ 间

绝缘阻抗从之前的600MΩ下降到280MΩ，这与热分析曲线相对应（如图3），但是比粘结剂本身的约700MΩ有明显的降低；当温度达到130-170℃之间其绝缘阻抗下降地幅

度更明显，绝缘阻抗从之前的280MΩ下降到只有10MΩ，虽然这与热分析曲线相对应（如图3所示），但是比粘结剂本身的约660MΩ（如图1）有明显的降低。

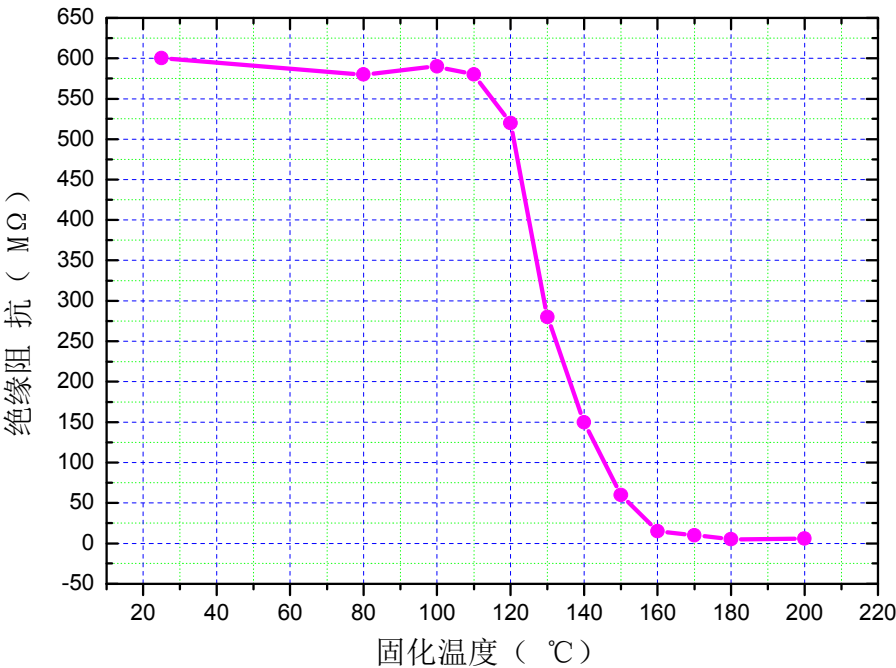


图2 磁环固化温度与绝缘阻抗之间的关系。

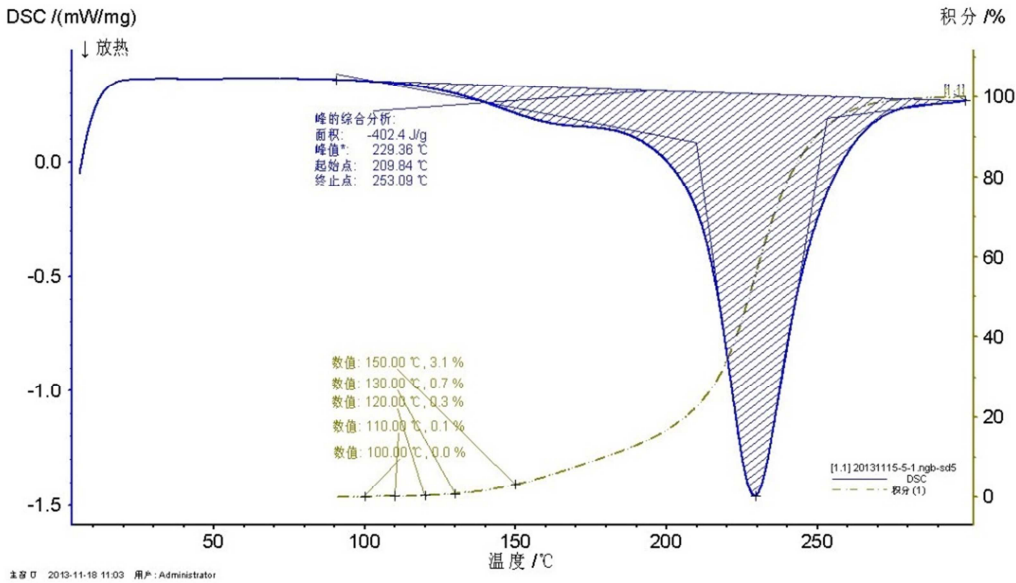


图3 粘结剂树脂DSC曲线。

3.3. 粘结剂与金属粉末结合强度随固化温度变化的讨论

如图4，在25℃之前粘结剂呈粘滞态，因此无法测量结合强度，当固化温度升高时结合强度呈现出先升高后降低的现象，当温度达到120℃及以上时结合强度急速下降；一般而言固化温度越高其固化越完全，相应地粘结剂强度越高（如图5所示），而这与图4结合强度先升高后降低的结果相矛盾，同时与模压电感的绝缘阻抗变化规律一致，

由此推断该原因在于金属粉末与粘结剂界面的破坏导致结合强度降低，同时引起绝缘阻抗的降低。

如图6所示，该实验是磁环在盐雾试验后的照片，该照片显示当固化温度提高到160℃后磁环生锈较严重，可以断定固化温度提高到160℃后粉末与粘结剂树脂之间的界面逐渐剥离甚至破裂，且考虑到微小粒径的曲面特征会加剧该现象，从而导致绝缘阻抗快速下降。

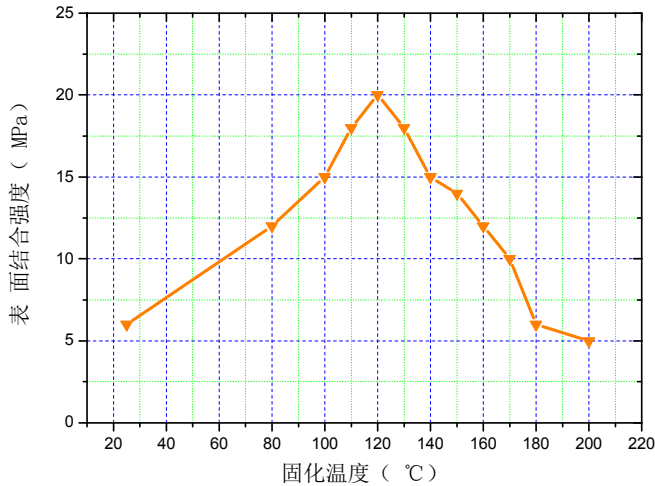


图4 粘结剂与粉末结合强度对绝缘阻抗的影响。

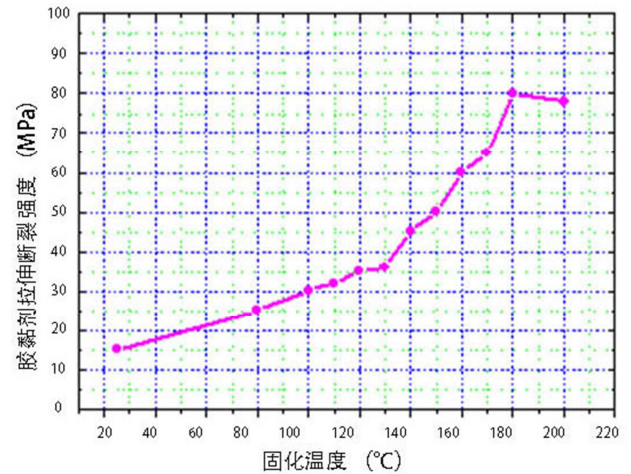


图5 粘结剂本体强度对与固化温度的关系。

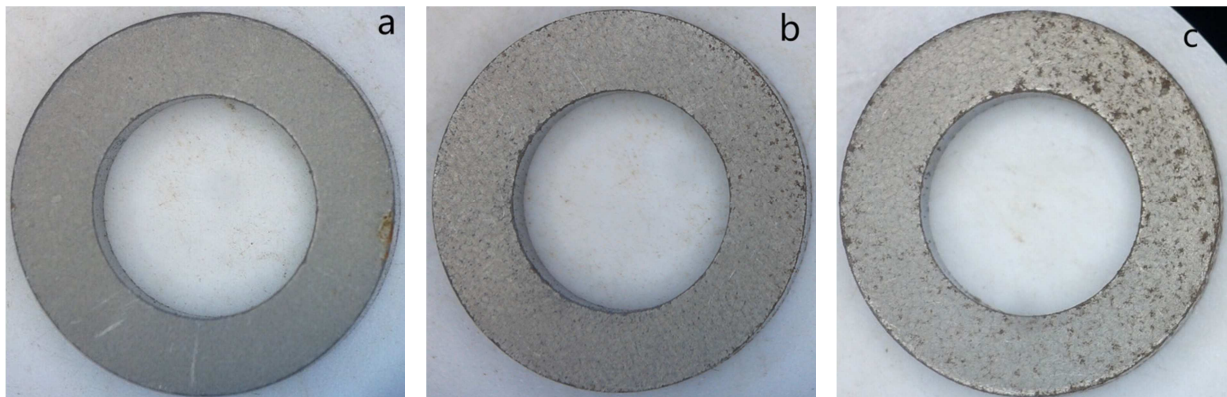


图6 磁环在不同温度固化后的盐雾试验结果: (a) 120°C固化后 (b) 140°C固化后 (c) 160°C固化后。

3.4. 粘结剂与金属粉末界面剥离原因的探讨

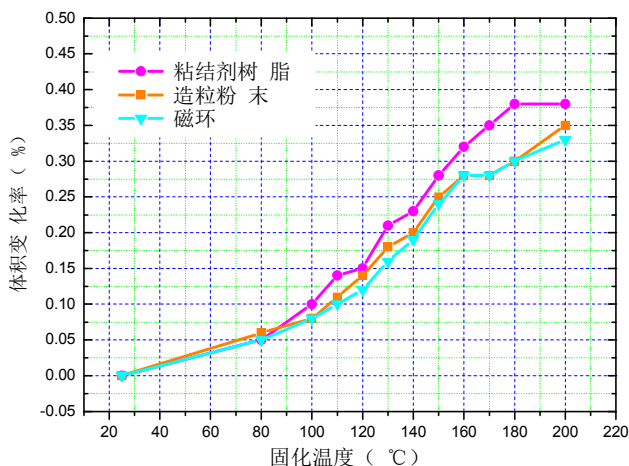


图7 固化温度对粘结剂树脂、造粒粉末和磁环的体积变化率的影响。

粘结剂树脂与金属粉末的界面剥离通常都是由于在固化过程两种材料不同的膨胀率产生的剪切作用。如图7, 虽然粘结剂与金属粉末的体积膨胀率基本接近, 但是由于金属粉末在铁芯中占据的体积百分比为82%, 而粘结剂的体积百分比为18%, 在产生体积膨胀时金属粉末产生的变

化是粘结剂的4倍多, 因此粘结剂会受到金属粉末的挤压而逐渐破损, 尤其当粘结剂还未固化到足够强度时其产生的挤压作用更大; 此时如若粘结剂的韧性足够则不会引起包覆层薄膜的破裂, 反之则会使包覆层薄膜产生剥离甚至破裂; 如图5所示在120°C时包覆层薄膜外观良好, 而粘结剂的强度只有35MPa, 说明此时薄膜的韧性较高, 而金属粉末的膨胀率也只有0.12%, 以上三种因素导致结合强度达到最大值。

因此, 如若提高电感的绝缘阻抗特性, 必须具备三个条件: (1) 粘结剂足够高的强度, (2) 粘结剂良好的韧性, (3) 金属粉末与粘结剂具有相近的体积膨胀率。

4. 结论

本文探讨了模压电感在低温烘烤后绝缘阻抗突变的原因, 通过大量的实验与理论分析, 得到了以下结论:

(1) 模压电感绝缘阻抗烘烤后会陡降的原因在于包覆层薄膜的剥离甚至破裂。

(2) 在本文粘结剂体系中在120°C下可获得最佳的绝缘阻抗特性、较好的强度以及较好的抗盐雾腐蚀能力。

(3) 提高模压电感烘烤后的绝缘阻抗特性, 必须具备三个条件: a、粘结剂足够高的强度, b、粘结剂良好的韧性, c、金属粉末与粘结剂具有相近的体积膨胀率。

参考文献

- [1] 贾梦秋, 邓海峰. 耐高温有机硅树脂的合成 [J]. 化工新型材料. 2007, 35(7):46.
- [2] WANG Wen-juan, HU Jing. Study on Properties of Silicone-modified Water-borne Polyurethane [J] Int. J. Powder Metallurgy, 2012, 31 (1): 9.
- [3] 洪旭辉, 李亚峰. 氰酸酯改性环氧树脂耐热性研究[J]. 热固性树脂, 2009, 24(5):14-16.
- [4] 王旭东. 环氧树脂改性氰酸酯体系研究[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(7):13-15.
- [5] 邱军, 黄裕杰, 胡友慧. 耐高温梯形聚甲基倍半硅氧烷的合成研究[J]. 功能高分子学报. 1999, 12(2):173-176.
- [6] W Kowbe. CVD and CVR Silicone-based Functional Gradient Coatings on C-C Composite[J]. Carbon, 2012, 33(4): 41-42.
- [7] S.Garin , L.Lecamp. New Polysiloxane Bearing Heterocyclic Groups-synthesis and Curability[J]. European Polymer Journal. 2014, 35: 473-482.
- [8] F.H.James. High Temperature Coating From Space. Modern Paint and Coatings [J] 2008, (10): 131-132.
- [9] 程斌等. 热固性树脂的制备工艺[J]. 热固性树脂. 2010, (3):7.
- [10] Hou S S, Yen-Pin Chung, Cheng-Kuang Chan, Ping-Lin Kuo . Curing behavior and characterization of epoxy-siloxane copolymer blended with diglycidyl ether ofbisphenol-A[J] . Polymer . 2013 , 41(9), 3263-3272.
- [11] 谭晓明, 黄乃瑜, 简永华等. 高羟甲基含量硼酚醛树脂的合成及表征[J]. 塑料工业. 2014, 29(4):6-8.