

基于真空镀镍碳纤维复合材料的 涡流加热性能研究

秦文峰 符佳伟 王新远 范宇航 游文涛

(中国民航飞行学院航空工程学院, 广汉 618307)

摘 要 通过真空镀膜技术制备了一种新型镀 Ni 碳纤维板复合材料, 用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、红外成像仪对其进行表征分析和温度测试。结果表明: 复合材料具有优良的涡流加热能力, 样品表面沉积量和输入功率的变化能直接影响样品表面导电网络的构建和升温能力。随着沉积量的变化, 在恒定输出功率 123W 情况下, Ni/CFB-100 样品的最高温度可以达到 123℃, 而 Ni/CFB-600 样品的最终温度达到 142.5℃。随输入功率的变化, Ni/CFB-600 样品在输入功率 44W 下的升温幅度只有 40.2℃, 但在输入功率 123W 下的升温幅度达到了 86.4℃。在恒定输入功率情况下, Ni/CFB-600 样品的最大融冰速率达到了 $20.161 \times 10^{-3} \text{ g/s}$ 。实验表明在导电性能较差的碳纤维板表面通过真空镀膜技术镀镍可以实现涡流加热除冰的目的, 具有潜在的应用价值。

关键词 真空镀, 镍, 碳纤维, 涡流加热, 除冰

中图分类号 TQ172

文献标识码 A

文章编号: 1006-3536(2020)07-0069-04

DOI: 10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.016

Study on eddy current heating property of carbon fiber composite based on vacuum Ni plating

Qin Wenfeng Fu Jiawei Wang Xinyuan Fan Yuhang You Wentao

(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307)

Abstract A new type of Ni-coated carbon fiber board composite was prepared by vacuum coating technique. The composite was characterized by (SEM), X-ray diffraction (XRD), infrared imaging (FT-IR) and scanning electron microscope. The experiment shown that the composite had excellent eddy current heating ability. The change of deposition amount and input power can directly affect the construction and heating capacity of the sample surface conductive network. With the change of deposition amount, when the input power was 123W, the maximum temperature of Ni/CFB-100 sample can reach 123℃, and the final temperature of Ni/CFB-600 sample can reach nearly 142.5℃. With the change of the input power, the heating range of the Ni/CFB-600 sample was only 40.2℃ at the input power 44W, but it reached 86.4℃ at the input power 123W. Under the condition of constant input power, the maximum melting rate of Ni/CFB-600 samples was up to $20.161 \times 10^{-3} \text{ g/s}$. The experimental results shown that nickel plating on the surface of carbon fiber board with poor conductivity can achieve the purpose of eddy current heating and deicing, which had potential application value.

Key words vacuum plating, nickel, carbon fiber, eddy current heating, deicing

随着当今科学技术的发展, 航空安全得到大幅度提升, 保证飞行安全的技术也发展迅速^[1]。高空飞行过程中飞机结冰现象很普遍, 飞机结冰或除冰不及时是导致飞机高空安全的主要原因之一, 严重时会导致人员伤亡和社会财产损失, 全球由于结冰除冰问题导致的飞机事故大约占 9%^[2-5]。当代主要除冰技术包括: 化学除冰(除冰液、融雪剂)、机械

除冰、电脉冲除冰等。除冰液和融雪剂是近现代防结冰和除冰的主要方法, 但它们价格高、融雪缓慢, 对当地生态环境有较大影响^[6]; 而传统的机械人力除冰虽然简便易行, 但工作量大、成本高、效率低, 只有在紧急情况下使用^[7]; 当今电脉冲除冰虽然耗能低、污染小, 但其产生的电磁场会干扰飞机上电子元件的运作^[8-9], 因此找到一种方便清洁的除冰方法成

基金项目: 中国民航飞行学院教育项目(J170)

作者简介: 秦文峰(1976-), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为复合材料结构维修与表面技术。

为首要目的。Şahmaran 等^[10]研究了不同粉煤灰掺量的水泥基复合材料在除冰盐存在情况下的除冰性能。Wu 等^[11]制备了复合导电混凝土,但是在 27V 电压下,2.5h 后试件温度升高 8.7℃,在 44V 电压下,2h 后试件温度升高了 21.8℃,但升温效果不理想。本实验研究涡流加热对复合材料升温的影响,涡流加热基于在导磁材料内部产生感应电流,进而实现加热,相比于传统的加热法不会出现短路烧毁、产生电火花等现象,加热分布均匀,加热温度易控制^[12-14]。Fang 等^[15]成功地将电磁感应加热应用到了钢纤维沥青混凝土的融冰性能,感应加热能显著地提高其融冰效率。Kauffeld 等^[16]在冰层和铝夹层中进行诱导加热实验,通过电磁场感应加热,得出与传统除冰相比,感应加热除冰具有节能和维护节能的潜力。真空镀在电子产品、光学仪器和通讯等领域有重大应用,真空镀技术与传统电镀和化学镀相比较,具有污染小、易操作、镀层致密且与基体结合牢固^[17]。本实验以真空镀技术在碳纤维板表面制备了一层致密且结合好的镍镀层,研究了其涡流效应加热除冰性能。由于真空镀涡流加热研究在国内较少见,说明此实验具有重要应用意义。

1 实验部分

1.1 样品的制备

实验所用镀镍样品为高纯镍颗粒(纯度为 99.99%),用作主体材料。实验所用镀膜机器为真空蒸发镀膜机(GSL-1800X-ZF4 型,沈阳科晶自动化设备有限公司),基体为自制铺层碳纤维板,尺寸大小为 25mm×25mm×2mm。

由于碳纤维板表面存在杂质与油污,镍粒子与碳纤维板表面结合力很低,所以要对碳纤维板进行必要的前处理。

本实验碳纤维板前处理步骤如下:(1)用干净棉布蘸质量分数为 5%的氢氧化钠,均匀擦拭除去碳纤维板表面油污,放置于干燥环境下自然阴干;(2)采用 500 目砂纸在样品表面沿同一方向进行打磨,直至碳纤维板表面粗糙为止;(3)将碳纤维板分别在无水乙醇、蒸馏水中超声清洗 30min,让碳纤维板自然烘干。实验通过真空镀技术制成 4 个膜厚成梯度变化的样品,所得样品记作 Ni/CFB- x ,其中 x 为样品沉积量(nm),样品尺寸为 25mm×25mm×2mm。

1.2 实验方法

采用扫描电镜(SEM,S-4800 型,日本 Hitachi

公司)观察样品的微观形貌;采用 X 射线衍射仪(XRD,Advance D8 型,Bruker 公司)测试样品的晶体结构;采用红外摄像机(RX-300 型)记录加热过程中样品表面中心温度的变化情况;采用自制电磁感应加热器,感应频率为 150kHz,输入电源(ZXD2400 型),实验研究镍膜厚度以及输入功率对样品电磁感应效果的影响。实验中室温为 26℃,为了实验过程中温度数据记录正确,螺线圈铜管须通入循环冷水保证其处于低温。实验流程简图见图 1。

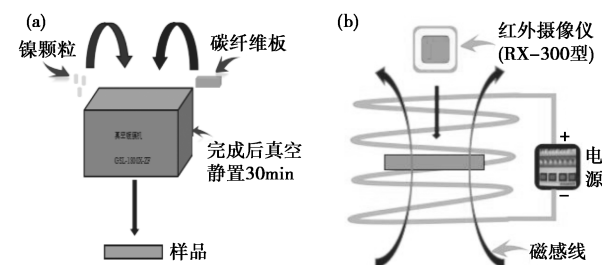


图 1 镀镍碳纤维板复合材料的制备(a)与涡流加热流程图(b)

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

图 2 为 Ni/CFB-600 复合材料的 SEM 图。由图可知,镍在碳纤维板表面分布良好,由于镍粒子周边存在大量不规则的形状,故相互之间结合更加牢固,镍与碳纤维板能更好地结合,有利于提高 Ni/CFB- x 复合材料的稳定性,有益于在样品表面形成许多串并联的导电链,进而提升表面多维导电网络的组成,因此 Ni/CFB- x 复合材料的表面导电网络比起单一碳纤维板有很大提高。

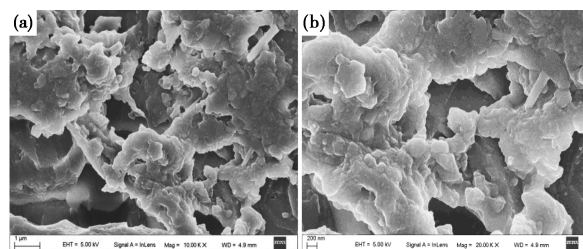


图 2 Ni/CFB-600 复合材料的 SEM 图
[(a)×10000 倍;(b)×20000 倍]

2.2 XRD 分析

图 3 为 Ni/CFB-600 在输入电压 30V 下涡流加热 30min 后镀层的 XRD 谱图。

由图可知,镍镀层加热处理之后在 $2\theta=26^\circ$ 处出现极高的强衍射峰,说明此处晶粒结晶效果很好。但由于碳纤维板表面存在细微碳和其他杂质造成此

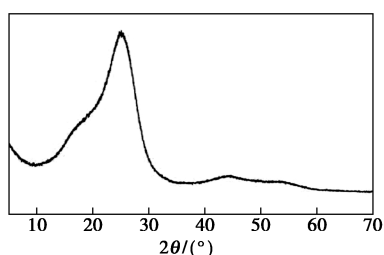


图3 Ni/CFB-600在输入电压30V下涡流加热30min后镀层的XRD谱图

处的衍射峰比较漫散。说明热处理能让镍胞体出现不同程度的增长,让其晶格的缺陷不断得到完善,镍粒子之间结合更加紧密。

2.3 镀镍厚度对涡流效应的影响

Ni/CFB- x 复合材料中沉积量对复合材料表面中心温度的影响见图4,实验条件为恒定电压35V,输入功率123W。

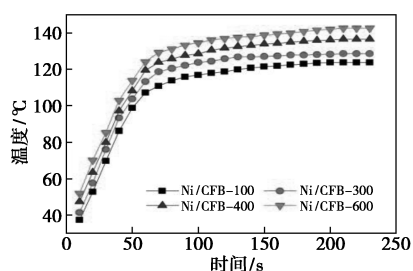


图4 Ni/CFB- x 复合材料中沉积量对复合材料表面中心温度的影响

由图可知,Ni/CFB- x 复合材料随涡流加热时间的增加,其上下表面中心温度也不断升高,但是表面中心温度不会一直增加下去,一段时间后中心温度不再随加热时间延长而递增,到最后会稳定在一个固定值。表明涡流效应在纳米粒子之间是能产生的,充分证明本实验的可行性。随着 Ni/CFB- x 复合材料中沉积量的增加,其升温能力也随之加强,Ni/CFB-100 中心温度为 123℃,Ni/CFB-600 中心温度可达到 142.5℃。因为涡流效应是在样品表面产生焦耳热进而除冰,因此材料导电性能决定了焦耳热的效果。而导电性取决于镍粒子相互之间连接形成的电通路,随着沉积量的增加,有利于复合材料表面多维导电网络的构建,进而提升局域导电网络性能。Ni/CFB- x 复合材料涡流加热性能可按式(1)~(4)计算。

$$\Phi = \mu NIS \quad (1)$$

$$E = N \times \left(\frac{\Phi}{\Delta T} \right) \quad (2)$$

$$Q = \frac{E^2}{RT} \quad (3)$$

$$t = \frac{Q}{CM} \quad (4)$$

式中, Φ 为通过样品的磁通量,Wb; μ 为材料磁导率; N 为螺线圈匝数; I 为输入电流,A; S 为样品表面积, cm^2 ; E 为感应电动势,V; ΔT 为加热时间,s; Q 为涡流加热产生的热量,℃; R 为样品表面电阻, Ω ; T 为做功时间,s; t 为样品表面中心温度变化时间,s; C 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; M 为复合材料质量,kg。

本实验中固定参数为输入功率、螺线圈匝数 N 、输入电流 I 、样品表面积 S ,因此感应磁场强度不变。随着样品成梯度变化,磁导率 μ 增大,磁感应强度 B 增大,由式(1)得磁通量 Φ 增大。因为随着沉积量的增加,复合材料表面导电网络电阻 R 减小,同时其涡流加热时间相同,故感应电动势 E 增大。因此在相同单位涡流加热时间内,Ni/CFB- x 复合材料的升温速率加强。

2.4 输入功率对涡流效应的影响

输入功率对 Ni/CFB-600 升温能力的影响见图5。

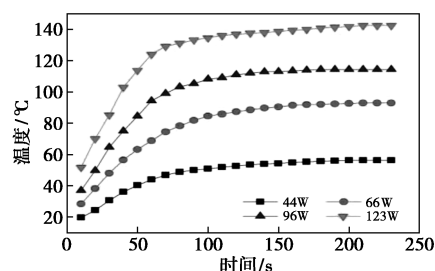


图5 输入功率对 Ni/CFB-600 升温能力的影响

由图可知,随着输入功率的增大,Ni/CFB-600 的升温速率变化明显,输入功率越高,升温速率越快。输入功率为 44W 时,Ni/CFB-600 中心温度升温幅度为 40.2℃。当输入功率升高至 123W 时,中心温度升温幅度达到了 86.4℃,增加了 46.2℃。

本实验中固定参数为螺线圈匝数 N 、磁导率 μ 、样品的表面积 S 以及加热时间 ΔT 。由于输入功率升高导致线圈输入电流 I 增大,由式(1)得螺线圈磁通量增大。根据式(2)可知,感应电动势 E 增大,进而样品涡流加热更加明显。根据式(3)得样品表面产生的热量 Q 大幅上升。又由式(4)可知,样品的比热容 C 和质量 M 都没变。因此随着输入功率的增大,Ni/CFB- x 复合材料的升温速率升高。

2.5 镀膜厚度对除冰速率的影响

图6为 Ni/CFB- x 复合材料在恒定输入功率(48V,210W)下融冰时间与除冰速率关系图,实验

记录直至冰块完全融化为止,其中放于复合材料上面的冰块尺寸为 $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。

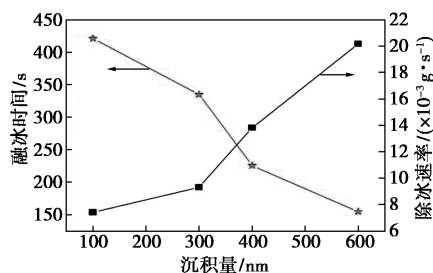


图 6 Ni/CFB- x 复合材料在恒定输入功率下融冰时间和除冰速率关系图

由图可知,随着样品表面沉积量的增加,融冰时间缩短,融冰速率逐渐提升。Ni/CFB-600 样品表面冰块最大融化速率为 $20.161 \times 10^{-3} \text{g/s}$,但是 Ni/CFB-100 样品的最大融冰速率只有 $7.423 \times 10^{-3} \text{g/s}$ 。说明在相同单位感应时间内,样品表面沉积量决定冰柱融化的时间和速率。

3 结论

(1)SEM 和 XRD 结果表明样品表面镍粒子分布均匀,相互之间结合很好且导电网络构造很好,有利于样品表面产生焦耳热效应进行除冰。

(2)随着样品表面镀层呈梯度变化,其涡流效应也随之增加。在恒定输入功率 123W 下,涡流加热时间 5min ,Ni/CFB-100 可升温到 123°C ,而 Ni/CFB-600 样品最终温度达到 142.5°C 。

(3)输入功率的增加,Ni/CFB- x 复合材料的升温幅度变换明显。Ni/CFB-600 在输入功率 44W 下升温幅度只有 40.2°C ,但在输入功率 123W 下的升温幅度达到了 86.4°C 。当输入功率从 44W 增至 123W ,样品表面温度增加了 46.2°C 。

(4)在恒定输入功率情况下,Ni/CFB-600 的最大融冰速率达到了 $20.161 \times 10^{-3} \text{g/s}$,证明利用涡流加热进行除冰是可行的,具有潜在的应用价值。

参考文献

[1] Jr C V O, Strong J S, Zorn C K. Analyzing aviation safety: problems, challenges, opportunities[J]. Research in Transportation Economics, 2013, 43(1): 148-164.

[2] 胡鑫. 飞机的结冰与防(除)冰[J]. 科技创新导报, 2012(16): 73.

[3] Thomas S K, Cassoni R P, Macarthur C D. Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling[J]. Journal of Aircraft, 2012, 33(5): 841-854.

[4] Xie T, Dong J, Chen H, et al. Experimental investigation of de-icing characteristics using hot air as heat source[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 681-688.

[5] Chu H, Zhang Z, Liu Y, et al. Self-heating fiber reinforced polymer composite using meso/macropore carbon nanotube paper and its application in deicing[J]. Carbon, 2014, 66: 154-163.

[6] 李斌. 飞机除冰/防冰液及除冰技术[J]. 清洗世界, 2012, 28(1): 26-31.

[7] Zhou J Z, Lai S W, Xu X P, et al. R&D of equipment for de-icing by thermal water-jet and mechanical deicing method[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 268-270: 1288-1293.

[8] Möhle E, Haupt M C, Horst P. Coupled magnetic and structural numerical simulation and experimental validation of the electro impulse de-icing[R]. Boston: AIAA, 2013-1494, 2013.

[9] Labeas G N, Diamantakos I D, Sunaric M M. Simulation of the electroimpulse de-icing process of aircraft wings[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(6): 1876-1885.

[10] Şahmaran M, Li V C. De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(7): 1035-1046.

[11] Wu J, Liu J, Yang F. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 129-135.

[12] Raji A R O, Varadhachary T, Nan K, et al. Composites of graphene nanoribbon stacks and epoxy for joule heating and de-icing of surfaces[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(5): 3551.

[13] Sun Y, Wu S, Liu Q, et al. Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 129: 871-883.

[14] Farahmand P, Liu S, Zhang Z, et al. Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La_2O_3 [J]. Ceramics International, 2014, 40(10): 15421-15438.

[15] Fang H, Sun Y, Liu Q, et al. Ice melting properties of steel fiber modified asphalt mixtures with induction heating[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 182(1): 012042.

[16] Schaaf J, Kauffeld M. Ice aluminum debonding with induction heating[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018, 32(19): 2111-2127.

[17] Schulz U, Kaiser N. Vacuum coating of plastic optics[J]. Progress in Surface Science, 2006, 81(8): 387-401.

收稿日期: 2019-03-27

修回日期: 2020-05-03