

微波修复技术研究与发展*

马世宁, 孙晓峰, 朱乃姝

(装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 微波修复技术作为一项新兴的战场抢修手段, 越来越受到国内外研究人员的高度关注。文中概述了微波修复技术的产生背景及国内外研究现状, 着重介绍了该技术的最新研究成果。研制了便携式大功率微波腔外操作设备, 采用原子力显微镜(AFM)、扫描电子显微镜(SEM)等测试手段分析了碳纤维表面处理及微波固化对复合贴片性能的影响。利用该技术修复不同材料的损伤, 其静强度恢复率达到 90 % 以上。

关键词: 装备损伤; 复合材料; 微波固化; 快速修复

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)02-0100-06

Research and Development of Microwave Repair Technology

MA Shi-ning, SUN Xiao-feng, ZHU Nai-shu

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: As a new battlefield emergency repair method, microwave repair technology receives the domestic and foreign researchers' high attention more and more. The production background and research status of microwave repair technology were summarized in this paper. The research results were introduced emphatically. A portable high-power microwave cavity operating equipment had been developed successfully. Effects of the properties of composite patch on carbon fiber surface treatment and microwave curing were analyzed by means of AFM and SEM. Using this technology to repair the damage of different materials, the restoration ratio of static intensity achieved above 90 %.

Key words: equipment damage; composite materials; microwave curing; rapid repair

0 引 言

近年来, 各种武器装备(如导弹、军用飞机、坦克等)都大量采用轻质合金及先进复合材料, 并逐步向主承力结构上发展以代替重量大的金属。这些新材料的损伤修复不同于钢质零部件的修复, 目前尚缺乏有效的快速修复方法。传统的修复方法如金属补强板铆接、焊接或胶接, 均不适用于新材料的快速修复, 从而严重制约了装备作战和保障能力的发挥。利用高分子材料对损伤装备及其零部件进行粘接、粘涂、粘贴、堵漏等, 是快速抢修中应用最多、最普遍、最有效、最便捷的方法。但限于高分子材料自身的特点, 必须使其固化才能发挥材料

的作用。而目前的固化方法各有不足, 如高温固化很难实现现场作业; 室温固化时间较长, 影响修复效率; 快速固化虽然固化时间短, 但却牺牲了粘结强度。

与传统的加热方式相比, 微波具有加热均匀、加热速度快等优点^[1,2], 将微波技术与粘接技术综合集成, 可克服粘接区在热成型过程中产生的热应力集中现象, 有效提高粘接接头质量和粘接效率^[3], 极具发展前景。

微波修复技术^[4]是指利用微波独特的致热特点, 使粘贴于装备及零部件损伤部位的高分子复合材料快速固化, 在短时间内恢复或提高损伤部位的强度, 达到其使用要求。由于微波在修复过程中发挥决定性的作用, 所以把它称为微波修复技术。又由于微波修复技术“又好又快”的特点, 也可称为微波快速修复技术。

收稿日期: 2010-02-25; 修回日期: 2010-03-02

基金项目: *国防科技重点实验室武器装备预研基金项目
(9140C85040209OC8510)

作者简介: 马世宁(1941—), 男(汉), 北京人, 教授。

图1给出了利用微波修复技术修复装备零部件损伤的示意图。从图中可以看出,微波修复技术的关键在于微波修复设备和修复材料。传统的微波设备多采用箱式结构,箱体过大,不便携带;箱体过小,难以处理大型零件。此外,针对装备大型零部件以及不便于拆卸的零部件来说,箱式微波设备则不能实现其原位和现场维修。如果能在不解体装备及零部件的前提下,将微波直接作用于损伤部位,就会显著提高修复效率。修复材料通常是由高强度、高模量、低脆性的增强纤维材料,各种功能添加材料和高性能胶粘剂复合而成,也可称为复合材料贴片。微波具有选择性加热的特点,复合材料贴片中具有不同介电性能的各组分吸收微波能的程度也不同,因此,在保证强度的同时,合理优化复合材料贴片各组分,使其在微波作用下更快、更均匀的固化成型显得尤为重要。

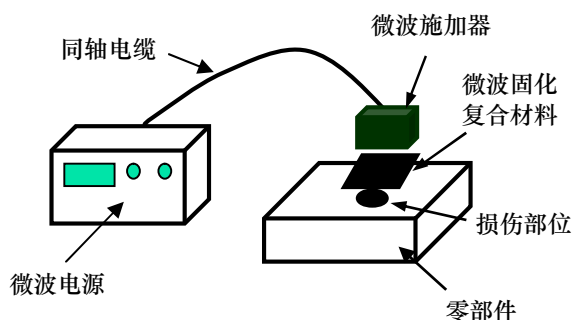


图1 微波修复零部件损伤示意图

Fig.1 Diagram of microwave repair parts damage

综上所述,研制便携、高效、可控、安全的微波修复设备和开发固化速度快、修复强度高的复合材料贴片是实现微波快速修复技术的关键所在。

1 微波修复技术国内外研究概况

微波在材料领域中的研究与应用起始于上世纪80年代,1992年在荷兰召开的首届国际微波化学学术会议展示了微波在有机合成、超导材料、陶瓷材料尤其是复合材料领域的研究成果。

国外在微波固化方面已经进行了广泛的研究,主要集中在微波固化机理、工艺过程、微波器设计及相关基础理论研究。T.Chaowasakoo^[5]采用加热和微波固化方式制备飞灰/环氧复合材料,并研究其力学和结构性能,发现加热固化70℃/80 min或微波固化240 W/18 min均能得到完全固化材料,且微波

固化复合材料的冲击强度高于加热固化复合材料。Marand E等^[6]研究了DGEBA/DDS的微波固化过程,认为在固化反应前期,微波可以提高反应速率,但由于微波诱导的快速交联反应生成的分子链很刚硬,它能圈住未反应的基团,从而使得在后期降低反应速率,并最终导致固化度的下降。目前微波固化对复合材料界面性能的影响研究较为活跃。D.A.Papargyris^[7]分别采用加热成型和微波成型方法制备出碳纤维/环氧树脂复合材料,发现采用微波成型复合材料与加热成型相比,固化时间缩短了50%,层间剪切强度提升9%,玻璃化转变温度提升15℃。Thostenson^[8]比较了玻纤增强环氧复合材料的微波和热固化研究,发现在加压热固化过程中,由于从外至里的固化,导致了可见裂纹;而在微波固化中,未发现裂纹,且固化时间明显缩短。此外,国外还将微波应用于RTM(树脂传递模塑)加工方面,显示出热固化无法替代的优越性。然而,利用微波固化复合贴片修复装备损伤国外尚未见报道,与之相关的微波修复设备和修复材料等方面的研究也未见报道。

国内在微波固化研究领域虽然起步较晚,但近年来已在微波固化材料、固化机理及工艺等方面做了大量的研究工作,取得了一定的研究成果。秦岩^[9]等探讨了不饱和聚酯树脂在微波加热作用下固化的可行性及特性规律,采用DSC及FT-IR等手段对微波加热固化及传统加热树脂固化性能进行了分析,结果显示微波加热凝胶固化时间比后者快几倍至20多倍,热性能、力学性能基本相当。刘学清^[10]利用微波辐照固化环氧E44/DDM体系,考察了固化温度、时间同微波功率间关系。结果表明,微波固化物有较高的热分解温度和较低的线性热膨胀系数,与热固化相比微波能显著加快固化速度,缩短凝胶时间。将微波固化技术用于材料损伤修补、连接与分离是近年来国内材料工程界研究的一个新方向,在复合材料外场快速修补用的微波设备、修复材料及修复工艺等方面的取得了一些探索性的成果。陈名华^[11]等对环氧树脂胶/碳纤维复合材料的微波固化性能进行了研究,并探讨了微波固化工艺。研究表明微波固化后的复合材料性能优于热固化,且采用变换档间歇式加热,效果更佳。罗文琳^[12]等开发了功率为200 W的便携式微波修复设备,采用正交铺层GRP加强板作为修复材料,

对带有损伤的金属结构进行微波修复,修复后强度恢复率均达到 80 %以上,并利用该技术对飞机结构损伤进行了尝试性的修复试验。

2 微波修复技术新进展

微波修复技术是一项综合技术,它涉及了微波技术、粘接技术、微波化学、纳米技术等诸多学科领域。作为一项新兴的战场抢修技术,其理论基础和技术体系还不完善,需要不断地探索和创新,通过深入研究,最终形成完善的理论体系和技术体系。

近年来,装甲兵工程学院一直致力于微波修复技术的研究和应用工作,在微波修复设备研制、微波修复材料开发、微波强化机理研究以及微波修复应用等领域开展了深入的研究,取得了突破性的研究成果,推动了该项技术的进展。

2.1 微波修复设备研究

为了提高修复效率,满足不同材料装备零部件原位和现场维修的需要,提出了大功率微波腔外操作的设计思想。该设备的结构组成如图 2 所示,主要由开关电源、可编程控制器、磁控管、激励器、波导及辐射器等组成。通过特殊设计和精确计算,在保证安全的前提下,将微波从激励腔中引出,使其直接作用于物体表面,将微波能迅速转化成热能。通过对设备各关键部件进行优化配置,最终开发出了适用于战场条件下使用的 BMR-01 型微波修复设备(如图 3 所示)。该设备可产生的微波频率为 2450 MHz,输出功率在 0~700 W 之间连续可调,工作时间在 0~3600 s 之间连续可调,微波输出方式可以为间歇和连续两种,

整机重量仅为 17 kg,尺寸为 200 mm×300 mm×400 mm。在满足微波泄漏小于国家安全标准的基础上,大幅提高了工作效率,可在野外条件下,为装备及零部件的损伤修复提供所必须的能量。

为了满足不同损伤形式的修复需要,还设计开发了多种形式的微波辐射器(如图 4 所示)。辐射器通过同轴电缆与主机连接,采用插拔式连接方式,可实现不同辐射器的快速更换,满足多种修复形式的需要。

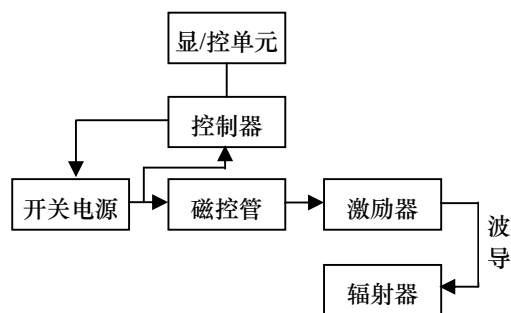


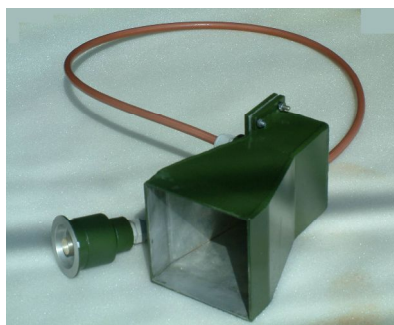
图 2 微波修复设备结构图

Fig.2 Structure of microwave repair equipment

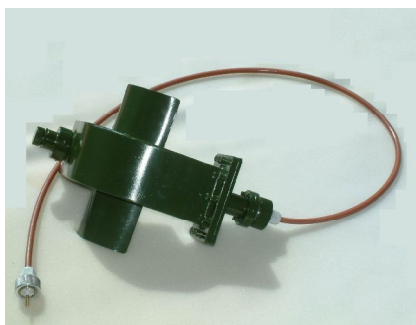


图 3 BMR-01 型微波修复设备

Fig.3 BMR-01 microwave repair equipment



(a) 喇叭形



(b) 弧形



(c) 方形

图 4 不同形式的微波辐射器

Fig.4 The microwave radiators (a)trumpet shape (b)arc shape (c)square shape

2.2 微波修复材料研究

在微波修复材料上,采用改性环氧树脂/改性胺类固化剂作为粘接材料基体,并添加纳米材料作为微波吸收剂,以碳纤维作为增强材料,开发出可实现制备成型一体化的微波修复材料,其组成见表 1。

修复材料能否在微波作用下快速固化且固化后具有良好的力学性能,粘接材料起着至关重要的作用。图 5 给出了未添加微波吸收剂的粘接材料在不同固化方式下的拉伸强度值。从图中可以看出,该粘接材料体系在微波作用下,固化时间明显缩短,在拉伸强度相近的情况下,仅为室温固化时间的 1/288、为加热 (50 ℃) 固化时间的 1/5。普通的粘接材料属于低损耗型的微波吸收材料,只能吸收少部分的微波,单纯靠高分子聚合物自身吸收的微

波来固化,则需要较长的时间,如果在其中添加一定量的高性能微波吸收材料则有利于粘接材料吸收微波的能力。图 6 给出了添加不同微波吸收剂的粘接材料,微波固化 5 min 后的拉伸强度值。从图中可以看出,添加了 4wt % 纳米 Fe 和纳米 Fe₃O₄ 的粘接材料,微波固化 5 min 后的拉伸强度值与未添加吸收剂的粘接材料微波固化 25 min 后的拉伸强度值相当,说明添加微波吸收剂后可显著缩短粘接材料微波固化时间。

碳纤维表面惰性大、表面能低,缺乏有化学活性的官能团,反应活性低,限制了碳纤维与粘接材料的界面结合。为了提高粘接材料与碳纤维的界面结合,采用低温等离子处理方法对碳纤维表面进行处理,并优化了工艺。图 7 给出了不同处理温度下

表1 微波修复材料组成
Table 1 Composition of microwave repair materials

树脂基料	固化剂	增韧剂	偶联剂	微波吸收剂	纤维增强材料
改性环氧 E-51 树脂	改性胺类固化剂	液体橡胶	KH560	纳米颗粒	T300 碳纤维布

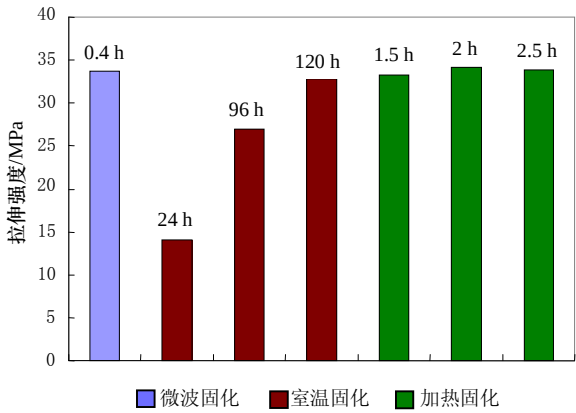


图 5 固化方式对粘接材料拉伸强度的影响
Fig.5 Effect of curing manner on tensile strength of adhesive

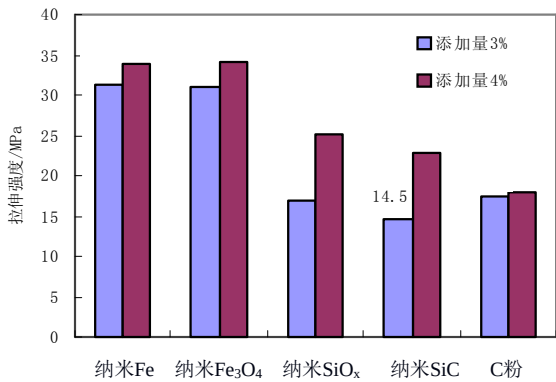


图 6 微波吸收剂对粘接材料拉伸强度的影响
Fig.6 Effect of microwave absorbent on tensile strength of adhesive

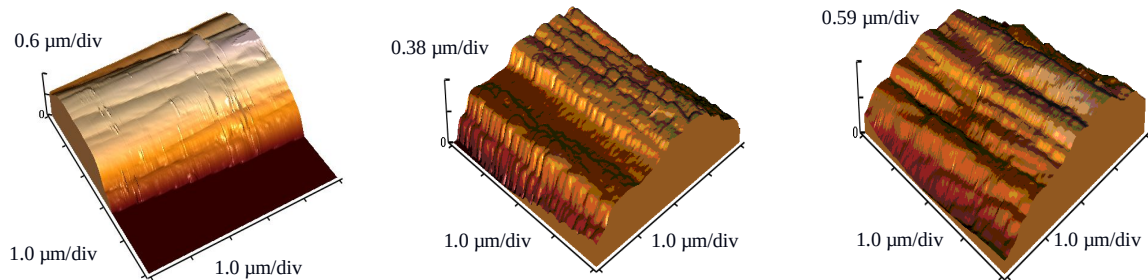


图 7 不同处理温度下碳纤维表面原子力显微镜照片
Fig.7 AFM photos of surface of carbon fiber at different processing temperature (a) untreated (b) 125 ℃ (c) 150 ℃

碳纤维表面原子力显微镜照片。从图中可以看出，处理后的碳纤维表面沿着碳纤维的径向方向，形成多条脊带，且每条脊带上的凸脊相互交隔，刻蚀地貌规则。脊带的形成，可显著增加纤维与粘接材料之间的锚齿效应，提高界面结合强度。经表面粗糙度测试实验发现，低温等离子处理后的碳纤维，其表面粗糙度均显著提高，最高可达到未处理时的 2.76 倍。表面粗糙度的增加，将会提高纤维与粘接材料的粘接面积。

将研制的粘接材料与处理后的碳纤维复合，修复不同材料基体的损伤，其修复效果（拉伸试验）见表 2。从表中可以看出，不同的基体材料，固化工艺不同，所得到的试验数据也不同。对于 45 钢和 LY12 铝合金材料，采用微波功率 300 W，固化时间 20 min 效果最佳，静强度恢复率分别为 96.1 %和 102.9 %。而对于玻璃纤维复合材料，采用微波功率 200 W，固化时间 4 min 效果最好，静强度恢复率可达 142.8 %。

表 2 微波固化复合材料贴片拉伸试验数据
Table 2 Tensile strength of composite material patches after microwave curing

基体材料	固化工艺		拉伸强度/MPa			静强度恢复率/%
	功率/W	时间/min	无损伤试件	未修复试件	修复后试件	
45 钢	200	20			447.4	91.0
	300	20	491.6	377.3	472.4	96.1
	400	20			433.5	88.7
LY12 铝合金	200	20			379.0	91.9
	300	20	416.3	288.2	428.1	102.9
	400	20			372.4	89.4
环氧/玻璃纤维 复合材料	200	3			172.3	104.2
	200	4	165.3	126.7	236.1	142.8
	150	5			157.5	95.3

2.3 微波强化机理研究

图 8 (a) 给出了微波固化复合材料贴片与铝合金板材的粘接断面 SEM 照片，图 8 (b) 和图 8 (c) 分别是将图 8 (a) 中的 A、B 两界面局部放大后的照片。从图中可以看出，微波固化后的复合材料贴

片与铝合金基体结合良好，纤维与铝合金基体之间有明显的粘接过渡层（界面 B），过渡层均匀、致密无缝隙；且粘接材料与碳纤维浸润完全，界面层横/纵向纤维之间（界面 A）及纤维缝隙中均被胶粘剂填充，且致密无缺陷。

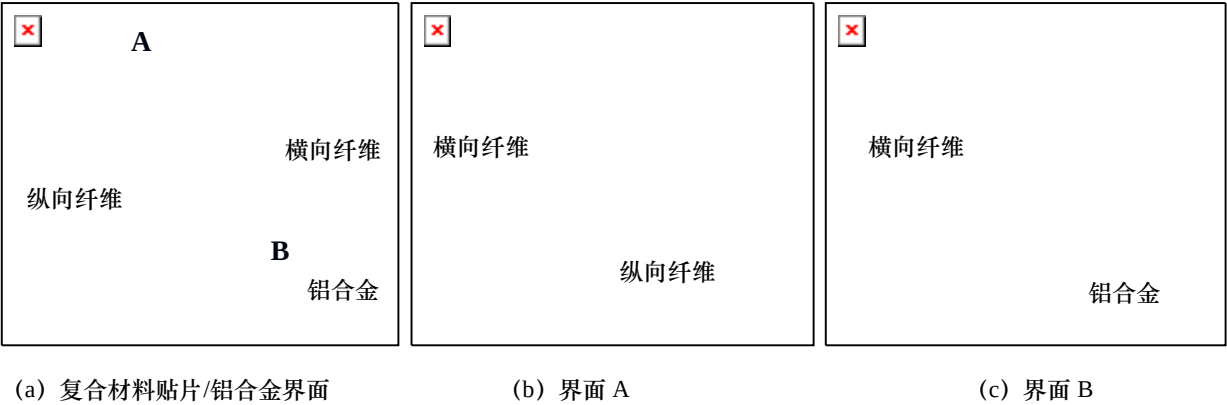


图 8 微波固化复合材料贴片与铝合金板材的粘接断面 SEM 照片

Fig.8 SEM photos of the joint's fracture faces of composite patch and aluminum alloy (a)composite patch and aluminum alloy (b)interface A (c)interface B

图9给出了不同固化条件下单向碳纤维束与粘接材料拉伸断口 SEM 照片。从图中可以看出,与热固化相比,微波固化的纤维束与粘接材料之间缝隙较少,结合更为紧密。说明在微波“体加热”的作用

下,提高了碳纤维周围树脂基体将微波能转化为热能的能力,加大了碳纤维表面的活性基团与粘接材料中环氧基团的化学反应机率,有利于碳纤维与粘接材料的界面结合,可有效缓解外力的破坏作用。

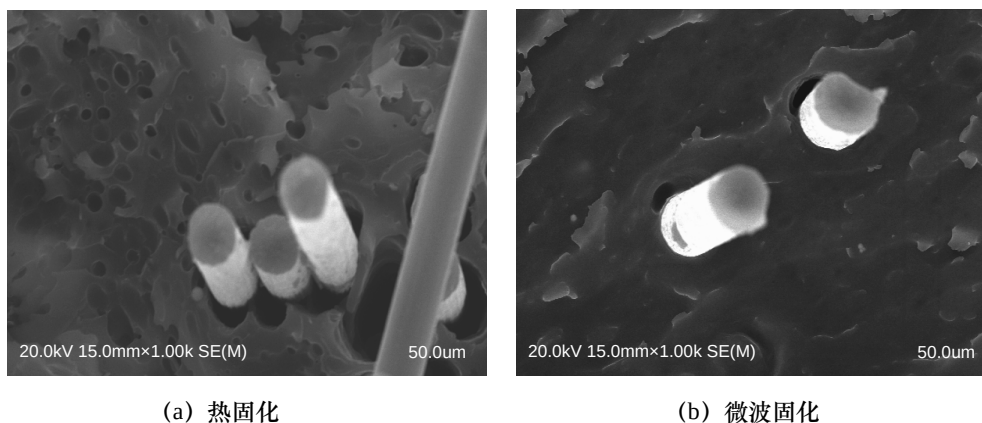


图9 不同固化条件下单向碳纤维束与粘接材料断口 SEM 照片

Fig.9 SEM photos of the fracture faces of carbon fiber and adhesive (a) heating curing (b) microwave curing

3 微波修复技术研究的发展趋势

作为一项新兴的战场抢修手段,微波修复技术还有很多问题需要进一步研究和解决。为了适应未来战场环境复杂性和装备损伤修复多样性的需要,今后微波修复技术应重点向以下几个方面发展:①微波修复设备的智能化。目前的微波修复设备虽然可以满足损伤修复的要求,但仍然存在温度控制不精确、能量转换效率较低、辐射器单一化等方面的问题。针对未来战场抢修的要求,微波修复设备应具备电脑精确控温、微波辐射方向可控、高能量转化效率、辐射器集成化、安全可靠、操作简单、便于携带等智能化要求。②微波修复材料的多样化。在未来高技术局部战场环境下,装备损伤的模式将会越来越多样化。为了满足不同损伤修复的需要,在实现现有修复材料产品化的同时,还应不断开发出具有吸波、隐身、耐热、耐蚀等特殊功能的多样化修复材料。③微波修复技术研究的理论化。目前有关微波固化复合材料贴片修复装备及零部件损伤的理论研究还不深入,尚未形成明确的、系统的理论体系。根据目前的研究状况,一方面应重点进行微波固化机理的研究,如“致热效应”与“非致热效应”及其协同效应;另一方面深入研究微波对纤维/粘接材料/基体材料之间界面行为的影响,为微波修复技术提供可靠的理论支撑。

参考文献:

- [1] Zhou J, Shi C, Mei B, et al. Research on the technology and the mechanical properties of the microwave processing of polymer[J]. Mater Process Technol 2003, 137(1-3): 156-158.
- [2] Bykov Y V, Rybalov K I, Semenov V E. High-temperature microwave processing of materials [J]. J Phys D: Appl Phys 2001, 34(13): 55-75.
- [3] Thostenson E T, Chou T W. Microwave processing: fundamentals and applications [J]. Composites: Part A, 1999: 1055-1071.
- [4] 马世宁. 装备战场应急维修技术 [M]. 国防工业出版社, 2009.
- [5] Chaowasakoo T, Sombatsompop N. Mechanical and morphological properties of fly ash/epoxy composites using conventional thermal and microwave curing methods [J]. Composites Science and Technology, 2007 (67): 2282-2291.
- [6] Marand E, Baker K R, Graybeal J D. Comparison of reaction mechanism of epoxy resins undergoing thermal and microwave cure from insitu measurements of microwave dielectric properties and infrared spectroscopy [J]. Macromolecules 1992, 25(8): 2243 -2252.

(下转第 111 页)