

微波固化技术及其在飞机战伤抢修中的应用探讨

贺 旺¹ 杜晓伟² 陈名华² 许光群¹ 谢金标¹

(1.国营芜湖机械厂,芜湖 241007;2.空军工程大学航空机务士官学校,信阳 464000)

摘 要 综述了近年来微波固化技术及微波修补技术的研究进展及应用现状,从研究方向、修理材料、微波设备、试验验证和固化工艺等方面,探讨了微波修补技术在飞机战伤抢修工程化应用中需深入开展的研究工作。

关键词 微波固化,应用现状,飞机战伤抢修

Discussion on microwave curing technology and application in aircraft battle damage repair

He Wang¹ Du Xiaowei² Cheng Minghua² Xu Guangqun¹ Xie Jinbiao¹

(1.State-operated Machinery Factory of Wuhu,Wuhu 241007;

2.Aeronautical Servie Sergeant School,Air Force Engineering University,Xinyang 464000)

Abstract Reviews was made on the advances and applications of the microwave curing and repairing technology from the direction of research,repairing materials,microwave equipment,experimental verification and curing process in recent years.Moreover,the further engineering applications of the microwave repairing in aircraft battle damage repair were deeply studied.

Key words microwave curing,application status,aircraft battle damage repair

飞机战伤抢修(ABDR)指战时通过有效使用保障资源对战伤飞机进行评估,采用现场修理或延迟修理等措施,使之恢复一定程度的任务能力,包括至少再出动一次或飞回后方修理场所的战时维修活动,是保持飞机持续作战能力最直接、最有效、最经济的途径,是战斗力的倍增器^[1],而胶接作为一种高效实用的战伤抢修技术,是战时快速修理飞机金属材料 and 复合材料结构损伤一种非常有效的抢修手段。基于微波固化技术特殊的加热机理,其具有传热均匀、加热效率高、固化速率快等优点,美军将其应用于飞机结构胶接修理中,并列为重点发展的战伤抢修技术之一^[2]。笔者对近年来国内外微波固化技术的发展及其在战伤抢修中的应用情况进行了系统总结,并对该技术在飞机战伤抢修工程化应用中需开展的研究工作进行了探讨。

1 微波固化技术的发展及原理

微波是频率为 300MHz~30GHz 的电磁波。微波技术首先应用于雷达、通信、广播、电视等技术中,作为一种信息或信息的载体使用。在通信工程应用中,发现存在热效应导致微波能损耗,需要预防

和消除。在此基础上,不少研究人员对微波加热进行了不断的探索、试验和研究,直到 20 世纪 60 年代末,微波能被作为一种能源加以利用,用于加热、干燥、杀虫、灭菌、医疗等方面上。

工业、科研常用的微波频率为 $2450 \pm 50\text{MHz}$,该频率与化学基团的旋转振动频率接近,故可用以改变分子的构象,选择性地活化某些反应基团,促进化学反应,在化学各个领域中得到广泛应用。对于微波固化反应的机理,目前仍有争议,主要有“致热效应”和“非致热效应”两种解释。传统观点认为微波固化加速反应主要是由于微波的“致热效应”,其固化机理是极性物质在外加电磁场的作用下,内部介质极化产生的极化强度矢量落后于电场一个角度,导致与电场相同的电流产生,构成物质内部功率耗散,从而将微波能转化为热能,致使固化体系快速均匀升温而加速反应;而另一种观点就认为微波除了热效应以外还存在一种不是由温度引起的非热效应,改变了反应动力学,降低了反应活化能^[3-6]。

2 微波固化技术研究

环氧树脂等热固性树脂及其复合材料的微波固

化是研究的重点之一,国外已经进行了广泛的研究,并从实验室逐步向工程化应用过渡。主要研究内容包括:微波固化机理、工艺、设备等方面。而国内在该方面的研究起步较晚,仅初步探讨了热固性树脂及其复合材料的微波固化行为及工艺。但由于微波独特的“分子内”均匀加热方式,使得树脂固化均匀、速度快、易于控制、节省能源、设备投资少,在热固化树脂及其复合材料固化方面的研究越来越重视^[7-9]。

微波固化技术另一应用方向主要在装备应急维修中,包括复合材料的微波修补以及金属结构损伤的复合材料微波快速抢修,目前也取得了一些探索性的成果,但仍远远达不到工程化应用的要求。雷运波等^[10]还开展了环氧树脂混凝土试件在自制微波辐射装置下的固化研究,发现微波固化具有高强、快硬、施工方便及固化易于控制等优点,可应用于路面抢建工程。

2.1 树脂的微波固化研究

树脂作为复合材料的基体材料,其微波固化机理、性能、工艺的研究,对树脂基复合材料的微波固化规律具有指导意义,一直作为微波固化的重点研究方向,多以环氧树脂等热固性树脂研究为主,并拓展至双马来酰亚胺树脂、聚酰胺树脂、呋喃树脂和酚醛树脂^[11-13]。

为解决部分树脂感应微波性能较弱的问题。陈名华等^[14]研究了铁粉、铜粉、石墨粉、 Fe_3O_4 粉、 SiO_2 粉、 Al_2O_3 粉等不同微波吸收剂对环氧胶黏剂微波固化时间的影响;在固化效率方面,孙晓峰等^[15]利用自研的腔外加热式微波设备固化环氧树脂胶黏剂,采用差示量热、红外光谱及扫描电镜分析方法,考察了微波与加热两种固化方式下环氧树脂胶黏剂的固化行为。结果表明微波固化时间是加热固化的1/24,且微波能有效改善纳米粉体与树脂基体之间的相容性,提高界面结合性能。Zainol等^[16]对双马来酰亚胺树脂分别进行热固化和微波固化,发现在微波场中双马来酰亚胺树脂固化速率较热固化快。

2.2 复合材料微波固化研究

在树脂微波固化研究的基础上,国内外广泛开展了树脂基复合材料微波固化研究。在微波吸收剂方面,游彦宇等^[17]选择 Fe_3O_4 作为环氧E51/DDM体系的微波吸收剂,利用超声设备对 Fe_3O_4 粉体进行分散,研究了 Fe_3O_4 添加量对微波扫描固化速度的影响,并探索其增速机理以及添加 Fe_3O_4 对玻纤增强复合材料热、力学性能的影响。Urabe等^[18]研

究了 SiO_2 填充树脂基复合材料的微波固化反应,探讨了粒子含量及不同粒径对材料性能的影响;在固化工艺方面,陈萍等^[19]研究了碳纤维/环氧预浸料在微波辐射下的固化特性,并对微波固化-真空袋成型工艺中存在的真空袋易过热破损的问题进行研究。丁星星等^[20]在热压罐设备基础上搭建了高压微波固化实验平台,采用高压微波加热固化工艺制备了碳纤维/环氧复合材料,提高了力学性能。Papargyris等^[21]研究了热固化和微波固化碳纤维/环氧复合材料,发现微波固化所用时间较热固化减少50%以上,通过扫描电镜观察拉伸断裂表面,表明微波固化后的碳纤维表面更好地包覆了环氧树脂,且显著地提高了界面剪切强度。文友谊^[22]还研究了微波固化碳纤维/双马复合材料的工艺方法,对比分析了微波和电加热对其固化度和玻璃化转变温度的影响规律。Xue等^[23]研究发现,同热固化相比,微波固化的碳纤维/环氧树脂复合材料具有较高的压缩强度。

2.3 微波修补技术研究

微波修复技术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。国外关于微波修补方面的研究主要集中在对搭接接头的微波固化研究,能在一定程度上指导微波修补。Kai等^[24]采用工业微波炉对聚酰亚胺胶黏剂粘结不锈钢接头进行了微波固化,发现微波固化后,接头的拉伸剪切强度要好于传统加热固化,时间大大缩短。Olofinjana等^[25]采用环氧胶黏剂对3种工程塑料进行粘结,采用微波固化,并设计温度反馈装置有效提高了胶接接头的粘结质量。Yarlagadda等^[26]设计了一套温度控制系统,用于微波固化速度,提高胶接接头的力学性能。

国内也开展了相关研究工作,主要针对金属结构的复合材料微波修复以及复合材料结构的微波修复。包括:腔外加热式微波设备、微波结构胶的研制,固化工艺的开发以及静态、疲劳力学性能研究等方面。

郑立胜等^[27]研制开发了复合材料微波快速胶接修复设备及微波结构胶,并进行试验验证,与常规修理相比显著地缩短了修复时间。代永朝等^[28]对含有预制裂纹的铝合金试样进行了碳纤维/双马复合材料补片贴补修理,结果表明静拉伸强度恢复率为86%,且疲劳寿命明显提升。路阳等^[29]使用微波粘接固化方法修理蜂窝夹芯结构破孔损伤,静强度

恢复率为 84.5%。

马世宁等^[30]利用碳纤维对不同基体材料进行微波修补。其中,对玻璃纤维复合材料基板的修补效果最佳,静强度恢复率达 142.8%;钱海峰等^[31]使用“全军装备维修表面工程研究中心”研制的微波修复器,开展了裂纹铝合金板的微波修复后的力学性能研究,修复后静强度可恢复到原材料的 102.9%,比普通加热的静强度提高 21.7%。

许陆文等^[32]开发了便携式微波修复机及高性能微波结构胶,开展了铝合金件的微波修补研究,修复后拉伸强度可恢复到原构件强度的 80% 以上。同时,还在国内首次用微波修补技术修复了某重型战机铝合金结构裂纹,取得良好的效果^[33]。

3 结语及应用展望

近 20 年来,利用微波修补技术快速、高效等优点,应用于飞机战伤抢修成为重要研究方向,国外相关资料较少,国内研究也有部分成果,并应用于飞机实际修理,但总体来讲不够系统和规范,还需开展大量的研究工作才能满足工程化应用的需要。

(1)明确微波修补技术的研究方向。目前,飞机结构的修补主要基于金属加强件的机械连接修理,但该方法会使结构增重较多,引入新的损伤源,恶化损伤区域的受力情况,降低修复效果^[34],且效率低,而复合材料补片胶接修补技术可解决该部分问题。当前微波修补技术研究和应用主要针对飞机损伤铝合金薄板(厚度小于 5mm)结构件的快速修复^[35-37]。因此,应首先解决铝合金薄蒙皮的战伤抢修工程化应用问题,通过对修理材料体系、修理设备、固化工艺等方面的研究,在尽可能短的时间内,用最少的设备、人员和设施,把战伤飞机恢复到最低水平的备战状态。在形成修理技术基础上,可将微波修补技术,拓展到层压板、蜂窝夹层等复合材料结构的战伤抢修上。

(2)规范专用修理材料体系。基于战伤抢修的特点及需求,修理所用的材料必须在室温下具有长储存寿命。其中结构胶是关键性的修理材料,应能在室温下固化,且对固化压力要求不高,在真空压力或滚筒等机械加压等条件下固化仍具备较好的力学性能。国内前期研究中,主要通过现有的环氧类结构胶中,添加颗粒或短纤维用以提高微波吸收效率,加快固化反应速率,缩短固化时间,但均为实验室产品,没有规范化的材料标准和使用规范。因此,应重点针对现有的环氧类结构胶进行固化配方改进,通

过加入微波吸收剂,或者将有利于微波吸收的基团和分子引入到微波固化体系中,提高微波吸收效率,改善微波固化产物的综合性能^[38],并形成专用的材料规范。

(3)修理设备的智能化升级。微波加热设备是微波修补技术的重要组成部分,传统的微波加热设备多采用箱式或腔式结构,而对于飞机战伤抢修不可行。因此,国内多个学校相关研究人员,成功开发了便携式辐射型微波修复设备,基本可以满足损伤修复的要求,但设备功能较为简单,存在温度控制不精确、能量转换效率较低、实际修理受限等方面的问题。基于未来战伤抢修的需求,应在操作控制、安全性、便携性等方面对设备进行智能化升级。

(4)系统化开展修理试验验证。美军空军只要要求战伤抢修有 100h 的疲劳寿命^[39],意味着修理主要按静强度进行设计,修理的疲劳或耐环境性相对不重要。国内前期的研究中,开展疲劳性能试验较少,且基本没有耐环境性试验,但为保证修理的耐久性,应系统开展试验验证工作,包括静态、疲劳以及耐环境性试验。由于湿-热和干-冷环境是复合材料胶接接头最严重的影响因素^[40],因此,耐环境性试验应重点考核修理后的湿热及干冷性能。

(5)快速修理工艺研究。快速修理工艺主要包括表面处理工艺及加压固化工艺,均需简单、快速。其中表面处理虽然以磷酸阳极化(PAA)处理的效果最好^[41],但处理时间较长,可结合修理材料研究及修理实际需求,开展打磨、吹砂等快速表面处理工艺研究。当前加压固化工艺多以工具进行机械施压,但存在施压不均匀,压力较小等问题。后续可重点开展真空袋法研究,针对碳纤维与微波之间的电磁耦合作用会产生电弧,致使真空袋破损的问题,可通过采用铝带或环氧树脂屏蔽碳纤维的尖端、密封胶条沿着复合材料边缘密封粘贴真空袋等方法^[42-43],避免电弧的产生,确保微波修补过程中真空袋不会破损。

参考文献

- [1] 张建华.飞机战伤抢修工程学[M].北京:航空工业出版社,2001,1-5.
- [2] 王东峰,汪定江,杨后川.用于胶接抢修的微波固化温度监控系统设计[J].机电产品开发与创新,2009,22(1):107-108.
- [3] 耿杰,李勇,陈云雷,等.环氧树脂聚酰胺体系微波固化特性研究[J].玻璃钢/复合材料,2013(5):7-13.
- [4] 谷晓昱,张军营.微波固化环氧树脂中非热效应的研究[J].高分子材料科学与工程,2006(22):183-186.
- [5] 郑立胜,李远才,代永朝,等.环氧复合材料用微波固化技术及

- 其展望[J].玻璃钢/复合材料,2006(3):53-56.
- [6] Guido S, Eugenio A, Domenico A. Conventional and microwave curing process of epoxy system: kinetic analysis and characterization[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(11): 2777-2783.
- [7] Mark W, David A, Richard J D, et al. Investigation of the microwave curing of the PR500 epoxy resin system[J]. J Mater Sci, 2006, 41(7): 5862-5869.
- [8] Shuangjie Z, Martin C H. A study of microwave reaction rate enhancement effect in adhesive bonding of polymers and composites[J]. Composite Structures, 2003, 31(3): 303-309.
- [9] 周文英. 热固性树脂微波固化研究进展[J]. 塑料, 2005, 34(5): 47-53.
- [10] 雷运波, 蒋懋, 陈辉国, 等. 微波固化环氧树脂混凝土路面抢修材料的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 599-602.
- [11] Unai L, Mariasun S, Koldo G, et al. Polymerization and curing kinetics of furan resins under conventional and microwave heating[J]. Thermochimica Acta, 2014, 581(2): 92-99.
- [12] Kimberly D F, Rahul N M, Sue A B A, et al. Variable frequency microwave curing of photosensitive polyimides[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(3): 474-481.
- [13] Chun L L, Yong G Y, Hai L F, et al. Microwave promoted rapid curing reaction of phenolic fibers[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(11): 507-512.
- [14] 陈名华, 姚武文, 王新坤, 等. 微波固化碳纤维/环氧树脂胶的研究[J]. 粘接, 2005, 26(6): 13-15.
- [15] 孙晓峰, 马世宁, 朱乃姝, 等. 环氧树脂胶剂微波固化研究[J]. 中国工程机械学报, 2010, 8(1): 107-110.
- [16] Zainol I, Day R, Heatley F. Comparison between the thermal and microwave curing of bismaleimide resin[J]. Apply Poly Sci, 2003, 90(10): 387-397.
- [17] 游彦宇, 李勇, 还大军, 等. Fe304 对微波扫描快速成型复合材料固化速率及性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(4): 569-576.
- [18] Urabe H, Nomuray Y, Shirai K, et al. Effect of filler content and size to properties of composite resins on microwave curing[J]. Journal of Material Science, 1999, 10(6): 375-378.
- [19] 陈萍, 徐学宏, 李振忠, 等. 一种碳纤维/环氧预浸料的微波固化特性及其层合板的微波固化工艺研究[J]. 材料工程, 2016, 44(4): 45-50.
- [20] 丁星星, 湛利华, 李树健, 等. 先进树脂基复合材料高压微波固化工艺实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(1): 68-72.
- [21] Papargyris D A, Day R J, Nesbit A, et al. Comparison of the mechanical and physical properties of a carbon fibre epoxy composite manufactured by resin transfer moulding using conventional and microwave heating[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(7/8): 1854-1861.
- [22] 文友谊. 碳纤维增强树脂基复合材料微波固化技术[J]. 航空制造技术, 2015(Z): 61-64.
- [23] Xue H X, Xiao Q W, Qun C, et al. Improvement of the compressive strength of carbon fiber/epoxy composites via microwave curing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(10): 226-232.
- [24] Kai W, Xiaojie Y, Maosheng Z. Comparison between microwave and thermal curing of a polyimide adhesive end-capped with phenylethynyl groups[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2017, 74(12): 28-34.
- [25] Olofinjana A, Yarlagadda P K D V, Oloyede A. Microwave processing of adhesive joints using a temperature controlled feedback system[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(7): 209-225.
- [26] Yarlagadda P K D V, Cheok E C. Study on the microwave curing of adhesive joints using a temperature-controlled feedback system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 91(12): 128-149.
- [27] 郑立胜, 代永朝. 复合材料微波胶接修补技术的研究及应用[J]. 航空制造技, 2007(11): 93-96.
- [28] 代永朝, 郑立胜. 飞机微波固化粘接修补技术试验研究[J]. 粘接, 2008(6): 38-41.
- [29] 路阳, 赵宇, 代永朝, 等. 复合材料损伤微波修理试验研究[J]. 航空维修与工程, 2009(3): 50-51.
- [30] 马世宁, 孙晓峰, 朱乃姝. 微波修复技术研究与发展[J]. 中国表面工程, 2010(2): 100-105, 111.
- [31] 钱海峰, 马世宁, 孙晓峰, 等. 复合材料快速修复含裂纹铝合金板的力学性能研究[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(11): 28-31.
- [32] 许陆文, 代永朝, 苗励刚. 飞机结构战伤复合材料微波快速抢修技术[J]. 航空工程与维修, 2002(3): 17-20.
- [33] 许陆文. 复合材料微波快速抢修技术在某重型战机抢修中的应用[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 223-226.
- [34] Qudaw W, Bachir B B, Belhouari M, et al. Analysis of the plastic zone size ahead of repaired cracks with bonded composite patch of metallic aircraft structure[J]. Computer Material Science, 2009, 46: 950-954.
- [35] Baker A A. Repair efficiency in fatigue-cracked aluminum components reinforced with boron/epoxy patches[J]. Fatigue Fracture Engineering Material Structure, 1993, 16: 753-765.
- [36] Albedah A, Bachir B B, Mhamdia R, et al. Comparison between double and single sided bonded composite repair with circular shape[J]. Material Design, 2011, 32: 996-1000.
- [37] Gu J U, Yoon H S, Chuoi N S. Acoustic emission characterization of a notched aluminum plate repaired with a fiber composite patch[J]. Composites: Part A, 2012, 43: 2211-2220.
- [38] 徐学宏, 王小群, 闫超, 等. 环氧树脂及其复合材料微波固化研究进展[J]. 材料工程, 2016(8): 111-120.
- [39] 董登科, 丁惠梁译. 飞机金属结构复合材料修理技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017, 567-568.
- [40] 牛春匀著. 实用飞机复合材料结构设计与制造[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010, 294-295.
- [41] 陈明安, 张新明, 蒋志军, 等. 铝及铝合金表面处理后的表面特征和粘接特性[J]. 化学与粘合, 2001(6): 262-267.
- [42] Kwak M, Robinson P, Bismarck A, et al. Curing of composite materials using the recently developed HEPHAISTOS microwave[C]. Jeju Island, Korea: International Committee on Composite Materials, 2011.
- [43] Li N, Li Y, Hang X, et al. Analysis and optimization of temperature distribution in carbon fiber reinforced composite materials during microwave curing process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014(3): 544-550.