

功能性环氧树脂复合材料研究进展

赵洪涛¹,陈国华¹,田明伟^{1,2},曲丽君^{1,2},朱士凤^{1,2}

(1. 青岛大学 纺织服装学院,山东 青岛 266071;
2. 青岛大学 山东省海洋生物质纤维材料及纺织品协同创新中心,山东 青岛 266071)

摘要:简述了近年来环氧树脂在功能性复合材料领域中的研究和应用,介绍了环氧树脂在灌浆材料、功能涂料、封装材料和胶黏剂等方面的研究现状;在此基础上,分析了当前功能性环氧树脂复合材料研究中存在的问题,并就分析结果展望了环氧树脂复合材料的发展趋势。

关键词:环氧树脂;涂料;复合材料;封装材料;胶黏剂;灌浆材料

中图分类号:TQ323.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2018)03-0001-09

环氧树脂(EP)是一种集电绝缘、耐化学药品、耐高温、耐磨和低收缩率、高黏合性能于一体的树脂材料,易加工成型,且成本低,在材料领域有着广泛应用。环氧树脂由于具有许多优异的物理机械性能,本身又含有活泼的环氧基和羟基官能团,因此很容易和其它材料相结合。环氧树脂与特定的功能材料相结合,不仅能弱化或去除环氧树脂本身存在的缺点,还能得到具有特定功能的环氧树脂基复合材料,这些复合材料按照用途可以分为灌浆材料、胶黏剂、功能涂料、封装材料等^[1-2]。目前,环氧树脂复合材料品种繁多、功能多样,本文通过对国内外的环氧树脂复合材料研究现状进行总结和分析,找出存在的问题,为以后的研究提供参考和意见。

1 环氧树脂复合材料应用分类

1.1 环氧灌浆材料

环氧树脂具有树脂类良好的可塑性,固化后的环氧树脂更具有耐磨、耐腐蚀、耐压、介电性好和较高黏结性等优点,在灌浆材料中占有重要地位。然而传统环氧灌浆材料的浆液往往有较大的毒性,危害施工人员的身体健康;另外传统环氧灌浆材料的固化剂易受潮湿环境的影响,固化后的黏结强度低^[3]。王冬等^[4]用改性的 HY 双酚 A 环氧树脂为基材,以自制的固化剂 AS 为 B 组分,制备出一种低黏度(110 mPa·s)的灌浆材料,这

种材料可操作时间大于 2 h,且固化后的抗压、抗拉、抗渗等性能优良,表 1 为环氧树脂灌浆材料的优化配方。Shamsuddoha 等^[5]将具有不同组分的纯树脂、硬化剂和骨料的环氧灌浆材料混合制备出用于修复钢制管道的浆料,该浆料具有高达 52 MPa~120 MPa 的抗压强度和 1.7 GPa~11 GPa 的刚度,其拉伸模量和弯曲模量分别为 3 GPa~17 GPa 和 4 GPa~13 GPa;另外热分析表明,该浆料的玻璃化转变温度 T_g 为 60~90 ℃,也为钢制管道的修复提供了较好的浇筑条件。Irshidat 等^[6]利用碳纳米管对环氧树脂进行改性处理,制备出的复合材料能有效改善钢筋混凝土梁的刚度和韧性。Li^[7]利用微乳法将乳化剂、助乳化剂、水和环氧树脂按一定比例混合,研制出一种去固化剂的环氧灌浆材料,实验证明以这种新型乳液制备的灌浆材料可用于实际防渗堵漏作业中。杨富民等^[8]利用聚氨酯对环氧树脂进行改性处理得到一种新型灌浆材料,这种材料分子间的物理交联程度低、黏度小,能够让浆液在保持较高的抗压强度和拉伸强度下,拥有更好的渗透性能。

目前,对环氧树脂灌浆材料的研究,主要集中在不同材料在特殊环境下的固化、粘结和渗透过程,而高抗压、高刚度、高韧性仍然是环氧灌浆材料的重要性能要求;另外,绿色、环保的环氧灌浆材料也是未来的发展趋势^[9-10]。

表 1 环氧树脂灌浆材料的优化配方^[4]

Table 1 Optimum formulation of epoxy resin grouting material^[4]

组分	添加量	g
环氧树脂 NPEL-127	70	
环氧树脂 HY	30	
固化剂 AS	40	
稀释剂 501	15	
促进剂 DMP-30	按需要添加	

1.2 环氧涂料

环氧树脂具有耐热、耐腐蚀、耐化学药品以及良好黏附性能,被广泛应用于防护涂料的基材^[11]。根据不同的功能应用,环氧涂料可以分为:防腐涂料、防火涂料、防污涂料和防辐射涂料。

1.2.1 环氧防腐涂料

环氧防腐涂料广泛应用于船舶、建筑桥梁等金属表面的涂层,以阻隔环境造成的腐蚀,有效减少或降低因酸碱腐蚀或生物侵蚀带来的损失。Wan 等^[12]用铝/锌(Al/Zn)基环氧树脂作为防腐涂层材料,通过调整 Al/Zn 的体积比至 10:1 得到了最佳的防腐效果,这种涂料的防腐效果要优于之前的基于 Al 基或 Zn 基的涂料。姜恭俭等^[13]用玄武岩纤维和黑宝石粉体作为改性组分掺入到

无溶剂的环氧涂料中,通过优化掺入比例制备出新的涂料,实验表明新涂料的拉伸强度和耐水性得到了显著提高。吴艺琛^[14]在其硕士论文中介绍了一种有机—无机杂化硅材料改性环氧树脂防腐涂料,让环氧树脂涂料同时具有无机材料和有机材料的优点,可以应用在石油开采的复杂环境中。He 等^[15]通过正交法,研制出一种纳米二氧化钛无溶剂环氧防腐涂料,这种涂料在海水、原油和盐雾试验中表现出较好的机械性能和良好的防腐性能。Ramezanzadeh 等^[16]利用高结晶度导电聚苯胺/石墨烯复合材料改进富锌环氧涂料,研究表明,氧化石墨烯可以充当优异的防腐改性剂,而聚苯胺还可以减少锌颗粒的氧化而不影响其电接触。Mostafaei 等^[17]利用苯胺和氧化锌纳米棒通过化学氧化法制备出导电纳米复合材料,其防腐性能比单一的聚苯胺或氧化锌纳米棒制备的涂料更加优异,可用于防腐环氧基复合涂料。图1为该材料用 3.5% 氯化钠溶液浸泡后在基板和漆膜界面形成的钝化层示意图,从图 1 可以明显看出,在盐水环境中,EP-PANI-ZnO 复合涂料形成的钝化层更加均匀,说明它对盐水环境具有更强的耐受性。Ramezanzadeh 等^[18]利用湿法转移将氨基功能化的氧化石墨烯(FGO)与环氧树脂结合,制

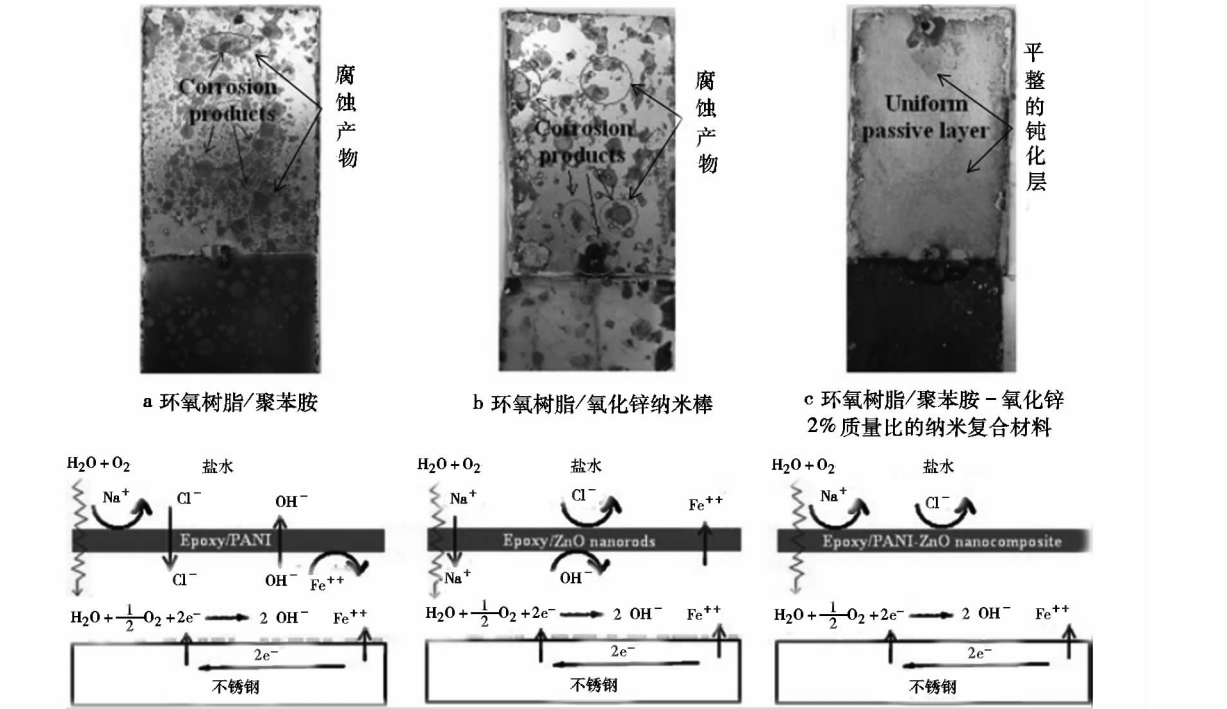


图 1 几种材料在质量含量为 3.5% 的氯化钠溶液浸泡后在基板和漆膜界面形成钝化层示意图^[17]

Fig. 1 Schematic diagram of formation of passivation layer at substrate and film interface after immersion in 3.5% sodium chloride solution^[17]

备出 FGO /EP 复合材料,其盐雾腐蚀试验表明,当 FGO 的质量百分比为 0.1% 时,复合涂料的耐腐蚀性即可获得明显提升(见图 2)。

目前,环氧防腐涂料的研究主要集中在功能

性填料的掺入和固化剂的改进,相较而言,国外研制的防腐涂料应用的材料更加灵活,制备出的产品防腐效果更好。

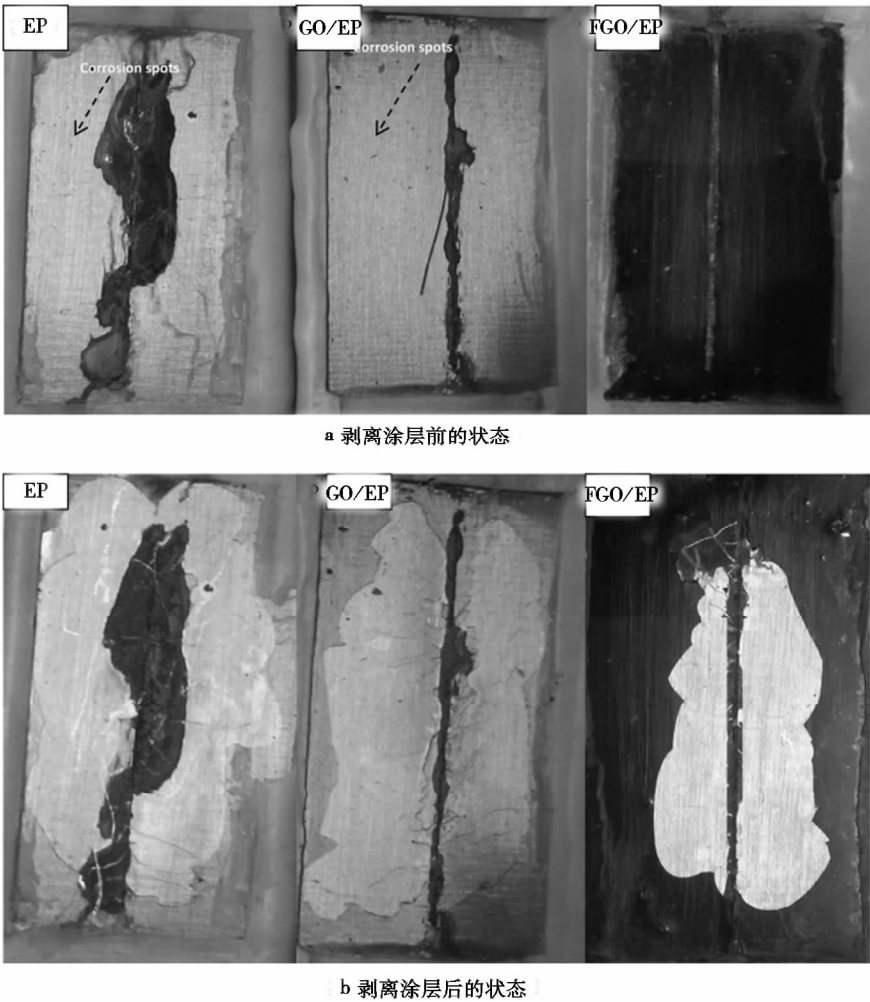


图 2 EP、GO/EP 和 FGO/EP 在 400 h 盐雾试验后的实物图^[18]

Fig. 2 Physical drawings of EP, GO/EP and FGO/EP after salt spray test at 400 h^[18]

1.2.2 环氧防火涂料

环氧树脂具有活泼的含氧基团,很容易与一些吸热、阻燃材料结合起来,制成耐高温的防火涂料。环氧树脂基防火涂料具有极佳的封闭性和耐气候性,其中的阻燃成分不会对所涂表面造成负面影响且有效时间极长,因此,在室外防火、阻燃等方面有着较为广泛的应用。王和山^[19]在其发明专利中公开了一种耐热阻燃的改性环氧树脂涂料。对比同类阻燃涂料,这种涂料的固化速度更快、固化条件更低,且较容易操作。郑振荣等^[20]在论文中介绍了一种复合有机硅树脂溶液,这种溶液是利用环氧树脂对自制有机硅低聚物进行改

性处理,继而添加了一定量的白炭黑、高岭土等阻燃材料制备而成,将其涂覆在玻璃纤维织物表面能显著提高织物的隔热性能。王庆平等^[21]将改性过的粉煤灰按照一定比例与环氧树脂涂料进行混合,制备出一种新型防火涂料。与传统环氧树脂涂料相比,这种涂料的防火性能有了明显提高,当改性粉煤灰添加量为 5% 的质量百分比时可以达到最佳防火效果。Yew 等^[22]在阻燃剂和丙烯酸酯黏合剂中添加 Mg(OH)₂ 和 TiO₂ 阻燃填料,这种新功能性填料的掺入显著改善了涂料的泡沫结构和防火性能。Jirasutsakul 等^[23]合成了含有芳族基团的二膦基二胺,分子式及合成过程见图

3. 这种材料应用到环氧涂料中不仅能充当环氧树脂固化过程中的交联剂,而且能在复合涂料中

起到阻燃剂的作用。

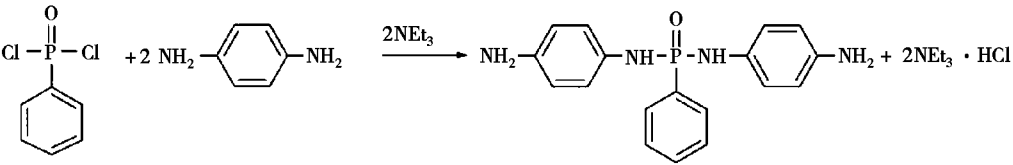


图 3 苯基磷苯二胺酰胺的合成^[23]

Fig. 3 Synthesis of phenyl phosphine phenylenediamine amide^[23]

研究人员对环氧树脂阻燃涂料的研究主要集中在环氧树脂的改性、阻燃项的开发和新型助剂的应用,以此来制备出具有单元或多元优异性能的防火涂料。国内研究新型阻燃填料的居多,而国外在此领域的研究更倾向于阻燃机理探究和新型助剂的开发。

1.2.3 环氧防污涂料

船舶表面很容易被海洋生物污损,这些污损会增大船体表面的粗糙度和航行时的摩擦力,使得燃油消耗增多^[24],因此船舶防污是远洋航行的一项重要课题。环氧树脂由于兼具良好的黏合性、耐化学腐蚀性和耐气候性,成为船舶防污涂料的重要基材。蔡棋成等^[25]比较了 H18 气相二氧化硅和有机膨润土两种流变剂对 E51 环氧树脂涂料的影响,发现 H18 气相二氧化硅由于具有更低的表面能,能更有效地改善 E51 环氧树脂涂料防污与防腐性能。杨保平等^[26]用纳米二氧化钛降低环氧改性氟树脂的表面能,开发出一种新型氟碳涂料,这种涂料具有较好的防污防腐性能。朱一谋等^[27]利用自制的三唑醇酯单体,制备出具有抑菌杀菌性能的树脂材料,并将其与环氧树脂结合用作建筑涂料,在防污作用的基础上还具有自抛光性能,对海洋防污有着重要的指导意义。防污涂料的配方如表 2 所示。刘明光等^[28]研究了不同形态的氧化亚铜对新型封端聚氨酯/环氧树脂共混物涂料的物理机械性能和防污性能的影响,结果表明,对比氧化亚铜和纳米氧化亚铜,80% 质量含量的 PEG 硅烷改性氧化亚铜涂料防污性能最佳。Mostafaei 等^[29]在其论文中介绍了一种新型环氧基复合涂料,其主要成分为混有导电聚合物的环氧树脂、聚苯胺以及含有 ZnO 纳米棒的添加剂的纳米复合材料。实验证明,这种复合涂料可以有效防止大型海洋生物的附着,另外,

如图 4 所示,由于涂料里面所含有的聚苯胺 - 氧化锌纳米复合材料以及环氧/氧化锌涂层的具有显著的抗菌性,因此该复合涂料对常规的菌类也有很明显的抑制作用。Peres 等^[30]将十二烷酸应用在绿色防污涂料中,他们在海水浸泡试验中设计了单组分环氧树脂和松香基防污涂料,结果表明,新的环氧树脂配方的涂料防污效果明显高于松香配方的,能够与商业涂料比肩,而且其防污剂的释放速率明显小于商业涂料,这也意味着这种涂料的防污效果持续时间更长。

表 2 防污涂料配方^[27]

Table 2 Antifouling paint formulation ^[27] g			
物料名称	质量	物料名称	质量
防污树脂	66.7	滑石粉	2.0
Cu2O	42.0	溶剂(正丁醇)	30.0
ZnO	2.0		

防污涂料的研究已经进行好多年,目前,新型防污涂料技术研究的重点是优化涂料的组成,降低防污剂的用量,实现防污剂的可控释放,以及提升防污涂层的强度和耐久性与筛选低毒广谱的防污剂。

1.2.4 环氧防辐射涂料

在科技日益发展的今天,电磁辐射已经成为我们生活中的重要污染源,而环氧树脂本身具有较强的耐辐射性能,是制备防辐射材料的良好基材。马晓洁^[31]在其发明专利中以石墨烯为防辐射主体,辅以紫外吸收剂、导电填料和其他助剂,制备出的复合涂料经固化后具有优异的抗电磁辐射和耐黄变,其附着力与综合性能也优于现有同类产品。黄益平等^[32]分别以 H-116 树脂和 793 树脂为固化剂,以碳化硼为热中子吸收剂,制得防辐射环氧树脂涂料。实验结果表明,当碳化硼的

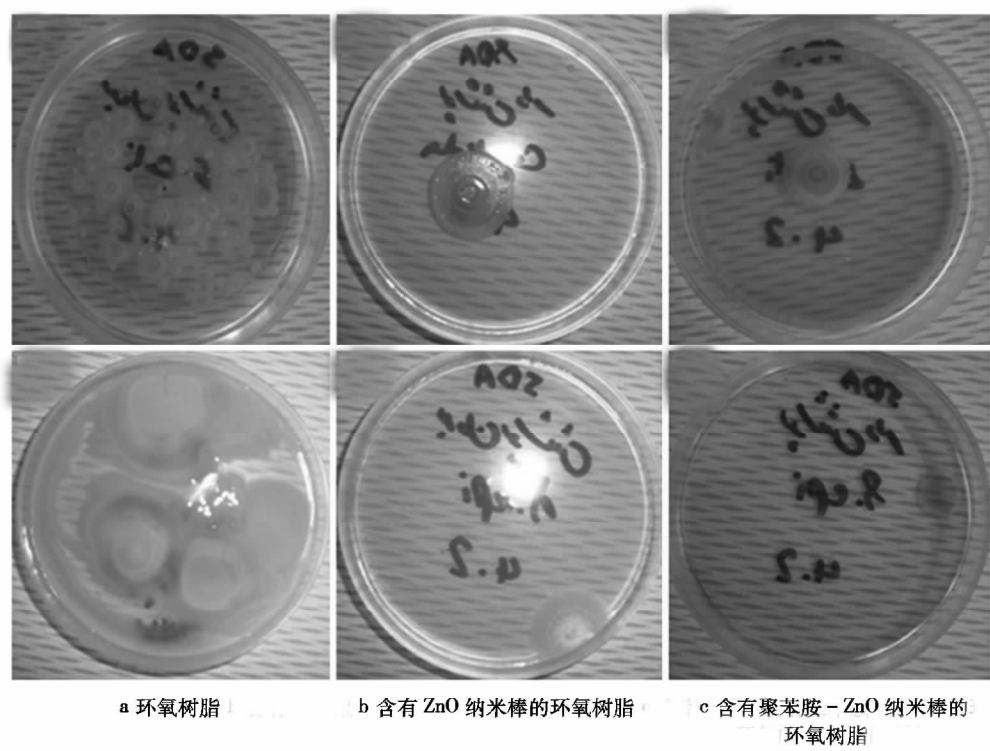


图 4 几种材料的抗菌性比较^[29]

Fig. 4 Comparison of antibacterial properties of several materials^[29]

质量含量为 30% 时,涂料的总体机械性能最佳;另外,由图 5 的涂料涂膜厚度与中子透过数的关系可知,当涂层厚度大于 300 μm 时,该涂料甚至能够屏蔽中子射线。张娟等^[33]利用环氧树脂、耐辐射颜填料和自制的胺固化剂开发出一种核电厂用的耐辐射涂料,经试验证明当颜填料和环氧树脂的质量比为 1:4 时,制得的复合涂料综合性能优异,能够满足普通压水堆核电厂的耐辐射要求。胥文军^[34]在其硕士毕业论文中介绍了一种由镀镍铜玻璃纤维和镍粉为功能填料,环氧树脂为黏结剂制备出来的新型电磁波屏蔽涂料,当镀镍铜玻璃纤维的质量含量为 5%,涂层厚度为 0.3 mm 时,涂料的电磁波屏蔽效能明显提高。Ackaln 等^[35]将自制的纳米导电聚苯胺与镍-锌铁氧体按照不同比例混合作为填料,以 2K 双 A 酚型环氧树脂为黏合剂,制备出新型吸波涂料。结果表明,相较铁氧体填料,纳米铁氧体/聚苯胺混合填料吸波效果更佳,并且随着聚苯胺含量的增加,涂层的电磁波吸收性能也随之增加。Kowsari 等^[36]利用静电纺丝技术制备出含有硝酸铬和醋酸锌的聚丙烯腈纤维,将这种纤维作为吸收剂添加到环氧树脂中制备复合吸波涂层,测试结果表明,经过 600 $^{\circ}\text{C}$ 煅烧退火 3 h 后,样品的反射损耗比显著降低。

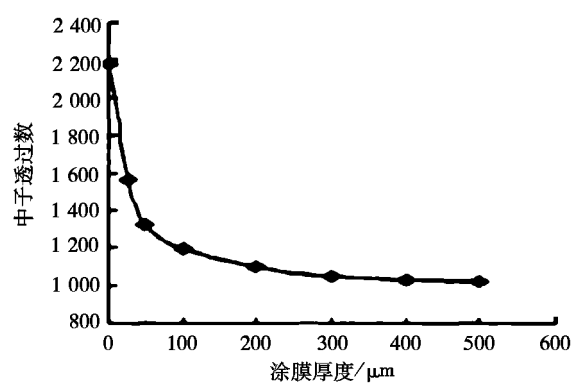


图 5 涂膜厚度与中子透过数的关系^[32]

Fig. 5 The relationship between coating thickness and neutron transmission number^[32]

在环氧防辐射涂料的研究中,研究人员主要集中在新型防辐射填料或吸波剂的制备和混配上,以不同的材料制备出屏蔽性能良好的防辐射涂料。

1.3 环氧树脂基胶黏剂

环氧树脂具有优异的黏结性能和很强的内聚力,且固化收缩率小、稳定性高,常被用作胶黏剂的主体材料^[37]。杨友龙等^[38]创新性地将粘贴增强纤维用的环氧树脂胶黏剂 Epoxy-44 用作表面防水剂,并以商用醇酸清漆作为对比,在 3 种木材

上分别涂覆 1 或 2 层环氧树脂胶黏剂或醇酸清漆,对其防水效果进行测试;70 d 的浸水测试表明,Epoxy-44 结构胶黏剂防水效果优异,无论是单层还是双层,Epoxy-44 的吸水率都要比商用醇酸清漆低很多。赵富贵等^[39]利用无水乙醇减小香豆素的表面张力,使其均匀分散在环氧胶黏剂中,制备出具有荧光特性的胶黏剂。测试结果表明制备出的胶黏剂荧光效果良好,特别是在 365 nm 的入射波长下荧光效果最佳(图 6),因此可为靶丸装配提供胶斑定位检测。辛浩波等^[40]以聚氨酯、丙烯酸酯和环氧树脂(E-51)为原料制备胶黏剂

(环氧树脂通过化学键接入聚氨酯分子链,并与丙烯酸酯形成互穿网络聚合物(IPNs)),力学性能测试表明,这种新型胶黏剂的剥离强度可达到 4.6 kN/m。Ghazali 等^[41]将环氧/硫醇微胶囊分散到商用环氧树脂胶黏剂中,开发出一种具有自修复性能的聚合物胶黏剂,这种胶黏剂剪切强度比原来胶黏剂提高了 26%,并且可以在室温下恢复黏结性能。Tutunchi 等^[42]研究了纳米 Al₂O₃ 对双组份结构丙烯酸酯胶黏剂粘结玻璃钢/环氧复合材料的强度影响,结果表明,Al₂O₃ 纳米粒子的引入能够显著改善复合材料的抗拉伸和抗剪切性能。

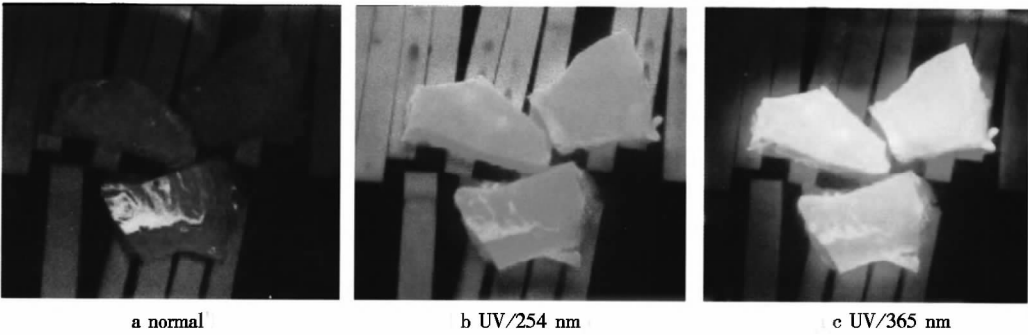


图 6 胶黏剂固化后的荧光效果比较^[39]

Fig.6 Comparison of fluorescence effect after curing of adhesive^[39]

环氧胶黏剂研究主要集中在新型胶黏剂的开发和应用上,高黏度、复合功能的胶黏剂将是新的发展方向。另外,对环境有负面影响的胶黏剂将渐渐被淘汰,绿色无公害的胶黏剂将成为未来研究的热点。

1.4 环氧树脂基封装材料

无论是分立器件、大规模集成电路还是超大规模集成电路,封装是保证电子元件正常工作的必要条件^[43]。环氧树脂具有绝缘、耐热、耐冲击、易成型和抗老化等特点,在封装材料领域有着广泛的应用。巩静等^[44]将改性过的纳米金属氧化物引入到环氧树脂中,制备出用于 LED 顶部的封装材料,研究发现,纳米 MgO 和纳米 ZnO 的引入不仅提升了 LED 的出光率,同时还增强了封装材料的光学稳定性(表 3 为不同质量配比的 MgO/ZnO/EP 复合材料,图 7 为对应配比的 MgO/ZnO/EP 复合材料老化前后的透光率比较。从图 7 可以看出,老化后纯环氧的透光率下降了 19.54%,而 MgO/ZnO/EP 复合材料透光率的下降百分率明显减小,特别地,4 号样品的透光率仅下降了 6.28%)。程艳芳等^[45]研究了不同固化促进剂对

表 3 不同质量配比的 MgO/ZnO/EP 复合材料^[44]

Table 3 MgO/ZnO/EP composites with different

样品编号	components ^[44]		% %
	ZnO	MgO	
1	0	0	
2	0	0.015	
3	0.04	0	
4	0.04	0.01	
5	0.03	0.015	
6	0.02	0.02	

环氧树脂模塑料(EMC)固化行为的影响(应用 Kissinger, Crane 和 Ozawa 方法获得固化动力学参数,进而确定固化工艺),结果表明:N,N-二甲基苄胺为固化促进剂的体系比 2-甲基咪唑、四丁基溴化铵体系,对 EMC 的储存时间更为不利。李良海等^[46]采用苯基三甲氧基硅烷的聚合等方法合成了超支化聚苯基硅树脂(HBPSi),探究了不同质量比的 HBPSi 对改性环氧树脂性能的影响,结果表明当 HBPSi 的质量含量为 10% 时,改性后的树脂表现出良好的耐热、耐湿性能和较好的力学性能。秦静等^[47]开发了新型非共平面共轭结构

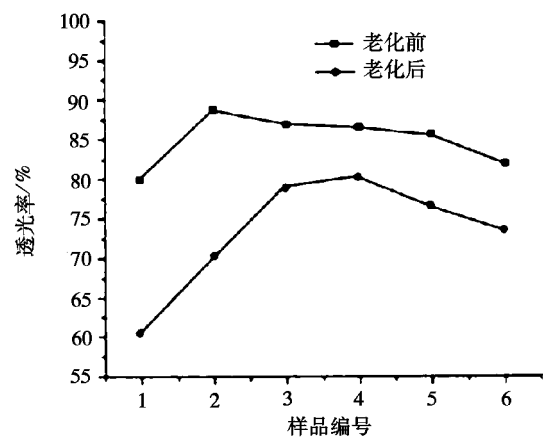


图 7 不同质量配比的 MgO/ZnO/EP 复合材料
老化前后的透光率比较^[44]

Fig. 7 Transmittance of MgO/ZnO/EP
nanocomposites before and after lifetime testing^[44]

二胺(TPEDA),并将其用于环氧树脂的固化反应,热分析表明 TPEDA 的加入能够显著提高树脂的玻璃化转变温度、弹性模量和尺寸稳定性,同时降低其介电常数,在电子封装领域有着潜在的应用前景。Dong 等^[48]利用溶胶-凝胶技术合成了纳米二氧化硅,并将其引入环氧树脂制备出二氧化硅掺杂环氧材料(SNP-EP),测试证明这种复合材料具有优异的防潮性能($1.52\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)、良好的透光率(超过 90%)和附着力(5B)、优良的表面硬度(9H)和较好的化学稳定性。Rmili 等^[49]深入研究了一种用于电子元件新型封装材料的环氧树脂复合材料的动态力学性能和热效应,分析表明经过热预处理的树脂具有更高的热分解温度,进而确定了预处理树脂在工业应用中的限制温度。

由于环氧树脂本身、固化剂和掺杂项等都是影响封装材料的重要因素,因此目前许多研究人员致力于研究环氧树脂本身和固化剂的改性,以及寻找新型的功能掺杂项,而树脂的固化过程对电子元件影响的相关研究还比较少,这将是未来环氧封装材料的研究重点。

2 环氧树脂复合材料研究中存在的问题

目前,为了开发出具有单元或多元功能的复合材料,大部分研究人员偏重于原料的筛选、改性和优化配比,而在新材料研发的过程中,筛选和优化往往需要进行大量的试验,而实验结果往往难以达到预期,却耗费许多的材料和人力。这种情况下,可以考虑利用计算机搭建相应的数学模型对试验情况进行模拟,推算出大致的结果,以节约开发成本。

国内外对环氧树脂复合材料的研究很多,针对性能提升、组分配比和材料形成机理等方面的研究都取得了丰硕成果,然而,在种类方面,国内的环氧树脂种类较为单一,应加大对传统环氧树脂改性和新型结构环氧树脂的开发,提高产品性能。

固化是环氧树脂成型的重要过程,固化剂是影响环氧复合材料性能的重要因素,市场上固化剂种类繁多,也各有优缺点,然而开发出更加高效、绿色的固化剂仍是相关领域的研究热点。

添加功能性填料是赋予环氧树脂特定性能的主要手段,在一些功能性环氧树脂复合材料的开发中,往往只注重产品性能,而对填料和成品的毒性视而不见。因此,开发绿色、无污染的功能性填料是未来环氧树脂复合材料研发的必然趋势。

3 环氧树脂复合材料研究展望

科技的发展、工业的进步必然催生许多新兴行业的崛起,这些行业的出现为环氧树脂复合材料拓宽了市场,同时也为环氧树脂复合材料的研发提出了更高的要求。目前高功能、多元化是环氧树脂材料的发展趋势和研究热点,然而在追求高性能的同时更需要考虑产品对环境的影响。当前,研究人员开发的许多环氧树脂复合材料只能在室内条件下才能取得较好的效果,在环境比较复杂的室外很难得到较好、较持久的效果。另外社会的进步对环氧树脂复合材料的制备工艺也提出了更高的要求,绿色、低能耗的制备过程以及健康、无污染的制备原料都是未来的研究方向。

参考文献:

[1] 王伟. 环氧树脂固化技术及其固化剂研究进展[J]. 热固性树脂,2001,16(3):29-33.

[2] 钱军民,李旭祥. 环氧树脂改性研究进展[J]. 绝缘材料,2001,29(5):27-31.

[3] 徐宇亮,杨元龙,于方. 一种新型环氧灌浆材料的制备及性能研究[J]. 中国建筑防水,2014(4):12-15.

- [4] 王冬,方绪顺,石明建,等. 混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料的研究[J]. 新型建筑材料,2015,42(7): 69-72.
- [5] SHAMSUDDOHA M, ISLAM M M, ARAVINTHAN T, et al. Characterisation of mechanical and thermal properties of epoxy grouts for composite repair of steel pipelines[J]. Materials & Design, 2013,52(24):315-327.
- [6] IRSHIDAT M R, AL-SALEH M H, ALMASHAGBEH H. Effect of carbon nanotubes on strengthening of RC beams retrofitted with carbon fiber/epoxy composites[J]. Materials & Design, 2016,89:225-234.
- [7] LI Y. Microemulsion of epoxy resin grout and application of water-proofing[J]. New Chemical Materials, 2013,41(8):176-178.
- [8] 杨富民,刘志,马荣田,等. 聚氨酯改性环氧树脂的制备方法及基于该树脂的灌浆材料:CN201410505358. X[P]. 2015-01-14.
- [9] 于腾,李悦. 改性环氧树脂灌浆材料的研究进展[J]. 建材世界,2014(6):11-14.
- [10] 孙亮,苏迎春,李珍,等. 关于绿色灌浆技术和化学灌浆环保体系构建的思考[J]. 中国建筑防水,2016(20):6-9.
- [11] 赵志超,袁才登,徐涛,等. 环保型环氧树脂涂料[J]. 热固性树脂,2005,20(6):32-35.
- [12] WAN K, LI C, XING C, et al. Enhanced anticorrosion properties of epoxy coatings from Al and Zn based pigments[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2015,31(4):573-580.
- [13] 姜恭俭,贾涛芳,刘华武. 连续玄武岩纤维/玄武岩玻璃粉体增强无溶剂环氧涂料的制备[J]. 涂料工业,2016,46(2):28-30.
- [14] 吴艺琛. 有机-无机杂化改性环氧树脂涂料的制备及其在采出水中的性能[D]. 成都:西南石油大学,2015.
- [15] HE X Y, CHEN L, YAN Z C, et al. Preparation of nano-TiO₂ solvent-free epoxy anticorrosive coating[J]. Electroplating & Finishing, 2014,33(2):41-45.
- [16] RAMEZANZADEH B, MOHAMADZADEH MOGHADM M H, SHOHANI N, et al. Effects of highly crystalline and conductive polyaniline/graphene oxide composites on the corrosion protection performance of a zinc-rich epoxy coating[J]. Chemical Engineering Journal, 2017,320:363-375.
- [17] MOSTAFAEI A, NASIRPOURI F. Epoxy/polyaniline-ZnO nanorods hybrid nanocomposite coatings: Synthesis, characterization and corrosion protection performance of conducting paints[J]. Progress in Organic Coatings, 2014,77(1):146-159.
- [18] RAMEZANZADEH B, NIROUMANDRAD S, AHMADI A, et al. Enhancement of barrier and corrosion protection performance of an epoxy coating through wet transfer of amino functionalized graphene oxide[J]. Corrosion Science, 2016, 103:283-304.
- [19] 王和山. 一种耐热阻燃改性环氧树脂涂料:CN201410681536.4[P]. 2015-03-25.
- [20] 郑振荣,张玉双,王红梅,等. 低温固化有机硅耐高温涂层织物的制备[J]. 材料科学与工艺,2015,23(6):52-56.
- [21] 王庆平,王辉,闵凡飞,等. 粉煤灰/环氧树脂涂料的制备及防火性能研究[J]. 涂料工业,2015,45(6):27-30.
- [22] YEW M C, RAMLI SULONG N H, YEW M K, et al. Investigation on solvent-borne intumescent flame-retardant coatings for steel[J]. Materials Research Innovations, 2014,18(S6):384-388.
- [23] JIRASUTSAKUL I, PAOSAWATYANYONG B, BHANTHUMNAVIN W. Aromatic phosphorodiamidate curing agent for epoxy resin coating with flame-retarding properties[J]. Progress in Organic Coatings, 2013,76(12):1738-1746.
- [24] YEBRA D M, KIIL S, DAM-JOHANSEN K. Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2004,50(2):75-104.
- [25] 蔡棋成,舒晓玲,王毛建,等. 流变剂对船舶防污涂料触变性的影响研究[J]. 中国水运,2014,14(10):154-155.
- [26] 杨保平,崔锦峰,张应鹏,等. 环氧改性氟碳纳米复合船舶涂料的研制[J]. 兰州理工大学学报,2005,31(5):67-70.
- [27] 朱一谋,张静,杨椰子,等. 新型自抛光防污涂料的制备与性能测试[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2017,32(1):117-122.
- [28] 刘明光,晏欣,李亮,等. 氧化亚铜对封端聚氨酯/环氧树脂涂料力学和防污性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2015,31(4):57-60.
- [29] MOSTAFAEI A, NASIRPOURI F. Preparation and characterization of a novel conducting nanocomposite blended with epoxy coating for antifouling and antibacterial applications[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2013,10(5):679-694.
- [30] PERES R S, BALDISSERA A F, ARMELIN E, et al. Marine-friendly antifouling coating based on the use of a fatty acid derivative as a pigment[J]. Materials Research, 2014,17(3):720-727.

[31] 马晓洁. 一种石墨烯基抗电磁辐射双组份环氧树脂涂料;CN201610566089.7[P]. 2016-12-07.

[32] 黄益平,冯惠生,梁璐,等. 含碳化硼的吸收和屏蔽中子辐射涂料的研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2011,44(7):639-644.

[33] 张娟,王秋娣,蒋晨,等. 核电厂用耐辐射涂料的制备与性能[J]. 现代涂料与涂装,2012,15(8):32-35.

[34] 胥文军. 防电磁辐射用镀镍铜玻璃纤维的制备与应用研究[D]. 成都:成都理工大学,2015.

[35] ACKALN E, COBAN K, SAYLNTL A. Nanosized hybrid electromagnetic wave absorbing coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2016,98:2-5.

[36] KOWSARI E, MALLAKMOHAMADI M. Electrospun PAN nanofiber process control by ionic liquids and electromagnetic wave absorbing properties[J]. Materials Letters, 2012,79(3):7-10.

[37] 户善文,晏辉. 谈谈石材常用黏粘剂及其使用[J]. 石材,2013(8):15-20.

[38] 杨友龙,尹业高,熊光晶. 环氧树脂胶黏剂涂覆木材的防水性能研究[J]. 建筑材料学报,2013,16(1):170-174.

[39] 赵富贵,邓启刚,宋伟明,等. 用于靶丸装配的胶黏剂荧光性能及相容性研究[J]. 强激光与粒子束,2014,26(2):100-104.

[40] 辛浩波,潘光政,马端人. 聚氨酯/丙烯酸酯/环氧树脂 IPNs 型胶黏剂的制备[J]. 化工科技,2016,24(5):26-30.

[41] GHAZALI H, YE L, ZHANG M Q. Lap shear strength and healing capability of self-healing adhesive containing epoxy/mercaptan microcapsules[C]//Aip Conference. AIP Publishing LLC,2016:794-797.

[42] TUTUNCHI A, KAMALI R, KIANVASH A. Effect of Al₂O₃ nanoparticles on the steel-glass/epoxy composite joint bonded by a two-component structural acrylic adhesive[J]. Soft Materials, 2015,14(1):1-8.

[43] 李晓云,张之圣,曹俊峰. 环氧树脂在电子封装中的应用及发展方向[J]. 电子元件与材料,2003,22(2):36-37.

[44] 巩静,文瀚颖,牟其伍,等. ZnO/MgO/环氧树脂基复合材料对 LED 出光效率的影响[J]. 材料导报,2016,30(8):13-17.

[45] 程艳芳,陈元凯,周颖,等. 固化促进剂对贴片 LED 封装用 EMC 固化行为影响[J]. 现代塑料加工应用,2015,27(1):37-39.

[46] 李良海,葛秋玲,李宗亚. 超支化聚苯基硅树脂改性封装用环氧树脂研究[J]. 电子与封装,2013(7):1-4.

[47] 秦静,张国平,孙蓉,等. 刚性非共平面的环氧树脂体系的制备及性能研究[J]. 高分子学报,2015(4):390-395.

[48] KANG D J, PARK G U, PARK H Y, et al. A robust transparent encapsulation material: Silica nanoparticle-embedded epoxy hybrid nanocomposite[J]. Composites Science and Technology, 2017,144:107-113.

[49] RMILI W, DEFFARGES M P, CHALON F, et al. Dynamic mechanical properties and thermal effect of an epoxy resin composite, encapsulation's element of a new electronic component[J]. Journal of Electronic Materials, 2014,43(3):702-707.

Research Progress on Functional Epoxy Composites

ZHAO Hongtao¹, CHEN Guohua¹, TIAN Mingwei^{1,2}, QU Lijun^{1,2}, ZHU Shifeng^{1,2}

(1. College of Textiles & Clothing, Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China;
2. Collaborative Innovation Center for Marine Biomass Fibers, Materials and Textiles of Shandong Province,
Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China)

Abstract:In this paper, the research and application of epoxy resin in functional composites in recent years are reviewed. The research status of epoxy resin in grouting materials, functional coatings, packaging materials and adhesives is mainly introduced. On this basis, the problems in the research of functional epoxy resin composites are analyzed. And the analysis results are looked forward to the development trend of epoxy resin composites.

Keywords:epoxy resin; functional coatings; composites; packaging materials; adhesive; grouting materials

(责任编辑:李华云)