

综 述

环氧树脂体系功能化研究进展

阮峥, 刘朝辉, 邓智平, 成声月, 叶圣天

(中国人民解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311)

摘要: 简述了环氧树脂的优异性能, 对国内外环氧树脂作为灌浆材料、环氧防辐射材料、金属防腐材料、环氧树脂防火材料、环氧树脂粘结材料和环氧绝缘材料等6种类型的功能化材料研究现状进行了分类总结和详细分析。在此基础上, 指出了目前环氧树脂体系功能化研究存在的问题, 最后展望了未来环氧树脂功能化研究的发展方向。

关键词: 环氧树脂; 功能化; 灌浆材料; 环氧防辐射材料; 金属防腐材料; 环氧树脂防火材料; 环氧树脂粘结材料; 环氧绝缘材料

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.01.011

中图分类号: TJ04; TQ323.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)01-0051-08

Research Progress in Functionalization of Epoxy Resin Systems

RUAN Zheng, LIU Zhao-hui, DENG Zhi-ping, CHENG Sheng-yue, YE Sheng-tian

(Department of Chemistry & Material, PLA Logistic Engineering University, Chongqing 401331, China)

ABSTRACT: A brief introduction of the excellent properties of epoxy resin was provided. The research status of epoxy resin in China and foreign countries with the focus on the six types of functional materials, including epoxy grout, epoxy radiation protection materials, metal anticorrosive materials, anti-fire epoxy resin, epoxy adhesives and epoxy resin insulating materials, was classified, summarized and analyzed in detail. Based on this, the problems existing in the current functional epoxy resin systems were pointed out. Finally, the development trends of functionalization study on epoxy resin were prospected.

KEY WORDS: epoxy resin; functionalization; functional materials; including epoxy grout; epoxy radiation protection materials; metal anticorrosive materials; anti-fire epoxy resin; epoxy adhesives; epoxy resin insulating materials

环氧树脂具耐化学药品性能良好、附着力强、绝缘性优良、耐磨性性强、力学强度高、反应后尺寸稳定和耐辐照性较强等优点^[1-3], 使其在材料粘结、灌浆、绝缘、防火、防腐和防辐射等领域有着广泛的应用。因其优良的性能吸引广大学者和研究人员投入到环氧树脂的应用研究中, 这使得环氧树脂体系朝着功能多元化的方向发展。文中通过对国内外环氧树脂功能化应用研究现状进行分类和详细总结分

析, 为环氧树脂未来功能化发展提供参考。

1 环氧树脂功能化研究分类

1.1 环氧灌浆材料

环氧树脂灌浆材料粘结力强, 固化收缩率低, 机械性能良好, 渗透性强, 在补强灌浆材料中占有

收稿日期: 2014-10-30; 修订日期: 2014-11-09

Received: 2014-10-30; Revised: 2014-11-09

基金项目: 全军后勤科研计划项目(CY112C014)

Fund: Logistics Research Project of PLA(CY112C014)

作者简介: 阮峥(1987—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要研究方向为新型防水材料。

Biography: RUAN Zheng(1987—), Male, from Huanggang, Hubei, Master graduate student, Research focus: new waterproof materials.

通讯作者: 刘朝辉(1965—), 男, 教授, 主要研究方向为防水技术。

Corresponding author: LIU Zhao-hui(1965—), Male, Professor, Research focus: waterproof technology.

重要的地位,广泛地用于修补混凝土裂缝和浇筑设施设备基座^[4-6]。张斌^[7]等利用氨基硅油与环氧树脂E44反应制备出的糠醛丙酮环氧树脂灌浆材料比普通糠醛丙酮环氧树脂灌浆材料在断裂伸长率、韧性和耐热性等方面有很大的提高。王永珍^[8]等制备出潜伏性环氧固化剂,并以环氧树脂E51、固化剂、稀释剂和促进剂为原料,配制出粘结强度高、附着力好的环氧灌浆材料。张维欣^[9]等制备出环保型衣康酸环氧树脂灌浆材料,该灌浆材料固结体机械强度高,水泥块粘结强度超过2.8 MPa,纯聚合体的抗压强度可达102.37 MPa,剪切强度达到22.18 MPa。邱建华^[10]等以环氧树脂E51、刚性固化剂T31和柔性固化剂聚酰胺651混合复配,活性稀释剂501、促进剂和增韧剂为原材料设计制备出环氧灌浆材料。在实验中发现灌浆材料的柔韧性和抗冲击能力随着柔性固化剂聚酰胺651比例增大而得到提高,压缩模量则是降低。其抗拉强度和压缩强度随着促进剂和活性稀释剂的比例增大而增大。杨霞等^[11]发现柔性聚醚胺固化剂D-230和改性腰果酚类固化剂G2复配时制得的环氧灌浆材料具有良好的施工黏度和可操作时间,并且固结体具有较好的柔韧性和力学性能。

范兆荣等^[12]合成了一种含有酚羟基的环氧固化剂,并以该固化剂制备出了一种能在低温潮湿环境中固化的灌浆材料,该灌浆材料具有与潮湿基面粘结强度高、可操作时间长等特点。石红菊等^[13]以环氧树脂和衣康酸反应实现环氧树脂水性化,制得环保型环氧灌浆材料,材料的黏度和纯聚合体压缩强度均比传统的丙烯酰胺、丙烯酸盐等2种灌浆材料高。龙勇^[14]在硕士论文中指出采用有机硅改性的环氧灌浆材料的断裂伸长率、冲击强度、耐湿热和耐老化的性能得到提高。Md Shamsuddoha等^[15]对5种环氧树脂灌浆材料的力学性能和热性能进行了实验分析。研究表明,5种树脂的抗压强度范围为50~120 MPa,模量范围为1.7~11.0 MPa,拉伸强度范围为11~32 MPa,弯曲强度范围为27~53 MPa,剪切强度范围为13~30 MPa,抗拉刚度范围为3~17 GPa,抗弯刚度范围为4~13 GPa。其中2种环氧树脂灌浆材料A和B的玻璃化温度大约为60℃,C、D和E等3种灌浆材料的玻璃化温度在60~90℃之间。通过对树脂的力学性能和热性能的分析,有助于研究人员了解灌浆材料的修复行为。

从环氧树脂灌浆材料的研究现状分析可以看出,研究人员关注于材料的力学性能研究,并以此为

指标来获得性能良好的灌浆材料。相比较而言,国外研制的环氧树脂抗压强度、拉伸强度等机械性能都优于国内。

1.2 环氧防辐射材料

科学技术的发展给人们的生活带来了诸多便利,但高技术产品如手机、笔记本电脑、核工业、核成像、医院核照射检测、核放疗等设备大大增加了人们受到辐射的几率,防辐射研究越来越重要,环氧树脂具有较强的耐辐照性能^[3],是作为环氧防辐射材料的良好基体树脂。黄益平等^[16]用环氧树脂和H-116树脂作为固化体系,用碳化硼作为热中子吸收填料,制得防辐射涂料,通过改变填料在涂料体系中的比例来获得性能优异的涂料。研究发现,当碳化硼的质量分数为30%时,涂料能够获得最佳的总体机械性能,以此填料比例为基础,得到当涂膜厚度超过300 μm时能够屏蔽中子射线的结论。巩晓阳等^[17]针对家用电器电磁波辐射危害,研制出了纳米铁/环氧树脂吸波材料。文献中指出,纳米铁的体积分数达到临界值0.25%时,吸波效率最高。此项研究为该材料用作家用电器防电磁辐射外壳提供了参考价值。

李江苏等^[18]通过⁶⁰Co辐射伽马射线照射的方式研制出聚丙烯酸钐/环氧树脂辐射屏蔽材料,研究表明,照射剂用量在50KGy时,材料力学性能较纯环氧树脂优异。通过对比试验,证明了钐元素防护低能射线的能力比铅元素强,在核电、医学放射场所具有应用价值。陈飞达等^[19]在纤维树脂基中添加碳化硼制得玻璃纤维/B4C/环氧树脂材料。该材料对中子具有良好的屏蔽效果,具有作为核设施防护材料的潜力,研究的内容为优化设计和制备新型中子屏蔽材料提供借鉴。环氧防辐射材料研究现状表明,研究人员主要通过筛选合适的防辐射填料来制备出环氧防辐射材料,而且性能优良。

在研究环氧防辐射材料时,主要以环氧树脂为基体树脂,以不同的防辐射填料来制备出屏蔽性能良好的防辐射材料。

1.3 金属防腐材料

环氧树脂耐化学药品性能好,抗酸碱和油侵蚀能力强,与金属有良好的附着力^[20],适合用于金属防腐。关有俊^[21]等在自制改性环氧树脂中添加锌粉制得环氧富锌防腐底漆,底漆具有良好的防腐性能,并且比国外同类产品的性价比高,具有广阔的

应用前景。谢亦富^[22]等采用向环氧树脂、聚酰胺固化体系中加入配以硅钛防锈增强剂的环保型复合填料的方法研制出环氧防腐防锈涂料,涂料具有优良的防腐性能。邵德龙^[23]等利用复配的环氧树脂为基体,腰果油改性聚酰胺为固化剂,加入磷酸锌复合填料制备出的环氧防腐底漆具有优异的耐腐蚀性能,该漆能在低于5℃的环境下使用,具有良好的低温固化性能,可以用作高铁机车底漆。高新华等^[24]利用自制环氧固化剂和水性环氧树脂作为成膜物,采用无铬填料,研发出适合铝合金使用的防腐涂料。通过性能测试证明了涂料性能优于进口水性环氧底漆,可替代含 Cr^{6+} 水性环氧底漆。张玉忠等^[25]在纳米二氧化硅改性的环氧树脂中添加功能性填料制得的防腐涂料具有良好的防腐性能和机械性能。研究表明,纳米二氧化硅的最佳用量为2%~3%,此时涂膜的柔韧性从30 cm提70 cm,湿附着力增大为原来的3倍。胡群义等^[26]从水性环氧树脂、固化剂、颜填料和助剂等方面研究影响水性工业防腐涂料性能的因素,综合分析筛选出涂料的配方和工艺,并将涂料应用在工程设备中,取得良好的防腐效果。陈永福^[27]等采用水性环氧-胺体系为基料,掺加功能性填料锌粉以及胺硅烷偶联剂制备出水性环氧富锌防腐涂料。涂料中的锌粉含量高达87%,具有很好的防腐性能。涂料用水稀释,无挥发性溶剂,安全环保,可以替代传统的溶剂型环氧富锌防腐涂料。杨小刚等^[28]通过交流阻抗技术,对磷酸锌/云铁灰环氧防腐涂料性能的影响因素进行了综合分析,研究表明,颜填料体积浓度为8%,稀释剂添加量为2%,磷酸锌与云铁灰质量比为4:1时,涂料具有最佳的防腐性能。

M.T. Rodr í guez等^[29]通过电化学测试技术研究增塑剂的添加量对环氧底漆防腐性能的影响,实验表明,增塑剂含量为1.5%~3%时,环氧底漆防腐性能最佳。M.R. Bagherzadeh等^[30]在水性聚酰胺-胺固化剂中添加0.02%的纳米聚苯胺,与DGEBA环氧树脂固化反应制得防腐涂层。对涂层进行耐盐雾和附着力测试实验,结果表明,涂层的防腐性能得到显著提高,在受到腐蚀介质侵蚀后,与钢材依然保持着良好的附着力。Eram Sharmin等^[31]合成丙烯酸改性三聚氰胺树脂,并以此树脂为固化剂,与DGEBA环氧树脂进行固化反应制得涂层。实验中将固化剂控制在10%~40%的范围内,通过标准的测试方法来测试涂层的物理力学性能和防腐性能。研究表明,固化剂的添加量为30%时,涂层具有良好的物

理力学性能和耐腐蚀性能,该涂层体系与聚酰胺环氧树脂涂层体系相比,具有更好的防腐性能。

环氧防腐涂料的研究现状表明,目前研究人员主要通过掺入功能性填料、合成固化剂以及固化剂改性的方式来制得性能良好的防腐涂料^[32-35]。国内外相比较,国外研制的环氧树脂防腐性能比国内优异,制备的环氧防腐材料有更好的防腐性能。

1.4 环氧树脂防火材料

环氧树脂反应固化后耐热性强,用它来配制的防火涂料附着力好、机械强度高。又因环氧树脂防火涂料封闭性极好,能够很好地将阻燃成分封闭在涂层里面,其防火性能基本不受环境和时间的影响^[36]。刘成楼等^[37]以环氧树脂ORE-95与水性胺固化剂751为固化成膜物,添加阻燃成分制备钢结构环氧防火涂层。实验发现,环氧基料的交联度在50%~70%时,涂层具有良好的防火隔热性能,控制涂层厚度为2 mm时,涂层的耐火时间可达94 min。王丹等^[38]在环氧树脂E51固化体系中加入膨胀控制剂和抗白化剂等研制出环氧膨胀型防火涂料,研究表明,抗白化剂能够提高膨胀层的强度,当添加量为14%时,涂料的性能较好;通过改变膨胀控制剂的添加量来影响涂层的防火性能时发现膨胀控制剂的最佳添加量为15%,此时膨胀层致密均匀,韧性较高。该防火涂料与国外同类产品相比,性能相当。赵敏^[39]利用硼酚醛树脂对环氧树脂E51进行改性,以制得的改性环氧树脂为成膜物,加入功能性耐火填料硅酸铝和阻燃协效剂磷酸酯改性胺,研制出饰面型防火涂层。实验以涂层耐燃时间作为评价指标,设计正交试验来研究硅酸铝、磷酸酯改性胺复合物和硼酚醛树脂3个主要因素的最佳用量,取每个因素3个水平的方式进行研究,实验结果表明,硼酚醛树脂对防火涂层防火性能影响最大,磷酸酯改性胺复合物次之,硅酸铝的影响最小。当环氧树脂质量分数为40%,硼酚醛树脂质量分数为25%,硅酸铝质量分数为14%,磷酸酯改性胺复合物质量分数为13%,丁基环氧醚/固化剂的质量分数为8%时,涂层防火性能最佳。此时涂层的耐燃时间达到55 min,附着力等级为1级,耐冲击性达到35 cm,均已达标。

崔锦峰等^[40]合成四溴双酚A溴碳环氧树脂,并以该树脂为主要成膜物制得防火地坪涂料,通过热重分析、红外光谱分析和电镜扫描测试等技术方法对涂料进行微观表征,对影响涂料性能主要因素进行

研究。结果表明,地坪涂料的燃烧极限氧指数为37.5%,符合防火阻燃的要求,涂料无挥发性溶剂,环保安全,能够防硫酸、氢氧化钠等腐蚀,具有优异的耐溶剂性能。Caroline G é rard等^[41]以环氧树脂为基体树脂,添加OMPSS, CNTS和APP等3种阻燃填料来筛选最佳的环氧防火体系,通过对这三种发泡样品燃烧的动态研究,得到最佳的阻燃防火体系组合为环氧树脂95%、APP 4%和OMPSS 1%。

从环氧防火材料的研究方式来看,研究人员主要研究通过改性环氧树脂、添加助剂和添加功能性阻燃填料等方式来制备出性能良好的防火涂料,涂料的性能符合防火要求。

1.5 环氧树脂粘结材料

环氧树脂具有优异的粘接性能,能够将金属和金属,金属和非金属很好地粘接在一起,并且能形成平整的表面,密封性能良好^[42]。李伟信等^[43]采用环氧树脂胶粘剂粘接铝薄片和氧化铝片,利用常温模压的方法研制出氧化铝/铝层复合材料。通过研究环氧树脂与固化剂不同质量比对粘接强度的影响,确定环氧树脂:固化剂为1:0.8,此时粘接剂能够达到最大的粘接强度。复合材料与单一的氧化铝材料相比,有更高的断裂功和断裂韧性。章凯^[44]在研究水性环氧乳液改性砂浆性能时发现,环氧乳液最佳添加量为水泥用量6%~10%,此时砂浆与老砂浆的粘接强度明显提高,与同灰砂的普通砂浆相比,其强度最大可提高73%。李美江^[45]等利用接枝聚合法在双酚F环氧树脂中引入聚甲基苯基硅氧烷,合成有机硅改性环氧树脂。对制得的树脂进行不同条件下的性能测试,研究结果表明,改性的环氧树脂比未改性的环氧树脂有更好地耐高温粘结性能,且当聚甲基苯基硅氧烷与双酚F环氧树脂质量比为1:4时,制得的改性树脂能够作为耐高温粘结剂。蒋伯成^[46]利用聚酰亚胺改性环氧树脂制得耐高温环氧胶粘剂,通过力学性能实验测试、TG和DSC等技术测试手段,确定出胶粘剂最佳配合比,此时胶粘剂的剥离强度为22.5 kN/m,剪切强度最大为27.1 MPa,热分解温度为411℃,力学性能和粘结强度良好。

朱海燕^[47]等利用KY-2055改性剂对环氧树脂E-44改性,研制出改性的环氧树脂比未改性的环氧树脂粘结强度大,并用此树脂来粘结磁粉制得NdFeB磁体。NdFeB磁体的磁性能优于未改性环氧树脂作粘接剂的磁体的磁性能。研究不同制备工艺参数对磁性能的影响,实验发现,控制体系固化温度

为120℃、固化时间为120 min,将模压温度控制为130℃、保压时间为2 min,制备出的磁体具有最佳的磁性能。K.B. Katnam等^[48]制作圆柱体凹槽试件来测试空心微珠改性环氧粘结剂的拉伸性能。实验中通过改变试件的容积率和曲率半径来测试粘接剂的应变力和三轴应力的变化,借助光学显微镜和扫面电镜得手段观察断面形貌来判断失效机理。研究表明,粘接剂的应变率和三轴应力对其拉伸性能产生影响。A. Sturiale等^[49]通过实验发现在环氧-胺粘接体系中加入酚醛树脂能够提高粘接体系的粘接强度。Ramazan Kahraman等^[50]研究了环氧树脂粘接剂的厚度和铝粉含量对铝合金接头力学性能的影响。通过单搭接接头剪切实验和有限元分析发现,粘接强度随粘接剂的厚度增加而下降,环氧粘接剂中铝粉最高质量分数可达50%。

从研究现状来看,研究人员主要是通过对环氧树脂进行改性和添加一些功能性填料的方式制备粘结材料,并探索出了合适的工艺。相比较而言,国外研制的环氧树脂有更好的粘接强度,使填料与基材结合更加紧密。

1.6 环氧绝缘材料

环氧树脂具有优异的绝缘性能,其力学性能好,广泛用于电气绝缘领域^[51]。汤俊萍等^[52]在环氧树脂中添加水合氧化铝制得真空绝缘子材料,通过表面电阻率测试实验,可以看出环氧树脂表面电阻率从约 $10^{16}\Omega$ 降至约 $10^{11}\Omega$,有利于减少沿面闪络过程中残余电荷的积累。真空脉冲电压下的沿面闪络性能实验表明,添加适量水合氧化铝的环氧树脂的沿面闪络强度高于纯环氧树脂。杨志强^[53]等以CCL作为纳米SiO₂的分散介质,将纳米SiO₂均匀地分散在环氧树脂中研制出高压绝缘材料。对复合绝缘材料进行力学性能和电性能测试,结果表明,纳米SiO₂的加入既对环氧树脂起到增韧作用又没有损害材料的电性能,同时还提高了材料的力学性能。徐任信^[54]等研究了加入短切碳纤维的AlN/环氧树脂复合绝缘导热材料的电、热以及力学性能。实验将AlN陶瓷的体积分数固定在50%,将短切碳纤维的体积分数从0开始,以0.3%等间距增大到1.8%,测试绝缘材料的热导率、表面电阻率、体积电阻率、弯曲强度以及弯曲模量的变化。研究结果表明,绝缘导热材料的热导率提高了27%,表面电阻率为 $10^{10}\Omega$,体积电阻率为 10^{12} ,弯曲强度增大14%,弯曲模量增大13%,符合绝缘要求。

黄翠华等^[55]研究了环氧树脂、固化剂、硅微粉三

者间不同的对比对绝缘材料性能的影响,通过对环氧复合绝缘材料的固化时间、流动性、弯曲强度以及电气强度等性能的测试,确定出环氧树脂、固化剂和硅微粉三者间的最佳配合比为1:1:4,此时环氧复合绝缘材料具有最佳的综合性能。Chu Xinxin等^[56]在环氧树脂中添加钨酸锆研制出低热膨胀环氧树脂,研究表明,钨酸锆添加到树脂中能够显著降低材料的热膨胀系数。该材料可以作为超导馈线系统的绝缘子。

从研究现状得知,可以通过添加不同的绝缘填料等方式来制备出绝缘性能好的绝缘材料,并且材料具有良好的力学性能。

2 环氧树脂优点以及功能化研究总结

环氧树脂具有优良的特性以及广泛的应用,通过对环氧树脂的优点以及其功能化研究现状进行细致的分析,总结其性能优点与功能化研究如图1所示。

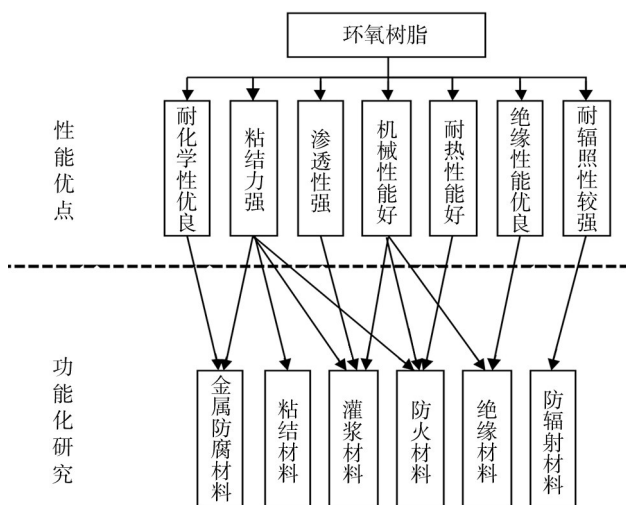


图1 环氧树脂体系功能化研究

Fig.1 Graph for research on functionalization of epoxy resin systems

3 环氧树脂功能化研究存在的问题

1) 目前环氧树脂功能化应用研究方面着重于实验探索研究,通过不同的实验方案来筛选和优化合理的原料配方,从而制备出所需的材料。探索实验的过程漫长而且耗费较多的时间、精力和材料,对于实验的结果也无法预料。计算机仿真技术可以对实验情况进行模拟,能够大致预测出实验效果,节约资源和时间。

2) 国产环氧树脂在产品性能方面和国外树脂

相比还存在一定的差距,比如在力学性能、耐化学性能和粘接强度等方面,并且树脂的种类较为单一,需要加大投资研发力度以提高树脂的质量,开发出性能优异,种类各异的树脂。

3) 不同种类的环氧树脂需要特定类型的固化剂来实现固化,市场上的固化剂种类繁多,通过实验逐一筛选出合适固化剂的成本太高,不经济。应根据不同类型环氧树脂的特点开发出不同种类的固化剂,同一种类的固化剂的性能也应该相近,以提高效率,降低成本。

4) 环氧树脂在实现不同功能化研究应用时往往需要添加功能性填料,但是有的填料则是有毒的重金属,危害健康和污染环境,对此类填料进行无毒改性或开发安全环保的新型填料作为该填料的替代品值得思考。

4 环氧树脂功能化研究发展方向展望

国家建设快速发展,新型行业正在快速崛起,将会出现越来越多的新型领域。这些领域的出现将对环氧树脂的功能多样化提出更高的要求,目前环氧树脂的功能化研究如环氧灌浆材料、环氧防辐射材料、环氧防腐材料、环氧防火材料、环氧粘结材料等主要在实验室标准理想条件下进行的实验,与实际工程应用时的多变的环境条件有一定的差别。实验条件下得到的性能不一定能在材料的实际工作环境中得到充分的发挥,有时甚至不能用到实际的工程应用之中去,在某种程度上使得研究失去意义。今后的研究应该模拟自然环境中复杂多变的环境条件,或者在实际工程中进行实验,以此来使制备的材料能够更好地得到实际应用。此外,环氧树脂固化后涂膜致密,对此可以将其用作为建筑大面积涂层防水、建筑墙面涂层防刮痕和建筑涂层防涂鸦等,使其功能朝着多元化的方向发展。

参考文献:

- [1] 周盾白,周子鹄,贾德民. 环氧地坪涂料的研究及应用进展[J]. 中国涂料,2007,22(10):17—22.
ZHOU Dun-bai, ZHOU Zi-hu, JIA De-min. Research and Application of Epoxy Floor Coatings[J]. China Coatings, 2007, 22(10):17—22.
- [2] 武渊博. 环氧树脂增韧及其阻尼性能的研究[D]. 北京:北京化工大学,2011.
WU Yuan-bo. Research on Toughening Epoxy Resin and its Damping Property[D]. Beijing: Beijing University of Chemi-

- cal Technology, 2011.
- [3] 董宇,戴耀东,常树全,等. WO_3/CeO_2 /环氧树脂基辐射防护材料的制备及性能研究[J]. 材料导报, 2012, 26(z1): 184—205.
- DONG Yu, DAI Yao-dong, CHANG Shu-quan, et al. Preparation of WO_3/CeO_2 /Epoxy Resin Based Multilayer Radiation Shielding Material and Its Property Research[J]. Materials Review, 2012, 26(z1): 184—205.
- [4] 魏涛,汪在芹,韩炜,等. 环氧树脂灌浆材料的种类及其在工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(7): 69—72.
- WEI Tao, WANG Zai-qin, HAN Wei, et al. Category of Epoxy Resin Grouting Materials and Its Application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(7): 69—72.
- [5] 林泽伟. HY型环氧树脂灌浆材料的研制[J]. 福建建设科技, 2005(2): 52—53.
- LIN Ze-wei. Research on the HY-type Epoxy Grout[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2005(2): 52—53.
- [6] 史瑁,梁利岩,何泳生,等. YDS高渗透环氧防水抗渗材料的耐腐蚀研究[J]. 广州化学, 2014, 39(1): 14—18.
- SHI Mao, LIANG Li-yan, HE Yong-sheng, et al. Corrosion Resistance of YDS High Permeable Epoxy Resin[J]. Guangzhou Chemistry, 2014, 39(1): 14—18.
- [7] 张斌,刘伟区. 氨基硅油改性环氧灌浆材料的形态与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(3): 148—151.
- ZHANG Bin, LIU Wei-qu. Study of Morphology and Properties of Amino Group of Polysiloxane Fluid-Modified Epoxy Resin Grouting Materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2003, 19(3): 148—151.
- [8] 王永珍,张亚峰,邝健政,等. 潮湿基面用环氧灌浆材料的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(1): 84—91.
- WANG Yong-zhen, ZHANG Ya-feng, KUANG Jian-zheng, et al. Development of Epoxy Grouting Material for Wet Surfaces and Its Properties[J]. New Building Materials, 2011, 38(1): 84—91.
- [9] 张维欣,张亚峰,邝建政,等. 高强度环保型衣康酸环氧酯树脂灌浆材料的制备[J]. 新型建筑材料, 2007, 34(9): 5—9.
- ZHANG Wei-xin, ZHANG Ya-feng, KUANG Jian-zheng, et al. Preparation of Environmental Protection and High Strength Itaconic Epoxy Ester Resin Grouting Material[J]. New Building Materials, 2007, 34(9): 5—9.
- [10] 邱建华,谢永江,李化建,等. 环氧树脂灌浆材料的制备及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(10): 62—65.
- QIU Jian-hua, XIE Jiang-yong, LI Hua-jian, et al. Research on Preparation and Properties of Epoxy Resin Grouting Material[J]. New Building Material, 2010, 37(10): 62—65.
- [11] 杨霞,富珠峰. 无溶剂柔韧性环氧灌浆材料的研究[J]. 新型建筑材料, 2011(7): 76—78.
- YANG Xia, FU Zhu-feng. Research on Flexible Solvent-free Epoxy Grouting Material[J]. New Building Materials, 2011(7): 76—78.
- [12] 范兆荣,唐元亮,谷亚新,等. 新型环氧树脂灌浆料的研制[J]. 中国胶粘剂, 2014(7): 21—28.
- FAN Zhao-rong, TANG Yuan-liang, GU Ya-xin, et al. Study on Preparing New EP Grouting Material[J]. China Adhesives, 2014(7): 21—28.
- [13] 石红菊,张亚峰,葛家良. 新型水溶性环氧灌浆材料的制备[J]. 化学建材, 2004, 20(6): 42—45.
- SHI Hong-ju, ZHANG Ya-feng, GE Jia-liang. Preparation of Water-Soluble Epoxy Grouting Material[J]. Chemical Materials for Construction, 2004, 20(6): 42—45.
- [14] 龙勇. 有机硅异氰酸酯预聚体改性环氧树脂灌浆材料[D]. 西安:长安大学, 2012.
- LONG Yong. Silicone Isocyanate Prepolymer Modified Epoxy Resin Grouting Material[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [15] MD S, MD M I, THIRU A, et al. Characterisation of Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Grouts for Composite Repair of Steel Pipelines[J]. Materials and Design, 2013, 52: 315—327.
- [16] 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, 2011, 44(7): 639—644.
- HUANG Yi-ping, FENG Hui-sheng, LIANG Lu, et al. Boron Carbide Containing Paint Absorbing and Shielding Neutron Radiation[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(7): 639—644.
- [17] 巩晓阳,董企铭,田保红,等. 纳米铁/环氧树脂复合材料的介电和吸波特性研究[J]. 机械工程材料, 2004, 28(11): 32—48.
- GONG Xiao-yang, DONG Qi-ming, TIAN Bao-hong, et al. Permittivity and Micro Wave-absorption of a Nano-iron Epoxy Resin-based Composite Material[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2004, 28(11): 32—48.
- [18] 李江苏,戴耀东,张瑜,等. 聚丙烯酸钐/环氧树脂辐射防护材料的制备工艺及性能[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(1): 117—123.
- LI Jiang-su, DAI Yao-dong, ZHANG Yu, et al. Preparation and Property of Polyacrylic Acid Samarium/Epoxy Resin Composite Material for Radiation-Protection[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(1): 117—123.
- [19] 陈飞达,汤晓斌,王鹏,等. 新型纤维增强环氧树脂基复合材料研制及其中子屏蔽性能研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(z1): 703—707.
- CHEN Fei-da, TANG Xiao-bin, WANG Peng, et al. Preparation and Neutron Shielding Performance of New Type Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(z1): 703—707.
- [20] 李依璇,邸建军. 环保型环氧树脂防腐涂料的研究进展

- [J]. 涂料技术与文摘, 2013, 34(5): 14—17.
- LIU Yi-xuan, DI Jan-jun. Progress in Environmental Friendly Epoxy Anticorrosive Coatings[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2013, 34(5): 14—17.
- [21] 关有俊, 谭亮, 熊永强. 高锌粉含量的单组分环氧富锌底漆的研制[J]. 涂料工业, 2011, 41(7): 41—44.
- GUAN You-jun, TAN Liang, XIONG Yong-qiang. Development of One Component Epoxy Zinc —Rich Primer with High Zinc Powder Level[J]. Paint & Coatings Industry, 2011, 41(7): 41—44.
- [22] 谢亦富, 张虎, 李国荣, 等. 防锈增强型无溶剂环氧防腐涂料的研制[J]. 上海涂料, 2013, 51(1): 9—12.
- XIE Yi-fu, ZHANG Hu, LI Guo-rong, et al. Development of Ant-rust Enhanced Non-solvent Epoxy Anticorrosion Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2013, 51(1): 9—12.
- [23] 邵德龙, 冯海兵, 刘志文, 等. 高铁机车专用环氧防腐底漆的制备[J]. 上海涂料, 2013, 51(10): 13—15.
- SHAO De-long, FENG Hai-bing, LIU Zhi-wen, et al. Preparation of Special Epoxy Anticorrosive Primer for High-Speed Railway Locomotive[J]. Shanghai Coatings, 2013, 51(10): 13—15.
- [24] 高新华, 王丹, 王华进, 等. 铝合金用水性无铬防腐底漆的研制[J]. 涂料工业, 2013, 43(1): 63—66.
- GAO Xin-hua, WANG Dan, WANG Hua-jin, et al. Development of Waterborne Epoxy Chromium-free Corrosion Protective Primer for Aluminum Alloy[J]. Paint & Coatings Industry, 2013, 43(1): 63—66.
- [25] 张玉忠, 李静, 刘天琦. 纳米二氧化硅改性环氧防腐底漆的研究[J]. 上海涂料, 2014, 52(4): 13—16.
- ZHANG Yu-zhong, LI Jing, LIU Tian-qi. Study on the Nano-SiO₂ Modified Epoxy Anti-corrosive Primer[J]. Shanghai Coatings, 2014, 52(4): 13—16.
- [26] 胡群义, 张明星. 水性工业防腐涂料的制备研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(2): 75—77.
- HU Qun-yi, ZHANG Ming-xing. Study on Preparation of Waterborne Industrial Anti-corrosion Coatings[J]. New Building Materials, 2010, 37(2): 75—77.
- [27] 陈永福, 钟军, 王琴. 水性环氧富锌防腐涂料的研制[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 90—93.
- CHEN Yong-fu, ZHONG Jun, WANG Qin. Preparation of Water-based Epoxy Zinc-rich Anti-corrosion Coatings[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 90—93.
- [28] 杨小刚, 张婷, 王彝, 等. 磷酸锌/云铁灰环氧涂层防腐性能的研究[J]. 涂料工业, 2011, 41(3): 10—13.
- YANG Xiao-gang, ZHANG Ting, WANG Ben, et al. Study on the Corrosion Resistance of Zinc Phosphate/Micaceous Iron Oxide Gray Epoxy Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2011, 41(3): 10—13.
- [29] RODR GUEZ M T, GRACENEA J J, GARC A S J, et al. Testing the Influence of the Plasticizers Addition on the Anticorrosive Properties of an Epoxy Primer by Means of Electrochemical Techniques[J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 50: 123—131.
- [30] BAGHERZADEH M R, MAHDAVI F, GHASEMI M, et al. Using Nanoemeraldine Salt— polyaniline for Preparation of a New Anticorrosive Water-based Epoxy Coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2010, 68: 319—322.
- [31] ERAM Sharmin, IMO L, ASHRAF S M, et al. Acrylic-melamine Modified DGEBA-epoxy Coatings and Their Anticorrosive Behavior[J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 50: 47—54.
- [32] 胡传波, 郑燕升, 杨世椿, 等. 苯胺均聚物(共聚物)/环氧复合涂层的制备及其防腐性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 158—163.
- HU Chuan-bo, ZHENG Yan-sheng, YANG Shi-chun, et al. Preparation and Anti-corrosive Performance Study of Aniline Homopolymer (Copolymer)/Epoxy Composite Coatings[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 158—163.
- [33] 陈郁栋, 曾志翔, 彭叔森, 等. 苯胺三聚体固化环氧树脂制备防腐涂层及其性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 158—162.
- CHEN Yu-dong, ZENG Zhi-xiang, PENG Shu-sen, et al. Preparation and Properties of Epoxy Resin Anticorrosive Coating Cured by Aniline Trimer[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 158—162.
- [34] 唐囡, 邓静伟, 尹桂来, 等. 聚氨酯增韧环氧富锌涂料的制备及性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 163—168.
- TANG Nan, DENG Jing-wei, YIN Gui-lai, et al. Preparation and Property Investigation of Epoxy Zinc-rich Coating Toughened by Polyurethane[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 163—168.
- [35] 张天才, 张凯, 王永凤, 等. 聚醚胺/酚醛胺-环氧树脂体系的固化动力学研究[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 50—52.
- ZHANG Tian-cai, ZHANG Kai, WANG Yong-feng, et al. Study on the Curing Kinetics of the Polyether Amine /Phenolic Amine with Epoxy Resin[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 50—52.
- [36] 张麓, 王丹, 王华进, 等. 浅谈国内外室外防火涂料的研究进展[J]. 中国涂料, 2008, 23(11): 58—60.
- ZHANG Lu, WANG Dan, WANG Hua-jin. Discussion on Study Progress of Outdoor Fire-retardant Coatings Domestic and Overseas[J]. China Coatings, 2008, 23(11): 58—60.
- [37] 刘成楼, 隗功祥. 钢结构用超薄型水性环氧防火防腐涂料的研制[J]. 上海涂料, 2011, 49(6): 15—19.
- LIU Cheng-lou, HUAI Gong-xiang. Development of Extra-thin Waterborne Epoxy Fire Retardant and Anticorrosive Coatings for Steel Structure[J]. Shanghai Coatings, 2011, 49(6): 15—19.
- [38] 王丹, 张晖, 王华进, 等. 户外耐烃类火灾无溶剂环氧膨胀型防火涂料的制备及性能研究[J]. 涂料工业, 2010, 40(9): 41—45.
- WANG Dan, ZHANG Hui, WANG Hua-jin, et al. Preparation and Performance of Solvent Free Epoxy Based Intumescent Fire Retardant Coatings Against Hydrocarbon Fire

- Outdoors[J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(9): 41—45.
- [39] 赵敏. 硼酚醛改性环氧树脂饰面型防火涂料的制备[J]. 涂料工业, 2014, 44(6): 20—29.
- ZHAO Min. Preparation of Decorative Fire Retardant Coatings Based on Boron Phenolic Modified Epoxy Resin[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(6): 20—29.
- [40] 崔锦峰, 杨保平, 郭军红. 溴碳环氧无溶剂防火防腐地坪涂料的研制[J]. 涂料工业, 2010, 40(7): 5—9.
- CUI Jin-feng, YANG Bao-ping, GUO Jun-hong. Development of Bromine Carbon Epoxy Solvent-Free Flame Retardant Anticorrosion Flooring Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2010, 40(7): 5—9.
- [41] CAROLINE G, GA LLE F, S VERINE B. Reaction to Fire of an Intumescent Epoxy Resin; Protection Mechanisms and Synergy[J]. Polymer Degradation and Stability, 2012, 97: 1366—1386.
- [42] 王莉, 侯燕燕. 浅谈环氧树脂胶粘剂的发展前景[J]. 中国化工贸易, 2012(5): 211.
- WANG Li, HOU Yan-yan. Development Prospects of Epoxy Adhesive[J]. China Chemical Trade, 2012(50): 211.
- [43] 李伟信, 陆颖, 谢明贵. 环氧树脂胶粘剂粘结的 Al₂O₃/Al 层状复合材料[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 117—122.
- LI Wei-xin, LU Ying, XIE Ming-gui. Laminated Al₂O₃/Al Composites Bonded by Epoxy Resin Adhesive[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(2): 117—122.
- [44] 章凯. 环氧树脂乳液改性水泥砂浆性能与结构[J]. 新型建筑材料, 2012, 39(12): 40—46.
- ZHANG Kai. Properties and Structure of Cement Mortar Modified with Epoxy Emulsion[J]. New Building Materials, 2012, 39(12): 40—46.
- [45] 李美江, 吴明军, 吴艳金, 等. 聚甲基苯基硅氧烷改性双酚 F 环氧树脂及其粘接性能的研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2012, 11(2): 118—121.
- LI Mei-jiang, WU Ming-jun, WU Yan-jin. Study on the Synthesis and Adhesive Properties of Polymethylphenylsiloxanes Modified Bisphenol-F Epoxy Resins[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Sciences Edition), 2012, 11(2): 118—121.
- [46] 蒋伯成, 孔德忠, 刘丹, 等. 聚酰亚胺改性环氧树脂胶黏剂的研究[J]. 化学与黏合, 2010, 32(2): 13—15.
- JIANG Bo-cheng, KONG De-zhong, LIU Dan. Study on the Epoxy Resin Adhesive Modified by Polyimide[J]. Chemistry and Adhesion, 2010, 32(2): 13—15.
- [47] 朱海燕, 张敏刚. 改性环氧树脂对粘结 NdFeB 磁体性能的研究[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(3): 211—215.
- ZHU Hai-yan, ZHANG Min-gang. Investigation on the Bonded NdFeB Magnets Made by Using Modified Epoxy Resin[J]. Materials Research and Application, 2010, 4(3): 211—215.
- [48] KATNAM K B, COMER A J, STANLEY W F, et al. Investigating Tensile Behaviour of Toughened Epoxy Paste Adhesives Using Circumferentially Notched Cylindrical Bulk Specimens[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012, 37: 3—10.
- [49] STURIALE A, V ZQUEZ A, CISILINO A, et al. Enhancement of the Adhesive Joint Strength of the Epoxy-amine System Via the Addition of a Resole-type Phenolic Resin[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2007, 27: 156—164.
- [50] RAMAZAN K, MEHMET S, BEKIR Y. Influence of Adhesive Thickness and Filler Content on the Mechanical Performance of Aluminum Singlelap Joints Bonded with Aluminum Powder Filled Epoxy Adhesive[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205: 183—189.
- [51] 高宇. 高海拔和磁场环境下环氧树脂的绝缘破坏[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- GAO Yu. Dielectric Breakdown of Epoxy Resin under Low Pressure and Magnetic Field[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [52] 汤俊萍, 张磊, 邱爱慈, 等. 环氧树脂基真空绝缘材料的制备和性能测试[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 505—508.
- TANG Jun-ping, ZHANG Lei, QIU Ai-ci, et al. Development and Test of Epoxy Composite for Vacuum Insulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3): 505—508.
- [53] 杨志强, 郝留成, 李小红, 等. 可分散性纳米二氧化硅改性高压绝缘用环氧树脂的研究[J]. 绝缘材料, 2006, 39(1): 7—10.
- YANG Zhi-qiang, HAO Liu-cheng, LI Xiao-hong. Study on Nano Silica Modifying Epoxy Resins for High-voltage Insulation[J]. Insulating Materials, 2006, 39(1): 7—10.
- [54] 徐任信, 单云刚, 鲁学林, 等. 短切碳纤维/AlN/环氧树脂绝缘导热复合材料性能研究[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 33—36.
- XU Ren-xin, SHAN Yun-gang, LU Xue-lin. Study on Properties of Insulating and Thermal-conducting Short Carbon Fiber/AlN/Epoxy Composite[J]. Insulating Materials, 2008, 41(3): 33—36.
- [55] 黄翠华, 肖汉宁, 陈宪宏, 等. 自动压力凝胶用环氧复合绝缘材料的组成对性能的影响[J]. 绝缘材料, 2005, 38(2): 36—38.
- HUANG Cui-hua, XIAO Han-ning, CHEN Xian-hong, et al. Effects of Composition on the Properties of Epoxy Insulating Composites[J]. Insulating Materials, 2005, 38(2): 36—38.
- [56] CHU Xin-xin, WU Zhi-xiong, HUANG Chuan-jun, et al. ZrW₂O₈-doped Epoxy as Low Thermal Expansion Insulating Materials for Superconducting Feeder System[J]. Cryogenics, 2012, 52: 638—641.