

附件

一、项目名称

热交联超支化聚合物合成及风电绝缘应用的关键技术

二、提名单位意见

国家民族事务委员会的提名意见：

认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认提名材料真实有效，完成人符合提名资格，相关栏目填写格式规范。

风电产业是国家可持续绿色健康发展的基础产业，耐高温绝缘树脂是保证风力发电机长期稳定运行的关键材料，然而其合成技术被欧美国家长期垄断，使得我国完全依赖进口，严重制约了我国风电行业的健康发展。高端专用树脂的合成一直是行业关注的重点，特别是风力发电机用的耐高温绝缘树脂合成更是迫切需要攻克的技术难题。在国家火炬计划和国家自然科学基金等项目支持下，中南民族大学、苏州太湖电工新材料股份有限公司和中车永济电机有限公司联合开展热交联超支化聚合物合成及风电绝缘应用的关键技术攻关，解决了绝缘树脂粘度大和环境污染严重等难题，建成了我国具有自主知识产权的耐高温绝缘树脂生产线，突破了风电绝缘树脂被国外垄断的局面，推动了产品国产化进程和促进了我国风电行业快速发展，对国内风电绝缘具有引领和示范作用。成果已在中车永济等风电企业应用，三年新增产值约 82.29 亿元，新增利润 9.02 亿元，取得了显著的经济、社会和生态效益。成果获授权国家发明专利 26 项。起草国家和行业标准 22 项，4 项产品列为国家火炬计划产业化示范项目，4 项产品通过美国 UL 认证，3 项产品通过 CTI 环保检测，10 项产品被列为江苏省高新技术产品。发表 SCI 和 EI 收录论文 37 篇，主编专著 1 部。获湖北省技术发明一等奖、中国石油和化学工业联合会科学技术奖技术发明一等奖，整体技术处于国际先进水平。

对照国家科技奖授奖条件，该项目符合国家技术发明奖提名条件。

三、项目简介

风电产业是国家可持续绿色健康发展的基础产业，也是国家规划发展的重要内容，我国风电累计装机容量从 2008 年的 6.1GW 增加到 2017 年的 188GW，年增长速度稳居世界第一。耐高温绝缘树脂是保证风力发电机长期稳定运行的关键材料，然而其合成技术被欧美国际巨头长期垄断，使我国完全依赖进口，严重制约了我国风电行业的健康发展。耐高温环保高端专用树脂的合成一直是行业关注的重点，特别是风力发电机用的耐高温绝缘树脂合成更是迫切需要攻克的技术难题。在国家火炬计划和国家自然科学基金等支持下，围绕我国风电大功率化的重大战略需求，经多年的研发和生产实践，取得了具有自主知识产权的风电用耐高温无溶剂绝缘树脂的合成技术，主要发明如下：

1、基于“不饱和双键和环氧基团具有热固性”原理，发明了风电绝缘用球形结构的低粘度超支化不饱和聚酯和低粘度硅骨架超支化环氧树脂，解决了传统线形树脂易缠结、粘度大、浸渍性能差、耐热和机械性能差等技术难题，发明了高分子量、低粘度和低挥发热固性超支化聚合物合成的关键技术和实现了产业化。该发明突破了国外的技术封锁，对低粘度树脂的设计合成提供了理论指导，对不饱和树脂和环氧树脂及下游产业无溶剂的环保化应用具有重要意义。

2、基于“咪唑羧酸盐热分解既产生促进固化的咪唑基又产出固化环氧树脂的羧基”原理,发明了风电用具有促进和固化双功能的端咪唑羧酸盐超支化聚酯潜伏性固化剂及耐高温无溶剂绝缘树脂的关键制备技术,打破了国外对风电用耐高温绝缘树脂制备技术的封锁,解决了传统绝缘树脂粘度大、储存稳定性差、环境污染严重、耐热性低等难题。实现了环氧树脂/固化剂均相稳定储存。建成了具有自主知识产权的风电用耐高温绝缘树脂等绝缘材料的生产线,其有机挥发物含量小于3%、耐热温度大于180℃、电气强度大于31kV/mm和180℃的介电损耗小于5%,产品取代了国外进口,促进了我国风电产业的健康发展。

3、基于“超支化聚合物似球形结构和内部空穴可吸收能量而增韧、表面官能团多可提高交联密度而增强”原理,构建了超支化聚合物的均相原位增强增韧模型,打破了传统线形热固性树脂强度和韧性不能同时提高的固有概念,实现了热固性树脂的均相增强20%以上和增韧1倍以上,为解释和分析增强增韧机理提供理论依据,对设计高韧性、高强度的高性能树脂具有指导意义。

主要成果:该发明获授权国家发明专利26项。起草国家和行业标准22项,4项产品列为国家火炬计划产业化示范项目,4项产品通过美国UL认证,3项产品通过CTI环保检测,10项产品被列为江苏省高新技术产品。发表SCI和EI收录论文37篇,主编专著1部。获湖北省技术发明一等奖、中国石油和化学工业联合会科学技术奖技术发明一等奖。

经济效益:建成了风电用耐高温绝缘树脂生产线。在中车永济、南京汽轮等风电著名企业广泛应用,三年新增产值约82.29亿元,新增利润9.02亿元。

社会效益:该发明技术推动了我国风电绝缘的科技进步和产业升级,起到了引领示范作用,带动了社会就业,促进了经济、社会和生态的协调发展。

四、客观评价

该项目围绕热交联超支化聚合物合成及其在风电绝缘树脂应用的关键技术,在国内同行业中率先开展了自主研发攻关,发明了似球形结构的超支化不饱和聚酯、超支化环氧树脂、潜伏性固化剂及风力发电机用耐高温无溶剂绝缘树脂相关产品及关键技术,构建了超支化聚合物的均相原位增强增韧模型,解决了传统线形不饱和聚酯和线形环氧树脂易缠结、粘度大、流动性差、使用过程中有机溶剂环境污染等难题,取得了一系列重大技术成果,突破国外技术封锁,将我国热固性超支化聚合物和耐高温无溶剂绝缘树脂制备及风电绝缘的应用技术,提升到国际先进水平,并成功实现产业化。获得国家授权发明专利26项,主持和参与制订了18项国家和行业标准,获美国UL认证产品4项,列为国家火炬计划产业化示范项目4项,江苏省高新技术产品10个。对该项目的客观评价如下:

(一) 项目产品的国际认可

该发明技术生产的ET-90改性耐热不饱和聚酯树脂、T-4260电子变压器用绝缘漆、T1168环保型耐高温浸渍树脂和T1180耐高温绝缘树脂四大系列产品都通过了国际权威的美国保险商试验所(UL)认证(E228349)(见附件2.6)。产品通过了CTI华测环保检测(见附件2.5),符合欧盟RoHS、REACH环保要求,达到国际质量标准,使其成为中车永济、南京汽轮、东方电气、湘潭电机、南阳防爆电机、航天万源、国电联合、ABB、马拉松、施耐德、爱默生等国内外知名企业的重要供应商。

（二）主持和参与制定了国家及行业标准

主持和参与制定了 18 项电气绝缘材料、绝缘结构、旋转电机、电机线圈等产品和性能检测的国家标准、行业标准和机械部标准，其中 11 项为主持单位。

（三）项目产品质量评价

1、发明的 T1168 环保型耐高温浸渍树脂（2011GH030416）、T1149-2 高压电机（VPI）无溶剂浸渍树脂（2010GH030455）、T6646-D 聚酯纤维非织布低阻上胶纸（2012GH030434）和 T-4260 电子变压器用绝缘漆（2013GH030334）是国家火炬计划产业化示范产品；T1168 等 10 个产品被列为江苏省高新技术产品，技术承接的公司也被评为“国家火炬计划重点高新技术企业”。

2、技术承接的公司产品，“太湖品牌”被中国电器工业协会评为“中国电器工业最具影响力品牌”。

3、ET-90 改性耐热不饱和聚酯树脂、T1168 环保型耐高温浸渍树脂和 T-4260 电子变压器用绝缘漆的环保性均通过国际认证机构（CTI 华测检测）认证。

4、本发明技术涉及的 ET-90 改性耐热不饱和聚酯树脂、T1168 和 T1168H 环保型耐高温浸渍树脂、T-4260 电子变压器用绝缘漆、T1149-2 高压电机（VPI）无溶剂浸渍树脂和 T1180 耐高温绝缘树脂的质量均通过国际实验室认可合作组织（ILAC-MRA）、CMA 和 CNAS 的测试。

（四）国际查新报告结果

委托武汉科学技术情报研究所查新检索中心对该项目集成技术进行国际查新，所检国内外文献中，除委托单位申请的专利外，未见与委托课题的查新要点相同的文献报道。

（五）文献评价

发明内容的技术关键之一是基于硅氢加成反应非均相合成硅骨架超支化环氧树脂，得到了意大利 Istituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati 的科学家 Pagliaro Mario (Euro. J. Org. Chem.2013, 28:6227) 的正面评论：“Again, not only was a hyperbranched silicone resin obtained in high yield (90 %), ... Considerably less solvent was needed than in the homogeneous process, suggesting future use of this heterogeneous syntheses on a large scale”（硅骨架超支化环氧树脂的产率可达 90%，使用少量溶剂，可望在非均相合成领域大规模使用，其引用文献 47-48 为我们所发表的论文）。

构建的超支化聚合物的原位增强增韧模型被著名科学家引用，在超支化聚磷酸酯、超支化不饱和聚酯以及其他课题组研究的超支化聚合物等多种体系均证实了这种模型，模型被邀请写入英文专著《Micro and Nanostructured Epoxy/Rubber Blends》，世界著名高分子科学家德国 Leibniz Institute of Polymer Research Dresden 的 Voit Brigitte 课题组、西班牙科学家 Fernández-Francos (Polymer,2012,53:5232)、美国 Northwestern University 的 Farha Omar K.(Ind. Eng. Chem. Res, 2015,54:922)、波兰 Rokicki Gabriel (Polymer, 2008,49:3168)、颜德岳 院士、蹇锡高院士、国家杰青高超等国内外科学家广泛应用来解释超支化聚

合物增强增韧效果。Voit Brigitte 在 ACS Appl. Mater. Interfaces (2013, 5:10027) 评论我们的工作: “recently hyperbranched epoxy resins …… received significant attention because of their added advantages like low solution and melt viscosity, high solubility, and high reactivity” (低粘度、高溶解能力和高反应活性的超支化环氧树脂引起了科学家的极大研究兴趣, 其中引用文献 11 为我们所发表的论文), 颜德岳院士在 Chem. Soc. Rev. (2015, 44:3942) 文中评论我们的工作: “Zhang et al. prepared a series of HBPPs with DBs over 0.87 from the polycondensation… , and examined their thermal degradation properties” (张道洪等制备了一些列支化度高达 0.87 的超支化聚合物, 其中引用文献 32 为我们所发表的论文)。高超在 Chem. Soc. Rev. (2015, 44:4091) 评论我们的工作: “With the increasing content of HPPA (from 0 to 20 wt%), the limiting oxygen index (LOI) values decreased from 27.0 to 34.0 …… With a large free volume, epoxy-functional HPs have been exploited as modifiers to develop the toughness” (HPPA 可以提高氧指数至 34%, 超支化环氧树脂可作为增韧改性剂, 其中引用文献 487、501 和 512 为我们所发表的论文)。(见附件 2.8)。

五、推广应用情况

自 2008 年以来。经过一系列难题的技术攻关, 发明了热固性超支化聚合物合成技术、风电用耐高温无溶剂绝缘树脂制备及风电绝缘的应用技术并实现产业化, 产品已在中车永济、南京汽轮、东方电气、湘潭电机、长风新能源、哈尔滨电气、江西特种电机、嘉善和园化工、源麦(上海)实业有限公司等我国著名风力发电机和工程塑料制造企业广泛应用(见附件 1.1 和 1.4)。其中风电耐高温无溶剂绝缘树脂, 自 2009 年应用于中车永济电机有限公司的 YJ127 型 1.5MW、YJ163 型 2.5WM 和 YJ253 型 2.0MW 风力发电机的绝缘处理累计约 15000 台。其中近三年累计生产 4539 台, 新增产值 75.5 亿元, 新增利润 7.98 亿元。耐高温无溶剂绝缘树脂、云母带、柔软复合材料在苏州太湖电工新材料股份有限公司产业化, 近三年累计新增产值 6.77 亿元, 新增利润 1.03 亿元。取得了显著的经济、社会和生态效益, 突破了国外的技术封锁, 推动了我国风电绝缘行业的技术进步和产业升级。取得了显著的经济、社会和生态效益, 突破了国外的技术封锁, 推动了我国风电绝缘行业的技术进步和产业升级。

六、主要知识产权和标准规范等目录

知识产权类别	知识产权具体名称	授权号	授权日期	权利人	发明人	发明专利有效状态
中国发明专利	一种硅骨架超支化环氧树脂及其制备方法	ZL201010224451.5	20111130	中南民族大学	张道洪,火文君,王晶,李廷成,周继亮,李琳,张爱清,李金林	有效
中国发明专利	硅骨架超支化环氧树脂及制备方法和以其组成的耐高温无溶剂绝缘漆	ZL200910062871.5	20101229	中南民族大学	张道洪,王晶,周继亮,张爱清,李廷成,吕康乐	有效
中国发明专利	一种无溶剂绝缘漆	ZL200910025139.0	20110504	苏州太湖电工新材料股份有限公司(原吴江市太湖绝缘材料厂)、中南民族大学	张道洪,施泉荣,施文磊,周继亮,张春琪,井丰喜,徐晓峰,许坤	有效
中国发明专利	一种功能型超支化聚合物固载铂催化剂及其制法和应用	ZL201010224428.6	20120530	中南民族大学	张道洪,王晶,火文君,周继亮,李琳,张爱清,李金林	有效
中国发明专利	一种潜伏性超支化聚合物固化剂及其制备方法	ZL201310047242.1	20150617	中南民族大学	张俊珩,张道洪,周继亮,张爱清	有效
中国发明专利	一种无溶剂绝缘漆及其制备方法	ZL200910115595.4	20110810	苏州太湖电工新材料股份有限公司(原吴江市太湖绝缘材料厂)	张道洪,施文磊,王晶,张春琪,张爱清,周继亮,许向阳,井丰喜,李廷成	有效
中国发明专利	一种埃洛石固载铂催化剂及其制备方法和应用	ZL201010224443.0	20120111	中南民族大学	张道洪,王晶,火文君,李廷成,周继亮,李琳,张爱清,李金林	有效
中国发明专利	一种水溶性聚氨酯表面磁漆	ZL200810123111.6	20110316	苏州太湖电工新材料股份有限公司(原吴江市太湖绝缘材料厂)	施文磊,张道洪,张春琪,杨明华,陈春其,包镜俊,徐晓风	有效
中国发明专利	一种含硫超支化环氧树脂及其制备方法	ZL201210566173.0	20121224	中南民族大学	张道洪,胡鹏,高凌,张俊珩,周继亮,张爱清.	有效
中国发明专利	一种无卤阻燃耐高温电机用绝缘漆	ZL201010234600.6	20120125	苏州太湖电工新材料股份有限公司(原吴江市太湖绝缘材料有限公司)	张道洪,施文磊,井丰喜,张春琪,杨明华,徐晓风	有效

七、主要完成人情况

姓名	工作单位	完成单位	参加本项目的起止时间	对本项目技术创造性贡献	曾获国家科技奖励情况	排名
张道洪	中南民族大学	中南民族大学	2006-2015	主持项目研究的整体方案制定与实施，发明了超支化环氧树脂、超支化不饱和聚酯、潜伏性固化促进剂及耐高温无溶剂绝缘树脂的设计与制备技术，提出了超支化聚合物的原位增强增韧机理。	无	1
张俊珩	中南民族大学	中南民族大学	2012-2013	主要负责潜伏性固化剂的设计与合成，发明了咪唑改性端羧基超支化聚酯制备具有促进剂、固化剂双功能潜伏性固化剂及其产业化研究。	无	2
李金林	中南民族大学	中南民族大学	2008-2015	发明了耐高温硅骨架超支化环氧树脂、硅氢加成反应催化剂(埃洛石固载铂和超支化聚合物固载铂催化剂)的设计制备及催化活性研究，指导耐高温无溶剂绝缘树脂的设计制备和参与了工业化的工艺设计。	无	3
施文磊	苏州太湖电工新材料股份有限公司	苏州太湖电工新材料股份有限公司	2006-2015	负责项目技术在苏州太湖电工新材料股份有限公司产业化实施的组织和协调工作，并参与了耐高温无溶剂绝缘树脂、少胶云母带等的发明。	无	4
李宏	中车永济电机有限公司	中车永济电机有限公司	2008-2015	对耐高温无溶剂绝缘树脂在风电定子绝缘处理工艺的系统研究和优化，使其能稳定应用于 1.5MW、2.5MW 永磁直驱风力发电机定子的绝缘处理，达到绝缘和防潮的技术要求，定子整体浸水 1h 后绕组的对地绝缘电阻大于 500MΩ，产品质量同行业第一。	无	5
刘冠芳	中车永济电机有限公司	中车永济电机有限公司	2008-2015	负责将耐高温无溶剂绝缘树脂应用于风电定子绝缘处理工艺及技术的设计和优化，使其能稳定应用于 2MW 及以上双馈风力发电机定子的绝缘处理。	无	6

八、完成人合作关系说明

项目第 1、2 和 3 完成人分别为张道洪、张俊珩和李金林，均来自中南民族大学化学与材料科学学院，均是催化材料科学国家民委-教育部重点实验室骨干成员，自 2006 年以来一起开展超支化环氧树脂、超支化不饱和树脂、超支化聚合物固载铂催化剂、潜伏性固化促进剂和无溶剂绝缘树脂的研究工作，共同获得 2016 年度湖北省技术发明一等奖和 2018 年中国石油和化学工业联合会科学技术奖技术发明一等奖，共同署名获得 7 项国家授权发明专利。项目第 4 完成人施文磊为苏州太湖电工新材料股份有限公司职工，2006 年中南民族大学与苏州太湖电工新材料股份有限公司开展产学研合作并组建校企技术研发中心，张道洪任中心主任。张道洪在 2007-2014 年期间带领施文磊及其他技术人员从事耐高温无溶剂绝缘材料、风电少胶云母带的研发和产业化工作，联合申报并获得 2014 年湖北省科技进步二等奖。张道洪、张俊珩、李金林与施文磊共同署名获得多项国家授权发明专利。项目第 5 和 6 完成人李宏和刘冠芳为中车永济电机有限公司职工，根据 2006 年永济公司提出的兆瓦级风力发电机对绝缘树脂国产化要求，三家单位联合进行“风力发电机用耐高温无溶剂绝缘树脂的产业化”的研发，李宏和刘冠芳负责组织实施并研究

绝缘树脂应用于风力发电机绝缘处理的浸渍工艺、烘培工艺、工艺调控等技术，共同获得 2018 年中国石油和化学工业联合会科学技术奖技术发明一等奖。