

# 石墨烯建筑材料的研究应用现状及前景展望

□文/付 饶

**【摘要】**:将石墨烯或氧化石墨烯应用于建筑材料的研究越来越细致、深入且已有技术成功应用。文章综述了石墨烯改性环氧树脂、石墨烯改性沥青、石墨烯改性涂料、石墨烯陶瓷复合材料、石墨烯玻璃、石墨烯混凝土等建筑材料的研究现状,从建筑行业对建筑材料的要求入手,展望了石墨烯复合建筑材料的应用前景。

**【关键词】**:石墨烯;建筑材料;改性环氧树脂;改性沥青;改性涂料;复合材料;玻璃;混凝土;陶瓷

自2004年诺贝尔物理学奖获得者安德烈盖姆(Andre Geim)和康斯坦丁诺沃肖洛夫(Konstantin)首次利用胶带剥离方法从石墨中分离出了 $SP^2$ 杂化石墨烯以来<sup>[1]</sup>,全世界已有80多个国家和地区不断加大石墨烯的研发支持力度,“中国制造2025”出台了石墨烯产业技术路线图<sup>[2]</sup>。石墨烯由单层C原子通过共价 $\sigma$ 键、 $\pi$ 键形成具有规则六方对称的理想二维晶体<sup>[3]</sup>,C原子间以 $SP^2$ 杂化方式紧密连接,

C-C键长约0.142 nm,是目前世界上发现最薄的层状材料,厚度是头发丝直径的二十万分之一,约为0.335 nm<sup>[4]</sup>;具有导热率5 000 W/(m·K)或5 000 J/(m·K·s)的热学性能,室温下电荷迁移率15 000  $cm^2/(V\cdot s)$ 、载流子迁移率达到 $2 \times 10^5 cm^2/(V\cdot s)$ 的电学性能<sup>[1,5]</sup>,透明度约为97.7%的光学性能<sup>[6]</sup>,理论上比表面积2 630  $m^2/g$ 和透明度约为97.7%的光学性能<sup>[1]</sup>,单层原子厚度具有1.02 TPa的杨氏模量和130 GPa抗拉强度的力学性能<sup>[7]</sup>;具有狄拉克-费米子特性、奇异的量子霍尔效应、量子霍尔铁磁性和零载流子浓度极限下的最小量子电导率<sup>[8-9]</sup>。韩同伟等<sup>[9]</sup>综述了石墨烯力学性能的试验测试、数值模拟和理论分析方法,提出了在电子元器件领域的应用前景;贾树明等<sup>[10]</sup>利用Matlab仿真模拟了石墨烯/P-CdTe肖特基结柔性薄膜太阳能电池的光电特性,表明石墨烯可替代传统的氧化铟锡(ITO)电极制备柔性薄膜太阳能电池;刘姝等<sup>[11]</sup>综述了近年来国内

外石墨烯掺杂铁酸盐光催化剂在光降解有机污染物方面的应用情况,石墨烯铁酸盐复合材料具有传统非均相光催化材料所不具有的诸多优势;肖蓝等<sup>[12]</sup>评价了各种石墨烯及其复合材料在污水处理中的应用效果,氧化石墨烯对处理含有金属离子和带正电荷的染料废水均具有良好的效果;国家国防科技工业局对重大国防颠覆性技术进行定量分析认为,未来可应用石墨烯材料制成长达数万米的“太空电梯”缆绳,石墨烯在超新型火箭、碳纤维飞行器外壳、固体推进剂等领域也有重要应用<sup>[13-14]</sup>;尹伟红等<sup>[15]</sup>综述了石墨烯在光电探测器、调制器以及超快锁模激光器和用于发光二极管、触摸屏透明导电薄膜等方面的应用情况;詹斌<sup>[16]</sup>从宏观、微观相结合的角度建立了纳米复合材料的变形本构模型,在传统的碳纳米材料中加入了石墨烯,材料的屈服强度提高约一倍;石墨烯衍生物石墨烯量子点,相比高维度石墨烯具有良好的生物相容性,较低的细胞毒性及较好的化学修饰性,近几年在生物医学的生物成像、生物传感器、药物运输、基因载体、抗菌抗病毒及肿瘤的光动力治疗等方面有了长足的研究进展<sup>[17]</sup>;在磷酸铁锂中添加质量分数2%的石墨烯后,磷酸铁锂的倍率性能和循环性能都得到明显提高,提升了磷酸铁锂正极材料电化学性能<sup>[18]</sup>;三维石墨烯的电化学传感器对葡萄糖、 $H_2O_2$ 、病毒、DNA以及多种生物小分子的检测都表现出高灵敏度和低检测限<sup>[19]</sup>;目前,国内外在

石墨烯场量子隧穿效应场电子发射、石墨烯/石墨烯基场发射阴极、场发射阴极结构以及场发射阴极的制备方法等方面都已获得重大突破<sup>[20]</sup>;进入21世纪,英国、德国、俄罗斯、中国、日本、韩国、印度、澳大利亚等先后制定了将石墨烯应用于纳米机器人的研究计划<sup>[21]</sup>;石墨烯FET免疫传感器具有不需标记、耗时短、反应灵敏度高、选择性好等独特性质,适用于医学检验领域生物分子检测,已引起医学研究人员的高度重视<sup>[22]</sup>;石墨烯的电学性能也引发了纳米发电机研究人员的关注<sup>[23]</sup>;基于石墨烯材料的气体传感器<sup>[24]</sup>,在室温下可以检测到 $10^{-9}$ 量级的 $\text{NO}_2$ 气体,甚至是单个气体分子,具有超高的灵敏度;与电信号相比,光信号具有数据容量大、传输速度快、不受电磁场干扰等优点,石墨烯零带隙,线性色散的能带结构、超高的载流子迁移速率以及电控可调的费米能级,使石墨烯成为一种极具应用前景的光信号处理材料<sup>[25]</sup>。黄华栋等<sup>[26]</sup>研究的石墨烯对氧化铝胶黏陶瓷涂层摩擦行为表明,胶黏陶瓷涂层加入质量分数1%石墨烯,磨损量降低76%。2013年7月8日,美国莱斯大学的研究人员用氧化石墨烯薄片为基本原材料,“纺织”出了强韧的碳纤维,可用于制作防弹衣面料<sup>[27]</sup>。2018年3月1日,我国首条全自动量产石墨烯OPV(在弱光下发电的石墨烯有机太阳能电池)生产线面世<sup>[28]</sup>,让“没有电池的遥控器正常使用、未插电的电扇风力依旧强劲”变成了现实,使石墨烯有机光电转换组件汽车领域的应用成为可能。也在2018年,世界首条石墨烯复合橡胶改性沥青路面应用在广西南宁大桥,率先实现石墨烯在路桥高等级公路的商业化应用,打通了石墨烯产业从石墨烯宏量制备到规模化应用的产业链条,为石墨烯产业发展指明了新方向<sup>[29]</sup>。近年来,建筑行业的学者已对石墨烯在建筑业防水、混凝土、涂料等领域进行了深入研究,随着石墨烯应用研究的深入,其在建筑行业有着光明的前景。

## 1 研究应用现状

### 1.1 石墨烯改性环氧树脂

建筑密封和防水常用热固性环氧树脂作基体,采用柔性、共混改性环氧树脂提高其韧性已得到国内外学者的认可;Bortz D R等<sup>[30]</sup>用质量分数 $<1\%$ 的氧化石墨烯改性环氧树脂产生的银纹歧化和分散,可显著提高其疲劳周期和断裂强度;Rafiee M A等<sup>[31]</sup>用0.125%的功能化石墨烯对环氧树脂改性后,其增韧、增强力学

性能得到极大的改善;Zaman I等<sup>[32]</sup>用自制的功能化石墨烯改性环氧树脂,其压缩强度提高了48.3%,韧性提高了1185.2%;刘凤丹<sup>[33]</sup>利用含有酰胺键、醚胺键的改性氧化石墨烯对环氧树脂进行固化后,其拉伸抗剪强度、抗冲击剥离能力、抗压强度、抗拉强度等力学性能均有明显改善。王凯等<sup>[34]</sup>研究用0.7%的多孔石墨烯气凝胶在真空中浇筑环氧树脂,浸渍形成的复合材料,断裂韧 $1.64 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,断裂能值1143.6,SEM断面扫描电镜分析表明,材料裂纹的表面能和塑性变形能显著增加。见图1和图2。

### 1.2 石墨烯改性沥青

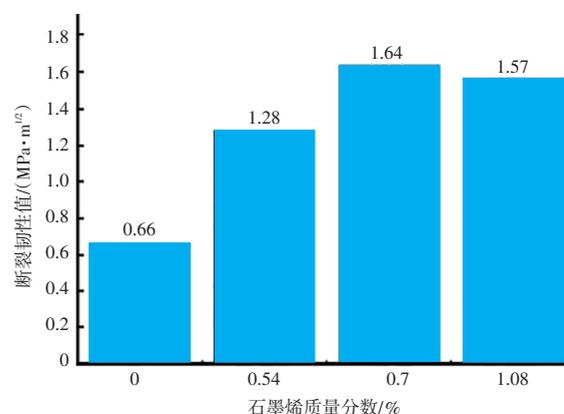


图1 不同石墨烯含量复合材料的断裂韧性值

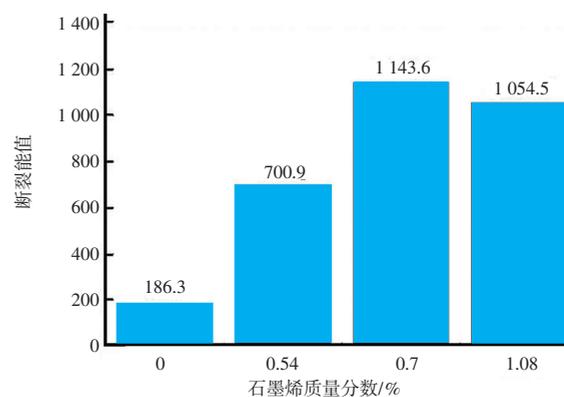


图2 不同石墨烯含量复合材料的断裂能值

建筑行业不断发展对沥青这种重要的工程材料提出了更高的要求。于瑞恩<sup>[35]</sup>提出了氧化石墨烯/聚氨酯水分散熔融制备改性沥青的方法,从宏观和微观角度研究了改性沥青的力学、热学性能,阐明了从“合金化”和“复合材料化”两方面提高基质沥青强度和韧性。朱俊材等<sup>[36]</sup>认为基质沥青中掺入0.05%的氧化石墨烯,沥青的黏度、高温稳定性、抗车辙能力、软化点、交联密度明显提高,针入度明显降低;同时,对低温抗

裂性、延度和玻璃化转变温度影响不大。黄瑾瑜等<sup>[37]</sup>认为基质沥青中掺入SBS改性剂和石墨烯有效改善了SBS改性沥青的高温性能,对SBS改性沥青产生了硬化效果,削弱了沥青的低温抗拉能力;随着温度的上升,石墨烯能有效减缓SBS改性沥青弹性成分的流失,提高其抗车辙能力。广西大学沈培康教授团队与广西正路机械科技有限公司共同研发的石墨烯复合橡胶改性沥青解决了南宁大桥沥青路面开裂、车辙、推移、脱层及拥包的难题<sup>[29]</sup>。

### 1.3 石墨烯改性涂料

巨浩波等<sup>[38]</sup>将0.4%氧化石墨烯溶液掺入丙烯酸乳液中形成复合涂料,涂膜表面粗糙度、热分解温度和抗拉强度分别提高87.5%、50℃和23%,涂膜吸水率基本保持不变。扬州大学朱爱萍研究团队与国内有关科研院所、企业合作<sup>[39]</sup>,采用爆炸法制备石墨烯微片,原位表面修饰得到的表面改性石墨烯微片粉末,分散于环氧、聚氨酯以及丙烯酸酯树脂等涂料树脂体系中,形成无溶剂石墨烯重防腐涂料,突破了低成本生产的界限,产品已投产且实现工程示范应用。卜庆朋等<sup>[40]</sup>将自主合成的、分散性显著提高的功能化氧化石墨烯均匀地分散在粉末涂料中,采用静电喷涂法成功制备了防腐涂层。郝松松等<sup>[41]</sup>将1%的改性石墨烯与环氧树脂涂料掺杂后,涂层疏水性、耐磨损性、耐腐蚀性显著提高;摩擦因数平均降低71.43%,最小为0.08。成锦江<sup>[42]</sup>制备的环境友好型石墨烯改性水性丙烯酸树脂涂料,扩大了水性丙烯酸应用范围。王巍等<sup>[43]</sup>研制的石墨烯改性钛纳米高合金涂料,大大提高了烟气脱硫系统金属的防腐能力,延长了设备的使用寿命。

### 1.4 石墨烯陶瓷复合材料

目前,国内外对石墨烯陶瓷复合材料的研究较少。江期鸣等<sup>[44]</sup>介绍,四川盛世东方陶瓷有限公司成功制备出石墨烯地暖瓷砖。见图3。

杜红斌<sup>[45]</sup>以氧化铝陶瓷管为载体制备出氧化石墨

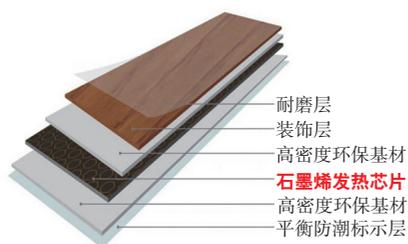


图3 石墨烯地暖瓷砖

烯陶瓷复合膜。2017年陈凌秀等<sup>[46]</sup>首次向全世界公布,运用模板法成功控制石墨烯纳米带在六角氮化硼沟槽中生长,打开了石墨烯带隙,陶瓷基表面制备了石墨烯。赵旭东<sup>[47]</sup>研究了不同烧结工艺对石墨烯/三氧化二铝复合陶瓷摩擦磨损、硬度、致密度、物相组成和微观组织的影响规律且对其生产工艺进行了优化。方燕洁等<sup>[48]</sup>利用溶胶-凝胶技术制备的石墨烯/TiO<sub>2</sub>陶瓷薄膜,摩擦系数低于0.1,36 000次往复摩擦试验陶瓷薄膜完好如初。Rouzbeh Shahsavari在两层硅酸钙间加入超薄的六角形氮化硼形成的“白色石墨烯”双层晶体,制成坚固耐用、耐热、耐辐射的陶瓷材料,抵抗弹性变形的能力高出普通陶瓷材约25%,不像普通陶瓷材料那样容易碎裂<sup>[49]</sup>。

### 1.5 石墨烯玻璃

魏嘉麒等<sup>[50]</sup>利用逐层沉积法在玻璃表面形成逐层自组装氧化石墨烯薄膜,得到了透明导电玻璃;赖奇等<sup>[51]</sup>将120~150 μm石墨超声破碎制备的石墨烯涂膜8 nm于玻璃上;杨斌等<sup>[52]</sup>进行了石墨烯改性TCO玻璃的研究;刘忠范等应用低压化学气相沉积法,快速制备了25英寸(635 mm)高品质石墨烯玻璃<sup>[53]</sup>;陈旭东等<sup>[54]</sup>进行了石墨烯在固态耐高温玻璃、熔融态玻璃表面的高温生长及在普通玻璃表面低温生长研究,提出了石墨烯玻璃的制备和应用的未来挑战与发展方向。

### 1.6 石墨烯混凝土

混凝土是建筑行业用量最大的材料,对其性能的要求越来越高。吕生华等<sup>[55-56]</sup>在100 g水泥中掺入15 mg纳米氧化石墨烯分散液后,水泥净浆的30~60 min流动度降低度均为1.43%,初凝、终凝时间分别减少3.45%、5.8%;水泥石固化3 d后超过200 nm的孔隙率由13.5%降至6.77%,固化28 d后超过200 nm的孔隙率由8.8%降至2.65%;固化28 d后,硬化水泥砂浆的耐折强度和抗压强度分别增加64.6%和27.9%;同时,其模板效应和调控作用促进了水泥石中水泥水化产物形成整齐、规整的纳米级微晶体。雷斌等<sup>[57]</sup>将0.06%的氧化石墨烯掺入再生混凝土后,细化了再生砂浆的微观结构,结构孔隙率降低,更多的水化产物生成,改善了微观结构。张苡铭等<sup>[58]</sup>将石墨烯掺入钢纤维混凝土后,其受弯过程的机敏性显著提高。杨雅玲等<sup>[59]</sup>将0.03%采用Hummers法和超声波分散法制备的氧化石墨烯掺入水泥砂浆中,SEM和能谱分析表明,水泥砂浆

内部含有大量的C-S-H凝胶结构,无明显被腐蚀的痕迹,水泥砂浆的力学性能和耐蚀性能大大提高。薛立强<sup>[60]</sup>在隧道衬砌混凝土中掺入0.03%的氧化石墨烯后,混凝土28 d抗压强度、抗折强度比普通混凝土分别提高30.77%、21.92%;同时,显著提高了抗氯离子性能,非稳态氯离子迁移系数由 $8.16 \text{ m}^2/\text{s}$ 降低至 $5.78 \text{ m}^2/\text{s}$ 。李相国等<sup>[61]</sup>在水泥砂浆中掺入氧化石墨烯复合PVA纤维,解决了混凝土耐久性差、脆性大等问题。陈旭等<sup>[62]</sup>在水泥砂浆中掺入0.3%的聚羧酸/氧化石墨烯复合材料后,克服了氧化石墨烯在水泥基材料中存在着分散不均匀、易絮凝的弊端。王琴等<sup>[63]</sup>研究了氧化石墨烯对水泥水化进程及其主要水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化硅酸钙凝胶的影响,氧化石墨烯可显著抑制 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 六方片状晶体的生成并细化其几何尺寸,可大幅度提高硅酸盐水泥基质材料的力学性能和耐久性。康志斌等<sup>[64]</sup>提出了利用石墨烯基复合混凝土材料(石墨烯智能混凝土)的压敏特性,替代“传感元件”对大型桥梁结构、生命线工程等进行实时结构受力状况应变监测的思路,实现数据化处理,保证建筑物结构安全、降低维护费用。吴文鑫等<sup>[65]</sup>研究了石墨烯智能混凝土在正交和斜交于受力方向的压敏响应。张宝强<sup>[66]</sup>利用石墨烯薄膜的焦耳效应,以其作为独立高效热源体,在室内构建了具有独立封装制造、统一装备集成的自发热融雪、抗雪路面系统,解决寒冷地区路面积雪结冰的难题。英国埃克塞特大学的科研团队将石墨烯片悬浮在水中与传统混凝土成分混合,与普通混凝土相比,抗压强度提高了146%,抗弯拉强度提高了79.5%,渗水率降低了近400%,混凝土中掺入石墨烯可以减少约50%的水泥等其他材料;每生产 $1 \text{ m}^3$ 混凝土, $\text{CO}_2$ 排放量减少 $446 \text{ kg}$ <sup>[67]</sup>。

## 2 应用前景展望

### 2.1 石墨烯改性环氧树脂

钢结构高层建筑已成为大中城市的主流建筑,其较差的耐火性问题越来越受到重视,在钢结构上涂覆防火涂料是目前最为有效的防护方法,但涂层发泡成炭后易脱落,防火性能随之下降<sup>[68]</sup>。磷硅元素改性氧化石墨烯环氧树脂<sup>[69]</sup>可有效提高涂覆防火涂料的动态机械性能,极限氧指数值提高27.1%,燃烧过程无滴落,符合塑料阻燃等级V-0级要求。石墨烯改性环氧树脂工业化生产成本降低后,将在钢结构建筑(桥梁、铁塔、机场、高铁站、高层房屋)涂覆防火材料方面得到

广泛的应用,满足其安全需要。

房屋建筑屋面防水、高层建筑地下室防水以及有防水要求的地面防水、建筑外墙防渗漏等效果好坏,直接影响建筑功能和使用寿命。卷材防水和涂膜防水是屋面经常采用的方式,受防水材料和施工方法的影响,屋面渗漏是建筑行业的顽疾<sup>[70]</sup>;高层建筑地下室主体工程为现浇混凝土箱型框剪结构,结构最外层设置防水层,构造性渗水、渗流、潜流、涌流是主要的渗水方式,造成渗水的主要原因是防水材料的选择和施工<sup>[71]</sup>。带有酰胺键、醚胺键的改性氧化石墨烯与环氧树脂进行固化反应得到的防水胶黏剂<sup>[72]</sup>,拉伸抗剪强度、抗冲击剥离能力、抗压强度、抗拉强度等力学性能均得到了明显的改善,黏结力强、收缩率低、抗化学腐蚀性好且与混凝土、金属黏结性优良,石墨烯/环氧树脂作为建筑物混凝土裂缝修补、复杂地基处理、防渗堵漏以及补强加固等工程前景广阔。但在石墨烯的研究中,如何制备结构规整、成本低廉、性能稳定、量化生产的石墨烯材料及如何制备功能化的石墨烯,使其具有良好的分散性并充分改善环氧树脂的各方面性能,是规模化生产并应用的基础。

### 2.2 石墨烯改性沥青

沥青混凝土加钢筋是建筑工程、公路工程最为常见的筑基技术,优化沥青混凝土技术是建筑行业的根基,建筑沥青和水泥本身固有的特性,难免会产生对建筑结构整体性与稳固性不可逆转的影响<sup>[73]</sup>。比如:公路沥青路面容易产生车辙、开裂和老化等缺陷;建筑沥青防水层出现的起鼓、脱层、腐烂现象。将高低温性能得到有效改善的石墨烯沥青应用于建筑防水,可显著提高其防水效果;广西南宁大桥石墨烯复合橡胶改性沥青路面的成功应用,更进一步地展现出石墨烯改性沥青在建筑行业的应用前景。将分散均匀的石墨烯在高速剪切速率掺入基质沥青中,产生插层作用,全面提升沥青路用性能,是科研人员需要攻克的难点。

### 2.3 石墨烯改性涂料

在2016—2017年《建材工业鼓励推广应用的技术和产品目录》中,石墨烯重防腐涂料作为鼓励产品推广应用,添加低于1%的石墨烯,就可以取代60%以上的锌粉;与富锌底漆相比节省30%以上用量,漆膜表面不产生锌盐,耐盐雾性能是富锌底漆行业标准I型产品要求4倍以上<sup>[74]</sup>。中国科学院等单位已就制定《环氧

石墨烯锌粉底漆》和《水性石墨烯电磁屏蔽建筑涂料》两项标准进行了研讨<sup>[75]</sup>;标志石墨烯重防腐涂料将在建材行业发挥重要的作用。

#### 2.4 石墨烯陶瓷复合材料

作为建筑物装饰构件的陶瓷,造型美观、种类繁多、外观新颖,装饰图案多样化<sup>[76]</sup>,但质重易脆、使用功能单一。我国北方地区,在地暖地面铺设瓷砖已成为时尚,地暖管线一旦发生漏水,维修十分麻烦;石墨烯地暖瓷砖依靠石墨烯电热板发热传递给瓷砖面<sup>[44]</sup>,既解决了北方室内采暖的问题,也解决了南方居民自装暖气带来的诸多不便。石墨烯陶瓷薄膜制备工艺工业化后,建筑陶瓷的耐磨性、抗脆性将大大提高。

#### 2.5 石墨烯玻璃

净片、装饰、安全、节能等建筑玻璃类型给人们的生活带来了很大的方便。高层建筑玻璃幕墙的隔热保温性能和传热系数的控制已成为人们关注的热点,双层中空玻璃、镀膜玻璃、Low-E玻璃等在玻璃幕墙节能中大量应用<sup>[77]</sup>。建筑玻璃贴膜所具有的隔热节能、防紫外线、防爆抗震、装饰性与提高私密性、透光性强等特点已得到公众的认可,越来越多地作为一种节能手段应用于建筑物门窗、幕墙、顶棚等,但其施工工艺复杂,养护麻烦<sup>[78]</sup>。在玻璃表面直接生长出石墨烯的方法已被北京大学掌握<sup>[79]</sup>;不久的将来,石墨烯玻璃应用于建筑行业,作为导电玻璃、透光玻璃、节能玻璃等将发挥其作用。目前,在科学技术上对石墨烯玻璃的生长和应用研究还有诸多问题没有解决,比如进一步提高玻璃表面石墨烯的质量,降低生长温度,缩短生长时间,实现石墨烯玻璃的工业化生产,拓展新的有价值应用等。

#### 2.6 石墨烯混凝土

混凝土的工作性能、抗压强度、弹性模量、弯曲韧性、早期塑性开裂、干缩和徐变等特性影响建筑物的质量和耐久性<sup>[80]</sup>。高层建筑混凝土本身的质量和施工质量要求越来越高;高寒地区桥梁混凝土抗氯离子渗透、抗裂性能,沿海桥梁混凝土结构防腐蚀等对混凝土固有特性提出更高的要求。国内外诸多学者将少量氧化石墨烯掺入水泥砂浆后,混凝土的初凝时间、终凝时间、抗压强度、抗折强度等指标得到明显改善。石墨烯智能混凝土的压敏特性,可配合或替代桥梁裂缝光纤传感的监测、超声波无损检测、温度应力监测,机器视觉

的桥梁自动监测等,更加有利于保证铁路、公路桥梁的安全;但如何进一步降低氧化石墨烯的成本、提高石墨烯混凝土的流动性和抗侵蚀性仍是亟待攻关的方向。

### 3 结论

1) 石墨烯相关的制备、掺杂和应用技术已相继突破,逐渐形成产业爆发点。

2) 石墨烯改性环氧树脂、石墨烯改性沥青、石墨烯改性涂料、石墨烯陶瓷复合材料、石墨烯玻璃、石墨烯混凝土等已在建筑行业应用并取得了小规模的成功。

3) 随着建筑业的发展,对石墨烯或氧化石墨烯的要求也越来越高,需要对石墨烯或氧化石墨烯建筑材料进行细致、深入的研究。

4) 大幅度降低石墨烯或氧化石墨烯的工业化生产成本,是石墨烯或氧化石墨烯在建筑材料行业广泛应用的前提。



#### 参考文献:

- [1] 付亚荣. 石墨烯在油气田开发工程领域应用前景[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2017, 9(2): 199-204.
- [2] 王本力. 石墨烯技术突破与市场前景分析[J]. 中国工业评论, 2016, (4): 72-80.
- [3] 韩同伟, 贺鹏飞, 骆英, 等. 石墨烯力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(3): 279-293.
- [4] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [5] 蒲瑾. 石墨烯力学性能研究新进展[J]. 中国西部科技, 2015, 14(7): 30-32.
- [6] 匡达, 胡文彬. 石墨烯复合材料的研究进展[J]. 无机材料学报, 2013, 28(3): 235-245.
- [7] Lee C, Wei X D, Kysar J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- [8] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N. Fine structure constant defines visual transparency of graphene[J]. Science, 2008, 320(5881): 1308.
- [9] 张丹丹, 战再吉. 石墨烯/金属复合材料力学性能的研究进展[J]. 材料工程, 2016, 44(5): 112-119.
- [10] 贾树明, 魏大鹏, 焦天鹏, 等. 石墨烯/CdTe肖特基结柔性薄膜太阳能电池研究[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(6): 19-22+27.
- [11] 刘姝, 邹丛阳, 吴宇, 等. 石墨烯掺杂铁酸盐降解有机污

- 染物研究进展[J].环境科学与技术,2015,38(S2):220-225.
- [12]肖 蓝,王祎龙,于水利,等.石墨烯及其复合材料在水处理中的应用[J].化学进展,2013,25(2/3):419-430.
- [13]栾恩杰,孙棕檀,李 辉,等.国防颠覆性技术在航天领域的发展应用研究[J].中国工程科学,2017,19(5):74-78.
- [14]韩秀洁,于 蓓.石墨烯:固体推进剂的新兴材料[N].中国航天报,2017-11-07(3).
- [15]尹伟红,韩 勤,杨晓红.基于石墨烯的半导体光电器件研究进展[J].物理学报,2012,61(24):585-596.
- [16]詹 斌.石墨烯增强纳米复合材料变形机理与力学建模研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [17]李欣聪,苗雷英.石墨烯量子点在生物医学中的研究进展[J].材料导报,2018,32(S1):176-178+182.
- [18]南文争,燕绍九,彭思侃,等.磷酸铁锂/石墨烯复合材料的合成及电化学性能[J].材料工程,2018,46(4):43-50.
- [19]王 钊,岳红彦,俞泽民,等.三维石墨烯的制备及其在电化学生物传感器中的研究现状[J].化学研究与应用,2018,30(4):472-477.
- [20]李 剑,王小平,王丽军,等.石墨烯在场发射器件中的应用与研究现状[J].材料科学与工程学报,2015,33(1):145-150.
- [21]付亚荣.未来采油工程新技术——纳米机器人[J].石油钻采工艺,2016,38(1):128-132.
- [22]蔡冰洁,李 艳.基于石墨烯场效应晶体管免疫传感器医学检测中应用的探讨[J].检验医学与临床,2016,13(9):1283-1285.
- [23]付亚荣.纳米发电机在油气田开发工程领域应用前景[J].石油钻采工艺,2016,38(1):531-535.
- [24]李 辉,高致慧,林伟豪,等.温度对石墨烯NO<sub>2</sub>气体传感器的影响[J].传感器与微系统,2018,37(6):5-7.
- [25]王永华.基于石墨烯与硅基纳米光波导复合结构的光电调制技术研究[D].太原:中北大学,2016.
- [26]黄华栋,卞 达,黄国栋,等.石墨烯对氧化铝胶黏陶瓷涂层摩擦行为的影响[J].热加工工艺,2018,47(10):127-132.
- [27]钱伯章.氧化石墨烯片可“纺出”强韧碳纤维[J].合成纤维,2013,(8):52-53.
- [28]王延斌.我首条全自动量产石墨烯 OPV 生产线面世[N].科技日报,2018-04-02(3).
- [29]江东洲,刘 昊.世界首条石墨烯改性路面在广西建成[N].科技日报,2018-05-30(3).
- [30]Bortz D R, Heras E G, Martin-Gullon I. Impressive fatigue life and fracture toughness improvements in graphene oxide/epoxy composites[J]. Macromolecules, 2011, 45(1):238-245.
- [31]Rafiee M A, Rafiee J, Srivastava I, et al. Fracture and fatigue in graphene nanocomposites[J]. Small, 2010, 6(2):179-183.
- [32]Zaman I, Kuan H C, Meng Q, et al. A facile approach to chemically modified graphene and its polymer nanocomposites[J]. Advanced functional materials, 2012, 22(13):2735-2743.
- [33]刘丹凤.柔性链段和功能化石墨烯改性环氧树脂的研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [34]王 凯,刘魏英.石墨烯/环氧树脂复合材料增韧机理研究[J].功能材料,2018,49(3):3082-3086+3091.
- [35]于瑞恩.氧化石墨烯/聚氨酯复改性改性沥青的制备和性能研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [36]朱俊材,李 泉,刘克非.氧化石墨烯改性沥青结合料的性能[J].中国粉体技术,2018,24(4):70-76.
- [37]黄瑾瑜,叶群山.SBS-石墨烯复合改性沥青流变性能研究[J].交通科技,2018,(1):131-133.
- [38]巨浩波,吕生华,邱超超,等.氧化石墨烯/丙烯酸酯聚合物乳液复合材料的研究[J].新型建筑材料,2013,40(10):66-70.
- [39]《合成材料老化与应用》编辑部.无溶剂石墨烯涂料[J].合成材料老化与应用,2018,47(3):135.
- [40]卜庆朋,汪小强,潘建良.功能化氧化石墨烯在粉末涂料中的分散性及防腐性能的应用研究[J].涂层与防护,2018,39(3):39-44.
- [41]郝松松,孙晓峰,宋 巍,等.石墨烯改性环氧树脂涂层的制备及其性能[J].中国表面工程,2018,31(3):108-115.
- [42]成绵江.石墨烯改性水性丙烯酸树脂涂料的制备与性能[J].生物化工,2018,4(3):128-129.
- [43]王 巍,张 驰,戴海雄.石墨烯改性钛纳米高合金涂料在烟气脱硫系统的试验与应用[J].涂层与防护,2018,39(4):11-22.
- [44]江期鸣,黄惠宁,何 乾,等.石墨烯及其在陶瓷中的研究现状与前景分析[J].佛山陶瓷,2017,27(11):1-8.
- [45]杜红斌.稳定氧化石墨烯陶瓷复合膜制备以及分离性能的研究[J].广东化工,2016,43(5):3-4.
- [46]Chen L, He L, Wang H S, et al. Oriented graphene nanoribbons embedded in hexagonal boron nitride trenches[J]. Nature communications, 2017, 8:14703.
- [47]赵旭东.石墨烯与氧化铝陶瓷基复合材料的性能研究[J].陶瓷,2018,(1):64-71.
- [48]方燕洁,白 涛.石墨烯/TiO<sub>2</sub>陶瓷薄膜的制备及其摩擦学性能研究[J].摩擦学学报,2017,37(3):297-304.
- [49]《山东陶瓷》编辑部.美学者运用“白色石墨烯”夹层,大幅提升陶瓷材料的延展性和强度[J].山东陶瓷,2018,41(1):21.
- [50]魏嘉麒,曾效舒,朱栋泉,等.逐层法制备碳纳米管/石墨烯透明导电玻璃[J].材料科学与工程学报,2014,32(4):548-553+586.
- [51]赖 奇,罗学萍.石墨烯导电涂膜的制备研究[J].非金属矿,

- 2014, 37(3):28-29.
- [52]杨斌, 门传玲, 曹军. 石墨烯改性的TCO玻璃的研究[J]. 大众科技, 2012, 14(4):124-126.
- [53]吴凯. 25英寸石墨烯玻璃的快速制备[J]. 物理化学学报, 2017, 33(1):5-6.
- [54]陈旭东, 陈召龙, 孙靖宇, 等. 石墨烯玻璃: 玻璃表面上石墨烯的直接生长[J]. 物理化学学报, 2016, 32(1):14-27.
- [55]吕生华, 马宇娟, 邱超超, 等. 氧化石墨烯增强增韧水泥基复合材料的研究[J]. 功能材料, 2013, 44(15):2227-2231.
- [56]吕生华, 马宇娟, 邱超超, 等. 氧化石墨烯对水泥石微观结构及性能的影响[J]. 混凝土, 2013, (8):51-54.
- [57]雷斌, 邹俊, 饶春华, 等. 氧化石墨烯对再生混凝土改性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S2):103-108.
- [58]张苾铭, 俞乐华. 钢纤维-石墨烯导电混凝土受弯过程的力-电效应试验研究[J]. 混凝土, 2016, (2):52-55.
- [59]杨雅玲, 袁小亚, 沈旭, 等. 氧化石墨烯改性水泥砂浆耐腐蚀性能的研究[J]. 功能材料, 2017, 48(5):5144-5148.
- [60]薛立强. 氧化石墨烯对隧道衬砌混凝土性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(22):124-128.
- [61]李相国, 任钊锋, 徐朋辉, 等. 氧化石墨烯复合PVA纤维增强水泥基材料的力学性能及耐久性研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(1):245-250.
- [62]陈旭, 卢霄, 刘帅, 等. 氧化石墨烯对水泥胶砂力学及微观形貌的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44(3):102-105.
- [63]王琴, 李时雨, 王健, 等. 氧化石墨烯对水泥水化进程及其主要水化产物的影响[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(2):164-172.
- [64]康志斌, 杨树坤, 叶扬春, 等. 基于石墨烯智能混凝土健康监测的探究[J]. 科技·经济·市场, 2018, (4):1-3.
- [65]吴文鑫, 康志斌, 王洁, 等. 石墨烯智能混凝土在正交和斜交于受力方向的压敏响应[J]. 混凝土与水泥制品, 2018, (5):15-18.
- [66]张宝强. 基于石墨烯薄膜的自发热路面融雪化冰研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [67]DT新材料. 石墨烯被用于制造更坚固、更环保的混凝土[J]. 商品混凝土, 2018, (5):18.
- [68]刘德红, 刘芝君, 王振, 等. 树脂基料对超薄型钢结构防火涂料性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2018, (1):37-39+66.
- [69]侯培鑫, 何锴慰, 李纪录, 等. 磷硅元素改性氧化石墨烯的制备及其阻燃改性环氧树脂的应用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(2):186-193.
- [70]王志懋. 住宅楼建筑屋面防水设计与施工措施分析[J]. 四川水泥, 2018, (8):340.
- [71]宋庭伟. 对高层建筑地下室防水施工与渗漏处理的研究[J]. 建材与装饰, 2018, (36):9-10.
- [72]郭增荣, 赵宇, 张新, 等. 石墨烯/环氧树脂复合材料的研究进展[J]. 中国建筑防水, 2016, (18):9-12.
- [73]周鹏. 沥青混凝土场拌质量管控措施分析[J]. 江西建材, 2014, (15):150.
- [74]申桂英. 石墨烯重防腐涂料等专用化学品获建材工业鼓励推广应用[J]. 精细与专用化学品, 2016, (6):50.
- [75]全球涂料网. 石墨烯防腐涂料标准加紧制定[J]. 建材发展导向, 2017, 15(16):118.
- [76]杨辉, 郭兴忠, 樊先平, 等. 我国建筑陶瓷的发展现状及节能减排[J]. 中国陶瓷工业, 2009, 16(2):20-23.
- [77]张海. 玻璃幕墙的节能环保技术进展研究[J]. 建材与装饰, 2018, (26):45.
- [78]田学春, 董孟能, 谢厚礼. 玻璃贴膜在建筑节能中的应用[J]. 新型建筑材料, 2009, (8):51-53.
- [79]陈志红, 田芳. 石墨烯玻璃发展概述[J]. 玻璃与搪瓷, 2016, 44(4):39-42.
- [80]邓翀, 鄢佳佳, 叶仙松. 机制砂掺量对混凝土力学性能和体积稳定性的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2018, (4):42-46.

□中图分类号: TU52

□文献标志码: C

□文章编号: 1008-3197(2019)06-44-07

□DOI编码: 10.3969/j.issn.1008-3197.2019.06.013

□收稿日期: 2019-05-15

□作者简介: 付饶男, 1995年出生, 助理工程师, 中国建筑第八工程局有限公司华北分公司, 从事建筑安全理论与技术研究工作。