

## B02.生态环境材料

分会主席：聂祚仁，张忠伦

### B02-01

#### 基于多金属协同效应的锰基类芬顿催化剂的设计和结构调控

于岩

福州大学

### B02-02

#### 用于二氧化碳捕集的固态胺吸附剂材料的设计及其研究进展

陈水挟，何辉，刘风雷，王烁宇

中山大学

### B02-03

#### Photocatalytic properties of BiOCl nanomaterials for environmental purification

王聪，王天民

北京航空航天大学

It was found that Bi-based nanomaterials displayed high photocatalytic activities under visible light irradiation, such as  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{WO}_6$ ,  $\text{BiVO}_4$ ,  $\text{BiOX}$ ( $X=\text{Cl}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{I}$ ), etc.. We report the synthesis and photocatalytic properties of BiOCl powder and thin film, composited with  $\text{Bi}_2\text{WO}_6$ ,  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  or AgCl, prepared by simple sol-gel method, incorporated with anode aluminum oxide (AAO) template or magnetron sputtering. Photocatalytic properties were evaluated by degradation of rhodamine B (Rh B), antiepileptic drug carbamazepine (CBZ) and other pollutants under visible light irradiation. The photocatalytic activities of black BiOCl and the composites BiOCl/  $\text{Bi}_2\text{WO}_6$ , BiOCl/ AgCl, BiOCl/  $\text{Cs}_x\text{WO}_3$  were shown to be much enhanced compared with pure BiOCl. In summary, crystal structure, crystallinity, morphology including specific surface area should be taken into consideration for improving photocatalytic activity.

### B02-04

#### 废弃混凝土资源化工艺技术研究

冯庆革<sup>1,2</sup>，张小利<sup>1</sup>，李浩漩<sup>1</sup>

1.广西大学资源环境与材料学院

2.广西高校环境保护重点实验室

随着城市化进程不断加快，房屋的拆除、新建以及改扩建项目不断增多，产生了大量的建筑垃圾；在建筑垃圾中最大的组分就是废弃混凝土，其中石灰石质粗骨料废弃混凝土数量最大。本研究通过对目前废弃混凝土的产生和再生利用技术进行了分析，并针对存在的问题，提出了：1) 制备高品质再生骨料的机械剥离工艺技术；2) 全组分废弃混凝土磨细粉，并作为水泥混合材使用。

研究表明：1) 提出了使用机械剥离设备的处理新工艺；利用机械剥离处理 10 min 内，获得的 5~20 mm 再生粗骨料级配良好，且粒型得到较大的改善，针片状含量小于 4%；吸水率达到 3.0%~6.0%，表观密度约为 2590~2640 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，压碎指标基本处于 9.9%~16.4%范围内，且回收率可以达到 37%；各组再生细骨料属于粗砂区粒径范围，细度模数约为 3.15~3.50，吸水率均大于 5.0%，表观密度约为 2500~2550 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；(2) 提出的石灰石质再生骨料表面附着砂浆含量测试方法可行，经测定发现，机械剥离处理对降低骨料表面砂浆含量有较好的效果，处理后砂浆含量约为 20~40%左右；同时，再生骨料砂浆含量不仅取决于生产工艺，还与原生混凝土的骨料性质及配合比有密切关系，且与其吸水率有相对应的关系；(3) 机械剥离处理后 <0.16 mm 的再生微粉化学成分中含有 17%以上的  $\text{SiO}_2$  与 33%以上的  $\text{CaO}$ ，可部分取代水泥生料生产的原材料；(4) 全组分废弃混凝土磨细粉不影响水泥的标准稠度需水量，但缩短了水泥的凝结时间；低掺量下细粉对胶砂强度影响不大，但掺量超过 10%时，胶砂强度随着掺量的增大不断降低；(5) 传统的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{CaCl}_2$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等化学激发剂对废弃混凝土粉不具有激发效果；F 激发剂通过促进水泥中铝酸盐矿物相的水化，加速了废弃混凝土粉与铝酸钙水化产物的反应，从而有效地提高了废弃混凝土粉的活性。

### B02-05

#### 低成本耐腐蚀钢筋生产技术研究

周和敏<sup>1,2</sup>，武兵强<sup>1,3</sup>

- 1.钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室
- 2.钢研晟华科技股份有限公司
- 3.东北大学 冶金学院

本文介绍了国内外钢筋腐蚀现象，特别对沿海构筑物、港口、码头和桥梁带来的危害进行了叙述。针对钢筋腐蚀存在的问题，本文对高强耐大气腐蚀钢筋和耐氯离子腐蚀钢筋的成分进行了优化设计，开发的产品其力学性能和耐蚀性能均满足标准要求。在以上试验研究的基础上，本文提出了低成本生产工艺和关键技术，即通过采用海砂矿和铜冶炼渣配矿、海砂矿和红土镍矿配矿、还原和熔分，分别获得含铜钒钛、含镍铬钒钛铁合金，并用于炼钢生产，最终生产出合格的 400MPa、500MPa 高强耐大气腐蚀钢筋和耐氯离子腐蚀钢筋产品。

关键词：耐腐蚀钢筋；海砂矿；红土镍矿；铜冶炼渣；低成本生产

## B02-06

### 我国铅酸蓄电池铅物质流分析及环境评价

陈莎

北京工业大学

## B02-07

### 热处理对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的结构和表面羟基的影响及其吸附性能研究

陈考<sup>1</sup>，冯庆革<sup>1,2</sup>，马大朝<sup>1,2</sup>，蔡辉东<sup>1</sup>，刘峥<sup>1,2</sup>，陈麒升<sup>1</sup>，黄岩<sup>1</sup>，周严<sup>1</sup>，梁凤<sup>1</sup>，黄潇潇<sup>1</sup>

- 1.广西大学资源环境与材料学院
- 2.广西高校环境保护重点实验室

SiO<sub>2</sub> 气凝胶具有高比表面积、高孔隙率和可控结构特性等独特优点，在环境吸附领域有着广泛的应用前景，备受学者关注。本文以农业废弃物稻壳为硅源，采用溶胶-凝胶法和常压干燥法制备出高比表面积的疏水性 SiO<sub>2</sub> 气凝胶，研究热处理条件对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的结构和羟基密度的影响。以阳离子染料亚甲基蓝和阴离子染料刚果红作为目标污染物，研究热处理条件对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶吸附水中污染物性能的影响。结果表明，（1）经过热处理后 SiO<sub>2</sub> 气凝胶内部产生了微孔结构，它的比表面积，孔体积和吸附量都有大幅提高。在 500℃ 保温 1h 处理后胶，制备的 SiO<sub>2</sub> 气凝胶为无定形结构，比表面积为 820.5 m<sup>2</sup>/g，平均粒径为 4.43 nm，孔体积 0.91 cm<sup>3</sup>/g，羟基密度为 0.998 OH/nm<sup>2</sup>。（2）在 500℃ 处理后，SiO<sub>2</sub> 气凝胶获得了最高的比表面积并且它的羟基密度趋向于最大值，它对亚甲基蓝和刚果红的最大吸附量分别达到 429 mg/g、452 mg/g。适当热处理温度能够使 SiO<sub>2</sub> 气凝胶获得较高的比表面积同时使硅气凝胶表面的甲基能够转化成羟基。（3）在阳离子染料亚甲基蓝溶液中，溶液 8.0<pH<10.0，大于 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的零电荷点(pHpzc=5.84)时，SiO<sub>2</sub> 气凝胶对亚甲基蓝的吸附效率都大于 95.2%。但是，在阴离子染料刚果红中，溶液 pH=4.0，小于 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的 pHpzc 时，SiO<sub>2</sub> 气凝胶对刚果红的吸附效率达到 94.5%。SiO<sub>2</sub> 气凝胶吸附亚甲基蓝和刚果红主要是氢键和静电吸引的作用，结果表明 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的比表面积和表面羟基的协同作用对阴离子染料和阳离子染料的吸附具有重要意义。

关键词：SiO<sub>2</sub> 气凝胶；热处理；亚甲基蓝；刚果红；吸附性能

## B02-08

### 钢渣微粉几何特性对沥青胶浆性能影响研究

孔德智<sup>1</sup>，陈美祝<sup>2</sup>，吴少鹏<sup>2</sup>，杨超<sup>1</sup>

- 1.武汉理工大学材料科学与工程学院
- 2.武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室

钢渣是钢铁冶炼过程中产生的废弃物，多年来国内外对钢渣作为集料应用于沥青混凝土已有较多研究，而对于钢渣微粉应用于钢渣沥青混凝土中的研究较少。钢渣在前期的破碎磁选过程和后期的自然陈化处理过程中会产生较多的微粉，如何合理的利用处理过程中产生的钢渣微粉就成为了钢渣 100%全梯度回收应用研究必须解决的问题。本研究以两种不同产地的钢渣微粉为研究对象，与石灰岩矿粉对比，以体积粉胶比为 0.37 制备沥青胶浆；探讨了不同填料的几何特性对沥青胶浆的基本物理性能及高低温流变性能影响，同时研究了内掺入 0.075-0.15mm 粒径钢渣微粉对沥青胶浆性能的影响。首先对比了两种钢渣微粉与石灰岩矿粉的物化性能；使用 XRF（X 射线荧光光谱）和 XRD（X 射线衍射分析）比较了化学组成差异；借助 SEM（扫描电镜）和 AIMS（集料图像测量系统）探究了微观形貌和棱角性、球形度等几何特性差异。其次，探讨钢渣微粉胶浆的针入度、软化点、黏度等基本物理性能；并借助动态剪切流变仪（DSR）研究钢渣微粉胶浆的高低温流变性能。

研究表明：钢渣微粉矿物化学组成包括  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等成分，较石灰岩矿粉更为复杂；钢渣微粉的微观纹理结构更为丰富，棱角性指数较高；相较于石灰岩矿粉沥青胶浆，钢渣微粉沥青胶浆的针入度降低约 10%、软化点升高约  $3^\circ\text{C}$ 、 $105^\circ\text{C}$  黏度增大约 35%，说明钢渣微粉的掺入对沥青的高温稳定性能提升明显；对比流变性能，钢渣微粉沥青胶浆具有更高的高温劲度模量，但钢渣微粉的掺入会进一步降低沥青的低温流动性能；综合分析，掺入 25% 的 0.075-0.15mm 钢渣微粉沥青胶浆仍具有比石灰岩矿粉沥青胶浆更低的针入度、更高的软化点和更大的黏度，其高温劲度模量也高于对应的石灰岩矿粉沥青胶浆。钢渣微粉作为填料应用于沥青混凝土中时可有效提升高温稳定性能，在掺入部分粒度较大钢渣微粉时，其对沥青胶浆的高温稳定性能提升效果依然较好；钢渣微粉作为填料应用于沥青混凝土中有很好的应用前景。

关键词：钢渣微粉；沥青胶浆；几何特性；流变性能

## B02-09

### 钙钛矿 $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的晶胞畸变程度与禁带宽度的关系

李曰毅，蒋来明，陈强，朱建国

四川大学

近年来，由于铅基压电材料在生产使用和废弃的过程中会对环境造成一定的污染，国际社会已经通过多条法令提倡使用无铅压电材料进行代替。无铅压电材料被广泛用于传感器、制动器、航空航天以及催化等领域，其中钙钛矿型  $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  (LTO) 以其具有高居里温度 ( $\text{TC} \sim 1500^\circ\text{C}$ ) 成为无铅压电材料的研究热点之一。为了在较低烧结温度下制备出结晶相 LTO，我们通过溶胶凝胶法制备出 LTO 凝胶，将凝胶在温度区间  $500\text{--}1200^\circ\text{C}$  内选取四个温度点处理 LTO 凝胶获得浅黄色粉体。结果表明，除了在  $500^\circ\text{C}$  下处理得到的样品未结晶，其余样品均为单一单斜相结构，空间群为 P21，对应于标准卡片 1950-ICSD。随着处理温度升高，所有样品均无组分偏析现象，LTO 粉体的结晶度增大，晶胞在 a, b 投影面的畸变角呈先减小后增大的趋势，比表面积的变化趋势与畸变趋势一致，而禁带宽度变化趋势与之相反。通过紫外-漫反射光谱得到分别在  $500^\circ\text{C}$ ， $850^\circ\text{C}$ ， $1000^\circ\text{C}$ ， $1200^\circ\text{C}$  处理获得的 LTO 粉体禁带宽度分别为 3.88 eV, 4 eV, 4.1 eV, 3.97 eV。

关键词： $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ；溶胶凝胶法；晶胞畸变；禁带宽度

## B02-10

### 不同晶核剂对硼硅酸盐钙钛锆石微晶玻璃析晶行为及化学稳定性的影响

耿安东<sup>1,2</sup>，朱永昌<sup>1,2</sup>，崔竹<sup>1</sup>，张浩<sup>1</sup>，韩勳<sup>1</sup>，霍冀川<sup>2,3</sup>

1. 中国建筑材料科学研究总院有限公司

2. 西南科技大学材料科学与工程学院

3. 环境友好能源材料国家重点实验室

通过“一步法”热处理制备硼硅酸盐-钙钛锆石微晶玻璃，研究不同晶核剂 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CaF}_2$ ) 作用下玻璃的析晶行为及化学稳定性的影响。实验结果表明， $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CaF}_2$  做晶核剂时，晶化指数均大于 3，析晶方式为整体析晶， $\text{P}_2\text{O}_5$  对降低析晶活化能 E 最为显著，MCC-1 标准测试法结果显示  $\text{P}_2\text{O}_5$  作为晶核剂时，28d 抗浸出性能最为优异，Ce 离子归一化元素浸出率达到了  $10\text{-}4\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  数量级。

关键词：钙钛锆石；玻璃陶瓷；核废料；晶核剂

## B02-11

### $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 系无铅凝胶玻璃粉体结构及热性能

袁鸽成，陆正华，乐迎峰，厉佩贤，李倩

广东工业大学

采用 Sol-Gel 法制备了一种  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  系超细无铅封装及助熔玻璃粉体，在替代传统的有毒铅系玻璃粉体方面前景广阔，无需高温熔淬制备，节能环保效果无疑，但其玻璃结构与性能特征有待探明。本文着重采用热处理法分析该胶体玻璃粉体结构与性能的稳定性，在  $200\text{--}800^\circ\text{C}$  温度范围内对凝胶玻璃进行热处理，经机械球磨后，采用 SEM、TEM 及激光粒度分析仪观察并分析了玻璃粉体的形貌结构及粒径分布；利用 XRD 表征了粉体的非晶态特性；采用 IR、Raman、XPS 研究了不同热处理温度下粉体玻璃的网络结构变化；借助 DSC、热膨胀仪及“纽扣”烧结实验研究了结构变化对玻璃粉体的转变温度  $T_g$ 、软化温度  $T_r$ 、膨胀系数  $\alpha$  和烧结特性的影响。结果显示，凝胶玻璃料疏松易碎，球磨后粒径主要分布于  $0.1\mu\text{m}\text{--}1\mu\text{m}$  范围；在热处理试验温度范围内，非晶态结构稳定，但随温度升高， $\text{Bi}^{3+}$  逐渐从初始的网络修饰体进入玻璃网络主体中， $[\text{BiO}_6]$  八面体和  $[\text{BiO}_3]$  三角体、 $[\text{BO}_4]$  四面体和  $[\text{BO}_3]$  三角体分别与  $[\text{SiO}_4]$  四面体以顶角相连的方式构建玻璃网络结构，O1s 和  $\text{Bi}4f$

的电子结合能逐渐增大, B1s 的电子结合能减小, 玻璃网络结构稳定性增强; 玻璃网络结构变化导致经过不同温度热处理后玻璃转变温度升高而润湿性降低, 600℃热处理后玻璃粉体具有较优的烧结性能, 软化温度约为 542℃, 热膨胀系数  $\alpha$  为  $6.57 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 溶胶凝胶法,  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  玻璃, 粉体结构, 热性能

## B02-12

### 富硅镁冶金镍渣对水泥水化特性及膨胀性能的影响

吴其胜<sup>1</sup>, 王顺祥<sup>2</sup>, 张长森<sup>1</sup>, 顾红霞<sup>1</sup>

1. 盐城工学院材料科学与工程学院

2. 同济大学材料科学与工程学院

研究了镍渣粉磨细度和掺量对硅酸盐水泥水化特性的影响。采用 XRF、激光粒度分析仪、负压筛析仪、蒸压釜以及氮吸附分析仪等仪器分析镍渣的化学组成、细度、筛余量、体积安定性和孔结构。结果表明: 随着镍渣掺量的增加, 水泥浆体凝结时间延长, 抗压强度、抗折强度降低, 水化反应放热量降低。随着镍渣细度的增加, 试样的颗粒密度提高, 凝结时间减小, 提高水化反应放热量。掺入不同细度镍渣的水泥试样膨胀值均低于空白组。20℃水养、标养条件下, 当镍渣掺量 $\leq 20\%$ 时, 养护时间 60d 后, 试样膨胀值与空白组发展趋势相似; 当镍渣掺量为 30~50%时, 养护时间 60d 后, 试样膨胀值明显低于空白组。室温恒湿养护, 掺有 30%风冷镍渣、30%水淬镍渣的硬化水泥浆体的干燥收缩值明显小于空白组干燥收缩值。镍渣中的 MgO 以镁橄榄石、镁黄长石、斜顽辉石等硅酸盐矿物存在, 这些矿物结构稳定而不发生膨胀, 使得硬化水泥浆体的压蒸膨胀率小于 0.5%。

关键词: 镍渣; 混合材; 易磨性; 水化特性

## B02-13

### 高炉矿渣的组成和结构对其早期水化特性的影响研究

王亚丽, 姚羽涵, 王卉, 崔素萍, 兰明章

北京工业大学

高炉矿渣的组成和结构会影响其早期水化特性。本论文以不同化学组成的高炉矿渣作为研究对象, 探究高炉矿渣的化学组成、矿物组成与其在碱性环境中的离子溶出特性、水化产物结构, 以及高炉矿渣自身结构随龄期变化的关系。研究表明: 结晶相含量较高的高炉矿渣的钙离子和铝离子的溶出量较大, 体系中液相的 pH 值在早期可以保持在更高的水平。而玻璃体含量较高的高炉矿渣的硅离子溶出量较大, 体系中液相的 pH 值降低较快。高炉矿渣的聚合度受其化学组成影响, 随着水化过程的进行, 高聚态的高炉矿渣生成水化产物较快, 易生成链状 C-S-(A)-H 凝胶类水化产物。而低聚态高炉矿渣生成水化产物较慢, 易生成链状或网状的 C-S-(A)-H 凝胶类水化产物。网状的 C-S-(A)-H 凝胶类水化产物可以对硬化浆体提供更高的抗压强度, 所以一定量结晶相的存在可以降低高炉矿渣的聚合度, 提高水化产物的聚合度, 对高炉矿渣的水化活性起到积极作用。

关键词: 高炉矿渣; 物相组成; 聚合状态; 水化产物; 离子溶出特性

## B02-14

### 聚羧酸系减水剂复配 $\beta$ -环糊精对高贝利特硫铝酸盐水泥性能的影响

唐芮枫, 王子明, 何欢, 张琳, 蔡扬扬, 王杰

北京工业大学

高贝利特硫铝酸盐水泥 (BCSA) 是一种新开发出来的胶凝材料, 具有力学性能优异、耐久性好、体积稳定性好、不易析碱泛白等优异性能。但 BCSA 凝结硬化快, 常用缓凝剂都难以有效延缓其快速水化问题, 这成为制约这种新型水泥广泛应用的瓶颈。为控制 BCSA 的凝结时间, 扩大其应用范围, 本文将探讨适用于 BCSA 水泥的缓凝材料, 并揭示 BCSA 的水化硬化作用控制机理, 提出有效的调控措施。在大量探索试验基础上, 发现将聚羧酸减水剂 (PCE) 与缓凝组分  $\beta$ -环糊精 (CD) 复掺到 BCSA 净浆或胶砂试件中具有较好的缓凝效果。同时测试了符合外加剂的 BCSA 浆体的流动度、凝结时间和各龄期胶砂试件强度, 并进行微观形貌 (SEM)、X-射线衍射分析 (XRD)、总有机碳 (TOC) 分析仪和水泥水化热测试, 研究 PCE 复配 CD 对 BCSA 水化产物的影响。研究结果表明: PCE 复配 CD, 水泥净浆凝结时间有了显著的延长, 且随着 CD 掺量的提高, 水泥凝结时间延长越显著; 浆体流动度随着 CD 掺量的提高, 呈现升高趋势。同时, 随着 CD 掺量的提高, BCSA1d 胶砂强度均有不同程度的下降, 3d、28d 强度均有不同程度的提高。

关键词: 高贝利特硫铝酸盐水泥; 聚羧酸减水剂; 环糊精; 缓凝

## **B02-15**

### **低温烟气用 SCR 脱硝催化剂研究进展**

唐婕

中国建筑材料科学研究总院有限公司

## **B02-16**

### **固体废物制备绿色建材评价体系的研究**

聂卿

中国建筑材料科学研究总院有限公司

## **B02-17**

### **低温 SCR 脱硝催化剂及其在水泥行业的应用**

房晶瑞

中国建筑材料科学研究总院有限公司

## **B02-18**

### **不同养护条件下络合型功能外加剂对水泥基材料孔结构和性能的影响**

何鹏, 王瑞阳, 查亚刚, 余剑英

武汉理工大学 硅酸盐国家重点实验室

混凝土是一种多孔脆性材料, 在服役过程中容易受到外界因素的影响而产生损伤和微裂缝, 导致混凝土的耐久性降低。络合型功能外加剂可以改善水泥基材料的微观结构、增强其自修复能力。本文通过力学性能和孔径分布测试、水化产物分析和微观结构表征, 研究了在标准养护、浸水养护、海水养护和盐雾养护条件下络合型功能外加剂对砂浆微观结构和性能的影响。结果表明: 掺加络合型功能外加剂的砂浆试样在 4 种养护条件下, 内部孔结构得到明显改善, 大孔所占比例均有不同程度的降低, 抗压强度显著提高。与基准砂浆相比, 掺加络合型功能外加剂的砂浆在标准养护、浸水养护、海水养护和盐雾养护后, 大孔 ( $\geq 0.1\mu\text{m}$ ) 所占比例分别减少了 9.2%、14.6%、8.9%和 2.9%, 28 天抗压强度分别提高了 21.8%、28.6%、15.9%和 13.4%。扫描电镜观察表明, 掺络合型功能外加剂的砂浆中有较多针棒状结晶体生成, 其中浸水养护的砂浆中针棒状结晶体数量最多。X 射线衍射分析表明, 络合型功能外加剂能促进水化硅酸钙在孔隙和裂缝处生成, 提高了砂浆的密实性。

关键词: 水泥基材料; 络合型功能外加剂; 养护条件; 孔结构; 性能

## **B02-19**

### **海藻酸钙微胶囊的力学性能及其在自修复水泥基材料中的应用**

毛倩瑾, 伍文文, 梁鹏, 王子明, 崔素萍

北京工业大学

水泥基材料在工程应用中易产生裂纹, 严重影响其耐久性。自修复微胶囊可以在水泥基体产生裂纹后主动填补裂缝、阻止裂缝的扩展。本文采用锐孔-凝固浴法制备海藻酸钙-环氧树脂复合微胶囊, 首次应用于水泥基自修复材料。利用 FTIR、SEM 等对微胶囊的组分及结构进行表征; 研究微胶囊组成、粒径、吸水溶胀对其力学性能的影响; 利用 X 射线计算机断层扫描技术和 SEM/EDS 分析微胶囊在水泥基材料中的自修复行为。结果表明: 制备的微胶囊内部为三维网络支架结构, 骨架为海藻酸钙, 环氧树脂填充内部孔道, 具有良好的机械强度。随着芯材/壁材质量比的增加, 微胶囊力学强度呈下降趋势, 当芯材/壁材质量比为 3.5-5.5 时, 微胶囊的破裂载荷最高, 超过 10.63N; 微胶囊粒径对其力学强度影响较小; 微胶囊吸水溶胀 20h 内, 其力学强度基本保持不变, 超过 20h 后, 力学强度大幅下降, 48h 吸水饱和后, 强度较未吸水微胶囊, 降低了 29.64%。当水泥制品开裂、有水渗入时, 海藻酸钙微胶囊一方面吸水溶胀, 堵塞裂缝; 另一方面释放环氧树脂, 粘结裂缝。

关键词: 水泥基材料; 微胶囊; 自修复; 力学性能

## **B02-20**

### **EVA 乳液胶囊的制备及其对水泥基材料自修复性能的影响**

张莹, 杜玮, 李颖, 余剑英

武汉理工大学硅酸盐国家重点实验室

混凝土在使用过程中受外界环境的影响, 会不可避免地出现内部损伤和微裂纹。微胶囊已被用于混凝土损伤和裂纹自修

复,然而现有微胶囊大多采用热固性壁材包覆修复剂和固化剂,在裂纹尖端应力作用下热固性壁材难以破裂,同时修复剂固化反应难度大。本文通过融化冷凝分散法制备了石蜡为壁材、EVA 乳液为芯材的自修复胶囊,研究了转速、温度、时间、原料比例对胶囊包覆率的影响,采用红外光谱和光学显微镜等手段对胶囊进行了表征,并对掺加胶囊的砂浆进行损伤自修复后力学性能的测试,评价了不同掺量胶囊对砂浆微裂纹的修复效果。结果表明:转速为 400rpm、温度为 65℃、搅拌时间为 10min 及壁材芯材比例为 4:3 时包覆率最高,达到 43%。胶囊的红外谱图中既有石蜡壁材的特征峰,也包含芯材 EVA 乳液的特征峰,在光学显微镜下可观察到 EVA 乳液芯材已被石蜡包覆。预损伤载荷为破坏载荷的 60%时,胶囊掺量为 3%的砂浆抗压强度为对比试样的 1.2 倍,自修复效果良好。

关键词:水泥基材料;EVA 乳液胶囊;自修复;强度恢复

## B02-21

### (K,Na)(Nb,Sb)O<sub>3</sub>-(Bi,Na)HfO<sub>3</sub> 陶瓷的电学性能以及稀土元素(Ho)对其烧结和极化温度的敏感性研究

陶红,吴家刚

四川大学

压电陶瓷作为一种重要的并且应用广泛的高技术先进材料,其相关研究已经成为当前科研领域中非常具有前瞻性的课题。但是,近年来,随着铅基压电陶瓷对环境和人体的损坏逐渐被人们所重视,从而促进了无铅压电陶瓷的研究和发展。在相关研究领域中,无铅压电陶瓷占据着越来越重要的地位。在本次研究中,我们利用传统固相法制备出 0.965K0.45Na0.55Nb(1-x)SbxO<sub>3</sub>-0.035Bi0.5Na0.5HfO<sub>3</sub> [KNNSx-BNH]无铅压电陶瓷,并对相结构,电学性能以及稀土元素(Ho)掺入后其压电性能对烧结温度和极化温度的敏感性进行了探究。结果表明,在该陶瓷中,通过调节 Sb<sup>5+</sup>含量可升高三方-正交相界温度(TR-O)的同时降低其正交-四方相变温度(TO-T),从而在 x=0.04~0.08 时,成功构建了室温下的三方-四方(R-T)新型相界。同时,电学性能在 R-T 相界组分范围内得到显著提升:d<sub>33</sub>~418 pC/N,TC~242 oC (x=0.04),strain~0.33%,S<sub>max</sub>/E<sub>max</sub>=983 pm V<sup>-1</sup>,d<sub>33</sub>~408 pC/N (x=0.07)。还发现,当掺入 Ho 时,该陶瓷在较宽的烧结温度(1070-1120 oC)以及极化温度(13~120 oC)范围内均能够获得优异的压电性能(d<sub>33</sub>~400-458 pC/N)。此外,当 x=0.10 时,该陶瓷具有一定的弛豫铁电性,并在 129 kV/cm 时获得优异的储能密度(W<sub>rec</sub>~0.54 J/cm<sup>3</sup>)。因此,我们相信该项研究能够有力地促进 KNN 基无铅压电陶瓷的研究。

关键词:铌酸钾钠基无铅压电陶瓷;多相共存;高压电;高应变;稀土元素

## B02-22

### 稻壳灰制备 TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 复合载体脱硝催化材料的研究

马晓宇,梁雨,崔素萍,王志宏,王亚丽

北京工业大学

鉴于农业废弃物稻壳灰中非晶态硅含量高的特点,本文以稻壳灰为原料采用共沉淀法制备出了 TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 复合氧化物为载体的锰铈脱硝催化材料。采用正交分析的手段考察了 NaOH 溶液浓度、反应温度、搅拌时间等因素对稻壳灰中 SiO<sub>2</sub> 提取率的影响,探究了载体 TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 复合氧化物的最佳生成条件,并对 TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 复合氧化物的微观形貌以及催化材料的微观结构和脱硝机理进行了相关分析。实验结果表明,NaOH 浓度为 1.5mol/L、反应温度为 90℃、搅拌时间为 2h 时,稻壳灰中 SiO<sub>2</sub> 的提取率达到最大值;PH 值为 7 时,TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 复合氧化物可以达到最佳生成条件;与纯 TiO<sub>2</sub> 为载体的催化材料相比,TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 复合氧化物为载体的催化材料比表面积及孔容都有所增加,酸性位点也大大提高,当硅与钛的摩尔比为 4:1 时,脱硝效率可达 90%以上。

关键词:稻壳灰;SiO<sub>2</sub>;TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>;SCR

## B02-23

### 稻壳灰和电石渣复合吸收剂的脱硫脱硝性能研究

王亚丽,陈美娜,崔素萍,马晓宇

北京工业大学

本研究采用农业废渣稻壳灰和工业废渣电石渣配制一种活性较高的吸收剂,能够在水泥熟料形成过程中实现脱硫脱硝。本论文研究了稻壳灰和电石渣不同质量比(0~15%),反应温度(500~900℃),氧气浓度(0~3%),气体流速(450~900mL/min)等参数对吸收剂脱硫脱硝效率的影响。结果表明稻壳灰和电石渣的配比为 6:5 时,以 10%的质量比掺入水泥生料中,脱硝率达到 97%,脱硫率 90%。利用稻壳灰和电石渣这两种废渣可以在水泥分解炉的环境中高效同时脱除 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub>,并且工艺简单。

关键词:稻壳灰;电石渣;同时脱硫脱硝

## B02-24

### SBS 改性 DOA 油浆调和沥青的制备与性能研究

顾怡<sup>1</sup>, 李雨师<sup>2</sup>, 黄小侨<sup>2</sup>, 余剑英<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室
2. 中石油燃料油有限责任公司研究院

脱油沥青 (DOA) 和油浆为石油炼制过程中的副产物。本文以 DOA 和油浆为原料制备了 DOA/油浆调和沥青 (DSB), 采用 SBS 对 DSB 进行改性, 研究了 SBS 对 DSB 物理性能的影响, 并通过热老化和紫外老化研究了 SBS 改性 DSB (SMDSB) 的老化性能, 利用傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 和荧光显微镜表征了老化前后 SMDSB 的化学结构与微观结构的变化。结果表明: 当 DOA:油浆为 4:6 时, DSB 的软化点和针入度分别为 47.6℃ 和 45dmm, 符合 50 号沥青的性能要求; 随着 SBS 掺量的增加, SMDSB 的软化点呈“S”型升高, 5℃ 延度和低温柔性逐渐增大, 当 SBS 掺量为 12% 时, SMDSB 的软化点、5℃ 延度和低温柔性分别为 105℃、55cm 和 -25℃。在 80℃ 下热老化 240h 和在 60℃ 下紫外老化 168h 后, 12% SBS 改性 DSB 的软化点增量和低温柔性减少量分别为 9℃、4℃ 和 7.9℃、2℃, FTIR 分析表明, 老化后 SMDSB 的羰基 (C=O) 和亚砷基 (S=O) 特征峰有一定程度的增强, 但荧光显微镜观察显示, SMDSB 的网络结构变化较小, 表现出较好的抗老化性能。

关键词: 脱油沥青; 油浆; SBS; 物理性能; 老化性能

## B02-25

### 温拌剂对胶粉改性沥青性能的影响研究

庄荣华<sup>1</sup>, 余剑英<sup>1</sup>, 余虎<sup>2</sup>, 黄军<sup>2</sup>, 曾彦<sup>3</sup>, 兰雪勇<sup>3</sup>

1. 武汉理工大学
2. 湖北省襄阳市南漳县公路管理局
3. 湖北楚晟科路桥技术开发有限公司

将废橡胶粉用于改性沥青可以提高混合料的高温稳定性和抗裂性, 但胶粉改性沥青粘度大, 导致混合料拌和、摊铺温度高, 对环境污染严重。采用温拌剂可以降低混合料的拌和和摊铺温度, 但温拌剂对胶粉改性沥青性能的影响研究尚少。本文研究了改性天然沸石温拌剂和有机降粘温拌剂对胶粉改性沥青的物理性能、流变性能、短期热老化、长期热老化以及紫外老化性能的影响。结果表明: 随着改性天然沸石温拌剂掺量的增加, 胶粉改性沥青的软化点升高, 针入度和延度降低、粘度增加, 提高了胶粉改性沥青的热稳定性; 改性天然沸石温拌剂可使胶粉改性沥青在短期热老化、长期热老化及紫外老化后的软化点增量、延度保留率和粘度老化指数降低, 残留针入度比升高, 改善了胶粉改性沥青的耐老化性能。随着有机降粘温拌剂掺量的增加, 胶粉改性沥青的软化点降低, 针入度和延度升高、粘度减少, 改善了胶粉改性沥青的低温抗裂性; 有机降粘温拌剂使胶粉改性沥青在短期热老化、长期热老化以及紫外老化后的软化点增量、延度保留率和粘度老化指数有所升高, 残留针入度比有所降低, 对胶粉改性沥青的老化性能有不利影响。

关键词: 胶粉; 改性沥青; 温拌剂; 天然沸石; 物理性能; 老化性能

## B02-26

### 水泥工业能耗及排放潜力分析

李承洋<sup>1</sup>, 龚先政<sup>1</sup>, 周立玮<sup>2</sup>, 丁晴<sup>3</sup>

1. 北京工业大学材料学院工业大数据应用技术国家工程实验室
2. 中国建筑材料联合会标准质量部
3. 中国标准化研究院

随着管理水平提升、技术进步以及一系列标准的发布, 水泥工业在节能减排上取得了长足进步。但依然存在高能耗、高污染、产能过剩等诸多问题。2015 年, 工信部发布《水泥行业去产能 2020 行动计划实施方案》等文件, 明确要求, 到 2020 年, 减压熟料产能 3.927 亿吨, 全国熟料产能平均利用率要达到 80%, 水泥产能利用率要达到 70%。吨水泥综合能耗降到 85 千克标准煤。吨熟料综合能耗降到 105 千克标准煤。而就目前情况而言, 2017 年水泥产能 38.3 亿吨, 熟料产能 20.2 亿吨, 相比 2015 年不降反增, 水泥产量利用率 60.48%, 而水泥熟料产能利用率也仅仅刚过 70%。截止 2017 年底, 在众多的水泥企业中, 也仅有 16 家水泥企业吨熟料能耗降到 105 千克标准煤以下。节能降耗、去产能的形式依然严峻。

关键词: 水泥工业; 去产能; 节能降耗; 综合能耗

## B02-27

### 建筑陶瓷碳排放研究及减排潜力分析

王彦静, 刘宇

北京工业大学 工业大数据应用技术国家工程实验室

本文综述了陶瓷产品碳排放计量的研究进展,并以8个典型建筑陶瓷生产企业为研究对象,涵盖了不同吸水率、不同燃料结构和制粉工艺建筑陶瓷的生产。结合《温室气体排放核算与报告要求-陶瓷生产企业》指南,选定1平方米陶瓷砖为功能单位进行定量碳排放核算研究分析,通过计算结果分析不同过程的碳排放量,并讨论建筑陶瓷行业降低碳排放的方向。核算结果表明燃料燃烧过程和电力生产过程碳排放量占比大分别为64.56%和29.73%。采用干法制粉工艺单位产品碳排放为3.51 kg/m<sup>2</sup>,湿法制粉工艺为10.38 kg/m<sup>2</sup>。采用干法制粉工艺具有明显的减排效益,是实现我国陶瓷行业走可持续发展道路的有效途径。

关键词: 建筑陶瓷; 碳排放; 核算指南; 减排潜力

## B02-28

### 原位漫反射红外光谱研究 NO 和 NH<sub>3</sub> 在 MnO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化材料的吸附行为及反应机理

赫连一哲, 崔素萍, 马晓宇

北京工业大学

MnO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化材料在选择性催化还原过程中表现出了较好的低温催化活性,为了深入了解其作用机理,改善催化活性,采用原位漫反射红外光谱法,系统地分析了 NO 和 NH<sub>3</sub> 在 MnO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化材料上的单吸附和共吸附,认为该催化材料表面选择性催化还原过程符合 E-R 机理,反应发生在吸附态 NH<sub>3</sub> 和气态 NO 之间,而吸附态的 NO 及生成的硝酸盐、亚硝酸盐会占据催化材料活性位点,影响其对 NH<sub>3</sub> 的吸附,导致脱硝活性的下降。

关键词: MnO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化材料; 原位漫反射红外光谱; 吸附; E-R 机理; 选择性催化还原

## B02-29

### CeO<sub>2</sub> 基复合材料的形貌调控及其 CO、CH<sub>4</sub> 催化氧化性能研究

李树娜

西安文理学院

萤石型结构的稀土氧化物 CeO<sub>2</sub> 具有易氧化还原性,可以很快达到 Ce<sup>3+</sup>/Ce<sup>4+</sup> 平衡,因此它可以在富氧条件下贮存氧,而在贫氧条件下释放氧。在催化领域,CeO<sub>2</sub> 被广泛用作催化剂的结构助剂和电子助剂以提高催化剂的催化活性、选择性和热稳定性。但是,CeO<sub>2</sub> 单独使用时,其本身热稳定性较差、储氧能力也有限,限制了其应用效果。在 CeO<sub>2</sub> 中引入低价阳离子形成固溶体能够显著提高其热稳定性、储氧能力和催化活性。这是由于掺杂离子与 Ce<sup>4+</sup> 半径和价态的差异导致 CeO<sub>2</sub> 的晶格畸变和表面缺陷,有利于氧空位形成。采用水热合成法制备了一系列金属元素掺杂的 CeO<sub>2</sub> 基复合氧化物 (CeO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>、CeO<sub>2</sub>-NiO、CeO<sub>2</sub>-MnO<sub>x</sub>、CeO<sub>2</sub>-FeO<sub>x</sub> 等),并以 CeO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 和 CeO<sub>2</sub>-NiO 复合氧化物为载体担载 Au 颗粒,重点考察了载体的形貌对 Au 催化剂 CO 低温氧化反应性能的影响;结果表明,纳米棒主要暴露 CeO<sub>2</sub> 的高能 (110) 和 (100) 晶面,这些晶面的暴露利于氧空位的形成及活性组分的分散和落位,因而提高了活性位的密度;最终,CeO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 和 CeO<sub>2</sub>-NiO 纳米棒负载的 Au 催化剂催化性能优于纳米颗粒负载的 Au 催化剂。此外,研究了不同形貌 CeO<sub>2</sub>-MnO<sub>x</sub> 复合氧化物 (船形、扁球形和纳米片) 的结构与其低浓度 CH<sub>4</sub> 催化燃烧反应性能之间的关系。结果表明,CeO<sub>2</sub>-MnO<sub>x</sub> 复合氧化物的形貌与其催化性能密切相关。扁球形 CeO<sub>2</sub>-MnO<sub>x</sub> 复合氧化物的氧空位、Ce<sup>3+</sup> 含量及表面吸附活性氧物种最多,其 CH<sub>4</sub> 催化燃烧反应活性最高,540 °C 时,可将 CH<sub>4</sub> 完全转化;其次是船形 CeO<sub>2</sub>-MnO<sub>x</sub> 复合氧化物催化剂,540 °C 时其 CH<sub>4</sub> 转化率为 94.05%;与前两者相比,纳米片 CeO<sub>2</sub>-MnO<sub>x</sub> 复合氧化物催化剂的氧空位及表面吸附活性氧物种较少,活性较差,相同反应温度下,其 CH<sub>4</sub> 转化率仅为 89.68% (活性测试条件: 1.0 vol.% CH<sub>4</sub>, 19.0 vol.% O<sub>2</sub>, balanced Ar and WHSV = 30000 mL h<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup>)。

关键词: CeO<sub>2</sub>; 形貌, 掺杂; CO; CH<sub>4</sub>; 催化氧化

## B02-30

### 乙醇用量与超声频率对 TiO<sub>2</sub> 气凝胶结构的影响及其吸附-光催化协同降解盐酸四环素的研究

蔡辉东<sup>1</sup>, 冯庆革<sup>1,2</sup>, 王东波<sup>1,2</sup>, 韦旭<sup>1,2</sup>, 马大朝<sup>1,2</sup>, 刘峥<sup>1,2</sup>, 林海英<sup>1,2</sup>, 陈考<sup>1</sup>, 黄岩<sup>1</sup>, 陈麒升<sup>1</sup>, 周严<sup>1</sup>, 杨俊<sup>1</sup>, 黄国亮<sup>1</sup>

1.广西大学资源环境与材料学院

2.广西高校环境保护重点实验室



TiO<sub>2</sub> 气凝胶是一种独特的三维多孔纳米材料，具有低密度、高比表面积、良好透光性和独特的光电特性，在光催化领域具有良好的应用前景。目前，在 TiO<sub>2</sub> 气凝胶制备过程，由于凝胶内部存在过多液态水分子和表面自由非桥接羟基，干燥过程中易因毛细管作用力导致三维凝胶结构被破坏，而采用超临界干燥技术成本昂贵，限制了其工业应用。针对以上问题，本研究通过超声协助溶胶凝胶法、溶剂替换和真空干燥等步骤合成了高比表面积的 TiO<sub>2</sub> 气凝胶，避免了超临界干燥。考察了乙醇用量  $V_{EtOH}$  和超声频率  $f$  两种因素对 TiO<sub>2</sub> 气凝胶材料结构和性能的影响，探讨了超声波在合成过程中的作用机制和微-介孔形成的变化规律。以盐酸四环素溶液作为探针研究 TiO<sub>2</sub> 气凝胶的吸附-光催化协同降解作用。研究结论如下：（1）乙醇分子起到阻碍溶胶颗粒生长、缩合和交联的作用。凝胶时间随乙醇用量的增加而呈指数增长，而 TiO<sub>2</sub> 气凝胶  $S_{BET}$  和  $V_{TP}$  都与乙醇用量呈负相关关系。微孔结构受乙醇用量变化的影响不大，而介孔结构受乙醇用量的影响较为显著。乙醇用量越少，介孔  $S_{mes-t-method}$  和  $V_{mes}$  都越大。所制得的制备态 TiO<sub>2</sub> 气凝胶为无定形的微-介孔结构，存在五个微-介孔分布峰，分别出现在 1.2、1.6、1.8、2.8 和 3.6 nm 处。（2）超声波显著影响 TiO<sub>2</sub> 气凝胶的结构性能，它的空化作用产生的局部高温高压条件、冲击波和微射流有助于去除凝胶内部过多的液态水分子和表面自由非桥接羟基，提高气凝胶  $S_{BET}$ 、 $V_{TP}$  和  $D_p$ 。TiO<sub>2</sub> 气凝胶的  $S_{BET}$ 、 $S_{mic-t-method}$ 、 $V_{TP}$  和  $V_{mic}$  随超声频率先增大后减小。当超声频率  $f=40$  kHz 时，TiO<sub>2</sub> 气凝胶的结构最佳，此时  $S_{BET}$  为 563.6 m<sup>2</sup>/g、 $V_{TP}$  为 0.4241 cc/g 和  $D_p$  为 3.01 nm，500 °C 煅烧 2 h 后  $S_{BET}$  仍达到 106 m<sup>2</sup>/g。拉曼光谱表明超声频率影响了 TiO<sub>2</sub> 的变角振动， $E_g(1)$  的半峰宽随超声频率先减小后增大。（3）由于吸附-光催化协同作用，TiO<sub>2</sub> 气凝胶具有优越的光催化性能，在 15W 低功率紫外灯下对 20 mg/L 的盐酸四环素溶液降解率高达 96%。TiO<sub>2</sub> 气凝胶对盐酸四环素的最大饱和吸附量约为 25 mg/g，是商用的 P25-TiO<sub>2</sub> 的吸附量(1~3.5 mg/g)的 7 倍左右。最佳吸附-光催化降解条件：初始浓度 20~30 mg/L，投加量 30 mg/50 mL，溶液初始 pH 值为 9.0。

关键词：超声频率 sol-gel 法 TiO<sub>2</sub> 气凝胶 协同作用 盐酸四环素

## B02-31

### 真空热压烧结制备稀土钨电极的工艺性能研究

付宝刚，杨建参

北京工业大学

本实验以稀土钨粉末为原料，采用真空热压烧结制备了稀土钨电极。通过 SEM 观察和分析了材料的显微组织，研究和分析了烧结温度、烧结压力以及保温时间和升温速率对材料的密度、硬度、显微组织和导电率的影响。结果表明：采用真空热压烧结法，在烧结温度 1600°C、烧结压力 60MPa、保温时间为 60min、升温速率为：0-1000°C 时 10°C/min、1000-1600°C 时 4°C/min 的工艺条件下，材料的相对密度达到 99.7%，硬度达到 528.5HV，晶粒尺寸为 3 $\mu$ m，导电率为 28.29%IACS。随着升温速率的减小，材料的密度增加，晶粒变细。

关键词：稀土钨粉末；热压烧结；相对密度；显微组织

## B02-32

### 中国铅生产生命周期评价

孙万意<sup>1</sup>，龚先政<sup>1</sup>，孙博学<sup>1</sup>，丁晴<sup>2</sup>

1.北京工业大学 工业大数据应用技术国家工程实验室

2.中国标准化研究院

铅具有各种各样的优良特性，是国民经济中非常重要和广泛使用的基础性原材料。然而，铅生产过程中存在大量的能源消耗和环境污染。中国是世界上最大的铅生产和消费国，这篇论文是运用生命周期评价（LCA）的方法分析我国铅生产过程中的环境影响。以精铅冶炼生产为基础，构建面向流程的生命周期评价模型，对我国铅生产过程中的采矿、选矿、运输和冶炼进行环境影响评价。研究结果表明：生产 1t 精铅的累积耗电为 1111.93kWh，温室气体排放量为 2.06E+03kgCO<sub>2</sub>eq。粗铅冶炼是最重要的环境影响阶段，产生的环境负荷占总环境影响的 51.16%。生产过程环境影响最大的是人体毒性（HTP），占生命周期总环境影响的 35.26%；其次是 MDP 和 FDP，分别占总环境影响的 27.94%和 11.80%。提高冶炼、选矿技术和使用更加清洁能源发电是降低中国铅生产总体环境影响的关键。

关键词：铅冶炼；生命周期评价；环境影响

## B02-33

### 稀土氧化铈、氧化铈的生命周期评价

张徐东，高峰

在铝及其合金中添加稀土元素可以显著提高合金在常温及高温下的力学性能，稀土铈（Sc）微合金化效果显著，但其价格非常昂贵。近些年研究发现相对廉价的铈（Er）能够起到有效的微合金化作用，从制备工艺、价格和性能上考虑，铈可以部分替代钕在高性能铝合金中的应用。然而，稀土铈、钕的开采制备过程对环境的影响严重，但是目前少有关于稀土铈、钕生产的全生命周期评价。

本文基于生命周期评价思想，结合我国资源和能源属性，选取 ReCiPe 方法分析了稀土氧化铈和氧化钕生产过程中资源利用和环境影响状况。研究结果显示：在所选取的各项环境影响指标中，除海洋富营养化外，单位氧化钕制备所产生的环境影响均明显高于氧化铈的制备所带来的环境影响。造成差异的主要原因是氧化钕制备过程消耗了大量的能源，其中生命周期各环节化石能源消耗贡献率依次为氧化钕生产 42.2%，NaOH 生产 33%，盐酸生产 14.5%，硫酸生产 7.2%，双氧水生产 3.1%。而氧化铈制备过程环境影响最大的是海洋富营养化，主要原因是氧化铈开采浸矿阶段部分硫酸铵浸出液留在矿体中，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>被排放到土壤中，对环境产生较大影响。

关键词：氧化铈；氧化钕；生命周期评价

## 墙展

### B02-P01

#### 含镍铬耐蚀钢筋在模拟海洋环境中的耐蚀性研究

武兵强<sup>1,2</sup>，周和敏<sup>1,3</sup>，齐渊洪<sup>1,3</sup>，曹晓恩<sup>4</sup>，洪陆阔<sup>1</sup>，邹宗树<sup>2</sup>，曾智中<sup>5</sup>

- 1.钢铁研究总院 先进钢铁流程及材料国家重点实验室
- 2.东北大学
- 3.钢研晟华科技股份有限公司
- 4.河钢集团邯钢公司 技术中心
- 5.广西盛隆冶金有限公司 品管部

通过周期轮浸腐蚀试验和电化学工作站研究了含镍铬耐蚀钢筋的耐腐蚀性能，用扫描电镜观察了锈层形貌，用能谱分析仪测得合金元素在锈层中的分布，用 X 射线衍射分析了锈层的物相成分。结果表明：与 20MnSi 相比，含镍铬耐蚀钢筋的腐蚀速率更小，耐腐蚀性能更好；Tafel 极化曲线分析可得含镍铬耐蚀钢筋的自腐蚀电位更大，腐蚀电流密度更小；含镍铬耐蚀钢筋的锈层分为内外两层，Cr 元素在内锈层富集，阻碍了 Cl<sup>-</sup>对基体的腐蚀；锈层成分大致相同，为  $\alpha$ -FeOOH， $\gamma$ -FeOOH，Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，含镍铬耐蚀钢筋中具有保护性的  $\alpha$ -FeOOH 所占比例较大。

关键词：耐蚀钢筋；海洋腐蚀；锈层；极化曲线

### B02-P02

#### 《绿色建材评价技术导则（试行）》-控制项详细解读

任世伟，刘翼，赵春芝，蒋荃

中国建材检验认证集团股份有限公司

2015 年 10 月，住房和城乡建设部与工业和信息化部联合印发的《绿色建材评价技术导则（试行）》（以下简称《导则》），制定了包括砌体材料、保温材料、预拌混凝土、建筑节能玻璃、陶瓷砖、卫生陶瓷、预拌砂浆七类大宗建材产品评价技术要求。《导则》从 2016 年 3 月开始实施，七类材料的评价工作也陆续展开。本文从《导则》的控制项着手，针对具体指标进行了详细解释，并就开展评价工作以来统计的资料情况进行了分析，旨在将两部门发布的《导则》深入合理地贯彻实施。

关键词：导则；控制项；加分项；评价

### B02-P03

#### 宽波段遮蔽型干扰物及其结构设计

贾菲，徐铭，鲍红权，张帆，崔凯

中国建筑材料科学研究总院有限公司

详细叙述了遮蔽型烟幕干扰物的国内外研究现状，指出提高综合遮蔽能力和效果，研制以吸收为主的吸收型遮蔽烟幕隐

身材料,研制可同时对抗紫外、可见光、红外、毫米波和微波等的宽波段多功能型遮蔽烟幕是未来的主要发展方向。根据滞空式无源干扰材料的空气动力学特性,以及吸波体设计所需满足的能量守恒、阻抗匹配等原理,对宽波段遮蔽型干扰物的结构设计方案进行了探讨。

关键词: 复合材料; 遮蔽型干扰物; 宽波段; 结构设计

## **B02-P04**

### **城市 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康与经济效应研究**

刘影影, 陈莎, 孙中梅, 石晓丹, 李素梅

北京工业大学

近年来,随着工业化和城市化的步伐不断加快,大气污染问题逐渐凸显出来,尤其是频发的雾霾,使得 PM<sub>2.5</sub> 被大众所熟知。PM<sub>2.5</sub> 不仅能够在大气环境中停留时间长、传输距离远,造成持续性污染,而且携带有大量有毒、有害物质,通过呼吸道进入人体后,会直接进入支气管,引发包括哮喘、支气管炎和心血管病等方面的疾病。因此,PM<sub>2.5</sub> 已经成为影响我国大气环境质量和城市居民健康的重要问题。PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效应和相应的经济损失量化研究,不仅可以直观看到污染所带来的经济损失,而且也可以为政府部门制定和实施大气污染防治政策起到强有力的支撑。

本文系统地总结了量化研究 PM<sub>2.5</sub> 健康影响和经济损失的综合模型的现状与研究进展。目前的综合模型主要包括空气质量模型、健康评价模块和经济评价三个模块。文章首先系统介绍了 ISC3、AERMOD、CALPUFF、WRF-CHEM、CMAQ 等空气质量模型的基本功能和国内外学者的应用研究,建议在选择空气质量模型时,应从实际问题的需求出发,选择合适的模式。随后,文章对 PM<sub>2.5</sub> 污染对健康影响的急性和慢性作用的研究进行了综述,对健康评价模型中 PM<sub>2.5</sub> 的阈值和暴露反应关系热点问题进行了讨论。同时,本文还总结了相关的健康经济损失评价方法,重点对疾病成本法、支付意愿法和人力资本法进行了分析。最后,对量化研究 PM<sub>2.5</sub> 健康影响和经济损失综合模型未来向精准化方向发展做出展望。

关键词: PM<sub>2.5</sub>; 健康效应; 经济损失; 综合模型; 量化

## **B02-P05**

### **动态生命周期评价的研究与应用现状分析**

孙中梅, 陈莎, 李素梅, 刘影影, 石晓丹

北京工业大学

生命周期评价(Life cycle assessment ,LCA)是一种评价产品、工艺过程或活动从原材料的采集和加工到生产、运输和销售、使用、回收、循环利用和最终处理整个生命周期系统有关的环境负荷的过程。但是,随着生产技术的发展或资源消耗和能源效率的变化,静态生命周期评价的结果具有很大的不准确性和不确定性。动态生命周期评价(Dynamic life cycle assessment, DLCA)是针对周围工业和环境系统的时间和空间变化的动态过程建模的评价方法,通过 DLCA 的应用,可以提高分析结果的灵敏度和准确度,适合于复杂系统的冲击评估。动态生命周期评价的应用还可以使决策者了解产品在生命周期中的实时性能,当它们在时间和空间上发生变化时,及时做出决策以最小化环境影响。

本文综述了动态生命周期评价的研究与应用现状,包括生命周期评价的动态建模、动态数据的提取、影响类别的动态评价。目前,动态建模主要应用在能源系统和技术发展、建筑和建筑材料的变化、污水处理技术进步以及新能源汽车方面进行建模评价;动态实时数据的提取方法的研究与应用主要集中在生产制造过程的能耗和排放数据以及建筑物内部的污染物的实时监测等;由 Lavaseur 等人建立的影响类别的动态评价方法,主要是用以为单位的动态特征因子计算全球变暖的评价,并用于评价土地利用、土地利用变化、造林等临时性碳存项目的温室气体减排效益以及评价生物质燃料替代化石燃料对环境的影响。此外,也有学者建立了以月为单位的动态特征因子评价光化学氧化物的影响。本文还总结了当前 DLCA 存在的挑战和机遇,并对其未来的发展进行了展望,以期对 LCA 的研究、应用、发展和完善提供更多的支持。

关键词: 生命周期评价; 时间信息; 动态建模; 动态数据; 影响类别动态评价

## **B02-P06**

### **获取汽车尾气氮排放因子方法的研究与比较**

石晓丹, 陈莎, 孙中梅, 刘影影, 李素梅

北京工业大学

近年来,随着中国经济社会持续快速发展,汽车保有量快速增长,汽车产生的尾气污染也越来越严重,成为大气污染的重要来源之一。尾气催化装置中的三元催化剂可以将尾气中的氮氧化物转化为氮气和氧气,但是在催化过程中也产生了二次

污染物氨。氨作为大气中唯一的碱性气体，能够与大气中的硫酸根离子和硝酸根离子结合，加剧了气溶胶的形成，降低了大气能见度，以至于严重危害到人体健康<sup>[7]</sup>。因此，准确评估汽车催化装置产生的氨排放对于控制城市大气污染变得十分重要。

目前，汽车尾气产生的氨排放主要使用排放因子法进行估算。在这种方法中，重要的是获得排放因子。获取排放因子的方法有 5 种，其中包括隧道法、远程遥感法、台架试验法、MOBILE 和 MOVES 模型。到目前为止，这几种方法在国外应用的比较多，而国内研究使用的氨排放因子大多数借用国外文献中的数据，给研究结果造成了很大的不确定性。本文系统阐述了以上 5 种方法的基本原理，国内外研究现状及最新进展，评价每种方法的优劣，并且提出了这 5 种方法应用于我国汽车氨排放的适用范围。因此，对这几种方法的本土化应用与发展作了展望，期望能为准确测定北京市汽车氨排放提供方法依据。

关键词：氨排放；排放因子法；台架试验法；MOVES 模型

## B02-P07

### 冷却方式对富镁冶金镍渣易碎性及易磨性的影响

吴其胜<sup>1</sup>，王顺祥<sup>2</sup>，诸华军<sup>1</sup>，顾红霞<sup>1</sup>

1.盐城工学院材料科学与工程学院

2.同济大学材料科学与工程学院

以钢渣和水泥熟料为参比，研究了水淬镍渣和风冷镍渣的易碎性及易磨性差异，采用 X 射线衍射仪、激光粒度分析仪、光学电子显微镜、SEM、TEM 分析其矿物组成、粒度分布、显微形貌和微区成分。结果表明：4 种物料的易碎性优劣顺序为：风冷镍渣<钢渣<水泥熟料<水淬镍渣；易磨性优劣顺序为：钢渣<风冷镍渣<水泥熟料<水淬镍渣；风冷镍渣 Bond 球磨功指数 (28.5kW.h/t) 是水淬镍渣 Bond 球磨功指数 (23.3kW.h/t) 的 1.2 倍。微观分析表明，水淬镍渣结构疏松、镁橄榄石晶格衍射形成的晶格条纹模糊，化学成分分布均匀；风冷镍渣结构致密，顽火辉石晶格条纹清晰可见，存在 Fe、Cr 金属元素局部聚集现象。2 种镍渣的晶体结构与元素分布均匀性差异是导致易磨性不同的原因。

关键词：镍渣；冷却方式；易磨性；易碎性；金属元素聚集

## B02-P08

### 垃圾焚烧飞灰陶粒的制备及其性能研究

刘晶

中国建筑材料科学研究总院

垃圾焚烧飞灰因富集高浓度重金属、可溶盐和二噁英、呋喃等有机污染物而被列为危险废物。传统的飞灰处置方法是安全填埋，即通过水泥固化、熔融固化、化学药剂稳定化等方法将飞灰固化稳定化后再填埋，但该方法占用安全填埋场库容，且存在二次污染的风险。建筑用陶粒原料与垃圾焚烧飞灰中的组分和元素具有相似性，陶粒生产的烧结过程能够分解去除二噁英等有机物，同时固化重金属元素，因此以垃圾焚烧飞灰制备陶粒是其资源化利用的有效途径。本文以垃圾焚烧飞灰和粘土为主要原料，添加适量辅助材料，在 1100-1250℃ 下烧结制备陶粒，研究了预热温度、预热时间、烧结温度和烧结时间对陶粒性能和重金属固化能力的影响规律。结果表明，在预热温度 500℃，预热 10min，烧结温度 1150℃，烧结 10min 的条件下，垃圾焚烧飞灰掺量 30% 时，陶粒可获得最佳的膨胀性能，此时表观密度 600kg/m<sup>3</sup> 左右，1 小时吸水率 3%-5%，重金属固化率 99.98% 以上。X 射线衍射分析表明，陶粒中的晶相以石英、镁（铝、铁）尖晶石为主，随着烧结温度和保温时间增长，石英组分逐渐减少，镁（铝、铁）尖晶石组分逐渐增多。

关键词：垃圾焚烧飞灰；陶粒性能；重金属固化

## B02-P09

### 稳定的 DUT-67 (Zr) 高效吸附去除水中痕量汞和甲基汞

冯帆，陈莎，李晓新，束伦，张晓雷，李素梅

北京工业大学

汞是一种具有很高毒性和生物可积累性的重金属污染物，其对于生物体的危害极大。随着《水俣公约》的生效，人们越来越关注它的毒性和危害。二价汞离子很容易穿透生物膜，导致严重的肾脏、消化、内分泌和中枢神经系统疾病。毒性最强的甲基汞具有生物积累性，并随着食物链而放大，能够对人类的神经系统和大脑造成永久性损害。研究表明，汞在水中浓度通常在 ppb 量级。然而，即使在很低的浓度范围，汞也会对人体产生很大的毒害作用。世界卫生组织 (WHO) 标准规定饮用水中最大汞许可含量为 1ppb，美国环保局 (USEPA) 建议饮用水中汞最高浓度是 2ppb。因此，去除水中微量、痕量、乃至超痕量汞变得十分重要。

在去除水中污染物的方法中,吸附法由于具有高效,操作简单,花费较少和较低的二次污染等优点而被广泛应用于水体净化过程。金属-有机骨架化合物(Metal-Organic Frameworks, MOFs)具有很高的孔隙率、比表面积大、易于修饰的表面、化学和热稳定性等优良性质,使得这类材料广泛应用于气体贮存、吸附分离、催化和荧光传感。近几年,MOFs在吸附去除水中重金属离子等污染物方面的研究也得到了广泛的关注。应用上表现出了杰出的性能。

MOF材料DUT-67(Zr),由 $Zr_6O_6(OH)_4^{2+}$ 簇和2,5-噻吩二甲酸互连形成的无限网状结构,具有良好的水稳定性、酸稳定性,且比表面积大于 $1100\text{m}^2/\text{g}$ 。本文系统研究了其对水中痕量 $\text{Hg}^{2+}$ 和 $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ 离子的吸附去除作用。通过调节温度、pH等参数,优化了吸附条件。在最佳pH值(6)和温度( $55^\circ\text{C}$ )下,20 mg/L的 $\text{Hg}^{2+}$ 和 $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ 离子的去除效率分别为90%和55%。动力学研究表明,DUT-67(Zr)吸附 $\text{Hg}^{2+}$ 和 $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ 离子均符合拟二阶动力学模型,且在1h内可以达到吸附平衡。此外,还研究了天然水体中常见有机质胡敏酸(HA)对吸附的影响。最后,在实际水样中进行 $\text{Hg}^{2+}$ 和 $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ 离子的加标实验,评价DUT-67(Zr)在实际应用的性能。当水中 $\text{Hg}^{2+}$ 浓度低于20ppb时,去除率约为95%,溶液中 $\text{Hg}^{2+}$ 的残余量可以达到WHO的标准1ppb。

关键词:金属有机骨架;汞离子;甲基汞离子;痕量浓度;吸附

## B02-P10

### 石灰石低温固硫特性:降低水泥生产 $\text{SO}_2$ 排放水平

王俊杰<sup>1</sup>,王金宜<sup>2</sup>,汪澜<sup>1</sup>

- 1.中国建筑材料科学研究总院
- 2.河北科技大学

$\text{SO}_2$ 是水泥生产过程产生的主要大气污染物之一。生料粉磨是水泥生产的重要工序,具有温度低( $100\text{-}200^\circ\text{C}$ )、水分含量大(6%-10%)等特点,通常被认为具有10%-60%的脱硫效果。然而,实际粉磨过程脱硫效率及其影响因素研究较少,生料低温固硫机理尚不清楚。基于此,本文在对水泥企业生料粉磨过程脱硫效果进行现场测试的基础上,进一步开展了石灰石低温固硫特性实验研究,以期揭示生料粉磨过程固硫机理,为降低水泥企业 $\text{SO}_2$ 排放水平提供支撑。

围绕生料粉磨过程脱硫,本文对国内4家水泥企业粉磨过程前后烟气温度、流量、 $\text{SO}_2$ 含量等进行了现场测试,结果表明所调研水泥企业生料粉磨过程脱硫效率为40%-70%;立磨脱硫效率总体优于球磨机;随着出磨温度的降低,立磨和球磨机脱硫效率均有显著提高,如当球磨机出口烟气温度为 $52^\circ\text{C}$ 时,脱硫效率达到66%;当立磨出磨温度为 $95^\circ\text{C}$ 时,脱硫效率仅有40%。

围绕石灰石低温固硫,通过固定床反应器开展了不同反应温度下石灰石颗粒对 $\text{SO}_2$ 吸收及脱附特性研究。作为空白对照,同时研究了相同条件下石英砂对 $\text{SO}_2$ 的吸附及脱附特性。结果表明,当石灰石和石英砂的颗粒含水量为20%,反应温度为 $50\text{-}100^\circ\text{C}$ 时,石灰石颗粒床层穿透时间为400-750s,随温度降低而显著提高;石英砂颗粒床层穿透时间为150-200s,与温度无明显相关性。考虑空白石英砂的影响,通过积分计算表明,石灰石颗粒对 $\text{SO}_2$ 的吸收量为6.4-21.2mg,且随着温度降低而升高;脱附量为0.8-1.3mg,与反应温度无关。最终单位石灰石颗粒对 $\text{SO}_2$ 的有效吸附量为0.28-1.01mg/g石灰石,理论上将导致石灰石 $\text{SO}_3$ 含量增加0.04%-0.13%。进一步,基于硫酸钡重量法检测了吸脱附反应后石灰石颗粒的 $\text{SO}_3$ 含量,与空白石灰石颗粒相比, $\text{SO}_3$ 含量增加0.02%-0.13%,该值随着吸脱附反应温度的降低而增加,与石灰石 $\text{SO}_3$ 含量理论增加值基本一致。

通过生料粉磨现场测试和石灰石低温固硫实验研究,表明石灰石具有低温下吸收 $\text{SO}_2$ 的效果,吸收过程为化学反应而不是物理吸附反应。现场测试和实验研究均表明石灰石对 $\text{SO}_2$ 的吸收量随温度降低而明显提高,这为优化水泥企业生料磨操作参数,降低 $\text{SO}_2$ 排放水平提供了有力支撑。

关键词:水泥; $\text{SO}_2$ ;生料粉磨;石灰石

## B02-P11

### 纳米氧化钨在不同溶液体系中的溶剂热法制备

赵林艳,沈越岗,李萌萌,马立文,席晓丽

北京工业大学

氧化钨是一种廉价而稳定的过渡金属氧化物,因其结构的高度可调及独特的物理化学性能一直以来备受关注,被广泛应用于光催化降解、气敏传感器、锂离子电池、电致变色器件等设备中。在氧化钨的众多制备方法中,溶剂热法因其经济环保、操作简便且产物纯度高、形貌易控等优点而受到青睐。本文选用溶剂热法在不同溶液体系中制备纳米氧化钨,通过控制溶剂类型及钨源浓度,分别制得了结构形貌良好的纳米颗粒、纳米棒、纳米线状产物,研究发现空气气氛下长时间的搅拌对于产物的均匀性及分散性具有重要影响,且对反应过程中溶剂及钨浓度对最终产物的长径比及尺寸大小等产生的影响也进行了阐

述,并对不同产物在亚甲基蓝溶液中的光催化降解过程进行了探究。

关键词: 纳米; 氧化钨; 溶剂热; 光催化

## B02-P12

### 正极材料镍钴酸锂的回收再制备

王跃花, 席晓丽, 马立文, 张云河

北京工业大学

因为锂离子电池有工作电压高、比能量高和使用寿命长等优点目前广泛应用于各种小型电子设备,因此锂离子电池的报废量呈现一个快速上涨的趋势。鉴于对环境和资源的考虑我们以废旧锂离子电池正极材料为原料对废旧锂电池进行了循环再生,合成了一种新的正极材料镍钴酸锂  $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$ 。首先是采用萃取的方法分别利用萃取剂 CP-150 和  $\text{p}_2\text{O}_4$  去除酸浸液中的铜离子和铝离子杂质,铜离子萃取条件为:相比 O/A=2:1、萃取浓度为 30%、pH=3。铝离子萃取条件为:相比=1:2、pH=3、萃取浓度 30%、皂化率 70%,然后利用共沉淀法制备前驱体,这种方法的优点是可以使正极材料达到原子水平的均匀混合。利用高温固相法将前驱体和氢氧化锂在高温下煅烧,煅烧条件为:空气气氛、煅烧温度  $800^\circ\text{C}$ 、煅烧时间 15h、 $n$ (前驱体): $n$ (氢氧化锂)=1:1.1。正极材料的 X 射线衍射分析、热重分析及扫描分析结果表明所得的正极材料即为材料镍钴酸锂  $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$  且结晶度好、具有规整的层状结构,通过对正极材料的能谱分析再次证明了所得的正极材料即为镍钴酸锂  $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$ ,和正极材料 XRD 分析结果相吻合。

关键词: 废旧锂离子电池; 正极材料; 循环再生; 萃取; 除杂; 共沉淀; 原子水平; 高温固相; 镍钴酸锂  $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$

## B02-P13

### 不同梳状链接结构聚羧酸在高性能混凝土中的应用性能和作用机理

刘晓, 许谦, 赖光洪, 管佳男, 王子明, 崔素萍

北京工业大学

本文的目的是研究梳状结构聚羧酸大分子在主链与侧链链接不同的基团对其在高性能混凝土中的应用性能的影响规律及其作用机理。本研究以聚丙烯酸(AA)、羟基甲氧基聚氧乙烯醚(HMPEG)、氨基甲氧基聚氧乙烯醚(AMPEG)为主要反应原料,分别根据酯化反应和酰胺化反应的基本原理,设计相同的分子侧链密度与分子量,合成了以酯键和酰胺键两种方式连接主侧链的梳状结构聚羧酸减水剂。通过红外光谱(IR)和分子量特性测试表征了合成产物的分子结构特征官能团和分子量特性,证明了合成产物中梳状接枝结构的存在以及成功引入了酯基结构和酰胺结构,符合预期设计结构。将两种合成的聚羧酸减水剂掺入到水泥净浆和混凝土中,分别测定了净浆流动度和凝结时间、混凝土坍落度和各龄期抗压强度等应用性能,结果表明,相比于酰胺键,以酯键为主侧链连接基团的聚羧酸减水剂表现出更加优异的净浆流动度保持性能、更长的凝结时间、更优异的混凝土坍落度和 28 天抗压强度,但是早期强度相对较低。基于对两种聚羧酸减水剂的表面张力和水泥表面吸附量的测定,分析了其作用机理,结果表明,以酰胺键为主侧链连接基团的聚羧酸减水剂的表面张力更低,吸附速率更快,说明该类型聚羧酸减水剂能够通过酰胺基团快速吸附和润湿水泥颗粒,产生更强的气-液界面取向能力和起泡作用。根据各自的应用性能特点和作用机理特征,本研究合成的以酯键和酰胺键两种方式连接主侧链的梳状结构聚羧酸减水剂可以分别应用于高泵送要求的混凝土和高早强要求的混凝土,具有较好的应用前景和推广价值。

关键词: 高性能混凝土; 聚羧酸减水剂; 梳状结构; 链接; 水泥净浆

## B02-P14

### 纳米 ZnO/RGO 复合材料的制备及光催化性能研究

王明铭<sup>1</sup>, 张忠伦<sup>1</sup>, 侯贵华<sup>2</sup>, 辛志军<sup>1</sup>, 范磊<sup>1</sup>, 李锐<sup>1</sup>, 彭明强<sup>1</sup>

1.中国建筑材料科学研究总院有限公司

2.盐城工学院

以商品纳米 ZnO 颗粒与氧化石墨烯(GO)为反应物,通过水合肼化学还原的方法制备了 ZnO/RGO 复合材料,并通过扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)等手段对样品进行了表征。结果表明:纳米 ZnO 颗粒表面均匀包裹着石墨烯片,复合材料的晶格常数和带隙宽度发生了变化。将 ZnO/RGO 复合材料引入水性聚氨酯涂料中,以甲醛降解率作为评价指标,对 ZnO/RGO 复合材料的光催化性能进行了研究,着重探讨了石墨烯负载量、复合材料添加量、光降解时间等因素对涂料甲醛降解率的影响。研究结果表明:当石墨烯负载量为 2%时,ZnO/RGO 复合材料具有最高的光催化活性,甲醛降解率 $\geq 90\%$ 。

关键词: ZnO/RGO 复合材料; 制备; 光催化性; 甲醛降解率

## B02-P15

### Fenton 反应预处理木质素衍生多孔碳应用于高性能超级电容器

张可菁<sup>1,2</sup>, 石岩<sup>1,2</sup>

- 1.长沙市中南大学
- 2.冶金与环境学院

木质素作为生物质的主要组成部分是储量第二的天然聚合物,其分子结构主要为醚键或碳-碳键交联而成复杂的非结晶三维网络结构,同时具有高含碳量被认为是制备炭材料理想的碳前驱体之一。本文以商业碱木质素(KL)为原料,采用简单的 Fenton 反应对碱木质素进行预处理代替传统的碱活化步骤,然后在高温下碳化处理(N<sub>2</sub> 气氛, 900℃, 2 h)。通过 SEM、EDS、BET、Raman 等分析方法表征了材料的物化特性,研究表明:Fenton 预处理降低了 KL 的分子量,去甲氧基化提高了含氧量,再经过高温碳化获得了高度石墨化、大表面积和高导电性的活性炭,并且孔隙率大大增加。使用三电极系统通过标准循环伏安图(CV)和恒电流充放电技术(GCD)分析其电化学性质,基于 KL-Fenton 电极材料的 CV 曲线呈现出大环面积的准矩形形状,意味着它们的典型电容行为。材料具有丰富的官能团,其中 Fenton 反应期间整合的 Fe<sup>3+</sup>可以通过在电极界面处的额外的法拉第反应提供大的附加赝电容。在电流密度为 0.5A g<sup>-1</sup> 时,所制备的材料具有 223 F g<sup>-1</sup> 的比电容,即使在 5A g<sup>-1</sup> 的电流密度下进行 2000 次充放电循环后也具有优异的循环稳定性(保留率> 95%)。在这项工作中开发的策略为充分利用自然赋予的最丰富资源提供了一个很好的例子。

关键词: Fenton 反应; 木质素; 超级电容器

## B02-P16

### 基于生命周期评价的典型可见光光催化液研究

张艳姣

中国建材检验认证集团股份有限公司

随着人们对空气质量和生活品质要求的提高,具有空气净化功能的新型装修装饰材料的需求量将逐渐增大。本研究运用生命周期评价方法编制典型可见光光催化液产品生命周期过程中资源、能源消耗和污染物排放清单,计算可见光光催化液产品生命周期过程中的重要环境影响指标,分析并辨识影响产品环境表现的关键阶段,指导绿色建筑的选材与生态建材的开发。结果显示,可见光光催化液的全球变暖潜力为 40.97kgCO<sub>2</sub> 当量/t,不可再生资源耗竭潜力为 9.34×10<sup>-5</sup>kgSb 当量/t,可吸入无机物指标为 7.88×10<sup>-2</sup>kgPM<sub>2.5</sub> 当量/t,富营养化为 4.13×10<sup>-2</sup>kgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>当量/t,酸化效应为 0.34kgSO<sub>2</sub> 当量/t;本研究产品生命周期中各环境影响主要来源于能源使用,而运输过程是造成富营养化的主要阶段。

关键词: 空气净化材料; 可见光光催化液; 生命周期评价; 绿色建筑材料

## B02-P17

### 建筑用硬质聚氯乙烯泡沫塑料(PVC-U)铝复合板性能测试验证

许欣, 蒋荃, 刘翼

中国建材检验认证集团股份有限公司

目前国内发展比较成熟的外墙外保温系统在建筑节能方面获得了广泛的应用,但同时存在开裂、鼓包、脱落、施工复杂、翻新困难等问题。市场现有外墙装饰保温材料的保温、防火等性能远远不能适应建筑领域和人民的需要,亟待研发兼具建筑节能、防火安全和高使用寿命的新型保温材料。建筑用硬质聚氯乙烯泡沫塑料(PVC-U)铝复合板具有优异的保温性、阻燃性、耐候性,在建筑节能市场中的应用率逐年增加。文章对比了各类保温材料的综述了建筑用硬质聚氯乙烯泡沫塑料复合铝板的性能测试指标与检测方法,为规范市场、引导行业的健康发展起到一定的作用。

关键词: 硬质聚氯乙烯; 保温; 防火

## B02-P18

### 基于生命周期评价的预拌混凝土产品 III 型环境声明技术规范制定

张艳姣

中国建材检验认证集团股份有限公司

基于 ISO 14025 的原则和要求,以预拌混凝土产品为例,讨论了预拌混凝土生命周期评价技术规范的制定,展示了预拌混凝土 III 型环境声明认证示范报告,以期国内预拌混凝土产品生命周期评价技术规范制定及 III 型环境声明认证提供方法

基础与示例。

关键词：生命周期评价；预拌混凝土；III型环境声明；产品种类规则

#### **B02-P19**

##### **气化渣处理含油废水 COD 的研究**

刘姚君，汪澜

中国建筑材料科学研究总院

研究了气化渣与自制强氧化剂联用氧化分解含油废水中 COD 的效果。考察了投加量、反应时间、pH 对 COD 去除率的影响。研究表明，气化渣与自制强氧化剂联用处理含油废水存在明显的协同效果，当初始 COD 质量浓度为 136 mg/L，pH 为 8 左右，反应时间为 180 min，气化渣和自制强氧化剂投加量分别为 0.25g/L、0.5g/L 时，COD 去除率高达 48%以上，与单独使用自制强氧化剂相比，COD 去除率增加 15%。

关键词：气化渣；自制强氧化剂；含油废水

#### **B02-P20**

##### **吸附去除水中全氟化合物的金属有机骨架材料的构建**

张晓雷，李素梅，冯帆，陈莎

北京工业大学

近年来，全氟化合物（PFCs）由于其广泛的应用和全球关注的水环境中的污染，越来越受到人们的关注。PFCs 在 2009 年被列为新的持久性有机污染物，其具有优异的热稳定性，化学稳定性、表面活性、环境持久性、生物累积性并且具有高度发展性毒性、免疫毒性和肝毒性等。这些特性可能对人类健康和生态系统产生不利影响<sup>1</sup>。

金属有机骨架材料(MOFs)作为一种新兴的多孔材料，具有高孔隙率、表面易于修饰、化学和热稳定性等特点，由于其往往具有较大的比表面积、不饱和金属位点等独特的性质以及丰富的拓扑结构<sup>2</sup>，使其在吸附相关领域内具有巨大的应用潜力。目前，MOFs 材料已经用于水中吸附去除 PFCs 的研究。本文分析了 MOFs 材料在水中吸附 PFCs 的结构特性，提出了吸附去除水中的 PFCs 的 MOFs 材料的构建。

第一，吸附 PFCs 的 MOFs 材料的须具有水稳定性。由于 PFCs 主要存在于水体中，因此 MOFs 材料的水稳定性是首要考虑因素。第二，MOFs 材料须具有较大的比表面积<sup>3</sup>。与气体吸附类似，大的比表面往往具有高的吸附量，因此选择具有大比表面积的 MOFs。第三，选择阳离子型 MOFs 材料<sup>4</sup>。由于 PFCs 水体中主要以阴离子形式存在，因此选择构筑阳离子型 MOFs。第四，须合成具有适当的孔道大小的 MOFs。根据典型 PFCs 分子全氟辛酸的大小在 8Å 左右，因此选择介孔或大孔材料的 MOFs。本文总结了吸附去除水中的 PFCs 的 MOFs 的构建条件，希望能为以后 MOFs 材料的选择提供方向。

关键词：全氟化合物；金属有机骨架材料；吸附去除

#### **B02-P21**

##### **基于化学焓表征的典型轻稀土矿生产氧化钕的资源耗竭分析**

陈文娟，孙博学，高峰，刘宇

北京工业大学

稀土是重要的战略资源，我国是稀土生产、消费和出口大国，2016 年中国稀土冶炼分离产品产量为 10.5 万吨，占全球总产量约 88.2%，大量的稀土产品生产造成对我国稀土资源的持续消耗。本文针对我国典型的轻稀土矿，即包头混合型稀土矿和四川氟碳铈矿，计算得到了包头混合型稀土矿和四川氟碳铈矿真实矿物的化学焓值，填补了我国稀土真实矿物化学焓值计算的空白。计算结果表明，包头混合型稀土矿的化学焓值是四川氟碳铈矿化学焓的 1.7 倍。同时论文研究了上述两种矿生产 1t 氧化钕的稀土矿资源耗竭的化学焓值，并进行对比分析，计算得到包头混合型稀土矿生产 1t 氧化钕的稀土矿资源焓耗竭是四川氟碳铈矿生产 1t 氧化钕的稀土矿资源焓耗竭的 2.85 倍。

关键词：稀土矿；氧化钕；资源耗竭；化学焓

#### **B02-P22**

##### **高频等离子体化学气相沉积系统的气体循环技术**

孙元成，宋学富，杜秀蓉，张晓强

中国建筑材料科学研究总院有限公司



高频等离子体化学气相沉积 (HFPCVD) 技术利用电感耦合高频等离子体作为反应物质的活化源以及沉积系的热源。电感耦合高频等离子体具有无电极污染、高温面积大、能量密度大等优点, 并可在相对较低温度下将反应物质充分活化。因此, 高频等离子体化学气相沉积技术在制备硬质膜、半导体功能膜、高性能涂层乃至高纯块体材料 (如石英玻璃、金刚石等等) 等方面具有很大优势。在传统等离子体化学气相沉积系统中, 通常将未完全反应的尾气直接排放, 导致原料消耗大并产生极大浪费。本研究开发了气体循环式 100kW 高频等离子体化学气相沉积系统, 将大部分尾气过滤后重新作为等离子体的气源, 同时补充少量新鲜气体以维持物料平衡; 采用甲烷、氢气、氩气作为气源, 研究了循环气体比例对类金刚石膜生长速率、硬度、附着力的影响。结果表明, 在同等沉积质量条件下, 使用气体循环系统可降低 75% 的气体消耗, 循环气体的余热利用可使设备功耗降低 10%, 有效提高了能源、原料利用率。

关键词: 气体循环; 等离子体; 化学气相沉积

## B02-P23

### 废弃混凝土再生胶凝材料碳化特性研究

张运华, 刘芷怡, 张志鹏, 闵捷

湖北工业大学

目前我国正处于基础设施建设的高峰时期, 大规模新混凝土建筑物的建造和废旧建筑物的拆除产生了大量废弃混凝土。废弃混凝土的弃置不仅占用大量土地资源, 并且严重污染环境, 引起了严重的社会问题和环境问题。同时, 水泥混凝土所用的原材料生产能耗大, 环境负担重, 且资源日益紧缺。而废弃混凝土中水泥石经济成本最高、环境负荷最重, 具有重要的再生资源化利用价值。因此, 做好废弃混凝土中水泥石的再生利用有非常重要的现实意义和历史意义。研究发现废弃水泥石经 450-750℃ 处理后, 脱水相的结构发生改变, 450℃ 时 C-S-H 凝胶脱水生成了无定形相, 在 750℃ 时 C-S-H 转换为低结晶程度的  $\beta$ -C<sub>2</sub>S。而  $\beta$ -C<sub>2</sub>S 具有极高的碳化活性。

基于此, 论文采用废弃水泥石, 经不同温度处理后制备得到具有较高碳化活性的胶凝材料, 研究了加速碳化再生胶凝材料的力学性能与 CO<sub>2</sub> 捕获能力, 采用 XRD、TG、SEM 与 BET 等测试方法探究了再生胶凝材料碳化特性与机理。研究表明, 经 650℃ 处理后, 再生胶凝材料碳化体抗压强度大于 40MPa, CO<sub>2</sub> Uptake 大于 20%, 再生胶凝材料具有较高的碳化活性。论文的研究对废弃混凝土的分质化再生利用有提供了一条新的途径。

关键词: 碳化特性; 废弃混凝土; 再生胶凝材料

## B02-P24

### Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系凝胶玻璃及熔淬玻璃粉体特性对比

厉佩贤<sup>1</sup>, 袁鸽成<sup>1</sup>, 李倩<sup>1</sup>, 陆正华<sup>1</sup>, 吴其光<sup>2</sup>

1. 广东工业大学材料与能源学院

2. 广东工业大学分析测试中心

分别采用溶胶-凝胶法和传统的熔融-淬法制备了同组分配比的 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系玻璃粉体, 运用 XRD、SEM、EDAX、FT-IR、Raman、DSC/TG、粒度分析仪、密度测试、“纽扣”实验、热膨胀仪等手段对玻璃粉体进行了结构与性能表征, 对比性地研究了同组分配比两种制备方法下玻璃粉体结构与性能的同异。结果表明, 两种粉体结晶状态均显示典型的非晶态特征, 凝胶玻璃粉体颗粒较易破碎且密度较低, 球磨后可得到粒径范围为 0.1-1μm 范围的超细玻璃粉体, 其化学组成与实验设计比较接近; 两种粉体的玻璃网络结构极为相似, 主要以 [BiO<sub>3</sub>] 三角体、[SiO<sub>4</sub>] 四面体、[BO<sub>4</sub>] 四面体构成基本网络骨架; 凝胶玻璃转化温度略低于熔淬玻璃转化温度且均小于 600℃, 但其软化烧结温度高于熔淬玻璃粉体烧结温度, 且线膨胀系数  $\alpha$  略大于熔淬玻璃线膨胀系数; 凝胶玻璃不易发生析晶行为, 熔淬玻璃在高温下易析出 Bi<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> 等晶相。

关键词: Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系玻璃; 粉体; 结构与性能; 对比

## B02-P25

### 水泥生料的率值对选择性非催化还原脱硝率的影响研究

王亚丽, 李楠, 张宏展, 崔素萍, 张云宁

北京工业大学

水泥预分解炉内的 SNCR 脱硝过程受到多个复杂的因素的影响, 水泥生料的组成是影响脱硝过程比较重要的因素。本文在空速为 27000ml/h, NO 浓度为 1000ppm, NH<sub>3</sub> 浓度为 1000ppm, O<sub>2</sub> 含量为 5%, 温度范围为 700-1100℃ 的条件下, 研究水泥生料的硅率值 (SM), 铝率值 (IM) 及石灰石饱和系数 (KH) 改变对脱硝率的影响。结果表明在 700-900℃ 时, 随

着 KH 增加,脱硝率降低,随着 IM 的增加,脱硝率增加,建议采用低饱和系数、中硅率,高铝率的水泥生料;在 900-1100℃ 时,随着 KH 增加,脱硝率增加,随着 IM 的增大,脱硝率降低,建议采用高饱和系数、高硅率,低铝率的水泥生料。

关键词:选择性非催化还原技术;水泥生料;率值

## B02-P26

### 稀土元素 Sm 对 Sn<sub>58</sub>Bi 无铅钎料组织和电化学腐蚀性能的影响

张宁<sup>1</sup>,张春红<sup>2</sup>,童亚星<sup>1</sup>,董蔚霞<sup>3,1</sup>

- 1.徐州工程学院
- 2.徐州生物工程职业技术学院
- 3.南京理工大学

近年来随着电子封装技术的日益完善以及人们环境保护意识的不断增强,钎料无铅化的研究、开发和应用正逐渐受到研究者的关注。Sn<sub>58</sub>Bi 无铅钎料因其较低的熔点(138℃)、良好的性能和环境自适性,而被公认为是 Sn-Pb 钎料的优良替代者,因此在材料研究中得到广泛应用。本文为了提高微焊点的润湿性和可靠性,向 Sn<sub>58</sub>Bi 钎料中掺杂七组(0%、0.025%、0.05%、0.1%、0.2%、0.4%和 0.8%)不同质量含量的稀土钎粉,制备无铅复合钎料,并钎焊 Cu/Sn<sub>58</sub>Bi-xSm/Cu 微焊点。采用扫描电子显微镜、能谱仪和电化学工作站研究稀土元素 Sm 对 Sn<sub>58</sub>Bi 钎料润湿性、组织和电化学腐蚀性能的影响机制。

结果表明:焊点的综合性能达到最优时,稀土 Sm 添加量为 0.05%,铺展面积达到最大值,较 SnBi 提高了 23.22%,较 SnPb 提高了 15.02%。稀土 Sm 为活性元素,容易在钎料/钎剂表面积聚而降低界面自由能,增大润湿性,但过量添加稀土导致氧化,造成界面自由能提高,使钎料的润湿性恶化。对钎料的基体组织研究发现稀土元素的添加可以显著细化 Bi 相组织,对钎料组织有细晶强化的作用。但 Sm 含量高于 0.1%后,Bi 相逐步粗化,稀土强化效果减弱。采用动电位扫描的方法,研究复合钎料的塔菲尔极化曲线和交流阻抗谱,发现稀土 Sm 的掺杂能够有效阻碍电荷在钎料与溶液之间的传递,显著降低腐蚀电流密度,增大极化电阻,提高交流阻抗,从而减缓腐蚀的进程。Sn<sub>58</sub>Bi-0.05Sm 复合钎料的腐蚀电流密度  $I_{corr}$  最低( $1.61 \times 10^{-6} \mu A \cdot cm^{-2}$ ),自腐蚀电位  $E_{corr}$  最大(-0.370V),极化电阻  $R_p$  最大( $14162.0 \Omega \cdot cm^2$ ),耐腐蚀性能最为显著。

关键词:Sn<sub>58</sub>Bi 钎料;稀土;润湿性;显微组织;耐腐蚀性

## B02-P27

### 从废弃动力电池回收镍钴锰及其掺镁镍钴锰酸锂正极材料的制备

郭苗苗<sup>1,2</sup>,席晓丽<sup>1</sup>,刘炼<sup>2</sup>,蔡津津<sup>2</sup>,黄冬波<sup>2</sup>,胡忆<sup>2</sup>,毕凡<sup>2</sup>,聂祚仁<sup>1</sup>

- 1.北京工业大学
- 2.荆门市格林美新材料有限公司

本文探索一种废旧动力电池绿色、短流程、低成本的回收及材料再制备工艺流程:通过放电、破碎、热裂解、筛分后得到含有一定铁、铜、铝、镁、钙杂质的镍钴锰酸锂正极粉,然后用  $H_2SO_4+Na_2SO_3$  浸出,控制反应温度 70-80 度,终点 PH 为 1.5,反应 3 小时,铁、铝、镁、钙、镍、钴、锰、锂浸出率均在 99%以上,铜不浸出;接着调节体系 PH 为 4-4.5,铝、铁去除率分别为 99%、99.9%;除铝铁之后的溶液通过 P204 萃取剂进行共萃取,优化工艺后控制萃取剂浓度为 25%,皂化段钠皂值为 16.6%,萃取段有机相:水相=2:1,将有价金属萃入有机相,反萃段有机相:水相=24:1,使金属达到富集目的,得到镍、钴、锰和镁的硫酸盐混合溶液;用硫酸镍、硫酸钴、硫酸锰及硫酸镁调节混合溶液中各金属含量比例,化学共沉淀制备提高材料循环稳定性的掺镁镍钴锰三元前驱体,萃余液用碳酸钠沉淀,制备碳酸锂。通过 XRD、SEM、EDS 分析,掺杂镁进入镍钴锰酸锂晶格,晶体结构为典型的层状结构,球形,杂质元素均匀分布;在 0.1C,电压为 2.75-4.5V 条件下,优化后的掺杂镁的循环性能优于未掺杂的正极材料,具有良好的产业化前景。

## B02-P28

### 锂电池中间相炭微球(MCMB)负极材料的能耗与碳排放分析

高思雯,龚先政,孙博学

北京工业大学 工业大数据应用技术国家工程实验室

化石燃料的耗竭促进了清洁能源的开发,锂离子电池作为新能源储存的重要媒介得到了广泛的发展与应用。我国作为锂离子电池负极材料的出口大国,于 2020 年出口负极材料的比重将达到国外需求量的 50%。中间相炭微球具有较好的比容量、循环寿命以及优异的倍率性能等,因此成为我国常见锂离子电池负极材料之一。本研究针对我国中间相炭微球负极材料产品生命周期中的能源消耗与碳排放问题展开研究,基于生命周期清单分析方法,对生产中主要能源、资源输入量与污染物排放数据

进行调研、汇总与计算，采用 IPCC 方法分析产品的碳排放强度与物质贡献。

能耗分析结果显示，天然气和电力为中间相炭微球产品生产中的主要能源消耗类型，其比重分别占全部能源消耗的 55% 和 33.73%。碳排放结果显示，生产 1t 中间相炭微球负极材料的碳排放为 11596 kg CO<sub>2</sub>-当量，其中 CO<sub>2</sub> 是最大的贡献者，贡献比重达到 99.40%。从各贡献物质来看，生产中主要能耗天然气和主要原料煤沥青贡献比重最大，分别占总碳排放量的 39.80%和 31.79%。同时，还对主要输入项进行敏感性分析，并根据结果提出降低产品碳排放量最有效的改进建议。

关键词：中间相炭微球； 生命周期分析； 能源消耗； 碳排放

## **B02-P29**

### **中国钨生产的生命周期评价**

鹿珂伟<sup>1</sup>，龚先政<sup>1</sup>，孙博学<sup>1</sup>，丁晴<sup>2</sup>

- 1.北京工业大学 工业大数据应用技术国家工程实验室
- 2.中国标准化研究院

钨是一种重要的战略金属元素，被广泛用于硬质合金、钢铁等行业，全球每年消耗的钨资源 80%以上来自中国。然而钨的生产过程中会产生大量的能源消耗和环境污染。本文基于生命周期评价的技术框架，采用 ReCiPe 生命周期评价方法，通过对金属钨的采矿，选矿，冶炼和运输过程中环境影响的研究，找出环境热点并提出改进建议。研究表明：环境影响最大的在冶炼阶段，其中环境影响负荷占环境影响总量的 76.54%，主要是因为钨冶炼中消耗的烧碱和氢气大部分来自于电解，电解过程中消耗大量的电力。而最大的环境影响类型是人体毒性（HTP），占环境影响总量的 35.39%，这是由于钨矿开采和冶炼过程间接地产生了较多的重金属元素。因此有必要改进采选矿技术和冶炼技术来降低辅助材料的消耗量，对于降低钨生产过程的能源消耗和污染排放具有重要意义。

关键词：生命周期评价；钨；环境影响

## **B02-P30**

### **绿色产品认证实施效果评价技术研究**

孟瑞珂，高峰  
北京工业大学

随着社会的进步，人们的追求不断地朝绿色化的方向发展。然而，国内对绿色产品的认证并没有统一的标准，由此将对人们的生活造成极大的不便。本文将针对以上现实问题，在统一绿色产品概念和认证标识体系的基础上，建立科学的认证实施效果评价体系。尽管许多专家学者对认证实施效果评价方面提出了许多很有见地的见解，但一个科学的、易操作的绿色产品认证实施效果评价体系尚未建立。本文从认证结果评价和应用效果的角度，研究绿色产品认证实施效果评价指标体系的构建，采用层次分析法和网络分析法确定各指标权重，为典型绿色产品认证实施效果的评估提供基础理论和方法模型。

关键词：绿色产品；实施效果；指标体系；权重