

纳米 TiO₂ 负载硅藻土及改性研究进展

白春华,徐志永,李光辉,樊雪敏,范雯阳
(内蒙古科技大学 矿业研究院,内蒙古 包头 014010)

摘要:纳米二氧化钛光催化剂,由于其催化活性高、化学性质稳定、成本低、无毒等优点,已成为环境领域最有发展前景的光催化材料。针对其在催化过程中催化效率低、可见光利用率低、难回收利用等问题。本文综述了硅藻土负载纳米 TiO₂ 负载方法及 TiO₂ 掺杂改性最新研究进展,并提出了 TiO₂ 光催化剂存在问题及发展前景。

关键词:纳米二氧化钛;硅藻土负载;掺杂;光催化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2016.06.002

中图分类号:TD985 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2016)06-0008-05

自从水在 TiO₂ 电极上光分解得到氢气的论文发表以来,纳米半导体多相催化材料受到多领域学者的广泛研究。纳米 TiO₂ 具有催化活性高,化学性质稳定,无毒,无污染等优点^[2-4],广泛应用于光催化降解有机污染物,太阳能电池,气敏传感器,水处理和空气净化等领域。但是,纳米 TiO₂ 在悬浮液体系中,由于其粉体粒径小,量子效率低,极易团聚且难以回收利用等问题,造成光催化效率下降,成本上升。因此,将纳米 TiO₂ 负载载体上是提高其光催化效率的有效手段。目前,研究人员将纳米 TiO₂ 负载硅藻土、高岭土、白炭黑、粉煤灰、活性炭和凹凸棒等非金属矿物上抑制纳米 TiO₂ 颗粒团聚,实现纳米 TiO₂ 回收再利用。

硅藻土是一种硅质沉积岩,具有独特的微孔结构、比表面积大、吸附性强、高孔隙度耐高温和化学性质稳定等优良性质^[5-6],可作为纳米 TiO₂ 良好的载体。另一方面,TiO₂ 带隙较宽,只能被波长较短的紫外线激发,使得太阳能的利用率仅为 3%~5%;而且光激发产生的电子与空穴易复合,导致光量子效率较低^[7]等问题,降低 TiO₂ 能隙带宽度,抑制电子与空穴复合,使其吸收范围向可见光拓展是提高 TiO₂ 光催化的关键技术。

1 TiO₂/硅藻土光催化剂负载方法

纳米 TiO₂ 在水介质的悬浮体系中极易团聚,回收难、二次污染等问题。将纳米 TiO₂ 负载于硅藻土上,一方面实现纳米 TiO₂ 固化负载,为光催化反应提供场所;另一方面,硅藻土具有强吸附性能和离子交换性能,可以将污染物吸附在纳米 TiO₂ 表面,增大污染物与 TiO₂ 接触面积,提高纳米 TiO₂ 的催化效率^[8]。目前常用 TiO₂/硅藻土负载方法有溶胶-凝胶法、水解沉淀法、浸渍法、液相沉积法、机械力法和低温燃烧法等。

1.1 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是目前国内外研究最多制备负载型纳米 TiO₂ 材料的方法。该法一般以 TiCl₄、Ti(OC₂H₅)₄、Ti(OC₃H₇)₄ 为原料,以无水乙醇为溶剂,用酸调节 pH 值,在强烈搅拌下滴加去离子水,生成溶胶,将载体浸渍于溶胶中强烈搅拌,经陈化、过滤、干燥、煅烧制得负载型 TiO₂ 复合材料^[9]。

Bin Wang^[10] 采用溶胶-凝胶法制备 TiO₂/硅藻土光催化复合材料降解罗丹明 B。结果表明在光照 120 min,煅烧温度 750 ℃ 下煅烧 2 h, TiO₂ 的锐钛矿与金红石比例为 9:1,样品对罗丹明 B 去除率接近 100%,表明混晶效应提高了 TiO₂ 光催化效率。严

收稿日期:2015-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51464037)

作者简介:白春华(1978-),女,讲师,博士,从事非金属矿物材料研究。

通信作者:徐志永(1989-),男,硕士研究生,从事非金属矿物材料、矿物加工方面研究 Email: xzy15024749565@126.com。

继康等^[11]以硅藻土和钛酸四丁酯为原料,采用溶胶-凝胶法制备 TiO₂/硅藻土光催化复合材料,研究 TiO₂ 含量和煅烧温度对 TiO₂/硅藻土复合材料的光催化性能的影响。结果表明:煅烧温度 600℃ 时 TiO₂ 主要以锐钛矿晶型存在,煅烧温度抑制了锐钛矿向金红石的转变。TiO₂ 含量 37% 时, TiO₂ 均匀负载硅藻土表面,具有良好的催化活性。溶胶-凝胶法制备 TiO₂ 光催化复合材料工艺简单,合成温度低,可将 TiO₂ 制备与负载一次性完成, TiO₂ 与载体附着性好,得到 TiO₂ 纯度高,化学组分均匀,但是制备过程中需要大量原料,成本较高。

1.2 水解沉淀法

水解沉淀法以四氯化钛 (TiCl₄)、钛醇盐 (TiO-SO₄) 等为原料。首先,在冰水浴中,将一定质量的非金属矿物与水制成悬浮矿浆,搅拌的同时加入少量浓盐酸,随后缓慢加入一定量钛盐溶液,然后用碱性溶液调节 pH 值,在 50℃ 左右反应 2 h,所得样品经过滤、洗涤、干燥和煅烧处理^[12]。高如琴等^[13]采用水解沉淀法在不同水解温度下制备硅藻土负载纳米 TiO₂ 薄膜,结果表明,光照 300 min,水解温度 50℃,罗丹明 B 降解率达为 89.9%。王丽剑^[14]以提纯硅藻土和 TiCl₄ 为原料,采用水解沉淀法制备 TiO₂/硅藻土光催化复合材料,对降解罗丹明 B 降解率较高。丁世文^[8]采用分布水解沉淀法制备纳米 TiO₂/硅藻土复合材料,以酸性红 3R 染料溶液为目标污染物,考察复合材料光催化性能。研究表明,体系 pH=3,水解时间 75 min,酸性红 3R 染料降解率达到 86.55%。水解沉淀法工艺条件温和,设备简单,但是载体上 TiO₂ 分布不均匀。

1.3 浸渍法

浸渍法是将 TiO₂ 粉末置于水或乙醇中,利用超声波均匀分散成悬浮液,再将载体浸入到悬浮液,浸渍一定时间后经过吸附、过滤、洗涤和烘干得到 TiO₂ 光催化复合材料。该工艺操作简单, TiO₂ 负载率高,成本低,可用于工业化生产。但是制备的 TiO₂ 颗粒尺寸大,牢固性差,颗粒分布不均匀等。何媛媛^[15]采用浸渍法制备 TiO₂/硅藻土光催化剂,得到的 TiO₂ 光催化剂具有优良的吸附特性,在 160 W 紫外光照射 30 min,亚甲基蓝水溶液脱色率为 96%。

1.4 液相沉积法

液相沉积法是以无机钛酸盐为原料,加入的物

质向生成 TiO₂ 方向移动,将预先处理好的基片浸入溶液中,反应物在基片上发生配位体交换平衡反应,生成的 TiO₂ 沉积在基片上。张栋^[16]采用液相沉积法制备纳米 TiO₂/硅藻土复合材料,以甲醛为降解目标考察负载型 TiO₂/硅藻土光催化性能。研究表明, TiO₂ 负载量为 33.3%,40 W 日光灯下光照 60 min 甲醛降解率最高。将 TiO₂ 负载硅藻土上,提高了 TiO₂ 粒子分散性和改善其晶体结构,抑制光生电子与空穴复合,提高 TiO₂ 光催化活性。

1.5 机械力法

机械力法是固体颗粒在机械力作用下各种物质会发生物理化学反应,物质的形态、结构和物理化学性质发生改变,从而颗粒尺寸变小、比表面积增大、结晶度降低、产生晶格缺陷、旧化学键断裂新化学键重新组合。马玺^[17]等采用机械力活化法制备了 TiO₂/硅藻土光催化复合材料,结果表明 20% 硅藻土-80% TiO₂ 制备的光催化材料,在 300 W 高压汞灯下光照 60 min,甲基橙降解率达到 90%。

1.6 低温燃烧法

低温燃烧法是在点火温度 300~500℃,利用原料放出热量达到化合反应需要温度,产生的气体使形成的粉末不易团聚,能够合成均匀、比表面积大的粉体。陈建设^[18]以硫酸钛为原料,采用低温燃烧法合成硅藻土负载 TiO₂ 光催化材料,结果表明,罗丹明 B 浓度 10 mg/L,光催化剂量 2 g/L, pH=9,光催化剂重复降解 6 次罗丹明 B 降解率为 81.6%。

2 TiO₂ 掺杂改性

纳米 TiO₂ 掺杂改性可以延长空穴与电子复合时间,有效拓宽可见光吸收范围,提高 TiO₂ 光催化效率。目前,纳米 TiO₂ 掺杂改性主要有非金属离子掺杂、金属离子掺杂、共掺杂等。

2.1 非金属离子掺杂

非金属掺杂可以使非金属元素取代 TiO₂ 晶格氧, TiO₂ 禁带宽度变窄,使 TiO₂ 光催化具有可见光吸收范围。Asahi 等^[19]利用非金属掺杂提高 TiO₂ 活性以来,非金属元素 N、C、F、S 和 P 掺杂 TiO₂ 成为研究人员研究热点。夏悦^[20]以钛酸四丁酯为钛源,磷酸为磷源,采用溶胶-凝胶法制备磷掺杂 TiO₂-硅藻土光催化剂,结果表明,磷掺杂抑制 TiO₂ 晶粒生长,提高 TiO₂ 晶型转变温度, TiO₂ 光谱红移并拓展到可见光吸收范围。艾慧颖^[21]利用氮掺杂调控 TiO₂ 晶型和晶面研究,结果表明,氟离子掺杂 TiN 优先生成具

有(001)面的锐钛矿 TiO_2 单晶片状,氯离子掺杂 TiN 优先生成具有(110)面的金红石单晶棒状,而氟离子和氯离子协同掺杂 TiN 优先生成具有(110)面的锐钛矿红石 TiO_2 片状。王娟等^[22]以硅藻土为载体,利用硫掺杂制备红石 TiO_2 /硅藻土光催化复合材料,结果表明,硫掺杂后,硅藻土衍射峰减弱,金红石 TiO_2 包覆在硅藻土表面,形成了复合结构,紫外-可见漫反射图谱显示 S 掺杂使 TiO_2 吸收带由紫外向可见光红移,使 TiO_2 具有更强的可见光吸收性能。

2.2 金属掺杂

金属掺杂 TiO_2 有助于提高其光催化活性,作用机理主要表现在以下几个方面:(1)金属离子掺杂可以作为电子捕获剂,抑制了电子与空穴重新复合(2)金属掺杂可以在价带和导带之间形成掺杂能级,减小 TiO_2 襟带宽度,使吸收光谱向可见光红移(3)金属掺杂形成晶格缺陷,形成更多氧化中心^[23]。

2.2.1 贵金属掺杂

Li 等^[24]采用 Ag 掺杂 TiO_2 降解亚甲基蓝,结果表明,Ag- TiO_2 光催化剂在可见光下亚甲基蓝降解率较高。刘川川^[25]以硝酸铜为原料,采用溶胶-凝胶法制备 Cu 掺杂 TiO_2 /硅藻土光催化剂,研究表明, Cu^{2+} 掺杂浓度 0.5%, TiO_2 负载量为 75%,煅烧温度 540 $^{\circ}\text{C}$,在可见光下照 2 h,亚甲基蓝的降解率为 96.61%,掺杂后 TiO_2 光谱吸收发生红移,吸收光谱向可见光拓展。Aleksandra^[26]采用溶胶-凝胶法制备 Pt- TiO_2 光催化剂来降解药物中的异环磷酰胺和环磷酰胺,在可见光照射下, Pt- TiO_2 光催化剂对异环磷酰胺和环磷酰胺的降解非常有效, Pt 掺杂更好使电子与空穴分离,并且加速 $\cdot\text{OH}$ 自由基的产生。

2.2.2 稀土金属掺杂

掺杂 TiO_2 的稀土主要有 La^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Er^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Sm^{3+} 、 Th^{4+} 、 Nd^{3+} 、 Ce^{3+} 等。陈建设^[18]利用低温燃烧法制备 Ce 掺杂 TiO_2 /硅藻土光催化材料,并利用罗丹明 B 测定催化性能,结果表明,煅烧温度 600 $^{\circ}\text{C}$, Ce 掺杂量为 0.2%, TiO_2 主要以锐钛矿和金红石形成存在,光催化材料降解罗丹明效果较佳。

2.2.3 过度金属离子掺杂

过渡金属离子掺杂是在 TiO_2 半导体内形成杂质缺陷,缺陷成为空穴或光生电子的捕获中心,抑制空穴与光生电子复合。过度金属离子掺杂主要有 Fe^{3+} 、 Sn^{4+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 等。Jin Zhu Ma^[27]采用共沉淀法制备 Fe 掺杂 TiO_2 ,结果表明 Fe^{3+} 取代了

八面体配位氧化钛晶格中 Ti^{4+} 离子,延长光吸收波长至可见光,增加了光生电子与空穴的分离机率。

2.3 共掺杂

共掺杂主要包括非金属与非金属、金属与金属、金属与非金属。

2.3.1 非金属与非金属共掺杂

根据半导体能带理论, TiO_2 导带能级主要取决于 $\text{Ti}3d$ 轨道的能级,价带能级主要取决于 $\text{O}2p$ 轨道能级。非金属离子 P 轨道能量较高,可取代 TiO_2 中 O,使光催化剂在可见光具有催化活性。Yuan 等^[28]研究硼碳共掺杂 TiO_2 光照降解氯酚试验,发现共掺杂催化活性明显高于单一元素掺杂。Wang 等^[29]研究 C、N、S 三种非金属掺杂,结果表明共掺杂后 TiO_2 的吸收光谱向可见光拓展。魏凤玉^[30]研究发现 B、S 共掺杂有协同作用,使 TiO_2 的光吸收带发生红移,且提高 TiO_2 -B-S 表面羟基含氧量。

2.3.2 金属与金属共掺杂

金属与金属共掺杂 TiO_2 是将金属离子引入 TiO_2 晶格中,一种金属离子取代 TiO_2 中的 Ti^{4+} ,另一种金属作为捕获陷阱,在晶格中引入新电荷,使晶格形成缺陷,延长光生电子与空穴复合时间,提高 TiO_2 光催化活性。A. M. Bakhshayesh^[31]利用 Sr、Cr 共掺杂 TiO_2 ,结果发现共掺杂 TiO_2 薄膜比未掺杂具有较低的能隙带,拓展 TiO_2 的可见区吸收范围,并且共掺杂抑制了金红石生长。

2.3.3 非金属与金属共掺杂

非金属与金属掺杂 TiO_2 可产生掺杂能级和捕获中心,具有更显著的协同效应。Huang^[32]利用水热合成法制备 Pt/共掺杂 TiO_2 ,研究发现 Pt 作为掺杂 TiO_2 的电子捕获中心,抑制了电子-空穴复合,提高光电转化效率;N 掺杂使 TiO_2 能隙带变窄,降低激发所需能量,提高可见光响应范围。官长伟^[33]利用 Ag-N 共掺杂 TiO_2 ,研究发现 N 2p 态和 Ag 4d 态在 TiO_2 襟带中引入了杂质能级,导带下移,襟带宽度减小, TiO_2 吸收带发生红移,改善了 TiO_2 可见光响应。

3 展 望

纳米二氧化钛由于其光催化效率高、化学性质稳定、无毒、无二次污染等优点被广泛应用于各个领域,但是由于其能隙带宽,光生电子与空穴易复合,且在水介质悬浮液体系中分离回收难等问题,使其在大规模工业化生产受到极大限制。因此。今后研

究需解决以下问题:(1)寻求合适的载体以及负载方法将TiO₂成功负载与载体上,进一步提高光催化复合材料的催化活性。(2)加强对TiO₂改性研究,尤其深入研究不同掺杂改性机理研究,使TiO₂在可见光下有较强的催化活性。(3)研究载体与催化剂之间相互作用,探讨负载过程对催化效率的影响。(4)研究适合工业的光催化反应器,为工业生产和使用奠定技术基础。

参考文献:

- [1] Fujishima A. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. *nature*, 1972, 238: 37-38.
- [2] Z. -Z. Gu, R. Horie, S. Kubo, Y. Yamada, A. Fujishima, O. Sato, Fabrication of a metal-coated three-dimensionally ordered macroporous film and its application as a refractive index sensor[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2002 (41): 1153-1156.
- [3] Chatterjee D, Dasgupta S. Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2005, 6(2): 186-205.
- [4] Fujishima A, Rao T N, Tryk D A. Titanium dioxide photocatalysis[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2000, 1(1): 1-21.
- [5] 尹晓敏,程永清. 掺杂方式对纳米二氧化钛性能的影响研究[J]. *人工晶体学报*, 2006, 35(1): 46-49.
- [6] 王妍, 刘国军, 刘素花, 等. 硅藻土/TiO₂ 复合光催化剂制备及表征[J]. *材料导报*, 2015, 29(4): 18-21.
- [7] 陈春英. 二氧化钛纳米材料生物效应与安全应用. 科学工业出版社[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 5.
- [8] 丁士文, 柳涛, 李桐, 等. 纳米二氧化钛-硅藻土复合材料的制备及性能[J]. *河北大学学报: 自然科学版*, 2015 (1): 27-33.
- [9] 汪滨, 郑水林, 张广心. 纳米TiO₂/非金属矿物复合光催化剂的研究进展[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2013(4): 23-27.
- [10] Wang B, de Godoi F C, Sun Z, et al. Synthesis, characterization and activity of an immobilized photocatalyst: Natural porous diatomite supported titania nanoparticles[J]. *Journal of Colloid and interface science*, 2015, 438: 204-211.
- [11] 严继康, 曹加龙, 黄思仁, 等. TiO₂/硅藻土复合材料的制备与光催化性能研究[J]. *昆明理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(6): 28-32.
- [12] 刘勋. 纳米TiO₂/天然矿物复合光催化材料的制备[J]. *矿产综合利用*, 2004(1): 10-15.
- [13] 高如琴, 程萌, 黄豆豆, 等. 纳米TiO₂薄膜的制备与光催化性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2012, 41(3): 675-679.
- [14] 王利剑, 郑水林, 舒锋. 硅藻土负载二氧化钛复合材料的制备与光催化性能[J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(7): 824-826.
- [15] 何媛媛, 李正山, 范莉, 等. TiO₂ 硅藻土复合光催化剂研制及光催化氧化水中亚甲基蓝的研究[J]. *染料与染色*, 2005, 42(1): 53-54.
- [16] 张栋, 丁士文, 李兰芬, 等. 负载型混晶纳米TiO₂/硅藻土复合材料的制备及其光催化性能[J]. *化学研究*, 2012, 23(1): 35-38.
- [17] 马玺, 王旭明, 邓雁希. TiO₂/硅藻土复合光催化材料的制备与光催化性能研究[J]. *非金属矿*, 2010, 33(4): 72-73.
- [18] 陈建设, 熊领领, 蔡安, 等. 硅藻土负载TiO₂光催化材料的制备及性能研究[J]. *东北大学学报: 自然学科*, 2013, 34(6): 864-868.
- [19] Asahi R, Morikawa T, Ohwaki T, et al. [J]. *Science*, 2001, 5528(293): 269-271.
- [20] 夏悦, 李芳菲, 蒋引珊, 等. 天然硅藻土负载磷掺杂TiO₂及其可见光催化性能[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2014 (2): 415-420.
- [21] 艾慧颖, 石建稳, 陈建炜. 氮掺杂TiO₂优势晶面及晶型的调控研究[J]. *人工晶体学报*, 2011, 42(38): 1581-1583.
- [22] 王娟, 鲁立强, 沈翔, 等. 硫掺杂二氧化钛负载硅藻土复合光催化剂降解苯酚的研究[J]. *材料导报 B*, 2011, 25(5): 110-114.
- [23] Xin B, Ren Z, Wang P, et al. Study on the mechanisms of photoinduced carriers separation and recombination for Fe³⁺-TiO₂ photocatalysts[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(9): 4390-4395.
- [24] Li Y, Ma M Y, chen W. al. Preparation of Ag-TiO₂ nanoparticles by a miniemulsion method and their photoactivity in visible light illuminations[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 129(1-2): 501-505.
- [25] 刘川川. Cu 掺杂TiO₂/硅藻土复合光催化材料复合材料的制备及性能研究[D]. 北京: 2013.
- [26] Aleksandra Ofiarska, Aleksandra Pieczyńska, Agnieszka Fiszka-Borzyszkowska, Piotr Stepnowski, Ewa Maria Siedlecka. Pt-TiO₂-assisted photocatalytic degradation of the cytostatic drugs ifosfamide and cyclophosphamide under artificial sunlight. *Chemical Engineering Journal* [J]. 2015, 146: 23-27.
- [27] Ma J, He H, Liu F. Effect of Fe on the photocatalytic removal of NO_x over visible light responsive Fe/TiO₂ catalysts[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 179: 21-28.

- [28] Yuan J, Wang E, Chen Y, et al. Doping mode, band structure and photocatalytic mechanism of B-N-codoped TiO₂ [J]. Applied Surface Science, 2011, 257 (16): 7335-7342.
- [29] Wang P, Yap P, Lim T. C-N-S tri-doped TiO₂ for photocatalytic degradation of tetracycline under visible-light irradiation [J]. Applied Catalysis A-General, 2011, 339 (1-2): 252-261.
- [30] 魏凤玉, 倪良锁, 彭书传. TiO₂-BS 光催化剂的制备及性能研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(6): 621-625.
- [31] Bakhshayesh A M, Bakhshayesh N. Enhanced performance of dye-sensitized solar cells aided by Sr, Cr co-doped TiO₂ xerogel films made of uniform spheres [J]. Journal of colloid and interface science, 2015, 460: 18-28. [32] Huang L H, Sun C, Liu Y L, Pt/N-codoped TiO₂ nanotubes and its photocatalytic activity under visible light [J]. Applied Surface Science, 2007, 253: 7029-7035.
- [33] 官长伟, 王家恒, 付现凯, 等. Ag-N 共掺锐钛矿 TiO₂ 电子结构和光学质的第一原理研究 [J]. 人工晶体学报, 2015, 44(1): 178-180.

Research Progress of Nano TiO₂ Loaded Diatomite and Modification

Bai Chunhua, Xu Zhiyong, Li Guanghui, Fan Xuemin, Fan Wenyang

(Institute of Mining, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia, China)

Abstract: Nano-TiO₂ photocatalyst has become the most promising photocatalyst in environmental field due to its high catalytic activity, stable chemical properties, low cost, non-toxicity etc. In the catalytic process, there are these problems of low catalytic efficiency, poor visible absorption rate, and difficult to recycle. This paper reviews the method of diatomite loaded and doped nano-TiO₂. The research prospect and some existing problems of nano-TiO₂ Photocatalyst were discussed.

Keywords: Nano-TiO₂; Diatomite load; Dope; Photocatalysis

(上接 7 页)

- [46] 赵鸿胜, 张雄, 张永娟, 等. 影响煤矸石热活的因素分析 [J]. 四川水泥, 2003(6): 10-12.
- [47] 王智宇. 偏高岭土的制备及其在混凝土中的应用 [J]. 建材技术与应用, 2006(5): 6-8.
- [48] 卜景龙. 煤矸石在建材工业中的综合利用 [J]. 中国物资再生, 1994(2): 15-16.
- [49] 牟国栋, 马喆生, 施倪承, 等. 煤矸石的纳米结构研究及用其烧制结晶釉的试验 [J]. 矿物岩石, 2000, 20(1): 95-98.
- [50] 罗秋良. 我国煤矸石综合利用现状、存在问题及其对策 [R]. 北京: 地矿部矿管局, 1992(2): 41-43.

Resource Utilization Ways of Coal Gangue and its Development

Sun Chunbao^{1,2}, Zhang Jinshan^{1,2}, Cao Zhao^{1,2},

Fan Wenyang¹, Guo Zhenkun¹, Zhou Shan¹

(1. Mining Engineering Institute of Inner Mongolia Science and Technology University, Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Technology Research Center of Solid Waste Resources Comprehensive Utilization, Baotou, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Engineering Technology Research Center of Coal Safety Mining and Use, Baotou, Inner Mongolia, China)

Abstract: Overviewing on the current domestic and abroad source, harm, use of gangue, the different classification methods from different perspective in the techniques and methods of gangue use are summarized. It could be classified according to resource recycling, or according to the method of the project use. Focusing on the use of coal gangue according to the depth level classification, it can be divided into direct use of type, quality and processing and comprehensive utilization of three categories. Accordingly comprehensive and detailed analysis on available ways of comprehensive utilization of resources of coal gangue were roundly dissected, and prospected the depth of development of domestic coal gangue.

Keywords: Coal gangue; Resources; Comprehensive utilization; Exploration and research