黄光许,段宾,孔晓东,等. 活性氧化镁的制备及其对煤的黏结作用[J]. 煤炭学报,2016,41(5):1287-1293. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1255

Huang Guangxu, Duan Bin, Kong Xiaodong, et al. Preparation of active magnesium oxide and its bonding effect on coal[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1287-1293. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1255

活性氧化镁的制备及其对煤的黏结作用

黄光许,段　宾,孔晓东,康伟伟,张双杰,张　超,张传祥,谌伦建,刘全润

(河南理工大学 材料科学与工程学院,河南 焦作　454000)

摘　要:通过煅烧菱镁矿制备活性氧化镁,并与粉煤混合成型。利用水合法测定氧化镁的活性,采用 N_2 吸附仪、X 射线衍射仪(XRD)和扫描电镜(SEM)等设备表征氧化镁的结构与形貌;通过机械强度值表征氧化镁对粉煤的黏结效果,采用 XRD 和 SEM 等手段研究其黏结机理。结果表明:随着煅烧温度的升高(500~900 ℃)、煅烧时间的延长(0.5~2.5 h),所制氧化镁的活性均呈现出先升高后降低的趋势。菱镁矿在 700 ℃下煅烧 1.5 h 后,氧化镁大量生成且结晶度不高,比表面积最大,活性最高。氧化镁的活性决定其对煤粒的黏结效果,活性越高,形成的稳定水化物越多,对煤粒的黏结作用越强,相应型块的机械强度越高(最大值超过 500 N/块,约 30 MPa)。

关键词:菱镁矿;活性氧化镁;机械强度;黏结性;水化物

中图分类号:TQ536　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:0253-9993(2016)05-1287-07

Preparation of active magnesium oxide and its bonding effect on coal

HUANG Guang-xu, DUAN Bin, KONG Xiao-dong, KANG Wei-wei, ZHANG Shuang-jie, ZHANG Chao, ZHANG Chuan-xiang, CHEN Lun-jian, LIU Quan-run

(*School of Material and Science Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo*　454000, *China*)

Abstract: Active magnesium oxide was prepared by the calcination of magnesite, and then used as binder for coal briquetting. The activity, specific surface area, crystal structure and morphology of as-prepared magnesium oxide were evaluated by N_2 adsorption, scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The bonding effect of magnesium oxide hydrates on coal and corresponding mechanism were studied by briquette compressive strength test, XRD and SEM. The results show that the activity of magnesium oxide increases and then decreases with the increase of the calcination temperature (from 500 to 900 ℃) and calcination time (from 0.5 to 2.5 h). The optimal calcination conditions are as follows: temperature of 700 ℃, time of 1.5 h, therefore, the resultant magnesium oxide possesses a lower crystallinity, largest surface area and highest activity among all the samples prepared. The activity of magnesium oxide is the key factor to determine its bonding effect on coal particles. The magnesium oxide with higher activity may convert to more stable hydrate, and the corresponding briquette exhibit a higher compressive strength (higher than 30 MPa).

Key words: magnesite; active magnesium oxide; compressive strength; hydrate; bonding property

我国煤炭资源丰富,是世界上最大的煤炭生产和消费国[1-3]。但是,在煤炭加工利用过程中也产生了诸多亟待解决的问题。例如,机械化采煤的普及使块煤产率下降,粉煤量增多。粉煤的综合利用相对困

收稿日期:2015-08-31　**修回日期**:2015-11-24　**责任编辑**:张晓宁

基金项目:河南省科技攻关重点资助项目(102102210207);中国煤炭工业协会科学技术指导资助项目(MTKJ-2011-382);河南理工大学博士基金资助项目(72103/001/007)

作者简介:黄光许(1972—),男,河南信阳人,副教授。E-mail:hgxu@hpu.edu.cn。**通讯作者**:刘全润(1974—),男,河南信阳人,副教授。E-mail:qrliu@163.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

难,造成大量积压,既浪费资源又污染环境[4-5]。型煤技术是进行粉煤综合利用、促进洁净煤技术发展的有效途径[6-8],国家能源局《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020)》指出,应积极推广先进的洁净型煤技术。黏结剂是型煤技术的关键,决定型煤的质量和成本。因此,开发黏结性强、廉价易得、环境友好的黏结剂用于粉煤成型,并进行相关黏结机理研究,具有重要的现实意义。

胶凝材料是指能将各种散粒矿质材料或块状材料黏结成为一个整体,并经过自身的一系列物理化学作用形成具有一定机械强度的物质的统称,可用作型煤黏结剂。镁质胶凝材料是以氧化镁为主要成分的无机胶凝材料,由菱镁矿(主要成分为 $MgCO_3$)高温煅烧制得[9]。我国菱镁矿资源储量大,约占世界总储量的 31%,且绝大部分易于开采,氧化镁含量高[10-12]。氧化镁的活性主要指其水化胶凝性能,是影响其性能的关键因素,活性高的氧化镁水化固结后机械强度高,且凝结时间短。陈后维等用低品级轻烧氧化镁、粉煤灰、磷酸等制得了具有优良耐水性能的镁质胶凝材料[13-14];文静等研究发现,氧化镁的活性、反应温度对氯氧镁水泥的水化过程有不同程度的影响[15];巴明芳等调节轻烧氧化镁粉、七水硫酸镁、水的摩尔比为 14 ∶ 1 ∶ 12,得到了抗压强度达到 38.3 MPa 的硫氧镁胶凝材料浆体[16]。

如前所述,镁质胶凝材料的相关研究主要集中于氧化镁的水化过程及其机理方面,关于菱镁矿的煅烧工艺条件对氧化镁活性的影响及其对煤的黏结效果鲜有报道。另外,因为所制氧化镁的活性较低,限制了我国菱镁矿的高效利用[17]。本文以菱镁矿为原料,通过煅烧制备活性氧化镁,系统研究煅烧温度、煅烧时间对氧化镁活性的影响;分析活性氧化镁对粉煤的黏结效果及其机理,为其在粉煤成型领域的应用提供理论支持。

1 实 验

1.1 实验原料

菱镁矿产自辽宁省海城市,化学组成见表 1。粉煤煤样:长焰煤、兰炭取自新疆吐鲁番地区,烟煤取自河南省鹤壁市,无烟煤取自河南省焦作市,工业分析见表 2。各煤样经复合破碎机破碎后,其粒度分布基本一致,粒度均小于 3 mm,且小于 1 mm 的部分约占 69%。

1.2 实验过程

利用德国 Netzsch 公司的 STA409 PC 型热重分析仪对菱镁矿进行热重分析,升温区间为室温至 1 000 ℃,升温速率为 10 ℃/min,N_2 载气流量为 20 mL/min;将菱镁矿平铺于带盖铁盒底部(厚度约为 1 cm),置于鹤壁淇天 ZNHW-Ⅲ型马弗炉中,在 500~900 ℃下煅烧 0.5~2.5 h 制备(活性)氧化镁;运用水合法测定各氧化镁样品的活性[18],准确称量 2 g(W_0,精确至 0.000 1 g)氧化镁样品,置于 40 mm×25 mm 的玻璃称量瓶中,加入 15 mL 蒸馏水,盖上盖子并留窄缝,放入烘箱中于 100~110 ℃水化 6 h,然后升温至 150 ℃烘干 3 h 至恒重,取样后干燥并称量(W_1),进而计算试样中活性 MgO 的含量((W_1-W_0)/(0.45W_0));分别采用美国康塔仪器公司 AsiQM0000-3 型 N_2 吸附仪、日本岛津 XRD-6000 型 X-射线衍射仪(XRD)和日本电子 JSM-6390LV 型扫描电子显微镜(SEM)对氧化镁样品的比表面积、晶体结构和形貌进行表征。

表 1 菱镁矿的化学组成

Table 1 Chemical composition of magnesite %

MgO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	灼减
46.23	1.50	1.18	0.11	0.08	50.84

表 2 煤样的工业分析

Table 2 Proximate analysis of coal samples %

煤样	M_{ad}	A_d	V_{daf}	FC_{daf}
长焰煤	3.60	3.54	34.02	65.98
兰炭	5.94	8.54	17.21	82.79
烟煤	1.14	11.79	16.03	83.97
无烟煤	1.36	8.96	9.02	90.98

将各(活性)氧化镁按 11% 的添加量分别与不同煤样混合,物料总水分保持在 15% ~18%。用巩义鑫迪 360×250 型强力辊式压球机成型,再经自然风干得型块样品;按照煤炭行业标准(MT/I 748—1997),用无锡建仪 TYE-50 型抗折抗压试验机测定型块的机械强度;对型块进行 XRD 分析和 SEM 观察。

2 结果与讨论

2.1 活性氧化镁的制备

对菱镁矿进行煅烧制备(活性)氧化镁,确定适宜的煅烧温度和煅烧时间,使菱镁矿中所含的碳酸镁充分分解,不至“欠烧”,同时保证生成的氧化镁不因“过烧”而大幅提高结晶度(使其活性降低),最终得到活性最高的氧化镁。

2.1.1 菱镁矿的热重分析

为确定煅烧菱镁矿的工艺条件,首先对其进行热

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

重分析,结果如图 1 所示。可以看出,菱镁矿中碳酸镁热分解的主要温度范围是 400 ~ 750 ℃,最大质量变化速率温度为 640 ℃左右。温度高于 800 ℃时,菱镁矿所含碳酸镁基本分解完全。

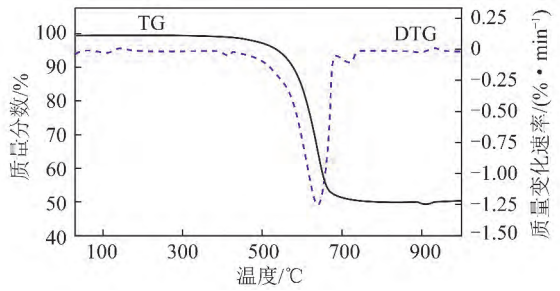


图 1　菱镁矿的 TG/DTG 曲线

Fig. 1　TG/DTG curve of magnesite

2.1.2　菱镁矿的烧失率

根据 2.1.1 节中菱镁矿的热重分析结果,本试验设定煅烧温度分别为 500,600,700,800 和 900 ℃;综合考虑菱镁矿煅烧分解速度及实际应用中生产成本等因素,选取煅烧时间分别为 0.5,1,1.5,2 和 2.5 h。菱镁矿煅烧后的烧失率如图 2 所示,随着煅烧温度的升高(500 ~ 800 ℃),菱镁矿的烧失率呈增大趋势,但增大的幅度逐渐降低,最大烧失率为 49.8%;煅烧温度超过 800 ℃时,菱镁矿的烧失率变化较小,可能出现“过烧”现象。随着煅烧时间的延长(0.5 ~ 2.5 h),500 ℃下煅烧时菱镁矿的烧失率呈线性增大,但最大值仅为 38.6%,表明处于“欠烧”状态;600 ~ 900 ℃下煅烧时菱镁矿的烧失率先逐渐增大,后均在 1.5 h 达到“饱和”,煅烧时间继续延长,烧失率保持不变,可能出现“过烧”现象。

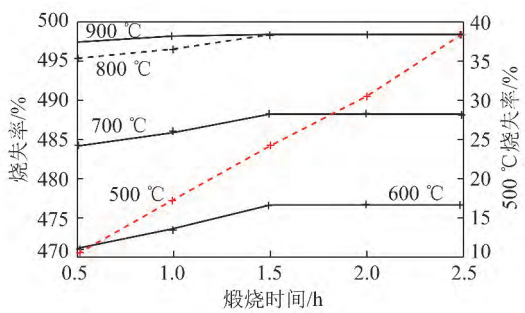


图 2　菱镁矿的烧失率

Fig. 2　Mass loss rates of magnesite

2.1.3　氧化镁的活性

由 2.1.2 节试验结果可知,菱镁矿在各温度下(除 500 ℃外)煅烧 1.5 h 后均分解完全,相应氧化镁样品的活性如图 3 所示。由图 3 可知,煅烧时间为 1.5 h 时,随着煅烧温度的升高(500 ~ 900 ℃),所制氧化镁(分别记作:MW500,MW600,MW700,MW800 和 MW900)的活性先迅速增大,在 700 ℃达到最大值(MW700,81.3%),随后缓慢降低,证实出现“过烧”现象。煅烧温度为 700 ℃时,煅烧时间对氧化镁活性的影响如图 4 所示,随煅烧时间延长(0.5 ~ 2.5 h),所制氧化镁(分别记作:MS05,MS10,MS15,MS20 和 MS25,MS15 即为 MW700)的活性先缓慢增大,在 1.5 h 时达到最大值,随后缓慢降低,表明出现“过烧”现象。由此得出,菱镁矿在 700 ℃下煅烧 1.5 h,所得氧化镁的活性最高。

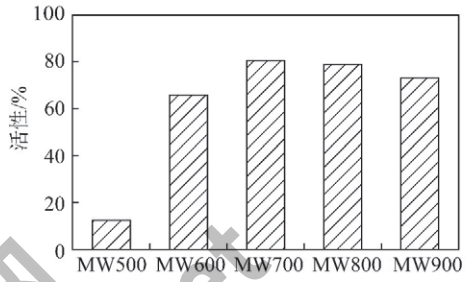


图 3　不同煅烧温度下所制氧化镁的活性

Fig. 3　Activity of MgO obtained at different calcined temperatures

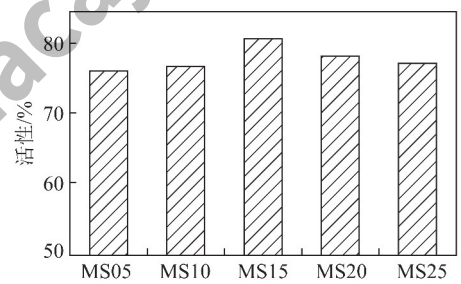


图 4　不同煅烧时间下所制氧化镁的活性

Fig. 4　Activity of MgO obtained at different calcined times

2.1.4　氧化镁的结构

(1)比表面积。

不同煅烧工艺条件下制备氧化镁的比表面积如图 5,6 所示。由图 5 可以看出,煅烧时间为 1.5 h 时,随着煅烧温度的升高,所制氧化镁的比表面积基本呈先增大后降低的趋势,在 700 ℃达到最大值(MW700,85 m^2/g)。500 ℃时菱镁矿分解程度较低(图 2,烧失率仅为 25%),表明样品中氧化镁含量较低,故所测比表面积不具参考性。由图 6 可以看出,煅烧温度为 700 ℃时,随着煅烧时间的延长,所制氧化镁的比表面积亦先增后降,在 1.5 h 达到最大值。不同煅烧条件下所制氧化镁的比表面积与相应活性的变化规律基本一致,这是由于氧化镁的比表面积越大,水化反应越剧烈、越充分,活性越高。

(2)XRD 分析。

对菱镁矿在不同工艺条件下煅烧制得氧化镁进行 XRD 分析,研究其晶体结构与活性之间的关系。图 7 为菱镁矿在不同温度下煅烧 1.5 h 所制氧化镁

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

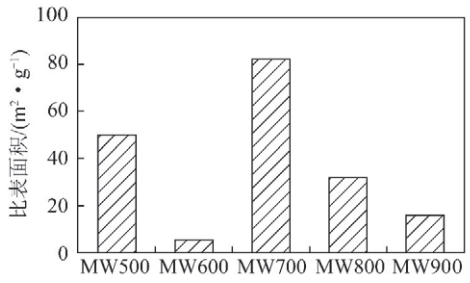


图 5 不同煅烧温度下所制氧化镁的比表面积

Fig. 5 Specific surface area of MgO obtained at different calcined temperatures

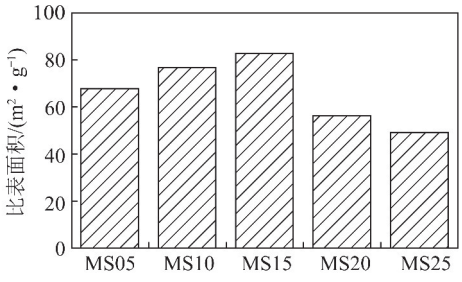


图 6 不同煅烧时间下所制氧化镁的比表面积

Fig. 6 Specific surface area of MgO obtained at different calcined times

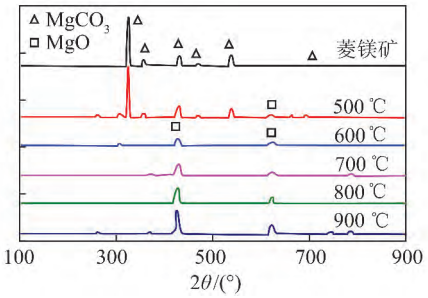


图 7 不同煅烧温度下氧化镁的 XRD 图

Fig. 7 XRD patterns of MgO obtained at different calcined temperatures

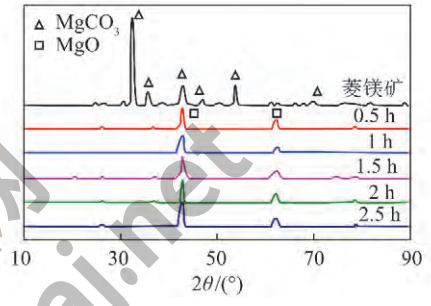


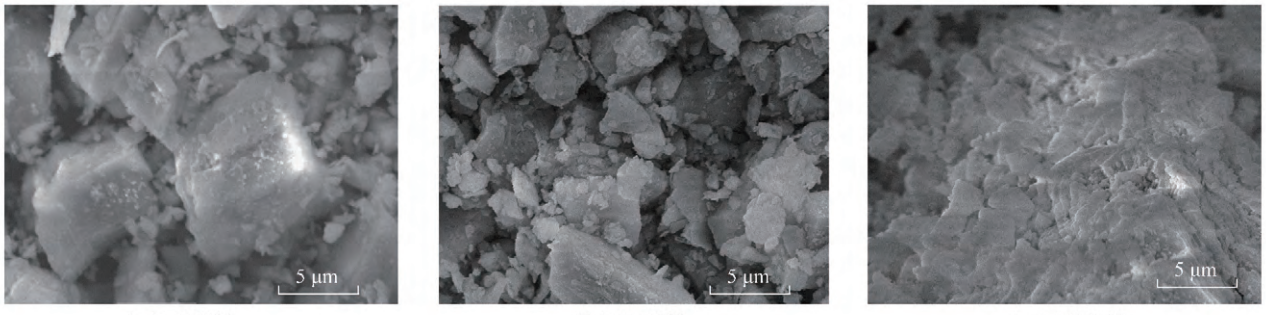
图 8 不同煅烧时间下氧化镁的 XRD 图

Fig. 8 XRD patterns of MgO obtained at different calcined times

的 XRD 谱图,500 ℃煅烧所得样品的峰位、峰强与菱镁矿相似,具有很强的碳酸镁特征峰,表明碳酸镁的分解程度较低;600 ℃下煅烧后,该特征峰基本消失,表明碳酸镁基本分解完全。煅烧温度继续升高,氧化镁的特征峰越来越尖锐(半峰宽减小),峰强变强,表明氧化镁的结晶度增大。图 8 为菱镁矿在 700 ℃煅烧 0.5 ~ 2.5 h 所制氧化镁的 XRD 谱图,随煅烧时间的延长,氧化镁的特征峰呈微弱的增强趋势,表明其结晶度缓慢增大。氧化镁的结晶度对其活性有一定影响,一般情况下,结晶度越低,缺陷越多,活性越高[19]。

(3)SEM 观察。

图 9 为 MW500,MW700,MW900 的 SEM 图。如图 9(a)所示,菱镁矿在 500 ℃下煅烧时后,矿粒仍具有规则几何外形,仅有少量碳酸镁分解,出现“欠烧”现象。700 ℃下煅烧后,样品粒度变细,呈不规则外形(图 9(b)),表明碳酸镁充分分解。900 ℃煅烧得到的氧化镁颗粒相互连接,颗粒有尺寸增大、外形更致密规则的趋势(图 9(c)),表明存在过烧现象。上述 3 种氧化镁的 SEM 观察结果与 XRD、比表面积和活性测试的结果一致。



(a) MW500 (b) MW700 (c) MW900

图 9 不同煅烧温度下所制氧化镁的 SEM 图

Fig. 9 SEM images of MgO obtained at different calcined temperatures

2.2 活性氧化镁对煤的黏结作用

2.2.1 黏结效果

粉煤成型的原理是在一定压力下,利用胶凝材料对煤(粒)的黏结作用,将煤(粒)固结为整体。分别将新疆长焰煤和兰炭与 2.1.3 节中各种氧化镁混合(氧化镁的添加量均为 11%)、加压成型,以型块的

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

机械强度表征活性氧化镁对煤的黏结效果。如图 10(a)所示,不同温度下煅烧 1.5 h 制备的氧化镁与长焰煤和兰炭混合成型所得型块,其机械强度的变化规律与相应氧化镁的活性变化规律基本一致。图 10(b)显示,在 700 ℃下煅烧不同时间所制的氧化镁,相应型块机械强度变化规律也与氧化镁的活性变化规律基本一致。另外,相同条件下,兰炭型块强度均高于长焰煤型块;700 ℃下煅烧 1.5 h 所制氧化镁作为黏结剂对应型块的机械强度最高,均高于 500 N/块(30 MPa)。而该活性氧化镁与烟煤、无烟煤混合成型,相应型块的机械强度分别为 297 N/块(17.8 MPa)和 278 N/块(16.7 MPa),表明该活性氧化镁对煤的黏结具有一定选择性。理论上,型煤黏结剂对煤料进行很好地润湿是二者界面产生黏合力的前提。本文中,不同煤样的表面性质不同,黏结剂对其润湿、黏结的作用亦不相同,详细区别需要进一步研究。上述结果表明,采用该活性氧化镁,可基本满足粉煤成型对强度的要求(根据需要,可加入其他添加剂)。

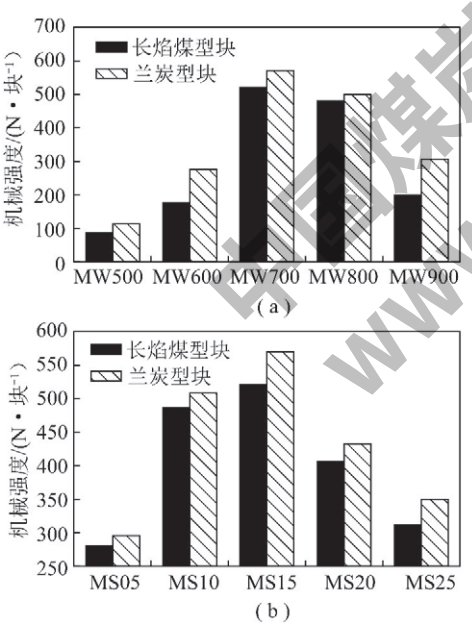


图 10　不同煤样型块的机械强度

Fig. 10　Compressive strength of different briquettes

2.2.2　黏结机理

(1)型块的 XRD 分析。

长焰煤与 MW500,MW700,MW900 混合所制型块(记作:C-MW500,C-MW700,C-MW900)的 XRD 分析如图 11(a)所示,兰炭与 MW500,MW70,MW900 混合所制型块(记作:L-MW500,L-MW700,L-MW900)的 XRD 分析如图 11(b)所示。不同活性的氧化镁在型块内部形成的水化相数量差别较大,C-MW500 和 L-MW500 的碳酸镁及氧化镁峰明显,几乎未形成水化相,故机械强度较低;C-MW700 和 L-MW700 中氧化镁的水化物 $Mg(OH)_2$ 的特征峰明显,其中一部分 $Mg(OH)_2$ 与煤中 $MgSO_4$ 生成 3·1·8 水化相,所以机械强度较高;C-MW900 和 L-MW900 中氧化镁的特征峰明显,但形成水化相较少,故型块强度降低。这是由于 900 ℃下氧化镁逐渐烧结致密,结晶度增大,活性降低,导致水化不完全。

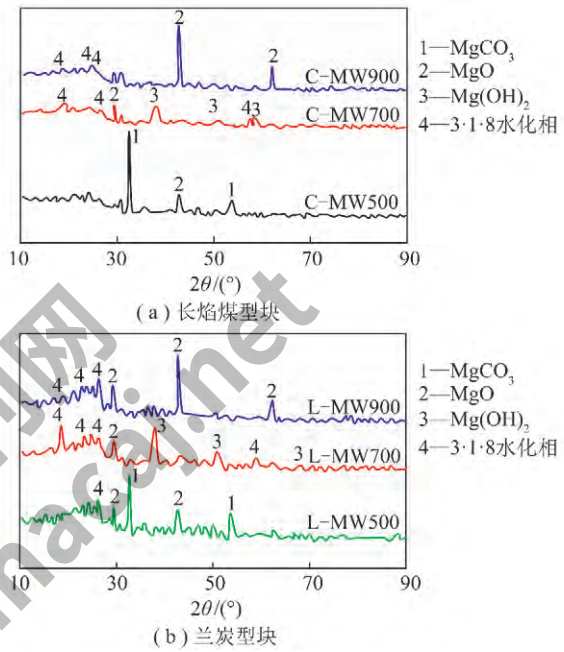


图 11　长焰煤型块和兰炭型块的 XRD 图

Fig. 11　XRD patterns of long flame coal and semicoke briquette

烟煤、无烟煤分别与 MW700 混合制得型块的 XRD 如图 12 所示,菱镁矿在 700 ℃煅烧得到的氧化镁在烟煤、无烟煤中除了形成 $Mg(OH)_2$、3·1·8 水化相,还生成了大量 4·1·4 水化相,这种水化相不稳定易失效,故型块的机械强度较低[20]。

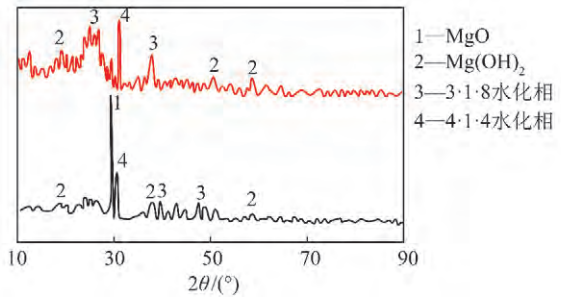


图 12　烟煤、无烟煤型块的 XRD 图

Fig. 12　XRD patterns of bitumite and anthracite briquette

从化学反应的角度看,氧化镁参与水化反应的程度越大,生成 $Mg(OH)_2$ 和 3·1·8 水化相越多,型块的机械强度越高。显然,该反应主要由反应物(氧化镁)的活性决定,同时受煤样的表面性能、灰分种类和含量的影响,具体机理需要进一步研究。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

(2)型块的 SEM 分析。

图 13 为不同活性氧化镁与不同煤样混合所制型块的 SEM 图。煤样与活性氧化镁混合成型过程中,氧化镁与水发生水化反应生成氢氧化镁,煤中硫酸盐参与反应可以生成少量 3·1·8 或 4·1·4 水化相。在型块的 SEM 图中,煤粒的形状较规则,白色或灰白色凝胶状物质即为氢氧化镁及其他水化相。对图 13(b)中白色或灰白色凝胶状物质进行了能谱分析(布点位置用"+"标出),该区域主要含镁、氧和碳 3 种元素,原子百分比分别约为 10%,49% 和 41%,其他种元素含量极少,证实其为镁质胶凝材料的凝胶物。

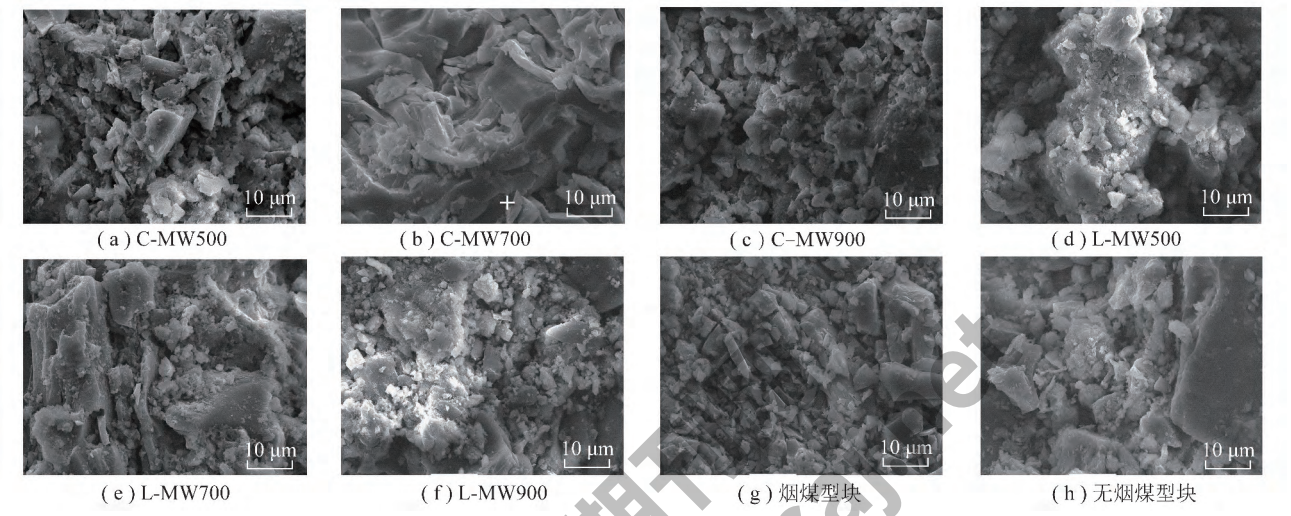


图 13 不同煤样型块的 SEM 图

Fig. 13 SEM images of briquettes based on different coal samples

对于长焰煤与不同活性氧化镁混合所制的型块,C-MW700 中胶凝物充分填充于煤粒之间,无明显孔隙存在,型块结构致密,基本成为一个整体(图 13(b)),所以机械强度高;C-MW500 中的凝胶物少,未形成有效网络结构(图 13(a)),故型块机械强度低;C-MW900 与 C-MW500 类似,少量胶凝状物质散布在煤粒之间,未能与煤粒紧密契合,孔隙明显、结构疏松(图 13(c)),导致型块的机械强度降低。

对于兰炭与不同活性氧化镁混合的型块,L-MW500(图 13(d)),L-MW700(图 13(e)),L-MW900(图 13(f))中凝胶状物质的数量及其与煤粒的结合情况与相应的长焰煤型块类似。图 13(g),(h)分别为烟煤、无烟煤与 MW700 黏结剂混合所制型块的 SEM 图,可以发现,两种型块的内部结构相似,煤粒表面均附着有一定量的凝胶状物质,但是未能充分填充于煤粒之间,整体结构疏松,故相应型块的机械强度较低。

3 结 论

(1)煅烧菱镁矿制备氧化镁,其活性由煅烧温度和煅烧时间决定。煅烧时间为 1.5 h 时,随着煅烧温度的升高(500 ~ 900 ℃),所制氧化镁的活性迅速增大,在 700 ℃达到最大值(81.3%),随后缓慢降低;煅烧温度为 700 ℃时,随煅烧时间延长(0.5 ~ 2.5 h),所制氧化镁的活性先缓慢增大,在 1.5 h 时达到最大值,随后缓慢降低。

(2)在不"欠烧"的前提下,氧化镁的比表面积和结晶度是影响其活性的主要因素,比表面积越大,结晶度越低,活性越高。活性高的氧化镁,粒度较细,结构松散,呈不规则外形。

(3)氧化镁对煤的黏结效果与形成水化相的数量和种类有关(如 $Mg(OH)_2$,3·1·8 水化相和 4·1·4 水化相)。形成 $Mg(OH)_2$ 和 3·1·8 水化相越多,与煤粒结合越紧密,相应型块的机械强度越大,最大值超过 500 N/块(30 MPa),基本满足应用要求。活性氧化镁对煤的黏结作用具有一定的选择性。

参考文献:

[1] 盛宏至,刘典福,魏小林,等. 煤部分气化后生成半焦的特性[J]. 燃烧科学与技术,2004,10(2):187-191.
Sheng Hongzhi, Liu Dianfu, Wei Xiaolin, et al. Characteristics of semi-cokes—the solid residues from coal partial gasification[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 10(2): 187-191.

[2] 谢和平,王金华,申宝宏,等. 煤炭开采新理念——科学开采与科学产能[J]. 煤炭学报,2012,37(7):1069-1079.
Xie Heping, Wang Jinhua, Shen Baohong, et al. New idea of coal mining: scientific mining and sustainable mining capacity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1069-1079.

[3] 王伟东,李少杰,韩九曦. 世界主要煤炭资源国煤炭供需形势分

析及行业发展展望[J]. 中国矿业,2015,24(2):5-9.
Wang Weidong, Li Shaojie, Han Jiuxi. Analysis of the main global coal resource countries' supply-demand structural trend and coal industry outlook[J]. China Mining Magazine,2015,24(2):5-9.

[4] 崔国星,林明穗. 腐植酸型煤气化特性及动力学研究[J]. 燃料化学学报,2012,40(11):1289-1294.
Cui Guoxing, Lin Mingsui. Gasification characteristics and kinetics of briquette using humic acid binder[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2012,40(11):1289-1294.

[5] 王越,白向飞,王东升,等. 型煤冷态强度影响因素的光学显微分析[J]. 煤炭转化,2013,36(2):79-82.
Wang Yue, Bai Xiangfei, Wang Dongsheng, et al. Optical micrcopic analysis of factors influencing cold strength of briquettes[J]. Coal Conversion,2013,36(2):79-82.

[6] 黄山秀,马名杰. 低阶煤制取型煤生球干燥终温优化实验研究[J]. 煤炭转化,2014,37(1):80-82.
Huang Shanxiu, Ma Mingjie. Experimental study on terminal temperature optimization for briouette ball by low rank bituminous coal[J]. Coal Conversion,2014,37(1):80-82.

[7] 蔡志丹,武建军,周国莉,等. 粉煤制电石用半焦的黏结剂与黏结机理[J]. 煤炭学报,2013,38(8):1465-1470.
Cai Zhidan, Wu Jianjun, Zhou Guoli, et al. Binders and bonding mechanism of semi-coke preparation technique for carbide production with pulverized coal[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(8):1465-1470.

[8] 王留成,马溢华,赵建宏,等. 一种高强度复合型气化型煤黏结剂的研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2013,34(6):32-35.
Wang Liucheng, Ma Yihua, Zhao Jianhong, et al. Research of a new type of binder for coal for gasification with high strength[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2013, 34(6):32-35.

[9] 张强,何宏平,陶奇. 基于热重分析的菱镁矿分解动力学解析[J]. 岩石矿物学杂志,2014,33(2):391-396.
Zhang Qiang, He Hongping, Tao Qi. Decomposition kinetics of magnesite deduced from thermogravimetric analysis[J]. Acta Petrologicaet Mineralogica,2014,33(2):391-396.

[10] 李晓安,郭小飞,代淑娟. 海城菱镁矿工艺矿物学研究[J]. 中国矿业,2014,23(10):125-127.
Li Xiao'an, Guo Xiaofei, Dai Shujuan. Study of process mineralogy on the Haicheng magnesite ore[J]. China Mining Magazine,2014, 23(10):125-127.

[11] 颜文斌,石爱华,高峰,等. 轻烧菱镁矿制备高纯纳米氧化镁[J]. 硅酸盐学报,2010,38(1):110-113.
Yan Wenbin, Shi Aihua, Gao Feng, et al. Synthesis of high purity and nanometer magnesium oxide from light calcined magnesite[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2010,38(1):110-113.

[12] 丁建华,陈正海,杨国俊,等. 中国菱镁矿成矿规律及资源潜力分析[J]. 中国地质,2013,40(6):1699-1711.
Ding Jianhua, Chen Zhenghai, Yang Guojun, et al. Metallogeny and resource potential of magnesite deposits in China[J]. Geology in China,2013,40(6):1699-1711.

[13] 陈后维,章祥林,靳廷甲,等. 低品级菱镁矿制耐水氯氧镁胶凝材料的研制[J]. 安徽建筑大学学报,2015,23(1):48-51.
Chen Houwei, Zhang Xianglin, Jin Tingjia, et al. The preparation of water-resistant magnesium oxychloride cement made with low-grade magnesite[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry,2015,23(1):48-51.

[14] 刘欣伟,冯雅丽,李浩然,等. 菱镁矿制备轻烧氧化镁及其水化动力学研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(12):3912-3917.
Liu Xinwei, Feng Yali, Li Haoran, et al. Preparation of light-burned magnesia from magnesite and its hydration kinetics[J]. Journal of Central South University,2011,42(12):3912-3917.

[15] 文静,余红发,吴成友,等. 氯氧镁水泥水化历程的影响因素及水化动力学[J]. 硅酸盐学报,2013,41(5):588-596.
Wen Jing, Yu Hongfa, Wu Chengyou, et al. Hydration kinetic and influencing parameters in hydration process of magnesium oxychloride cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(5):588-596.

[16] 巴明芳,王婕斐,杨莹莹,等. 改性硫氧镁胶凝材料的配制及性能研究[J]. 宁波大学学报(理工版),2014,27(2):83-87.
Ba Mingfang, Wang Jiefei, Yang Yingying, et al. Preparation and property of modified magnesium oxy-sulfate materials[J]. Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition),2014, 27(2):83-87.

[17] 陈敏,李月圆,王健东,等. 利用菱镁矿制备碳酸镁晶须[J]. 硅酸盐学报,2009,37(10):1649-1653.
Chen Min, Li Yueyuan, Wang Jiandong, et al. Preparation of magnesium carbonate whiskers by magnesite[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2009,37(10):1649-1653.

[18] 董金美,余红发,张立明,等. 水合法测定活性 MgO 含量的试验条件研究[J]. 盐湖研究,2010,18(1):38-41.
Dong Jinmei, Yu Hongfa, Zhang Liming, et al. Study on experimental conditions of hydration methods of determining active magnesium oxide content[J]. Journal of Salt Lake Research,2010,18(1): 38-41.

[19] 张伟党,钱海燕,孔庆刚,等. 菱镁矿制备活性氧化镁研究[J]. 非金属矿,2007,30(5):9-11.
Zhang Weidang, Qian Haiyan, Kong Qingang, et al. Preparation of active magnesia with magnesite[J]. Non-metalic Mines, 2007, 30(5):9-11.

[20] 刘倩倩,余红发. 自然环境下氯氧镁水泥的长期水化产物及其相转变规律[J]. 盐湖研究,2008,16(4):15-20.
Liu Qianqian, Yu Hongfa. Long-term hydration products and phase transition of the magnesium oxychloride cement materials exposed to natural environment[J]. Journal of Salt Lake Research, 2008,16(4):15-20.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net