物化耦合激发煤气化渣活性研究*

胡维扬[1],郭育霞[1,2],白晨阳[1],史昀辑[1],万颖[1]

(1.太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024;
2.山西浙大新材料与化工研究院, 山西 太原 030024)

摘要:煤气化渣(CGS)含有丰富硅铝成分,具有潜在的火山灰活性,但硅铝氧化物成分多为晶态,阻碍了其资源化利用。为了探究物化耦合激发对CGS活性的影响,采用粒度分析、黏度、凝结时间、抗压强度和活性指数评估不同激发条件下的CGS活性激发效果,同时通过SEM和XRD分析煤气化渣充填材料的微观结构和物质组成,探究CGS的激发机理。结果表明:物化耦合激发效果优于单一物理激发,CGS最佳激发方案为粉磨时间为100 min、Na_2SO_4掺量为2.5%或粉磨时间为100 min、Na_2SiO_3掺量为7%,活性指数相较于单一物理激发分别提高7.13%和7.72%;物化耦合作用促进晶态硅铝离子转变为无定形态,促进水化产物的形成,可提高CGS活性。

关键词:煤气化渣;物化耦合激发;火山灰活性;水化产物
中图分类号:TD844;TQ54 **文献标识码**:A
文章编号:1005-2763(2024)11-0283-08

0 引言

煤气化是煤炭清洁高效利用的主要手段之一,具有转化率高、污染物排放量低等特点,但煤气化技术会产生一种新的固体废弃物——煤气化渣(CGS)[1-3]。据统计,全国CGS年产量超过6 000万t,已成为继粉煤灰、煤矸石后的第三大煤基固废[4-5]。CGS中含有70%以上的氧化硅、氧化钙及氧化铝等氧化物,具有潜在火山灰活性,在一定条件下可替代水泥充当胶凝材料,应用于工程实践[6-7]。然而,上述氧化物大多以晶体结构的形式存在,不能直接参与水化反应。因此,提升CGS火山灰活性并探究其激发机理具有重大意义。

目前学者们针对CGS的活性激发进行了大量研究。郭照恒等[8]研究了不同比表面积的CGS理化性能、活性、力学性能,得出了比表面积为503 m^2/kg的CGS活性最高的结论。盛燕萍等[9]研究了粉磨时间对CGS复合胶凝材料稠度用水量、力学特性及干缩特性的影响,结果表明,当研磨时间为70 min时,CGS复合胶凝材料上述特性达到最优。WU等[10]采用3种不同研磨方法对CGS进行机械研磨,研究了机械活化对CGS粒径分布、比表面积、活性指数、物质组成和颗粒形貌的影响,发现了在颗粒细度相同的情况下,不同机械研磨方法在不同程度上提高了CGS胶凝活性,且其活性均随着研磨时间的增加而升高。李祖仲等[11]研究了碱-盐激发剂对CGS胶砂抗压、抗折强度的影响,发现复合激发剂的激发效果优于各自单掺的激发效果,其中硫酸钙和氢氧化钠复合激发效果最佳,提升了胶凝材料的结构强度。刘娟红等[12]采用正交试验对3组激发剂配比进行优化设计,通过抗压强度、SEM、XRD等手段发现复合激发剂可显著激发CGS活性,得到了复合激发剂的最优掺量配比。

上述研究仅考虑了物理或化学单一作用对CGS活性的影响,并没有深入研究物理与化学的耦合作用对CGS活性的影响。基于此,本文探究了物理与化学耦合作用对CGS活性的影响,通过凝结时间、黏度、抗压强度和活性指数评估CGS活性激发效果,然后通过SEM和XRD分析微观结构及成分变化,揭示CGS活性激发机理。本研究可为CGS的活性激发提供理论依据,有利于CGS的资源化利用,对实现“碳达峰”和“碳中和”具有一定意义。

1 材料与方法

1.1 煤气化渣

试验选用陕西某化工企业的煤气化渣,CGS的SEM图像如图1所示。化学成分使用X射线荧光

* **收稿日期**:2024-01-04
基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U23A20131);国家杰出青年科学基金项目(51925402);山西-浙大新材料与化工研究院技术开发项目(2022SX-TD007)
作者简介:胡维扬(1998—),男,山西河津人,硕士,主要从事充填开采研究工作。E-mail:h1239646196@163.com
通信作者:郭育霞(1977—),女,山西阳城人,教授,博导,主要从事充填开采研究工作。E-mail:gyx771221@163.com

光谱仪(XRF)测量,测量结果见表 1。物理性质参照《水泥密度测试方法》(GB/T 208—2014)[13]和《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)[14]进行测量,测量结果见表 2。理化分析表明,CGS 中硅铝含量高,具有较高的火山灰活性。

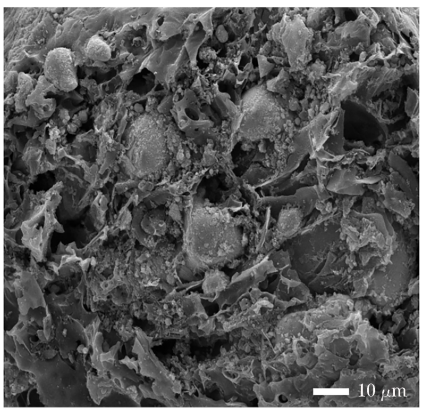


图 1 煤气化渣 SEM 图像

Fig.1 SEM image of CGS

表 1 CGS 的化学成分

Table 1 Chemical compositions of CGS %

SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	其他
52.71	18.62	11.62	6.22	0.89	9.94

表 2 CGS 的物理性质

Table 2 Physical properties of CGS

密度/(g/cm³)	比表面积/(m²/kg)	含水率/%
1.55	61.31	11.4

1.2 活性激发方案

将 CGS 放于振动筛中进行筛分,取粒径为 3 mm 以下的颗粒,然后放入 80 ℃的鼓风干燥箱中烘干 5 h,制得初始样品。然后,将 CGS 与磨珠以 1∶1的体积比放入转速为 500 r/min 的行星式球磨机中进行粉磨。

根据上述物理激发试验明确最佳粉磨时间,然后进行物化耦合激发试验研究。依据实验室测试和已有文献可知,Na_2SO_4 和 Na_2SiO_3 可以促进无定形离子的解离和水化反应,因此本试验选取上述两种化学试剂为激发剂,两种激发剂的纯度均大于 95%。物化耦合激发试验设计方案见表 3。CGS 具体激发流程:首先将 CGS 通过 3 mm 振动筛进行筛分,去除杂质并放入鼓风干燥箱中烘干;然后将烘干后的 CGS 与激发剂混合后放入行星式球磨机中粉磨,得到激发后的 CGS 微粉。

表 3 物化耦合激发试验设计方案

Table 3 Design schemes for physical and chemical coupling excitation experiments

方案	试验因素	
	激发剂	用量/%
S1	Na_2SO_4	1.5
S2		2.0
S3		2.5
S4		3.0
G1	Na_2SiO_3	1
G2		4
G3		7
G4		10

1.3 活性评估方法

首先采用激光粒度分析仪(BT-9300H)测量不同研磨时间下 CGS 的粒径分布和比表面积,然后按照 1∶7∶2 的质量比将水泥、激发后的 CGS 和煤矸石充分混合,制备成质量浓度为 80%的煤气化渣充填材料(CCBM)。其中,粗(10～15 mm)、中(5～10 mm)和细(0～5 mm)颗粒煤矸石质量比为 1∶1∶3。采用维卡仪和 NDJ-8AT 黏度计,参照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)[15]进行凝结时间和黏度测试。最后将料浆浇筑成 Φ50 mm×100 mm 的圆柱体标准试件,浇筑 24 h 后脱模放入标准养护室(温度保持在 20 ℃±3 ℃,湿度保持在 90%±5%)中养护 28 d 后进行抗压强度测试。单轴压缩试验加载速率为 0.6 mm/min,每组测试 3 个试件取平均值。活性指数计算公式如下:

$$A_{28}=\frac{R}{R_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中:A_{28}为 28 d 活性指数;R 为试验试件 28 d 抗压强度,MPa;R_0 为对比试件 28 d 抗压强度,MPa,物理激发试验中,指未粉磨 CGS 样品 28 d 抗压强度,物化耦合激发试验中,指最佳粉磨时间下未化学激发的样品 28 d 抗压强度。

2 结果与分析

2.1 物理激发效果

2.1.1 粒度分析

不同粉磨时间的 CGS 粒径分布和比表面积分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 可知,未粉磨 CGS 粒径主要集中在 900～2 000 μm。当粉磨 30～40 min 时,CGS 粒径分布曲线为双峰曲线,颗粒粒径主要分布在 600 μm 左右;随着粉磨时间延长至 50～90

min，粒度分布曲线由双峰变为单峰，600 μm 颗粒数量减少，而 10～100 μm 颗粒数量大幅增加，颗粒集中在 100 μm 左右；粉磨 100 min 时，粒径分布曲线整体降低，部分 1～100 μm 颗粒被粉磨至更细，开始出现 0.2～0.4 μm 的颗粒；粉磨 110 min 时，其粒度分布曲线与粉磨 90 min 基本相似。

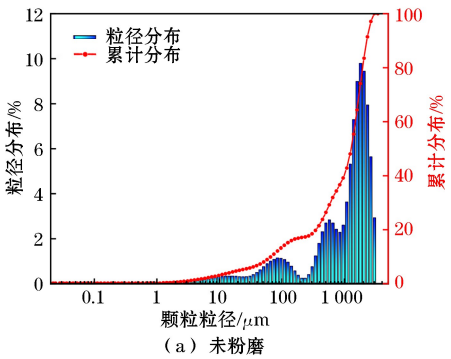


图 2　不同粉磨时间的 CGS 粒径分布

Fig.2　Particle size distribution of CGS with different milling times

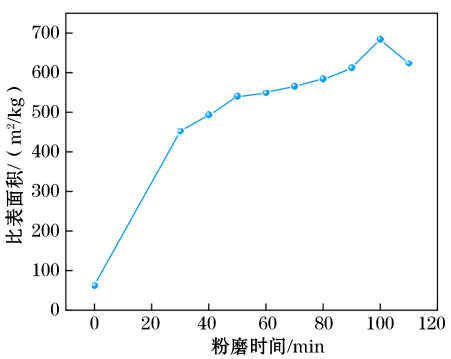


图 3　不同粉磨时间的 CGS 比表面积

Fig.3　Specific surface area of CGS with different milling time

不同粉磨时间的 CGS 中值粒径(D_{50})依次为：0 min（1 483.970 μm）＞30 min（341.106 μm）＞40 min（308.436 μm）＞50 min（79.871 μm）＞60 min（75.039 μm）＞70 min（74.536 μm）＞80 min（72.088 μm）＞110 min（63.105 μm）＞90 min（61.942 μm）＞100 min（56.485 μm），其中粉磨 100 min 的样品比表面积达到最大，为 683 m^2/kg。由此可知，随着粉磨时间的增加，颗粒与磨球、颗粒与颗粒之间发生剧烈碰撞，CGS 的中值粒径逐渐减小，而比表面积显著增大。但当粉磨时间为 110 min 时，细颗粒在机械能、热能、表面能、范德华力和静电力等作用下发生“团聚结块”现象，导致 CGS 的中值粒径增大和比表面积减小。

2.1.2　黏度和凝结时间变化

黏度和凝结时间是 CCBM 内部颗粒与颗粒、颗粒与水化产物之间相互作用的一种宏观表现。粉磨时间对 CCBM 黏度和凝结时间的影响如图 4 所示。未粉磨 CGS 制备的 CCBM 试样存在固液分层现象，无法进行黏度测试且固化 36 h 后仍未凝结。随着 CGS 粉磨时间的增加，比表面积增大，吸水率增加，CCBM 试样分层现象消失，黏度增加，凝结时间缩短。CCBM 黏度和凝结时间的变化与 CGS 比表面积紧密相关，随着粉磨时间的增加，CGS 比表面积逐渐增大，吸水率增加，使颗粒间自由水减少，相互作用力增大，且颗粒水化反应生成的水化产物数量增多，使颗粒之间黏结更加紧密，黏度增大。同时颗粒与水的接触面积增大，参与水化反应的颗粒增多，水化速率加快，凝结时间缩短。然而，粉磨时间为 110 min 时，CGS 的比表面积降低，导致 CCBM 黏度降低及凝结时间增加。上述结果表明，当粉磨时间为 100 min 时，CGS 的活性最高。

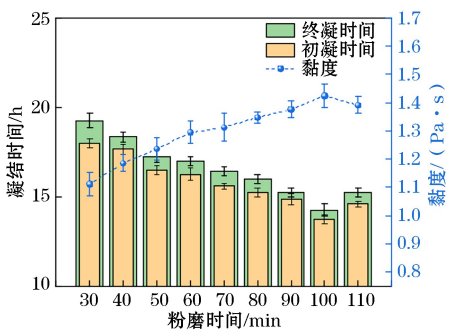


图 4　粉磨时间对 CCBM 凝结时间和黏度的影响

Fig.4　Effect of milling time on coagulation time and viscosity of CCBM

2.1.3　单轴抗压强度和活性指数变化

粉磨时间对 CCBM 抗压强度的影响如图 5 所示。未粉磨 CGS 制备的 CCBM 试样养护 36 h 后尚未固化，养护至 5 d 时样品才固化脱模，7 d 抗压强

度过低无法测量,28 d 抗压强度为 1.43 MPa。随着粉磨时间的增加,CCBM 试样的 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度均呈现先增大后略微减小的趋势,在粉磨时间为 100 min 时,CCBM 的 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度高于同期其余样品,分别为 1.62 MPa、4.12 MPa 和 8.42 MPa。产生上述现象的原因如下:一方面,由于物理研磨会减弱 CGS 粉体内部晶体间键能,最终化学键断裂,释放出活性离子参与水化反应,生成更多水化产物,同时在一定范围内,随着粉磨时间的增加,CGS 比表面积逐渐增大,这就使得 CGS 在参加水化反应过程中接触面积迅速增大,加快反应速率,从而增加水化产物含量;另一方面,CGS 在 CCBM 中可以起到填充作用,较细的 CGS 颗粒可以填充在较小的孔隙中,从而提升材料整体的抗压强度。粉磨时间为 110 min 时,CCBM 试样强度出现迅速降低的原因是 CGS 颗粒间发生团聚,与水的接触面积变小,水化反应速率和水化程度降低。同时,团聚体内部结合处力学性能较弱,最终表现为抗压强度降低。

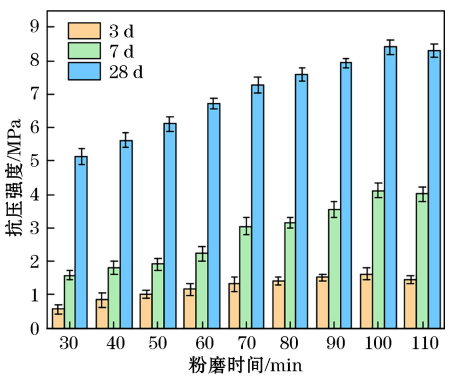


图 5 粉磨时间对 CCBM 抗压强度的影响

Fig.5 Effect of rilling time on compressive strength of CCBM

不同粉磨时间的 CGS 活性指数及增量如图 6 所示。由图 6 可知,粉磨后 CGS 的活性随着粉磨时间的增加呈现先升高后降低的趋势,粉磨时间为 100 min 时,活性指数较未粉磨时提升 488.8%;粉磨时间从 100 min 增加到 110 min 时,活性指数降低了 7.7%。粉磨时间的增加导致颗粒与颗粒、颗粒与磨球之间碰撞增多,CGS 受到的机械力增大,颗粒不断破碎细化,大量机械能转化为内能储存在粉体内部,部分机械能转化为颗粒表面能,少量机械能转化为热能消散,这些内能会造成颗粒内部晶体结构改变,CGS 发生无定形化。

综合分析,粉磨时间为 100 min 时,CGS 的活性达到最高。因此确定物理激发试验中最佳粉磨时间为 100 min。

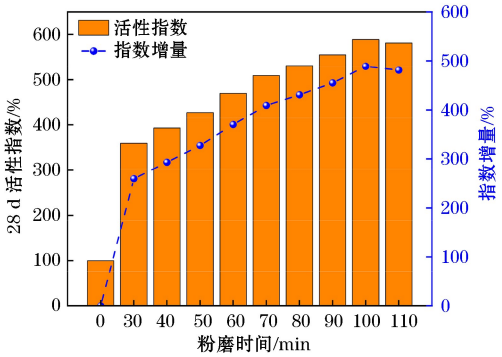


图 6 不同粉磨时间的 CGS 活性指数及增量

Fig.6 Activity index and increment of CGS with different milling times

2.2 物化耦合激发效果

2.2.1 黏度和凝结时间变化

激发剂掺量对 CCBM 黏度和凝结时间的影响如图 7 所示。

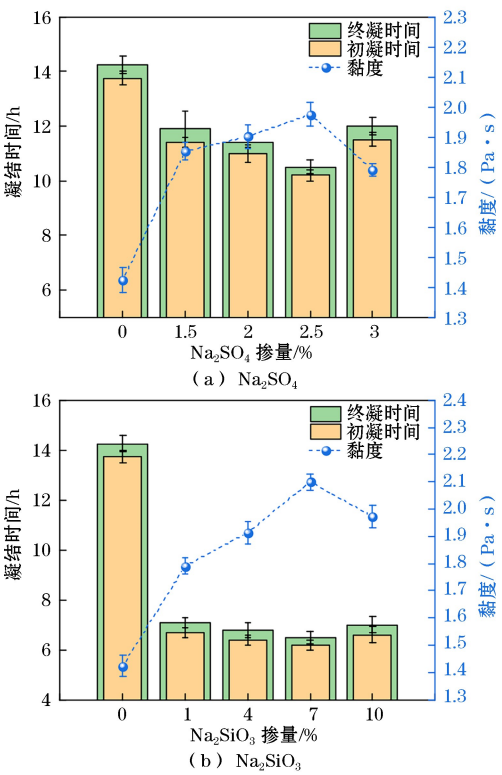


图 7 激发剂掺量对 CCBM 凝结时间和黏度的影响

Fig.7 Effect of dosage exciters on coagulation time and viscosity of CCBM

在激发剂种类相同的条件下,随着激发剂掺量的增加,黏度呈先升高后降低的趋势,凝结时间呈现先减少后增加的趋势。物化耦合激发条件下,CGS

黏度均大于、凝结时间均小于物理激发条件下 CGS（粉磨时间/100 min），这说明激发剂可以有效提升 CGS 黏度并缩短凝结时间。主要原因是激发剂会与 CGS 发生一系列化学反应，破坏其内部硅氧化学键、铝氧化学键，导致矿物内部结构断裂和结构缺陷增多，释放出部分活性离子，加快水化速率，提高 CGS 活性。水泥水化产生的氢氧化钙会与 CGS 中的活性离子发生反应，生成更多水化产物，使颗粒间黏结更加紧密，最终表现出黏度升高，凝结时间缩短的现象。

2.2.2　单轴抗压强度和活性指数变化

图 8 为激发剂掺量对 CCBM 抗压强度的影响。随着 Na_2SO_4 掺量的增加，CCBM 各龄期抗压强度均呈现先增加后减少的趋势，Na_2SO_4 掺量为 2.5% 时，CCBM 各龄期抗压强度最大，28 d 强度达到9.02 MPa。原因是 Na_2SO_4 活化了 CGS 颗粒，产生了更多、更微小的固体颗粒，使固体颗粒比表面积增大，同时水化产物成核位点增多，结构更加致密。随着 Na_2SiO_3 掺量的增加，CCBM 的 3 d 抗压强度呈持续升高趋势，7 d 和 28 d 抗压强度先升高后降低。Na_2SiO_3 掺量为 7%时，CCBM 的 28 d 抗压强度提升幅度最大，强度可达 9.07 MPa。这主要是因为 Na_2SiO_3 的掺入使得 pH 值升高，导致 CGS 中无定形离子的溶解和浸出速度加快，促进了水化产物的形成。然而 Na_2SO_4 和 Na_2SiO_3 掺入过多会导致前中期水化反应较快，水化产物吸附在颗粒表面形成致密的结构层，阻碍孔隙水、CGS 和激发剂之间接触反应，并大量产生石膏和钙矾石（AFt）等膨胀性产物，造成 CCBM 内部孔隙及裂隙的扩展延伸，结构受到损伤，导致 CCBM 抗压强度降低[16]。

物化耦合激发 CGS 活性指数如图 9 所示。在激发剂种类相同的情况下，随着激发剂掺量的增加，CGS 活性指数先增大后减小。Na_2SO_4 和 Na_2SiO_3 掺量分别为 2.5%和 7%时，CGS 活性指数达到最高，相较于 Na_2SO_4 和 Na_2SO_3 掺量为 0 时，其指数增量分别为 7.13%和 7.72%。物化耦合激发 CGS 活性指数均高于单一物理激发，这是由于激发剂的掺入会减少颗粒内部晶体结构无定形化所需要的能量，进而提高 CGS 的无定形程度及活性。

综合分析，CGS 的最佳激发方案：粉磨时间为 100 min，$NaSO_4$ 掺量为 2.5%（方案 S3）或粉磨时间为 100 min，Na_2SiO_3 掺量为 7%（方案 G3）耦合激发。

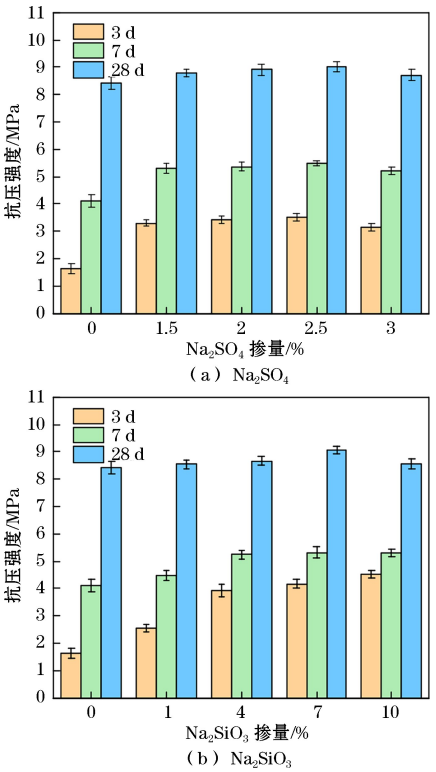


图 8　激发剂掺量对 CCBM 抗压强度的影响

Fig.8　Effect of dosage of exciters on the compressive strength of CCBM

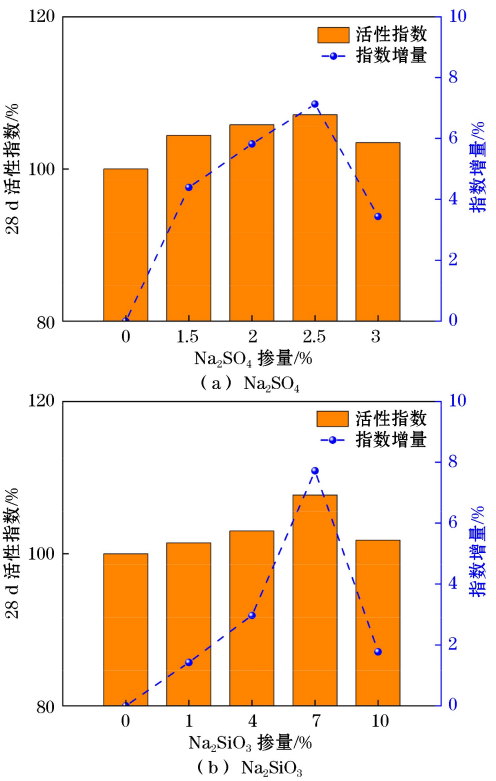
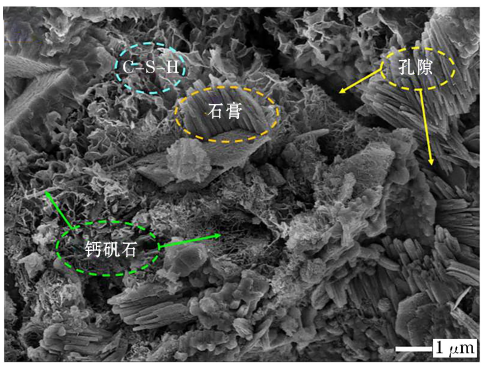


图 9　物化耦合激发 CGS 活性指数及增量

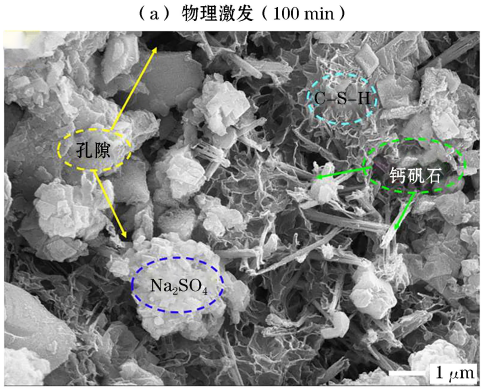
Fig.9　Activity index and increments excited by physical and chemical coupling excitation

3 机理分析

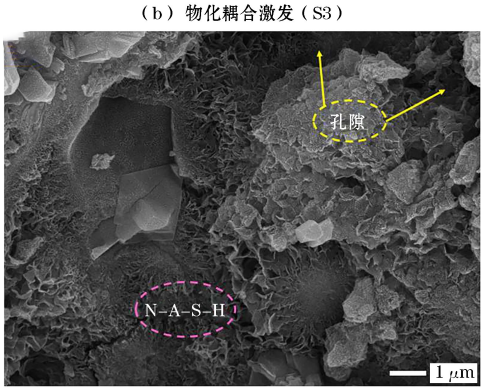
不同激发条件下 CCBM 试样 28 d 龄期的 SEM 和 XRD 分析如图 10 所示。



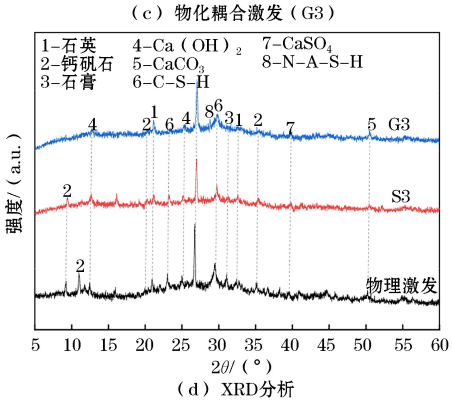
(a) 物理激发(100 min)



(b) 物化耦合激发(S3)



(c) 物化耦合激发(G3)



(d) XRD分析

图 10 CCBM 试样 SEM 和 XRD 分析

Fig.10 SEM and XRD analysis of CCBM

由图 10(a)可知,CCBM 试样中出现大量的石膏和絮状水化硅酸(C-S-H),部分水化铝酸钙(C-A-H)与石膏反应生成针棒状的 AFt,这些水化产物填充孔隙和裂纹,从而增强整体结构的致密性。由图 10(b)可知,采用 S3 方案激发条件下,CCBM 颗粒表面水化产物在成核位点放射形成 AFt,在孔隙之间相互交错形成三维空间结构,减少了体系可能存在的不完整度。出现这种现象的主要原因是 SO_4^{2-} 会促进 C-A-H 水化反应生成 AFt。其中,观察到的白色物质是 Na_2SO_4,没有观察到石膏的原因是在 Na_2SO_4 的作用下产生更多 AFt,导致钙离子减少,在缺乏钙离子的情况下石膏的产量减少,并且部分石膏也参与水化反应生成 AFt。由图 10(c)可知,采用 G3 方案激发条件下,CCBM 试样中发现有新的水化产物生成,颗粒表面以及孔隙间覆盖了网状水化硅铝酸钠(N-A-S-H)。

由 XRD 分析可以看出,采用 S3 方案激发条件下,衍射角为 27°时,石英、石膏、$Ca(OH)_2$ 的衍射峰值均有明显减弱,而 C-S-H 和 AFt 的衍射峰值增强,说明 Na_2SO_4 和 Na_2SiO_3 参与到水化体系中,CGS 中大量活性 SiO_2 和活性 Al_2O_3 在碱性环境中溶解,生成无定形硅铝离子,随后与体系中的 Ca^{2+}、SO_4^{2-} 和 H_2O 等结合生成 C-S-H 凝胶、AFt 等水化产物,且在 G3 方案激发条件下形成了新的衍射峰 N-A-S-H。综上,物化耦合激发可以提高煤气化渣活性,促进水化产物的产生。

结合 SEM 和 XRD 分析激发剂对煤气化渣的激发机理。CCBM 样品内部可以看作“煤气化渣-水泥-激发剂”形成的水化体系,该体系首先是水泥中的硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)和铝酸三钙(C_3A)水化生成 C-S-H、CA-H、$Ca(OH)_2$、AFt 等产物,主要反应如式(2)至式(4)所示,生成的 $Ca(OH)_2$ 又激发煤气化渣中的晶态 SiO_2、Al_2O_3 等物质参与反应生成 C-S-H、CA-H,如式(5)和式(6)所示。

掺入 Na_2SO_4 后,Na_2SO_4 与 $Ca(OH)_2$ 反应生成 $CaSO_4$、$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 和 NaOH,如式(7)和式(8)所示。NaOH 会增强体系碱性,促进 CGS 中晶体溶解,加速硅、铝等网络结构的解离,并与体系中分散的 $CaSO_4$ 和石膏反应生成 C-S-H、AFt,如式(5)、式(9)和式(10)所示。

掺入 Na_2SiO_3 后,Na_2SiO_3 水解生成 NaOH,碱性增强,促进水化反应,同时会生成硅胶与钙,硅胶与

钙发生反应生成 C-S-H。随着固化时间的增加,煤气化渣中的氧化物活性被逐渐溶解,产生更多具有胶结作用的水化产物,部分 AFt 在碱性较强的环境下钠离子会取代钙离子形成 N-A-S-H 凝胶[17]。

$$2(3CaO \cdot SiO_2)+6H_2O= 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O+3Ca(OH)_2 \quad (2)$$

$$2(2CaO \cdot SiO_2)+4H_2O= 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O+Ca(OH)_2 \quad (3)$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3+6H_2O= 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O \quad (4)$$

$$2SiO_2+3Ca(OH)_2= 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O \quad (5)$$

$$Al_2O_3+3Ca(OH)_2= 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3H_2O \quad (6)$$

$$Ca(OH)_2+Na_2SO_4= CaSO_4+2NaOH \quad (7)$$

$$Ca(OH)_2+Na_2SO_4+2H_2O= CaSO_4 \cdot 2H_2O+2NaOH \quad (8)$$

$$Al_2O_3+3Ca(OH)_2+3(CaSO_4 \cdot 2H_2O)+23H_2O=3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O \quad (9)$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O+3CaSO_4+26H_2O= 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O \quad (10)$$

4 结论

本文研究了物化耦合激发作用对 CGS 活性的影响,采用粒度分析、凝结时间、黏度、抗压强度和活性指数等指标进行活性评估,通过 SEM 和 XRD 分析煤气化渣充填材料的微观结构和物质组成,得出以下结论。

(1) 物理粉磨可有效降低 CGS 的粒径,增大比表面积,激发 CGS 活性,但粉磨时间过长会降低磨细效率和激发效果,综合考虑最佳粉磨时间为 100 min,此时 CGS 中值粒径为 56.485 μm。

(2) 与单一物理激发相比,物化耦合激发 CCBM 的凝结时间降低,黏度、抗压强度和活性指数均提高,因此物化耦合激发效果更显著。通过物化耦合激发试验确定 CGS 的最佳激发方案:粉磨时间为 100 min,Na_2SO_4 掺量为 2.5%或粉磨时间为 100 min,Na_2SiO_3 掺量为 7%。

(3) 从 CCBM 的微观形貌和物质组成分析可知,物化耦合作用可以破坏 CGS 中的硅氧、铝氧化学键,使晶态 SiO_2 和 Al_2O_3 解离释放出更多无定形硅铝离子,提高煤气化渣活性,促进 C-S-H 凝胶和 AFt 等水化产物的形成。

参考文献(References):

[1] TIAN Y, XIE Z L, XUE K W. The role of coal gasification slag in cement paste with and without polycarboxylate superplasticizer and its rheology [J]. Construction and Building Materials, 2023, 373: 130852.

[2] 王利峰.我国煤气化技术发展与展望[J].洁净煤技术,2022,28(2):115-121.
WANG Lifeng. Development and prospect of coal gasification technology in Chinap [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 115-121.

[3] 王辅臣,于广锁,龚欣,等.大型煤气化技术的研究与发展[J].化工进展,2009,28(2):173-180.
WANG Fuchen, YU Guangsuo, GONG Xin, et al. Research and development of large-scale coal gasification technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(2): 173-180.

[4] 张丽宏,金要茹,程芳琴.煤气化渣资源化利用[J].化工进展,2023,42(8):4447-4457.
ZHANG Lihong, JIN Yaoru, CHEN Fangqin. Resource utilization of coal gasification slag[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(8): 4447-4457.

[5] 冯向港,葛奋飞,张印民,等.煤气化渣高值化利用的研究进展及应用展望[J].洁净煤技术,2023,29(11):1-11.
FENG Xianggang, GE Fenfei, ZHANG Yinmin, et al. Research progress and application prospect of high-value utilization of coal gasification slag [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(11): 122-132.

[6] XIN J, LIU L, JIANG Q. Early-age hydration characteristics of modified coal gasification slag-cement-aeolian sand paste backfill [J]. Construction and Building Materials, 2022, 322: 125936.

[7] ZHANG J Y, ZUO J, JIANG Y S. Synthesis and characterization of composite conductive powders prepared by Sb-SnO_2-coated coal gasification fine slag porous microbeads[J]. Powder Technology, 2021, 385: 409-417.

[8] 郭照恒,杨文,祝小靓,等.不同比表面积煤气化渣掺合料活性及力学性能研究[J].硅酸盐通报,2020,39(11):3567-3573+3588.
GUO Zhaoheng, YANG Wen, ZHU Xiaoliang, et al. Activity and mechanical properties of coal gasification slag admixture with different specific surface area[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(11): 3567-3573+3588.

[9] 盛燕萍,扈培臻,冀欣,等.粉磨时间对煤气化渣复合胶凝材料的性能影响研究[J].应用化工,2020,49(8):1999-2003.
SHENG Yanping, HU Peizhen, JI Xin, et al. Study on the effect of pulverizing time on the properties of coal gasification slag composite cementitious material [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(8): 1999-2003.

[10] WU F, LI H, YANG K. Effects of mechanical activation on physical and chemical characteristics of coal-gasification slag [J]. Coatings, 2021, 11(8): 902.

[11] 李祖仲,关羽,赵红艳,等.碱-盐复合激发煤气化粗渣的水泥胶砂强度特性[J].材料科学与工程学报,2019,37(1):119-125+137.
LI Zuzhong, GUAN Yu, ZHAO Hongyan, et al. Strength characteristics of cement mortar with coal gasification coarse slag under alkali-salt compound activation[J]. Journal of Materials Science and Engineering,2019,37(1):119-125+137.

[12] 刘娟红,许鹏玉,周昱程,等.改性煤气化渣用于矿山充填的试验研究[J].硅酸盐通报,2020,39(8):2528-2535.
LIU Juanhong, XU Pengyu, ZHOU Yucheng, et al. Experimental study on modified coal gasification slag used for mine filling[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020,39(8):2528-2535.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.水泥密度测定方法:GB/T 208—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Test method for determinging cement density:GB/T 208—2014[S].Beijing: Standards Press of China,2014.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.用于水泥和混凝土中的粉煤灰:GB/T 1596—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Fly ash for cement and concrete: GB/T 1596—2017[S].Beijing:Standards Press of China,2017.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法:GB/T 1346—2011[S].北京:中国标准出版社,2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the portland cement: GB/T 1346—2011[S]. Beijing:Standards Press of China,2011.

[16] 屈慧升,索永录,刘浪,等.改性煤气化渣基矿用充填材料制备与性能[J].煤炭学报,2022,47(5):1958-1973.
QU Huisheng, SUO Yonglu, LIU Lang, et al. Preparation and properties of modified coal gasification slag-based filling materials for mines[J]. Journal of China Coal Society,2022, 47(5):1958-1973.

[17] 李肽脂,吴峰,李辉,等.复合激发煤气化渣基胶凝材料的制备[J].环境工程学报,2022,16(7):2356-2364.
LI Taizhi, WU Feng, LI Hui, et al. Preparation of composite activated coal gasification slag-based cementitious materials[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022,16(7):2356-2364.

Research on Activation of Coal Gasification Slag with Physical and Chemical Coupling Excitation

HU Weiyang[1], *GUO Yuxia*[1,2], *BAI Chenyang*[1], *SHI Yunji*[1], *WAN Ying*[1]

(1.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2.Shanxi-Zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract:Coal gasification slag (CGS) contains abundant silicon-aluminum components and has potential pozzolanic activity, but the silicon-aluminum oxide components are mostly crystalline, which hinders its resource utilization. In order to explore the effect of physical and chemical coupling excitation on the activity of CGS, particle size analysis, viscosity, coagulation time, compressive strength, and activity index were used to evaluate the activity excitation effect under different excitation conditions. At the same time, SEM and XRD were used to analyze the microstructure and material composition of coal gasification slag filling materials, and to investigate the excitation mechanism of CGS. The results show that physical and chemical coupling excitation is more effective than single physical excitation. The optimal excitation condition for CGS is milling time of 100 min and Na_2SO_4 dosage of 2.5% or milling time of 100 min and Na_2SiO_3 dosage of 7%. The activity index of physical and chemical coupling excitation under above optimal conditions can be increased by 7.13% and 7.72% compared to that of single physical excitation. The physical and chemical coupling promotes the transformation of crystalline silicon-aluminum ions into amorphous form, which can stimulates the formation of hydration products and enhance activity of CGS.

Key words:Coal gasification slag, Physical and chemical coupling excitation, Pozzolanic activity, Hydration product