

## 水淬硅锰渣的机械粉磨特性

邢质冰<sup>1</sup>, 韩凤兰<sup>1,2</sup>, 李茂辉<sup>1</sup>, 杨保国<sup>3,4</sup>, 郑彬<sup>1</sup>, 刘腾腾<sup>1</sup>

(1. 北方民族大学材料科学与工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 工业废弃物循环利用及先进材料国际合作基地, 工业副产物高值化利用协同创新中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏回族自治区地球物理地球化学勘察院, 宁夏 银川 750021; 4. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430075)

**摘要:** 这是一篇矿物加工工程领域的论文。根据机械力化学原理, 采用振动磨的方式对水淬硅锰渣进行粉磨, 通过研究粉磨时间对水淬硅锰渣粉比表面积、粒度分布、活性评价等影响, 并使用比表面积和激光粒度分析仪、XRD 和 SEM 等表征方法对水淬硅锰渣粉的比表面积、粒径分布、难磨物相和颗粒形貌进行了探讨, 同时也研究了不同粉磨时间的水淬硅锰渣粉作掺合料对地聚物抗压强度的影响。结果表明, 随着粉磨时间延长, 硅锰渣粒度分布逐渐左移, 颗粒粒径逐步细化, 石英相逐渐向无定形结构转变。从成本角度考虑, 当粉磨时间为 25 min、比表面积为 1.8281 m<sup>2</sup>/g 时作粉煤灰地聚物掺合料时, 28 d 抗压强度可达 26.79 MPa。并确定出难磨物相为直锰辉石晶体结构, 以及不同的含锰物相。

**关键词:** 矿物加工工程; 水淬硅锰渣; 颗粒粒径; 抗压强度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.01.023

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 01-0174-07

**引用格式:** 邢质冰, 韩凤兰, 李茂辉, 等. 水淬硅锰渣的机械粉磨特性[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(1): 174-180.

XING Zhibing, HAN Fenglan, LI Maohui, et al. Mechanical grinding characteristics of water quenched silicon-manganese slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(1): 174-180.

据 2018 年统计, 我国硅锰合金产量超过 660 万 t, 占铁合金总产量的比重达到 20%, 其中内蒙古、宁夏和广西是硅锰合金的主要产地, 占全国产量的 72%<sup>[1]</sup>。每生产 1 t 硅锰合金就产生 1.2 t 的硅锰渣<sup>[2]</sup>, 随着硅锰渣量的持续增加, 且大部分生产硅锰合金企业未采用任何处理, 直接露天堆积和任意排放, 这导致大量有害物质渗入到环境中。因此, 实现硅锰渣的资源化利用迫在眉睫。

机械力粉磨会使固体颗粒之间发生相互碰撞、挤压、磨削等作用, 从而引起颗粒的物理和化学变化, 能够有效地提高颗粒的反应活性。崔孝炜等<sup>[3]</sup>通过对钢渣粉磨特性的研究, 结果表明钢渣随着粉磨时间延长对混凝土的早期抗压强度影响较为显著。崔孝炜等<sup>[4]</sup>对铁尾矿进行粉磨特

性研究, 结果表明较佳粉磨时间为 100 min, 比表面积达 590 m<sup>2</sup>/kg 时, 铁尾矿活性较佳。随着球磨时间延长, 活性得到提高, 若粉磨时间过长会出现团聚现象而导致活性下降。饶磊等<sup>[5]</sup>研究了在相同的研磨条件下改性风淬钢渣与未改性钢渣的易磨性。结果表明, 对钢渣进行改质并通过风淬处理后能够有效降低难磨相 Fe 和 RO 的含量, 从而提高钢渣的易磨性。

由于近年来对水淬硅锰渣相关较少, 其中对水淬硅锰渣理化性质研究更少, 这为水淬硅锰渣的资源化利用创造了阻碍。因此, 本实验以水淬硅锰渣为原料, 探究机械力活化学对水淬硅锰渣的粒度、比表面积等方面的影响, 并作掺合料制备粉煤灰地质聚合物, 为水淬硅锰渣在建材方

收稿日期: 2021-05-24

基金项目: 北方民族大学重点科研项目 (2021KJ CX06); 宁夏回族自治区重大专项 (2020BCE01001、2021BEG01003); 宁夏自然科学基金 (2020AAC03194)

作者简介: 邢质冰 (1996-), 男, 硕士研究生。研究方向为矿物加工工程。

通信作者: 韩凤兰 (1978-), 女, 教授, 研究方向为矿物加工冶金工程。

面的大量消耗和综合利用提供参考。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

#### 1.1.1 原料的化学组成与矿物分析

水淬硅锰渣取自于宁夏某硅锰合金企业，呈墨绿色；硅锰渣从不同位置各取 350 g 经过筛分析后，粒径 4.75~9.5 mm 0.4%，粒径 2.36~4.75 mm 19.8%，-2.36 mm 69.8%，其化学成分与物相分析见表 1、图 1。粉煤灰来自于宁夏某电厂，呈灰棕色。其化学成分与物相分析见表 2、图 2。

表 1 水淬硅锰渣化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of water quenched silicomanganese slag

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	其他
42.17	21.66	20.71	5.60	5.77	1.08	1.37	1.973

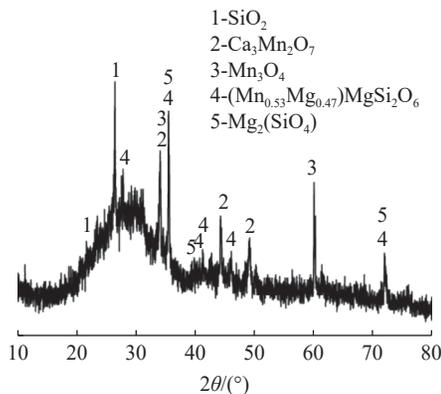


图 1 硅锰渣 XRD  
Fig.1 XRD pattern of silicomanganese slag

表 2 粉煤灰化学成分/%  
Table 2 Chemical composition of fly ash

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
44.8	22.6	6.2	1.8	5.7	1.7	1.5

依据高炉矿渣的水硬活性评价标准<sup>[6]</sup>，按照此标准可知水淬硅锰渣的碱度为  $M = [w(\text{CaO}) + w(\text{MgO}) + w(\text{MnO})] / [w(\text{SiO}_2) + w(\text{Al}_2\text{O}_3)] = 0.45 < 1$ ，属于酸性渣。

由图 1 可知，水淬硅锰渣中主要物相是石英 (SiO<sub>2</sub>)、直锰辉石 (Mn<sub>0.53</sub>Mg<sub>0.47</sub>)MgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>、镁橄榄石 Mg<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)、以及 Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 Ca<sub>3</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>。

由图 2 可知，粉煤灰中主要物相为石英 (SiO<sub>2</sub>) 和莫来石 (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 易磨性

采用 HFZY-B3 型密封式制样粉碎机进行粉

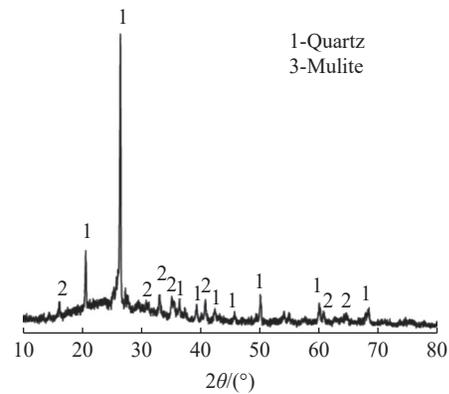


图 2 粉煤灰 XRD  
Fig.2 XRD pattern of fly ash

磨。将水淬硅锰渣每组取约 900 g，在烘箱内调至温度为 105 °C 下烘干后备用。粉磨时，每个磨盘内加入物料约 300 g，粉磨时间分别为 5、10、15、20、25 和 30 min 制备的硅锰渣粉并过 0.074 mm 筛。

#### 1.2.2 粒度测定

采用 Bettersize 2000 激光粒度分布仪测试物料粒度分布情况。

#### 1.2.3 比表面积测定

采用全自动比表面及孔隙度分析仪 BET (ASAP2460) 对物料比表面积进行测定。

#### 1.2.4 活性评价

将粉煤灰和水淬硅锰渣按 4:1 的配比与 NaOH、水玻璃及水按照一定比例在水泥胶砂搅拌机中混合搅拌 2.5 min 后，注入 40 mm×40 mm×40 mm 钢制模具中，再在水泥胶砂振动台振实后，用保鲜膜密封。在 60 °C 烘箱中养护 12 h 后取出脱模得到样品，放置在室温下养护 3、7、28 d 后对样品进行抗压强度测试。每组实验分别取 5 个样品按照 GB/T 17671-1999 《水泥胶砂强度检验方法》进行测试。具体方案配方见表 3。

表 3 粉煤灰/硅锰渣地质聚合物配方  
Table 3 Formulation of fly ash/silico-manganese slag geopolymer

类型	粉煤灰/%	硅锰渣/%	NaOH/%	水玻璃/%	水/%
FGM-5 min	80	20	5	20	17.5
FGM-10 min	80	20	5	20	17.5
FGM-15 min	80	20	5	20	17.5
FGM-20 min	80	20	5	20	17.5
FGM-25 min	80	20	5	20	17.5
FGM-30 min	80	20	5	20	17.5

注：碱激发剂的用量按照原料的质量占比

### 1.2.5 XRD 与 SEM 测定

采用 X 射线衍射仪 (XRD-6000) 对不同粉磨时间的硅锰渣粉末物相表征, 采用场发射扫描电镜 (Sigma 300) 对不同粉磨时间的硅锰渣粉末形貌表征。

### 1.2.6 堆积密度的测定

硅锰渣粉的堆积密度分为松散、振实堆积密度。松散堆积密度测试方法将水淬硅锰渣粉装入 250 mL 的量筒中, 装满后并刮平粉料至刻度线, 称量筒和粉料的总质量 ( $m_0$ ), 减去量筒的质量 ( $m_1$ ), 再除以量筒体积 ( $V$ ), 同样, 振实堆积密度是将水淬硅锰渣粉装满 250 mL 量筒后, 用振实台振实 2 min 后的粉料和量筒总质量 ( $m_2$ ) 减去量筒的质量 ( $m_1$ ), 除以量筒体积; 即松散堆积密度为 ( $K_1$ ): [ $K_1 = (m_0 - m_1) / V$ ], 振实堆积密度 ( $K_2$ ): [ $K_2 = (m_2 - m_1) / V$ ]

## 2 结果与讨论

### 2.1 粉磨时间对水淬硅锰渣粉比表面积的影响

通过使用全自动比表面积分析仪测定不同粉磨时间对比表面积的影响, 结果见图 3。

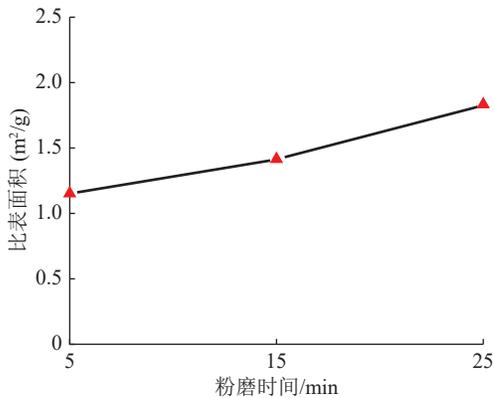


图 3 粉磨时间对水淬硅锰渣粉比表面积的影响

Fig.3 Effect of grinding time on the specific surface area of water quenched silicomanganese slag powder

随着粉磨时间的增加, 硅锰渣粉比表面积呈上升的趋势。在粉磨初期, 硅锰渣粉比表面积增速较慢, 随着后续粉磨时间延长, 硅锰渣粉比表面积增速逐渐较快。这是由于在粉末初期, 硅锰渣颗粒粒径较大且结构紧实, 粉磨过程中能量消耗较大, 对颗粒的破坏程度较小, 而随着粉磨时间增加, 硅锰渣颗粒逐渐细化, 内部结构发生缺陷使得粉磨过程中消耗能量较小, 对颗粒破坏程度较大。因此, 当粉磨时间从 5 min 增至 15 min 时, 增长速率为 23%, 而粉磨时间从 15 min 增至

25 min 时, 增长速率为 29.4%。

### 2.2 不同磨细水淬硅锰渣粉的粒度分布特征

不同粉磨时间对硅锰渣粉粒度分布和粒度累积分布影响见图 4 和图 5。不同粉磨时间对硅锰渣粉特征粒径影响见表 3。

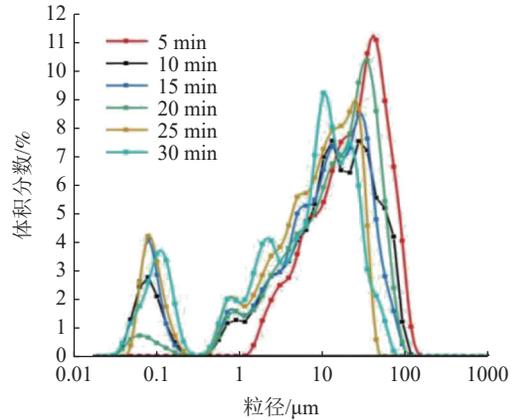


图 4 粒度分布

Fig.4 Particle size distribution

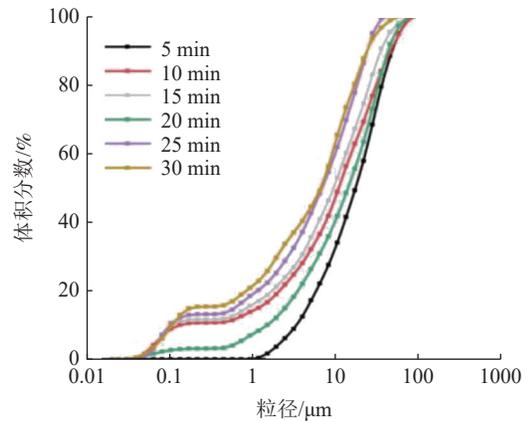


图 5 累计粒度分布

Fig.5 Cumulative particle size distribution

从表 4 中可以看出, 随着粉磨时间的增加, 不同细度水淬硅锰渣粉的特征粒径  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  和  $D_{90}$  整体呈现出先减小后增大再减小的趋势。

表 4 不同粉磨时间对硅锰渣粉特征粒径的影响

Table 4 Effect of different grinding time on the characteristic particle size of silicomanganese slag powder

粉磨时间/ min	特征粒径/ $\mu\text{m}$		
	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
5	4.027	21.85	59.45
10	0.166	13.68	57.80
15	0.132	11.89	43.21
20	1.896	12.34	43.09
25	0.125	8.691	29.97
30	0.134	8.398	29.58

由图 4 和图 5 能够看出, 通过机械力活化后水淬硅锰渣的粒度分布曲线出现了双峰, 主要集

中在 10~70  $\mu\text{m}$  和 0.049~1.161  $\mu\text{m}$ 。随着粉磨时间的增加，硅锰渣颗粒粒度分布范围收窄并先向左移动后右移再向左移，累积粒度曲线与粒度分布变化趋势一致，且在 5~15 min 内， $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$  均明显减小，中、小颗粒所占的比例增加，分析其原因可能是由于硅锰渣中大颗粒较多，由于在机械力的作用下颗粒沿着缺陷界面迅速破碎，使得大颗粒迅速细化，颗粒尺寸减小明显，而在 20 min 时， $D_{10}$ 、 $D_{50}$  无明显减小，反而增大，可能的原因是由于机械力做功，导致振动磨内的温度升高，部分水淬硅锰渣小颗粒之间发生弱团聚现象形成二次颗粒，而激光粒度分析仪无法破坏二次颗粒。从而使得这一阶段  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  颗粒尺寸增加。在 25~30 min 内， $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$  颗粒尺寸变化趋势减缓，其原因可能是随着活化时间的延长，部分水淬硅锰渣粉颗粒内部的细小颗粒团聚一起达到粉磨平衡，大颗粒难以被磨细。此时水淬硅锰渣中弱键已经断裂，难破碎的高能键还存在，因此粉磨效率开始下降。

### 2.3 粉磨时间对水淬硅锰渣粉的 XRD 影响

由图 6 可知，水淬硅锰渣颗粒通过粉磨后，随着机械活化力时间不断增加，在机械力的作用下使得内部紊乱程度升高，逐渐向无定形结构转变。石英晶体衍射峰强度不断减小，峰形逐渐宽化，说明石英晶体结构发生晶格畸变，非晶化程度逐渐加剧。而部分含锰物质的峰形则无明显变化，说明含锰物质是水淬硅锰渣中的难磨相。

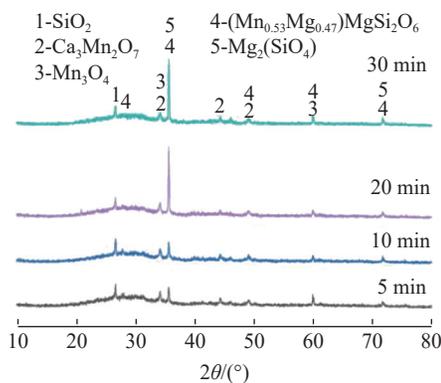


图 6 粉磨时间对硅锰渣 XRD 的影响

Fig.6 Effect of grinding time on XRD of silicomanganese slag

随着粉磨时间逐增，在衍射角度为 36.5° 时衍射峰强呈先增加后减小的趋势，在 20 min 时衍射峰强突然升高，原因可能是硅锰渣中含有较多  $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$  的存在，由于锰的离子的极化能力较强，使得硅氧四面体相互链接形成复杂的岛链状硅氧团，导致水淬硅锰渣出现团聚现象<sup>[7]</sup>，产生二

次颗粒。也可能是后期粉磨过程中这可能是由于机械力做功，导致振动磨内的温度升高，部分硅锰渣小颗粒团聚并重新结晶，表现为衍射峰强度重新升高<sup>[8]</sup>。再随着粉磨时间增加，到 30 min 时，衍射峰强又减小，此时的弱团聚现象被打破<sup>[9]</sup>，使得中、小粒径颗粒又逐步增加。

### 2.4 粉磨时间水淬硅锰渣粉的 SEM 影响

图 7 是经过不同粉磨时间的机械力化学磨后的 SEM 照片，其中图 (a) 是在放大低倍下的照片，图 (b)~(d) 是在放大高倍下的照片。通过图 7 能够看到，粉末 5 min 时，硅锰渣颗粒形状差异较大，且均已不规则的块状颗粒存在，大块颗粒较多、结构较为密实。粉磨 10 min、20 min 后，由于机械力的介入使得硅锰渣形貌发生明显的改变，不规则块状颗粒逐渐被破碎向类球形颗粒转变，同时在粉磨 20 min 时，出现较多不规则小颗粒，且部分小颗粒堆积在一起开始出现团聚现象，当粉磨时间达到 30 min 后，小颗粒粒径变化很小，且大部分小颗粒被吸附着在大颗粒上，使形貌变得粗糙。出现该现象可能的原因是随着粉磨时间的增加，使得颗粒产生大量的断裂面，在断裂面处出现了带电的结构单元，从而提高了颗粒表面的吸附能力，易于吸附小颗粒，出现团聚现象。

### 2.5 水淬硅锰渣粉作掺合料对粉煤灰基地聚物抗压强度的影响

由图 8 可知随着机械活化力时间越长，粉煤灰/硅锰渣地聚物抗压强度呈上升趋势，同时随着 3、7、28 d 龄期延长，试样抗压强度也一定程度增大。其中 3 d 抗压强度增长趋势较为缓慢，28 d 抗压强度增速最快。说明硅锰渣粉比表面积对 28 d 抗压强度影响较大，能够加速水化反应的进行。但在 25~30 min 时增速较为缓慢，可能的原因是由于出现团聚现象使得抗压强度增速变缓。

一方面原因是在机械力的作用下，硅锰渣颗粒逐渐细化，比表面积增大，表面活性位点增加，能够充分与碱激发剂接触发生地聚合反应，使得强度上升。同时，大量细化的颗粒能够填充在凝胶的细微孔隙中，使其凝胶结构结合更加紧密从而提高强度。另一方面机械力粉磨使得硅锰渣颗粒晶体结构发生畸变，结晶度下降，向无定形结构转变，使参与水化反应的活性成分增加，生成大量凝胶物质。

从成本角度考虑，由于硅锰渣易磨性较差，随着机械活化力时间增加，会消耗大量能量从而提高成本。因此，当硅锰渣的机械活化力时间达

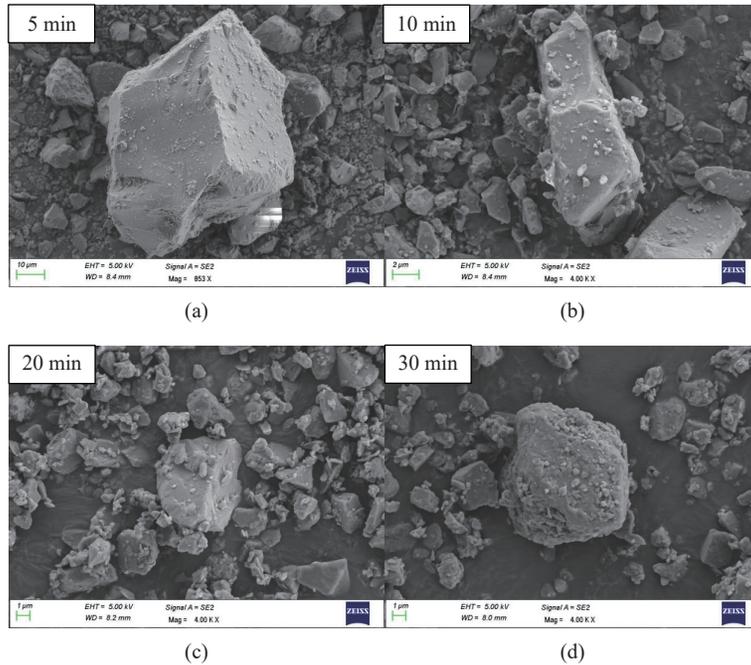


图 7 不同粉磨时间下硅锰渣粉末 SEM

Fig.7 SEM of silicomanganese slag powder under different grinding time

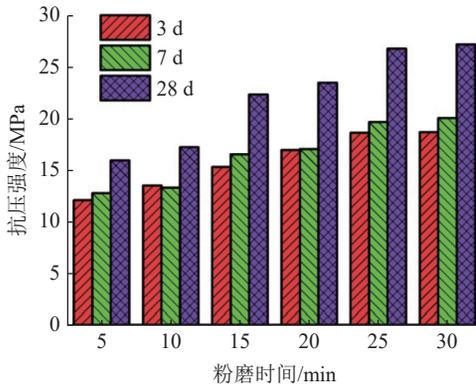


图 8 水淬硅锰渣粉作掺合料对粉煤灰基地聚物抗压强度

Fig.8 Compressive strength of water-quenched silicomanganese slag powder as admixture on fly ash base polymer 25 min 时, 28 d 抗压强度达 26.79 MPa, 对于加大硅锰渣在建材领域综合利用有着促进作用。

### 2.6 粉磨时间对硅锰渣粉堆积密度的影响

粉料的松散堆积密度是由粉体自由堆积状态的量征表现和颗粒团聚程度的数值表征, 振实堆积密度是由颗粒堆积紧密程度及高能团聚程度的量观表征。原因是水淬硅锰渣粉体随粉磨时间的增加, 颗粒粒径和均齐度均减小, 粒度分布也变窄, 而本实验的颗粒均齐度和粒度分布对堆积密度的影响主要是由颗粒填充空隙为主<sup>[10]</sup>。由图 9 可知, 随着粉磨时间的延长, 水淬硅锰渣粉松散堆积密度和振实堆积密度整体呈上升趋势, 硅锰渣粉振实堆积密度增速较为缓慢, 而松散堆积密

度增速较快。当处于 5 ~ 20 min 时, 颗粒堆积密度增速较小, 而处于 20 ~ 30 min 时, 颗粒堆积密度增速较快, 原因在于随着粉磨时间增加, 颗粒粒径不断细化, 使得小颗粒能够很好填充在大颗粒堆积的缝隙中, 从而使得堆积密度上升较快。对于水淬硅锰渣粉而言, 振动压实比松散堆积更有效, 原因在于当适当的振动能量被施加到粉末上时, 颗粒能够通过运动和偏转重新排列, 这就极大地提高了堆积密度<sup>[11]</sup>。

### 2.7 难磨相 XRD 的分析

通过分析水淬硅锰渣粉筛上 5、10 和 20 min 的 XRD (图 10) 可知, 表明筛上水淬硅锰渣粉的主要晶相是直锰辉石晶体结构, 且随着机械力粉

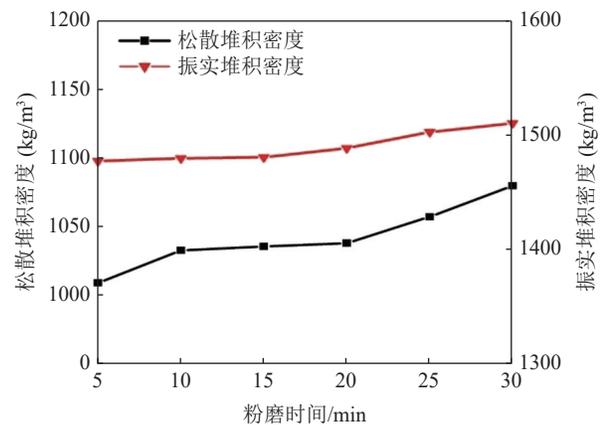
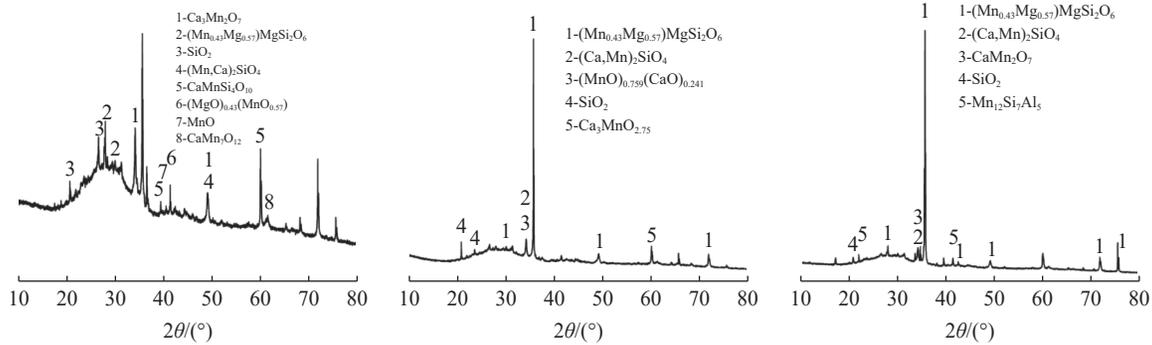


图 9 粉磨时间对水淬硅锰渣粉堆积密度的影响 Fig.9 Effect of grinding time on the bulk density of water-quenched silicomanganese slag powder



a. 筛上 5 min, b. 筛上 10 min, c. 筛上 20 min

a. 5 min on the sieve, b. 10 min on the sieve, c. 20 min on the sieve

图10 硅锰渣粉筛上 XRD

Fig.10 XRD pattern on sieve of silicomanganese slag powder

磨时间的增加，直锰辉石的结晶程度越来越高。同时，图 a、b 和 c 中均出现不同的含锰物相，因此能够说明水淬硅锰渣中难磨相是直锰辉石晶体结构，以及不同种类的含锰物相。

### 2.8 XPS 分析

由表 5 能够得到，随着粉磨时间的延长，Si 2p、Al 2p 和 O 1s 的结合能呈下降的趋势，Si 2p、Al 2p 和 O 1s 的结合能分别下降了 0.4 eV、0.45 eV 和 0.05 eV。Kiyoshi Okada 等<sup>[12]</sup>表明不同聚合态硅酸盐结构与 Si 2p 的 XPS 结合能有关，高的结合能会导致高的聚合度。水淬硅锰渣经粉磨后 Si 2p 结合能降低，表明了水淬硅锰渣中聚合度降低，表面活性提高。同时，张娜等<sup>[13]</sup>提到四配位的铝的结合能为 73.4 ~ 74.55 eV，六配位铝的结合能为 74.1 ~ 75.0 eV，因此粉磨 5、15 min 时水淬硅锰渣中 Al 分别以四、六配位共存和四配位的形式存在。通过以上分析，能够表明水淬硅锰渣粉经机械粉磨后，其颗粒活性会增强。

表 5 粉磨 5、15 min 下 Si、Al 和 O 的结合能  
Table 5 Binding energies of Si, Al and O under 5 min and 15 min grinding

粉磨时间/ min	结合能/eV		
	Si 2p	Al 2p	O 1s
5	102.2	74.25	531.50
15	101.8	73.80	531.45

## 3 结论

(1) 水淬硅锰渣粉的易磨性较差。随着粉磨时间增加，水淬硅锰渣粉的比表面积增速较为明显，粒度分布逐渐左移，颗粒粒径逐步细化，但继续延长粉磨时间，粒径分布虽继续左移，但

中、小粒径颗粒减小趋势较为缓慢。同时，石英相衍射峰强逐步减弱，向无定形结构转变。

(2) 粉磨时间对水淬硅锰渣粉作地聚物掺合料的抗压强度有着较大的影响，随着粉磨时间的延长，地聚物抗压强度逐步上升，最高可达 27.21 MPa。但从综合角度考虑，粉磨时间为 25 min 时作粉煤灰基地聚物掺合料的性能较佳，其 28 d 抗压强度可达 26.79 MPa。

(3) 通过对水淬硅锰渣筛上和筛下的 XRD 物相分析，表明水淬硅锰渣中的难磨物相主要是直锰辉石晶体结构，以及不同含锰物相。

### 参考文献:

- [1] 李胜春, 朱春江, 宁伟. 最新固废利用热态熔渣生产优质矿棉的研究和应用[C]. 2019 第 22 届全国玻璃窑炉技术研讨交流会, 2019: 12.
- [2] LI S C, ZHU C J, NING W. Research and application of the latest solid waste to use hot molten slag to produce high-quality mineral wool [C]. 2019 22nd National Glass Furnace Technology Seminar, 2019: 12.
- [3] 窦林瑞. 浅谈硅锰渣在建筑材料中的利用[J]. 中国锰业, 2017, 35(4):136-138.
- [4] DOU L R. Discussion on the utilization of silicomanganese slag in building materials[J]. China Manganese Industry, 2017, 35(4):136-138.
- [5] 崔孝炜, 狄燕清, 南宁. 钢渣的机械力粉磨特性[J]. 矿产保护与利用, 2017(5):77-81.
- [6] CUI X W, DI Y Q, NAN N. Mechanical grinding characteristics of steel slag[J]. Mineral Resources Protection and Utilization, 2017(5):77-81.
- [7] 崔孝炜, 狄燕清, 邓婉心, 等. 铁尾矿机械力粉磨特性的基础研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(1):73-75.
- [8] CUI X W, DI Y Q, DENG W X, et al. Basic research on mechanical grinding characteristics of iron tailings[J]. Nonmetallic Minerals, 2020, 43(1):73-75.

- [5] 饶磊, 吴六顺, 周云, 等. 高温改性及风淬处理对钢渣易磨性影响的工业性试验研究[J]. 炼钢, 2017, 33(6):73-77.
- RAO L, WU L S, ZHOU Y, et al. Industrial test research on effect of high temperature modification and air quenching treatment on the grindability of steel slag[J]. *Steelmaking*, 2017, 33(6):73-77.
- [6] 杨南如. 非传统胶凝材料化学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2017: 76-77.
- YANG N R. *The Chemistry of unconventional cementitious materials*[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2017: 76-77.
- [7] 赵计辉. 钢渣的粉磨/水化特征及其复合胶凝材料的组成与性能[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
- ZHAO J H. *Grinding/hydration characteristics of steel slag and the composition and properties of composite cementitious materials*[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [8] 刘璇, 李如燕, 崔孝炜, 等. 机械力对高硅金尾矿粒度及活性的影响[J]. 中国粉体技术, 2019, 25(2):42-46.
- LIU X, LI R Y, CUI X W, et al. The effect of mechanical force on the particle size and activity of high-silicon gold tailings[J]. *China Powder Science and Technology*, 2019, 25(2):42-46.
- [9] 王晨, 高宏, 刘淑红, 等. 中低品位磷矿粉的机械力化学活化与活性表征[J]. 化工矿物与加工, 2012, 41(7):1-4+8.
- WANG C, GAO H, LIU S H, et al. Mechanochemical activation and activity characterization of middle and low grade phosphate rock powder[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2012, 41(7):1-4+8.
- [10] 郑伟亮, 盖国胜. 不同粉碎方式对物料粉碎的研究[C]. 第九届全国粉体工程学术会暨相关设备、产品交流会, 2003: 3.
- ZHENG W L, GAI G S. Research on material crushing by different crushing methods[C]. *The 9th National Powder Engineering Conference and Related Equipment and Products Exchange Conference*, 2003: 3.
- [11] He T, Li Z, Zhao S, et al. Study on the particle morphology, powder characteristics and hydration activity of blast furnace slag prepared by different grinding methods[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270.
- [12] Okada K, Kameshima Y, Yasumori A. Chemical shifts of silicon X-ray photoelectron spectra by polymerization structures of silicates[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 81(7):1970-1972.
- [13] 张娜, 刘晓明, 孙恒虎. 赤泥-煤矸石基胶凝材料水化过程 XPS 分析[J]. 金属矿山, 2014(3):171-176.
- ZHANG N, LIU X M, SUN H H. XPS analysis of hydration process of red mud-gangue based cementitious material[J]. *Metal Mine*, 2014(3):171-176.

## Mechanical Grinding Characteristics of Water Quenched Si-Manganese Slag

XING Zhibing<sup>1</sup>, HAN Fenglan<sup>1,2</sup>, LI Maohui<sup>1</sup>, YANG Baoguo<sup>3,4</sup>, ZHENG Bin<sup>1</sup>, LIU Tengting<sup>1</sup>

(1. Institute of materials science and engineering North Minzu University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. Industrial Waste Recycling and International Cooperation Base for Advanced Materials, High-value utilization of industrial by-products Collaborative Innovation Center, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

3. Geophysical and Geochemical Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430075, Hubei, China)

**Abstract:** This is an article in the field of mineral processing engineering. According to the principle of mechanochemistry, the water-quenched silico-manganese slag is ground by vibrating mill. The effect of grinding time on the specific surface area, particle size distribution and activity evaluation of the water-quenched silico-manganese slag is studied, and the specific surface area is used. The specific surface area, particle size distribution, phase analysis and particle morphology of water-quenched silico-manganese slag powder were discussed with laser particle size analyzer, XRD and SEM and other characterization methods. At the same time, the water with different grinding time was also studied. Effect of silicomanganese slag powder as admixture on the compressive strength of geopolymers. The results show that with the extension of the grinding time, the particle size distribution of the silicomanganese slag gradually shifts to the left, the particle size is gradually refined, and the quartz phase gradually changes to an amorphous structure. From the perspective of cost, when the grinding time is 25 min and the specific surface area is 1.8281 m<sup>2</sup>/g as fly ash geopolymer admixture, the 28 d compressive strength can reach 26.79 MPa. And it is determined that the difficult-to-wear phase is the orthomanganese pyroxene crystal structure, and different manganese-containing phases.

**Keywords:** Mineral processing engineering; Water quenched silico-manganese slag; Particle size; Compressive strength