



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113153419 A

(43) 申请公布日 2021.07.23

(21) 申请号 202110461994.7

G06N 3/04 (2006.01)

(22) 申请日 2021.04.27

G06N 3/08 (2006.01)

(71) 申请人 北京科技大学

地址 100083 北京市海淀区学院路30号

申请人 河北钢铁集团矿业有限公司

矿冶科技集团有限公司

(72) 发明人 肖柏林 杨晓炳 温震江 郭斌

吴凡 高谦 杨航 胡亚军

李胜辉 陈彦亭 巴蕾 韦寒波

(74) 专利代理机构 北京金智普华知识产权代理

有限公司 11401

代理人 朱艳华

(51) Int.Cl.

E21F 15/00 (2006.01)

G06F 30/27 (2020.01)

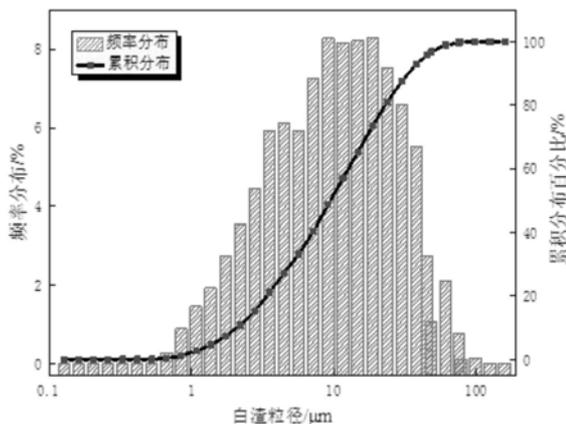
权利要求书2页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法

(57) 摘要

本发明提供一种精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,该方法利用LF精炼渣替代熟料,与脱硫石膏和高炉矿渣制备冶金渣基胶凝材料;针对高泥尾砂开展不同胶砂比和料浆浓度的胶结体强度和料浆流变试验以及胶结体膨胀率与浸出液pH值测试;建立胶结体强度、膨胀率、料浆流变参数和胶结体浸出液pH值与胶砂比和料浆浓度的关系;以高泥砂料浆成本作为优化目标,以胶结体强度、膨胀率、料浆流变参数和浸出液pH值作为约束条件,建立和求解高泥尾砂料浆优化模型。该方法为工业固废资源化、减量化和无害化处置探索出一条途径,从而提高充填采矿的经济效益和环保效益,促进充填采矿技术推广应用。



1. 一种精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,其特征在於:包括步骤如下:

(1) 根据采矿技术条件、采矿方法、充填系统对胶结体强度、体积膨胀性以及浸出液pH值要求,开展不同胶砂比和浓度胶结体强度和料浆流变试验,建立并求解满足固废处置与充填法采矿要求的料浆优化模型;

(2) 利用LF精炼渣、脱硫石膏和高炉矿渣制备冶金渣基胶凝材料;

(3) 根据充填料浆优化配比,利用充填系统制备高泥尾砂充填料浆,采用充填管道输送到地下采空区进行固化处置,实现精炼渣协同高泥尾砂固化处置以及充填法采矿。

2. 根据权利要求1所述的精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,其特征在於:所述步骤(2)中LF精炼渣为电弧炉精炼钢的还原期操作中所形成的副产物,其碱度系数 $M > 2.5$ ;冶金渣基胶凝材料粉磨后的粉体比表面积 $\geq 450\text{m}^2/\text{kg}$ ,含水率 $\leq 2\%$ 。

3. 根据权利要求1所述的精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,其特征在於:所述步骤(1)中首先建立胶结体强度和体积膨胀率数学模型,然后建立胶结体浸出液pH的数学模型,再建立充填料浆流变参数的数学模型,最后建立高泥尾砂充填料浆配比优化模型;

其中,胶结体强度和体积膨胀率数学模型为:

$$R_{7d} = f_1(x_1, x_2), R_{28d} = f_2(x_1, x_2), V_{28d} = f_3(x_1, x_2);$$

其中, $R_{7d}$ 、 $R_{28d}$ 、 $V_{28d}$ 分别代表胶结体7d强度、胶结体28d强度和体积膨胀率; $x_1$ 代表高泥尾砂料浆的胶砂比, $x_2$ 代表高泥尾砂料浆浓度; $f_1(x_1, x_2)$ 、 $f_2(x_1, x_2)$ 和 $f_3(x_1, x_2)$ 分别代表高泥尾砂胶结体7d强度、胶结体28d强度和28d胶结体的体积膨胀率数学模型;

胶结体浸出液pH的数学模型为:

$$\text{pH}_{28d} = f_4(x_1, x_2),$$

其中, $\text{pH}_{28d}$ 代表胶结体浸出液pH值, $f_4(x_1, x_2)$ 代表胶结体浸出液pH值的数学模型;

充填料浆流变参数的数学模型为:

$$R_L = f_5(x_1, x_2), R_N = f_6(x_1, x_2);$$

其中, $R_L$ 代表充填料浆的屈服应力; $R_N$ 代表充填料浆的黏度系数; $f_5(x_1, x_2)$ 、 $f_6(x_1, x_2)$ 分别代表充填料浆的屈服应力和黏度系数的数学模型;

高泥尾砂充填料浆配比优化模型为:

$$\text{Min}C_T = \text{Min}[c_1y_1 + c_2y_2 + c_3y_3]$$

$$R_{7d} = f_1(x_1, x_2) \geq [R_{7d}], R_{28d} = f_2(x_1, x_2) \geq [R_{28d}];$$

$$V_{28d} = f_3(x_1, x_2) \leq [V_{1im}], \text{pH}_{28d} = f_4(x_1, x_2) \leq [\text{pH}];$$

$$R_L = f_5(x_1, x_2) \leq [\tau], R_N = f_6(x_1, x_2) \leq [\eta];$$

其中, $C_T$ 代表充填料浆成本,单位为元/ $\text{m}^3$ ;  $c_1$ 代表冶金渣基胶凝材料成本,单位为元/t;  $c_2$ 代表高泥尾砂成本,单位为元/t;  $c_3$ 代表水的成本,单位为元/t;  $y_1$ 代表冶金渣基胶凝材料用量,单位为 $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $y_2$ 代表高泥尾砂用量,单位为 $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $y_3$ 代表水的用量,单位为 $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $[R_{7d}]$ 、 $[R_{28d}]$ 代表胶结体7d和28d设计强度;  $[V_{1im}]$ 代表28d胶结体膨胀率设计值;  $[\tau]$ 、 $[\eta]$ 代表充填料浆屈服应力和黏度系数的设计值。

4. 根据权利要求1所述的精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,其特征在於:所述步骤(2)中LF精炼渣、脱硫石膏和高炉矿渣的掺量范围为:LF精炼渣25%-35%、

脱硫石膏10%-15%、高炉矿渣50%-65%。

5. 根据权利要求1所述的精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,其特征  
在于:所述步骤(3)中充填料浆优化配比为:

当高泥尾砂中-74 $\mu\text{m}$ 含量 $\geq 80\%$ ,料浆胶砂比范围为1:4-1:6,料浆浓度范围为56%-  
62%;当尾砂中-74 $\mu\text{m}$ 含量为75%-80%,料浆胶砂比范围为1:6-1:8,料浆浓度范围为60%-  
66%;

当尾砂中-74 $\mu\text{m}$ 含量 $\leq 75\%$ ,料浆胶砂比范围为1:5-1:10,料浆浓度范围为64%-72%。

6. 根据权利要求3所述的精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,其特征  
在于:所述步骤(1)中;

当采用阶段嗣后充填采矿法时,胶结体设计强度为 $[R_{7d}] = 1.0\text{MPa}$ 、 $[R_{28d}] = 2.5\text{MPa}$ ;

当采用上向分层充填采矿法时,胶结体设计强度为 $[R_{7d}] = 1.5\text{MPa}$ 、 $[R_{28d}] = 3.0\text{MPa}$ ;

当采用下向分层充填采矿法时,胶结体设计强度为 $[R_{7d}] = 2.5\text{MPa}$ 、 $[R_{28d}] = 5.0\text{MPa}$ 。

7. 根据权利要求3所述的精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,其特征  
在于:对于不发生强度膨胀劣化的高泥尾砂28d胶结体膨胀率设计值为 $[V_{1im}] \leq 3\%$ 。

8. 根据权利要求3所述的精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,其特征  
在于:所述步骤(1)的充填系统中,

当充填倍线为3-6和自流输送,料浆流变参数设计值为 $[\tau] \leq 50\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.80\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

当充填倍线为1-3和自流输送,料浆流变参数设计值为 $[\tau] \leq 100\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.85\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

当充填倍线 $\geq 7$ 和泵压输送时,料浆流变参数设计值为 $[\tau] \leq 150\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.90\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

## 精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及固体废物固化处置与充填采矿法的交叉技术领域,特别是指一种精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法。

### 背景技术

[0002] 我国钢铁工业每年排放大量的矿渣和钢渣。高炉矿渣(又称水淬渣)的活性高、易粉磨,作为建材掺合料已经得到规模化与高值化应用。不仅利用率接近100%,而且在我国部分地区还供不应求。钢渣包括转炉渣、精炼渣和电炉渣三种。根据目前炼钢水平,钢渣产出量为粗钢产量的10%~15%。据国家统计局公布的数据,2020年我国粗钢产量为10.53亿t,钢渣达到1~1.5亿t。与高炉矿渣相比,钢渣活性低、粉磨难度大以及利用成本高与经济效益差,并存在不稳定性问题,导致钢渣总体利用率较低( $\leq 30\%$ )。为了提高钢渣资源化利用率,目前正在开展比表面积 $\geq 700\text{m}^2/\text{kg}$ 超细钢渣微粉用于建材工业。通过超细粉磨来改善钢渣性能,实现低品质钢渣的高值化和规模化利用,但大多存在产量低、能耗高等问题在探索中,目前未能实现规模化生产。

[0003] 作为钢渣中一种冶金工业固废,精炼渣是电弧炉精炼钢的还原期操作中所形成的工业副产物。与转炉钢渣相比,精炼渣碱性更高、活性更低,硬度更大,并且含有较多的f-CaO和f-MgO,体积不稳定性问题更为突出,在建材中应用存在更多的问题,目前对精炼渣资源的综合利用技术并不多见,导致精炼渣利用率更低( $\leq 10\%$ )。2020年我国精炼渣(LFS)产量大约1500万吨,大多数钢企将其冷却后存置于尾矿库,或者部分与转炉渣混合用于铺路或煅烧水泥,不仅利用价值低,而且还造成资源浪费。精炼渣在地表堆放占用土地资源,同时还污染环境。随着我国钢产量快速增长,增幅巨大,精炼渣增长更加明显。探索精炼渣高值化利用和安全处置,对钢铁企业的发展具有重要意义。

[0004] 国民经济高速发展对矿产资源开发,导致我国富矿资源日趋枯竭。贫矿开发不仅经济效益差,而且选矿尾砂排放量增大。为提高金属回收率,选矿尾砂粉磨越来越细,-74 $\mu\text{m}$ 细颗粒含量 $\geq 80\%$ 的高泥尾砂已经很普遍。高泥尾砂处置困难更大,固废处置成本更高。通常排放到尾矿库实施堆放处置,不仅存在尾矿库征地难度大、建库投资高,而且还潜在溃坝泥石流地质灾害风险。

[0005] 为了创建绿色矿山和实现清洁生产,全尾砂充填法采矿是当前和尾砂资源开采的必然选择和发展趋势。充填法采矿是在浓密全尾砂浆中添加胶凝剂搅拌,制备充填料浆采用充填管道输送到地下采空区,凝固后形成尾砂胶结体,不仅实现对尾砂固化稳定处置,而且还满足胶结充填法采矿,达到“以废制害”的目的。目前大多数矿山采用水泥作为尾砂胶凝剂,尾砂胶结体强度低,胶凝材料用量大,充填采矿成本高,因此不得不采用分级尾砂充填,由此不仅降低尾砂利用率,而尾砂分级排出的细泥处理面临更大的困难和问题。

[0006] 精炼渣矿物成分与水泥熟料相似,含有大量的CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和MgO等氧化物,潜在一定的活性。精炼渣的碱度系数 $M_0 > 2.5$ ,属于强碱性废渣。针对高泥尾砂胶结充填法采矿存在的困难和问题,本发明提出利用精炼渣代替水泥熟料制备冶金渣基胶凝材料。与水泥

相比,冶金渣基胶凝材料不仅成本低,而且适应高泥尾砂固体废物,尾砂胶结体强度高、充填料浆流动性好。替代水泥用于高泥尾砂胶结剂,胶凝材料用量少,充填采矿成本低,从而实现高泥尾砂固化处置以及充填法采矿的双重目的。

[0007] 本发明提出精炼渣协同高泥尾砂固化处置以及全固废充填采矿法,利用碱性精炼渣替代水泥熟料开发冶金渣基胶凝材料,然后针对高泥尾砂开展充填料浆的配比优化。由此制备全尾砂充填料浆回填到采空区实现固化处置,并利用胶结体强度实现充填法采矿。

[0008] 本发明所提出的优化方法,能够实现高泥尾砂固化处置以及充填法采矿的双重目的,不仅对精炼渣和高泥尾砂固废实现了资源化、减量化和无害化综合利用,而且为安全、环保和低成本全尾砂充填法采矿探索出一条途径,由此降低高泥尾砂充填采矿成本,促进尾砂充填采矿技术的推广应用。

### 发明内容

[0009] 本发明要解决的技术问题是提供一种精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法,利用精炼渣替代熟料开发冶金渣基胶凝材料,协同高泥尾砂实施固废固化处置,通过优化充填料浆配比,实现安全、环保和低成本充填采矿。

[0010] 进一步地,所述方法首先利用LF精炼渣替代熟料,与脱硫石膏和高炉矿渣制备冶金渣基胶凝材料;针对高泥尾砂开展不同胶砂比和料浆浓度的胶结体强度和料浆流变试验以及胶结体膨胀率与浸出液pH值测试;根据实验结果,建立胶结体强度、膨胀率、料浆流变参数和胶结体浸出液pH值与胶砂比和料浆浓度的关系;以高泥砂料浆成本作为优化目标,以胶结体强度、膨胀率、料浆流变参数和浸出液pH值作为约束条件,建立和求解高泥尾砂料浆优化模型。

[0011] 进一步地,所述方法具体包括步骤如下:

[0012] (1) 根据采矿技术条件、采矿方法、充填系统对胶结体强度、体积膨胀性以及浸出液pH值要求,开展不同胶砂比和浓度胶结体强度和料浆流变试验,建立并求解满足固废处置与充填法采矿要求的料浆优化模型;

[0013] (2) 利用LF精炼渣、脱硫石膏和高炉矿渣制备冶金渣基胶凝材料;

[0014] (3) 根据充填料浆优化配比,利用充填系统制备高泥尾砂充填料浆,采用充填管道输送到地下采空区进行固化处置,实现精炼渣协同高泥尾砂固化处置以及充填法采矿。

[0015] 其中,步骤(2)中LF精炼渣为电弧炉精炼钢的还原期操作中所形成的副产物,其碱度系数 $M > 2.5$ ;冶金渣基胶凝材料粉磨后粉体比表面积 $\geq 450 \text{m}^2/\text{kg}$ ,含水率 $\leq 2\%$ 。

[0016] 进一步地,步骤(1)中首先建立胶结体强度和体积膨胀率数学模型,然后建立胶结体浸出液pH的数学模型,再建立充填料浆流变参数的数学模型,最后建立高泥尾砂充填料浆配比优化模型;

[0017] 其中,胶结体强度和体积膨胀率数学模型为:

$$[0018] \quad R_{7d} = f_1(x_1, x_2), R_{28d} = f_2(x_1, x_2), V_{28d} = f_3(x_1, x_2);$$

[0019] 其中, $R_{7d}$ 、 $R_{28d}$ 、 $V_{28d}$ 分别代表胶结体7d强度、胶结体28d强度和体积膨胀率; $x_1$ 代表高泥尾砂料浆的胶砂比, $x_2$ 代表高泥尾砂料浆浓度; $f_1(x_1, x_2)$ 、 $f_2(x_1, x_2)$ 和 $f_3(x_1, x_2)$ 分别代表高泥尾砂胶结体7d强度、胶结体28d强度和28d胶结体的体积膨胀率数学模型;

[0020] 胶结体浸出液pH的数学模型为:

[0021]  $\text{pH}_{28\text{d}} = f_4(x_1, x_2)$ ,

[0022] 其中,  $\text{pH}_{28\text{d}}$  代表胶结体浸出液pH值,  $f_4(x_1, x_2)$  代表胶结体浸出液pH值的数学模型;

[0023] 充填料浆流变参数的数学模型为:

[0024]  $R_L = f_5(x_1, x_2)$ 、 $R_N = f_6(x_1, x_2)$ ;

[0025] 其中,  $R_L$  代表充填料浆的屈服应力;  $R_N$  代表充填料浆的黏度系数;  $f_5(x_1, x_2)$ 、 $f_6(x_1, x_2)$  分别代表充填料浆的屈服应力和黏度系数的数学模型;

[0026] 高泥尾砂充填料浆配比优化模型为:

[0027]  $\text{Min}C_T = \text{Min}[c_1y_1 + c_2y_2 + c_3y_3]$

[0028]  $R_{7\text{d}} = f_1(x_1, x_2) \geq [R_{7\text{d}}]$ 、 $R_{28\text{d}} = f_2(x_1, x_2) \geq [R_{28\text{d}}]$ ;

[0029]  $V_{28\text{d}} = f_3(x_1, x_2) \leq [V_{1\text{im}}]$ 、 $\text{pH}_{28\text{d}} = f_4(x_1, x_2) \leq [\text{pH}]$ ;

[0030]  $R_L = f_5(x_1, x_2) \leq [\tau]$ 、 $R_N = f_6(x_1, x_2) \leq [\eta]$ ;

[0031] 其中,  $C_T$  代表充填料浆成本, 单位为元/ $\text{m}^3$ ;  $c_1$  代表冶金渣基胶凝材料成本, 单位为元/t;  $c_2$  代表高泥尾砂成本, 单位为元/t;  $c_3$  代表水的成本, 单位为元/t;  $y_1$  代表冶金渣基胶凝材料用量, 单位为 $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $y_2$  代表高泥尾砂用量, 单位为 $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $y_3$  代表水的用量, 单位为 $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $[R_{7\text{d}}]$ 、 $[R_{28\text{d}}]$  代表胶结体7d和28d设计强度;  $[V_{1\text{im}}]$  代表28d胶结体膨胀率设计值;  $[\tau]$ 、 $[\eta]$  代表充填料浆屈服应力和黏度系数的设计值。

[0032] 进一步地, 步骤(2)中LF精炼渣、脱硫石膏和高炉矿渣的掺量范围为: LF精炼渣25%-35%、脱硫石膏10%-15%、高炉矿渣50%-65%。

[0033] 进一步地, 步骤(3)中充填料浆优化配比为当高泥尾砂中-74 $\mu\text{m}$ 含量 $\geq 80\%$ , 料浆胶砂比范围为1:4-1:6, 料浆浓度范围为56%-62%; 当尾砂中-74 $\mu\text{m}$ 含量为75%-80%, 料浆胶砂比范围为1:6-1:8, 料浆浓度范围为60%-66%; 当尾砂中-74 $\mu\text{m}$ 含量 $\leq 75\%$ , 料浆胶砂比范围为1:5-1:10, 料浆浓度范围为64%-72%。

[0034] 进一步地, 当采用阶段嗣后充填采矿法, 胶结体设计强度为 $[R_{7\text{d}}] = 1.0\text{MPa}$ 、 $[R_{28\text{d}}] = 2.5\text{MPa}$ ;

[0035] 当采用上向分层充填采矿法, 胶结体设计强度为 $[R_{7\text{d}}] = 1.5\text{MPa}$ 、 $[R_{28\text{d}}] = 3.0\text{MPa}$ ;

[0036] 当采用下向分层充填采矿法, 胶结体设计强度为 $[R_{7\text{d}}] = 2.5\text{MPa}$ 、 $[R_{28\text{d}}] = 5.0\text{MPa}$ 。

[0037] 进一步地, 对于不发生强度膨胀劣化的高泥尾砂28d胶结体膨胀率设计值为 $[V_{1\text{im}}] \leq 3\%$ 。

[0038] 进一步地, 当充填倍线为3-6和自流输送, 料浆流变参数设计值为 $[\tau] \leq 50\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.80\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

[0039] 当充填倍线为1-3和自流输送, 料浆流变参数设计值为 $[\tau] \leq 100\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.85\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

[0040] 当充填倍线 $\geq 7$ 和泵压输送时, 料浆流变参数设计值为 $[\tau] \leq 150\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.90\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

[0041] 本发明的上述技术方案的有益效果如下:

[0042] 1) 上述方案中, 利用碱性精炼渣替代水泥熟料开发冶金渣基胶凝材料; 针对冶金渣潜在的不安定性以及浸出液对地下水环境影响, 通过建立优化模型进行高泥尾砂充填料浆优化设计, 制备出满足充填法采矿与环保要求的充填料浆;

[0043] 2) 通过充填管道输送到地下空区实施固化处置并用于充填法采矿; 能够实现高泥

尾砂固化处置以及充填法采矿的双重目的,不仅对精炼渣和高泥尾砂固废实现了资源化、减量化和无害化综合利用,而且为安全、环保和低成本全尾砂充填法采矿探索出一条途径,由此降低高泥尾砂充填采矿成本,促进尾砂充填采矿技术的推广应用。

[0044] 当然,实施本发明的任一产品并不一定需要同时达到以上所述的所有技术效果。

### 附图说明

[0045] 图1为本发明一个实施例提供的邯钢公司精炼渣样品图;

[0046] 图2为本发明一个实施例提供的邯钢精炼渣的粒径分布曲线图;

[0047] 图3为本发明一个实施例提供的邯钢精炼渣的XRD分析图谱;

[0048] 图4为本发明一个实施例提供的中关铁矿高泥尾砂的XRD分析图谱;

[0049] 图5为本发明一个实施例提供的中关铁矿高泥尾砂的粒径分布曲线图;

[0050] 图6为本发明一个实施例提供的胶结体7d和28d强度试验值与预测值对比曲线图,其中,(a)为7d,(b)为28d;

[0051] 图7为本发明一个实施例提供的中关铁矿高泥尾砂料浆剪切应力与剪切速率关系曲线图。

### 具体实施方式

[0052] 为使本发明要解决的技术问题、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图及具体实施例进行详细描述。

[0053] 本发明提供一种精炼渣协同高泥尾砂固化处置与全固废充填采矿法。

[0054] 本方法首先利用LF精炼渣替代熟料,与脱硫石膏和高炉矿渣制备冶金渣基胶凝材料;针对高泥尾砂开展不同胶砂比和料浆浓度的胶结体强度和料浆流变试验以及胶结体膨胀率与浸出液pH值测试;根据实验结果,建立胶结体强度、膨胀率、料浆流变参数和胶结体浸出液pH值与胶砂比和料浆浓度的关系;以高泥砂料浆成本作为优化目标,以胶结体强度、膨胀率、料浆流变参数和浸出液pH值作为约束条件,建立和求解高泥尾砂料浆优化模型。

[0055] 具体包括步骤如下:

[0056] (1) 根据采矿技术条件、采矿方法、充填系统对胶结体强度、体积膨胀性以及浸出液pH值要求,开展不同胶砂比和浓度胶结体强度和料浆流变试验,建立并求解满足固废处置与充填法采矿要求的料浆优化模型;

[0057] (2) 利用LF精炼渣、脱硫石膏和高炉矿渣制备冶金渣基胶凝材料;

[0058] (3) 根据充填料浆优化配比,利用充填系统制备高泥尾砂充填料浆,采用充填管道输送到地下采空区进行固化处置,实现精炼渣协同高泥尾砂固化处置以及充填法采矿。

[0059] 具体过程如下:

[0060] 1. 冶金渣胶凝材料开发与制备,具体步骤如下:

[0061] (1) 对精炼渣、脱硫石膏、高炉矿渣以及选矿高泥尾砂固废物料进行烘干处理与物化分析。

[0062] (2) 采用 $7.07\text{cm} \times 7.07\text{cm} \times 7.07\text{cm}$ 三联模制备试块,开展冶金渣基胶凝材料胶结体强度试验;

[0063] (3) 利用胶结体强度试验结果作为学习样本进行训练,建立胶结体强度的神经网络

络预测模型,对不同配比冶金渣基胶凝材料胶结体强度预测并建立优化模型,进行冶金渣基胶凝材料配比优化。

[0064] 2.高泥尾砂料浆配比优化与制备,具体步骤如下:

[0065] (1)开展不同胶砂比和料浆浓度的高泥尾砂胶结体强度试验和膨胀率测试,并采用玻璃电极法进行胶结体浸出液的pH值测试;

[0066] (2)建立胶结体强度和膨胀率模型: $R_{7d}=f_1(x_1, x_2)$ 、 $R_{28d}=f_2(x_1, x_2)$ 、 $V_{28d}=f_3(x_1, x_2)$ ;其中, $R_{7d}$ 、 $R_{28d}$ 、 $V_{28d}$ 代表胶结体7d、28d强度和膨胀率; $x_1$ 代表料浆胶砂比, $x_2$ 代表料浆浓度; $f_1(x_1, x_2)$ 、 $f_2(x_1, x_2)$ 和 $f_3(x_1, x_2)$ 代表胶结体7d、28d强度和膨胀率数学模型。

[0067] (3)建立胶结体浸出液pH数学模型: $pH_{28d}=f_4(x_1, x_2)$ ,其中, $pH_{28d}$ 代表胶结体浸出液pH值, $f_4(x_1, x_2)$ 代表浸出液pH值的数学模型。

[0068] (4)开展高泥尾砂充填料浆流变性试验,获得不同胶砂比和料浆浓度高泥尾砂充填料浆流变参数;在此基础上,建立料浆流变参数数学模型为: $R_L=f_5(x_1, x_2)$ 、 $R_N=f_6(x_1, x_2)$ ;其中, $R_L$ 代表尾砂料浆的屈服应力; $R_N$ 代表尾砂料浆的黏度系数; $f_5(x_1, x_2)$ 、 $f_6(x_1, x_2)$ 代表尾砂料浆的屈服应力和黏度系数的数学模型。

[0069] (5)根据步骤(1)-(4),以尾砂充填料浆的成本作为优化目标,以胶结体强度、体积膨胀率、浸出液pH值和料浆流变参数作为约束条件,建立高泥尾砂充填料浆的优化模型如下:

[0070]  $MinC_T=Min[c_1y_1+c_2y_2+c_3y_3]$

[0071]  $R_{7d}=f_1(x_1, x_2) \geq [R_{7d}]$ 、 $R_{28d}=f_2(x_1, x_2) \geq [R_{28d}]$ ;

[0072]  $V_{28d}=f_3(x_1, x_2) \leq [V_{1im}]$ 、 $pH_{28d}=f_4(x_1, x_2) \leq [pH]$ ;

[0073]  $R_L=f_5(x_1, x_2) \leq [\tau]$ 、 $R_N=f_6(x_1, x_2) \leq [\eta]$ 。

[0074] 其中, $C_T$ 代表高泥尾砂充填料浆的成本,单位为元/ $m^3$ ;  $c_1$ 代表冶金渣基胶凝材料成本,单位为元/t;  $c_2$ 代表高泥尾砂成本,单位为元/t;  $c_3$ 代表水的成本,单位为元/t;  $y_1$ 代表冶金渣基胶凝材料用量,单位为 $t/m^3$ ;  $y_2$ 代表高泥尾砂用量,单位为 $t/m^3$ ;  $y_3$ 代表水用量,单位为 $t/m^3$ ;  $[R_{7d}]$ 、 $[R_{28d}]$ 代表胶结体7d和28d设计强度;  $[V_{1im}]$ 代表胶结体膨胀率设计值;  $[\tau]$ 、 $[\eta]$ 代表充填料浆屈服应力和黏度系数的设计值;

[0075] (6)求解优化模型获得充填料浆的优化配比(胶砂比和质量浓度)。

[0076] 3.精炼渣与高泥尾砂胶结充填采矿法,具体步骤如下:

[0077] (1)确定精炼渣、脱硫石膏和矿渣微粉配比范围:精炼渣25%-35%、脱硫石膏10%-15%、高炉矿渣50%-65%;

[0078] (2)采用 $7.07cm \times 7.07cm \times 7.07cm$ 三联模制备试块进行强度试验,以此作为学习样本,建立胶结体强度神经网络预测模型并进行强度预测;在此基础上,建立回归模型进行配比优化,获得冶金渣基胶凝材料的优化配比。根据优化配比进行混合粉磨,制备粉体比表面积 $\geq 450m^2/kg$ 和含水率 $\leq 2\%$ 的胶凝材料;

[0079] (3)确定高泥尾砂充填料浆试验配比范围:高泥尾砂- $74\mu m \geq 80\%$ ,胶砂比1:4-1:6、料浆浓度56%-62%。高泥尾砂- $74\mu m 75\% - 80\%$ ,胶砂比1:6-1:8、料浆浓度60%-66%。高泥尾砂- $74\mu m \leq 75\%$ ,胶砂比1:5-1:10、料浆浓度64%-72%。

[0080] (4)确定高泥尾砂胶结体强度和膨胀率设计值:对于嗣后充填采矿法: $[R_{7d}] = 1.0MPa$ 、 $[R_{28d}] = 2.5MPa$ ;对于上向分层充填采矿法: $[R_{7d}] = 1.5MPa$ 、 $[R_{28d}] = 3.0MPa$ ;对于下

向分层充填采矿法： $[R_{7d}] = 2.5\text{MPa}$ 、 $[R_{28d}] = 5.0\text{MPa}$ 。28d胶结体的膨胀率设计值： $[V_{lim}] \leq 3\%$ 。

[0081] (5) 确定高泥尾砂料浆流变参数设计值。对于充填倍线3-6和自流输送： $[\tau] \leq 50\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.80\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。对于充填倍线1-3和自流输送： $[\tau] \leq 100\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.85\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。对于充填倍线 $\geq 7$ 和泵压输送： $[\tau] \leq 150\text{Pa}$ 、 $[\eta] \leq 0.90\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

[0082] (6) 根据高泥尾砂充填料浆优化设计，制备充填料浆回填到地下采空区，对精炼渣和高泥尾砂实施固化处置，并进行充填法采矿。

[0083] 下面结合具体实施例予以说明。

[0084] 实施例1

[0085] 精炼渣协同高泥尾砂固化处置与充填法采矿的优化方法，实施步骤如下：

[0086] 1. 冶金渣胶凝材料开发与制备

[0087] (1) 精炼渣和高泥尾砂物化特性分析。图1为取自邯钢公司的精炼渣样品。图2为精炼渣粉磨后的粒径分布曲线。由此可见，邯钢精炼渣微粉细度达到4.23%。采用X射线荧光光谱(XRF)分析得出精炼渣的化学成分测试结果见表1。可见精炼渣中的CaO、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 以及 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量较高。图3为邯钢精炼渣XRD图谱。由此可知，邯钢精炼渣主要以玻璃态形式存在，未见其他明显结晶相，具有潜在活性。精炼渣中虽含有CaO和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等活性物质，但因其具有较稳定的玻璃体结构，正常情况下很难发生水化反应，须经一系列的物化激发，使其具有较高的水化活性。

[0088] 表1邯钢精炼渣主要化学成分

| 化学成分 | CaO  | MgO  | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{TiO}_2$ | MnO  |
|------|------|------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------|
| 含量/% | 52.4 | 3.92 | 18.73                   | 8.11           | 10.63                   | 0.65           | 1.89 |

[0090] 采用激光粒度分析仪测定高泥尾砂的粒径，图5为中铁铁矿高泥尾砂粒径分布曲线。由此可见，粉磨尾砂中-74 $\mu\text{m}$ 细颗粒含量为76.9%，为超细尾砂。中铁铁矿高泥尾砂的化学成分分析结果见表2，图4为尾砂XRD分析图谱。

[0091] 表2中铁铁矿选矿尾砂的化学成分

| 化学成分 | CaO   | MgO   | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{SO}_3$ |
|------|-------|-------|-------------------------|----------------|-------------------------|---------------|
| 含量/% | 35.89 | 10.32 | 10.57                   | 30.55          | 4.04                    | 6.74          |

[0093] (2) 冶金渣基胶凝材料配比试验。根据中铁铁矿尾砂细度确定胶砂比为1:4，浆浓度为66%；采用7.07cm $\times$ 7.07cm $\times$ 7.07cm三联模制备试块，在标准养护箱内养护。养护温度为 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ，养护湿度 $\geq 95\%$ 。冶金渣基胶凝材料胶结体强度试验结果见表3。

[0094] 表3冶金渣基胶凝材料胶结体强度试验结果

| 编号     | 冶金渣基胶凝材料 |        |        | 抗压强度/MPa |      |      |
|--------|----------|--------|--------|----------|------|------|
|        | 精炼渣/%    | 脱硫石膏/% | 高炉矿渣/% | 7d       | 28d  |      |
| [0095] | Q01      | 20     | 8      | 72       | 1.25 | 1.91 |
|        | Q02      | 20     | 18     | 62       | 1.40 | 2.59 |
|        | Q03      | 20     | 28     | 52       | 1.32 | 2.01 |
|        | Q04      | 30     | 8      | 62       | 1.49 | 2.81 |
|        | Q05      | 30     | 18     | 52       | 1.85 | 4.16 |
|        | Q06      | 30     | 28     | 42       | 1.65 | 3.94 |
|        | Q07      | 40     | 8      | 52       | 1.36 | 3.06 |
|        | Q08      | 40     | 18     | 42       | 1.68 | 3.8  |
| Q09    | 40       | 28     | 32     | 1.58     | 3.32 |      |
| [0096] | W01      | 30     | 14     | 56       | 1.55 | 4.23 |
|        | W02      | 30     | 16     | 54       | 1.82 | 4.91 |
|        | W03      | 30     | 18     | 52       | 2.02 | 4.83 |
|        | W04      | 30     | 20     | 50       | 2.15 | 5.65 |
|        | W05      | 30     | 22     | 48       | 1.94 | 5.04 |
|        | W06      | 30     | 24     | 46       | 1.80 | 4.93 |
|        | W07      | 30     | 26     | 44       | 1.72 | 4.58 |
|        | W08      | 30     | 28     | 42       | 1.57 | 4.07 |
|        | W09      | 30     | 30     | 40       | 1.29 | 3.12 |
|        | W10      | 30     | 32     | 38       | 0.98 | 2.53 |
| W00    | 42.5 水泥  |        |        | 1.48     | 2.23 |      |

[0097] (3) 建立胶结体强度神经网络预测模型。利用表3中的胶结体强度试验结果作为学习样本进行训练,建立胶结体强度神经网络预测模型。图6为胶结胶结体7d和28d强度试验值与模型预测值的对比曲线。

[0098] (4) 基于神经网络模型预测胶结体强度。针对冶金渣胶凝材料的不同配比进行胶结体强度预测。表4为胶结体强度神经网络模型预测结果。

[0099] (5) 冶金渣基胶凝材料配比优化。根据表4冶金渣基胶凝材料胶结体强度预测结果,建立二次多项式回归模型进行求解极值,获得优化配比是:当精炼渣为30%、脱硫石膏为20%和高炉矿渣为50%,其胶结体7d和28d单轴抗压强度分别为2.13MPa和6.08MPa。

[0100] 表4冶金渣基胶凝材料胶结体强度神经网络模型预测结果

| 编号        | 精炼渣/% | 脱硫石膏/% | 高炉矿渣/% | 胶结体抗压强度/MPa |        |
|-----------|-------|--------|--------|-------------|--------|
|           |       |        |        | 7d          | 28d    |
| R1        | 25    | 19     | 56     | 1.6697      | 3.9013 |
| R2        | 26    | 19     | 55     | 1.7564      | 4.3136 |
| R3        | 27    | 19     | 54     | 1.8450      | 4.7353 |
| R4        | 28    | 19     | 53     | 1.9306      | 5.1424 |
| R5        | 29    | 19     | 52     | 2.0088      | 5.5144 |
| R6        | 30    | 19     | 51     | 2.0767      | 5.8373 |
| R7        | 31    | 19     | 50     | 1.8603      | 3.9697 |
| R8        | 32    | 19     | 49     | 1.7879      | 3.2644 |
| [0101] R9 | 33    | 19     | 48     | 1.8230      | 3.4318 |
| R10       | 34    | 19     | 47     | 1.8498      | 3.5609 |
| R11       | 35    | 19     | 46     | 1.8699      | 3.6694 |
| T1        | 25    | 20     | 55     | 1.6245      | 3.6863 |
| T2        | 26    | 20     | 54     | 1.7081      | 4.0839 |
| T3        | 27    | 20     | 53     | 1.7963      | 4.5034 |
| T4        | 28    | 20     | 52     | 1.8842      | 4.9214 |
| T5        | 29    | 20     | 51     | 1.9669      | 5.3150 |
| T6        | 30    | 20     | 50     | 2.0407      | 5.6661 |
| T7        | 31    | 20     | 49     | 2.1035      | 5.9647 |
| T8        | 32    | 20     | 48     | 1.8519      | 3.8379 |
| T9        | 33    | 20     | 47     | 1.8049      | 3.3449 |

|        |     |    |    |    |        |        |
|--------|-----|----|----|----|--------|--------|
|        | T10 | 34 | 20 | 46 | 1.8360 | 3.4930 |
|        | T11 | 35 | 20 | 46 | 1.8594 | 3.6047 |
|        | Y1  | 25 | 21 | 54 | 1.5819 | 3.4838 |
|        | Y2  | 26 | 21 | 53 | 1.6612 | 3.8609 |
|        | Y3  | 27 | 21 | 52 | 1.7474 | 4.2711 |
|        | Y4  | 28 | 21 | 51 | 1.8361 | 4.6929 |
| [0102] | Y5  | 29 | 21 | 50 | 1.9222 | 5.1025 |
|        | Y6  | 30 | 21 | 49 | 2.0013 | 5.4788 |
|        | Y7  | 31 | 21 | 48 | 2.0704 | 5.8072 |
|        | Y8  | 32 | 21 | 47 | 2.2180 | 6.0809 |
|        | Y9  | 33 | 21 | 46 | 1.8473 | 3.7417 |
|        | Y10 | 34 | 21 | 45 | 1.8199 | 3.4165 |
|        | Y11 | 35 | 21 | 44 | 1.8474 | 3.5472 |

[0103] 2. 高泥尾砂充填料浆配比优化与制备

[0104] (1) 冶金渣基胶凝材料胶结体强度试验。针对中关铁矿高泥尾砂和充填系统,开展不同浓度和胶砂比的高泥尾砂胶结体强度试验。方案如下:冶金渣基胶凝材料为精炼渣30%、脱硫石膏20%和高炉矿渣50%。料浆浓度60%、63%、66%和69%,胶砂比1:4、1:6和1:8;胶结体试块采用标准养护,养护温度为 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 和湿度 $\geq 95\%$ ,养护1d后拆模,在养护箱中继续养护至7d和28d后对胶结体试块进行无侧限抗压强度测试。得到高泥尾砂胶结体强度试验结果见表5。

[0105] 表5不同胶砂比和料浆浓度胶结体强度试验结果

| [0106] | 编号 | 胶砂比 | 料浆浓度/% | 抗压强度/MPa |     |
|--------|----|-----|--------|----------|-----|
|        |    |     |        | 7d       | 28d |

|        |     |     |    |      |      |
|--------|-----|-----|----|------|------|
|        | E1  |     | 60 | 1.02 | 2.72 |
|        | E2  | 1:4 | 63 | 1.32 | 3.58 |
|        | E3  |     | 66 | 1.96 | 5.44 |
|        | E4  |     | 69 | 2.32 | 6.14 |
|        | E5  |     | 60 | 0.61 | 2.12 |
| [0107] | E6  | 1:6 | 63 | 0.92 | 2.56 |
|        | E7  |     | 66 | 1.59 | 3.01 |
|        | E8  |     | 69 | 1.85 | 4.17 |
|        | E9  |     | 60 | 0.39 | 1.32 |
|        | E10 | 1:8 | 63 | 0.66 | 1.60 |
|        | E11 |     | 66 | 1.10 | 1.97 |
|        | E12 |     | 69 | 1.41 | 2.22 |

[0108] (2) 建立胶结体强度模型。根据表5中的胶结体强度试验结果,进行二次多项式回归分析,由此建立胶结体强度模型:

$$[0109] \quad R_{7d} = f_1(x_1, x_2) = -8.722 + 5.953x_1 + 0.138x_2 \quad (1)$$

$$[0110] \quad R_{28d} = f_2(x_1, x_2) = -15.954 + 21.617x_1 + 0.235x_2 \quad (2)$$

[0111] 其中,  $x_1$  代表充填料浆的胶砂比;  $x_2$  代表充填料浆的质量浓度, %。

[0112] (3) 建立胶结体膨胀率数学模型。对养护28d的胶结体试块进行体积膨胀率测试,建立28d胶结体膨胀率的数学模型:

$$[0113] \quad V_{28d} = f_3(x_1, x_2) \quad (3)$$

[0114] (4) 建立胶结体膨胀率数学模型。采用玻璃电极法对28d胶结体进行浸出液的pH测试,建立浸出液pH的数学模型:

$$[0115] \quad \text{pH}_{28d} = f_4(x_1, x_2) \quad (4)$$

[0116] (5) 高泥尾砂充填料浆流变试验。针对中关铁矿高泥尾砂,开展不同浓度和胶砂比的高泥尾砂料浆流变试验。料浆浓度为60%、63%、66%和69%,胶砂比为1:4、1:6和1:8。图7为采用R/S+SST流变仪测定的不同胶砂比充填料浆的剪切应力的变化曲线。表6为不同胶砂比和料浆浓度料浆流变参数试验结果。

[0117] 表6高泥尾砂充填料浆流变特性参数试验结果

|        | 胶砂比 | 料浆浓度/% | 屈服应力 $\tau_0$ /Pa | 黏度系数 $\eta$ /Pa·s | 相关系数 $R^2$ |
|--------|-----|--------|-------------------|-------------------|------------|
|        | 1:4 | 60     | 20.73             | 0.0757            | 0.938      |
|        |     | 63     | 25.82             | 0.1446            | 0.969      |
|        |     | 66     | 41.44             | 0.2077            | 0.951      |
|        |     | 69     | 105.4             | 0.2376            | 0.953      |
| [0118] | 1:6 | 60     | 14.91             | 0.0738            | 0.940      |
|        |     | 63     | 23.25             | 0.1383            | 0.977      |
|        |     | 66     | 40.54             | 0.1839            | 0.979      |
|        |     | 69     | 69.48             | 0.2329            | 0.974      |
|        | 1:8 | 60     | 14.78             | 0.0703            | 0.952      |
|        |     | 63     | 16.78             | 0.0757            | 0.945      |
|        |     | 66     | 36.33             | 0.1599            | 0.975      |
|        |     | 69     | 67.61             | 0.1941            | 0.972      |

[0119] (6) 高泥尾砂充填料浆流变试验。根据表6中的高泥尾砂充填料浆流变试验结果，采用回归分析建立料浆流变数学模型：

$$[0120] \quad R_L = f_5(x_1, x_2) = 4048 - 1557.7x_1 - 127.6x_2 + x_2x_2 + 25.9x_1x_2 \quad (4)$$

$$[0121] \quad R_N = f_6(x_1, x_2) = -0.782 + 0.011x_2 - 4.63x_1x_1 + 0.032x_1x_2 \quad (5)$$

[0122] (7) 建立高泥尾砂充填料浆优化设计模型如下：

$$[0123] \quad \text{Min}C_T = \text{Min}[c_1y_1 + c_2y_2 + c_3y_3]$$

$$[0124] \quad R_{7d} = f_1(x_1, x_2) \geq [R_{7d}], R_{28d} = f_2(x_1, x_2) \geq [R_{28d}];$$

$$[0125] \quad V_{28d} = f_3(x_1, x_2) \leq [V_{1im}], \text{pH}_{28d} = f_4(x_1, x_2) \leq [\text{pH}];$$

$$[0126] \quad R_L = f_5(x_1, x_2) \leq [\tau], R_N = f_6(x_1, x_2) \leq [\eta].$$

[0127] 其中， $C_T$ 代表高泥尾砂充填料浆成本，元/ $\text{m}^3$ ； $c_1$ 代表冶金渣基胶凝材料成本，元/t； $c_2$ 代表高泥尾砂成本，元/t； $c_3$ 代表水的成本，元/t； $y_1$ 代表冶金渣基胶凝材料用量， $\text{t}/\text{m}^3$ ； $y_2$ 代表高泥尾砂用量， $\text{t}/\text{m}^3$ ； $y_3$ 代表水用量， $\text{t}/\text{m}^3$ ； $[R_{7d}]$ 、 $[R_{28d}]$ 代表胶结体7d和28d设计强度； $[V_{1im}]$ 代表胶结体膨胀率设计值； $[\tau]$ 、 $[\eta]$ 代表充填料浆的屈服应力和黏度系数的设计值；

[0128] (8) 求解高泥尾砂充填料浆优化设计模型，由此获得料浆的胶砂比为1:6、充填料浆浓度为66%，其尾砂胶结体7d强度达到1.59MPa > 1.0MPa，28d强度达到3.01MPa > 2.50MPa；充填料浆粘度系数为0.1839 < 0.2Pa·s，屈服应力为40.54Pa < 60Pa，满足中关铁矿阶段嗣后充填采矿一步回采对充填体强度要求。根据表7中关铁矿材料成本，算出高泥尾砂充填料浆成本为13.72元/ $\text{m}^3$ 。

[0129] 表7中关铁矿各类充填胶凝材料成本

|        |          |         |       |      |      |
|--------|----------|---------|-------|------|------|
|        | 品类       | 42.5 水泥 | 邯钢精炼渣 | 矿渣微粉 | 脱硫石膏 |
| [0130] | 价格 (元/t) | 500     | 100   | 200  | 80   |

[0131] 以上所述是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明所述原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

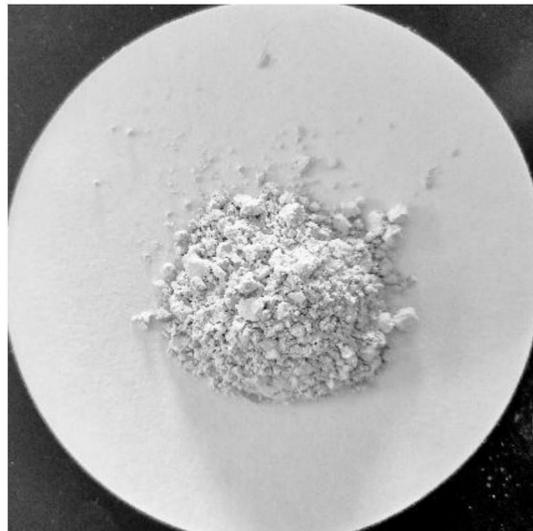


图1

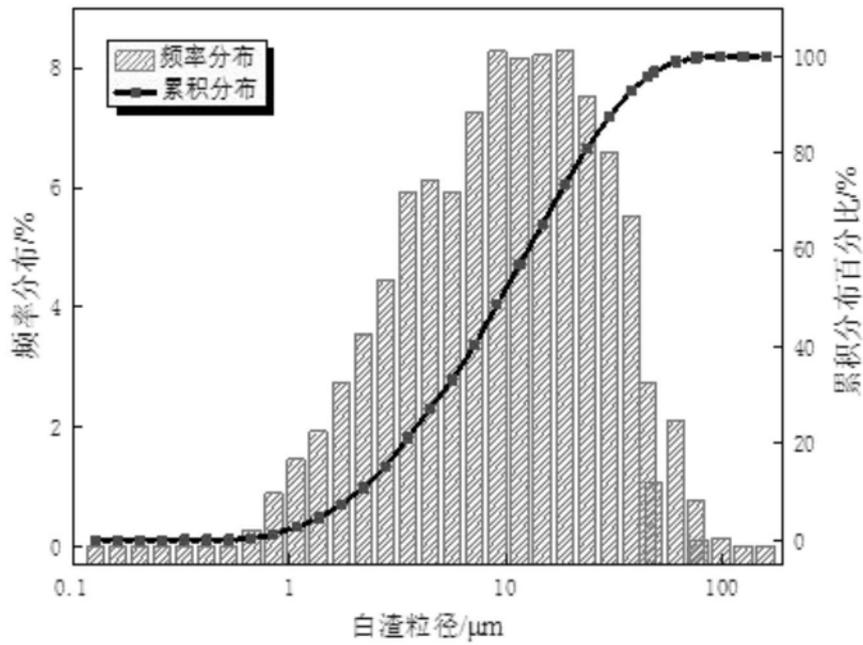


图2

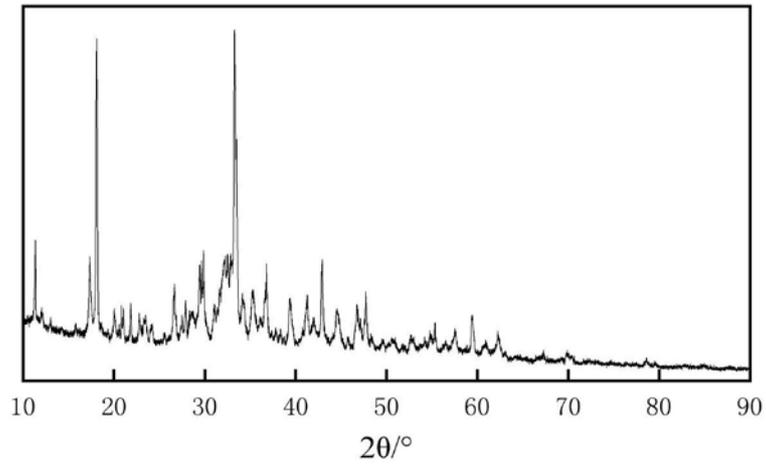


图3

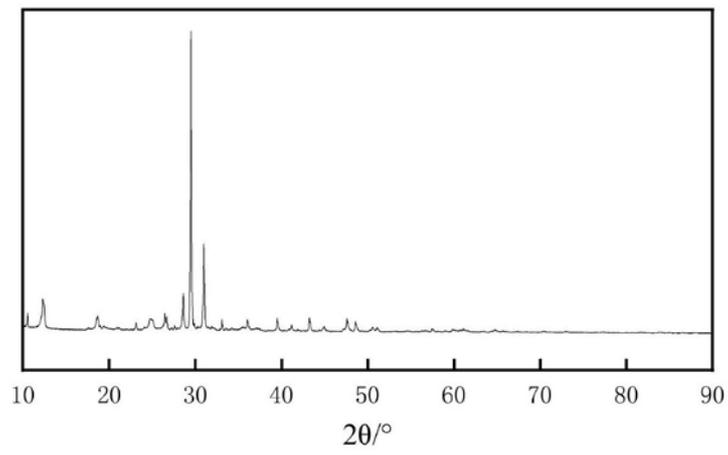


图4

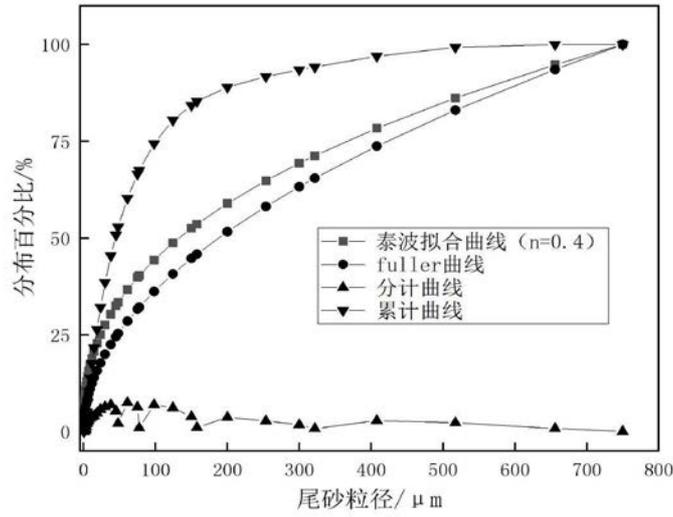


图5

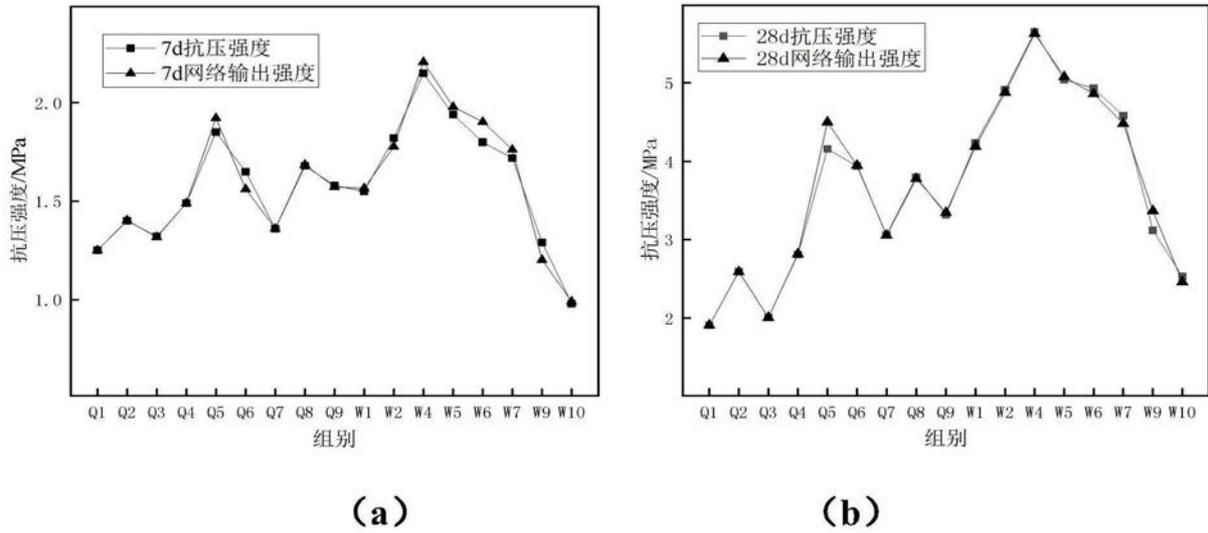


图6

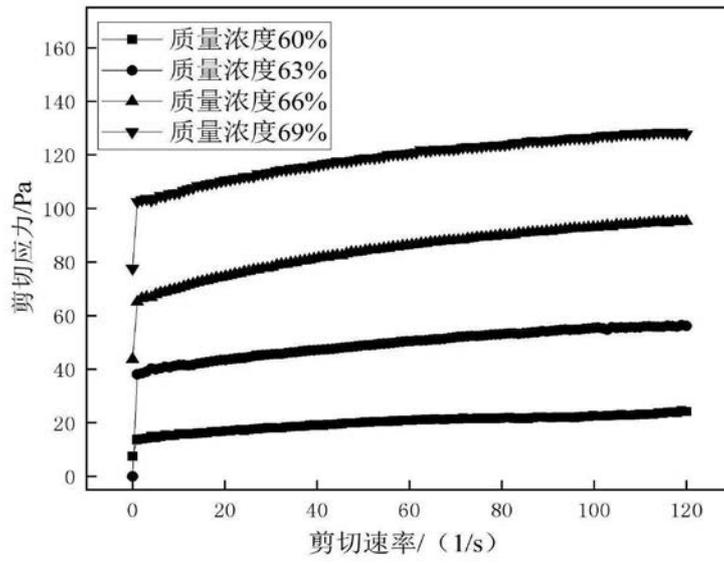


图7