用于制备单组分地聚物的铜尾矿热-碱活化研究*

贡嘎顿珠[1,2]

(1.西藏大学 工学院， 西藏 拉萨 850000；
2.高原建筑工业化自治区工程研究中心， 西藏 拉萨 850000)

摘要:尾矿的综合利用是当前矿山绿色发展的重点之一,而将尾矿制备为地聚物具有广阔的前景。由于尾矿活性较低,热-碱活化能够有效提升其反应活性,优化地聚物性能。采用X射线衍射技术(XRD)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)检测,分析了活化过程中物相和化学键的变化,探讨了活化机理。结果表明:热-碱活化的尾矿地聚物7 d强度最高达15.58MPa,相较于未活化时强度提升了10倍以上;随着碱掺量、煅烧温度、煅烧时长的增加,地聚物的抗压强度逐渐提高。热-碱活化过程中,尾矿中的白云母以基团取代而发生结构畸变,转化为无定形相,碱掺量和煅烧温度对活化效果影响显著。研究结果可为尾矿制备地聚物的筛选及活化提供理论参考。

关键词:地聚物;铜尾矿;热-碱活化;抗压强度;活化机理

中图分类号:TD926.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005-2763(2026)01-0299-08

Study on Thermal-Alkali Activation of Copper Tailings for the Preparation of Single-Component Geopolymers

GONGGA Dunzhu[1,2]

(1.School of Engineering, Xizang University, Lhasa, Xizang 850000, China;
2.Autonomous Region Engineering Research Center for Plateau Industrialized Construction, Lhasa, Xizang 850000, China)

Abstract: The comprehensive utilization of tailings is one of the key aspects of green development in the mining industry, and the preparation of geopolymers by tailings holds significant promise. Due to the low reactivity of tailings, thermal-alkali activation can effectively enhance their reactivity, thereby optimizing the performance of geopolymers. To characterize the changes in phase composition and chemical bonds during the activation process, exploring the activation mechanism, X-ray diffraction (XRD) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) were employed. The results indicate that the 7-day compressive strength of thermally-alkali-activated tailings geopolymers can reach up to 15.58 MPa, representing a more than tenfold increase compared to non-activated samples. The compressive strength of the geopolymers improves with the rise of alkali content, calcination temperature and calcination duration. During the thermal-alkali activation process, muscovite in the tailings undergoes structural distortion through group substitution and is converted into an amorphous phase. The alkali content and calcination temperature has a notable impact on the activation effect. The research findings can provide a theoretical foundation for the selection and activation of tailings in geopolymer preparation.

Key words: Geopolymer, Copper tailings, Thermal-alkali activation, Compressive strength, Activation mechanism

0 引言

矿产资源是人类生存和发展的重要物质基础之一,全球每年开采大量铁、铜、锰、铅、锌等重要金属矿产及其他矿产资源,在全球范围内形成了总产值超万亿美元的大型行业[1]。矿石的开发利用会产出大量的尾矿,以我国为例,2023年中国尾矿总产量约14.24亿t,其中铜尾矿约4亿t,仅次于铁尾矿[2]。大量堆存的尾矿不仅占用土地资源、破坏地貌植被,尾矿中的重金属离子和选矿药剂还会污染周围土壤及水体[3]。此外,尾矿库如遭遇泥石流、地震等灾害,极易引发尾矿库的溃坝事故[4],如2010年月9月紫金矿业锡矿尾矿库发生溃坝事故导致22人死亡;2019年巴西尾矿库溃坝事故造成270人死亡或失踪。

近年来,不断有学者研究尾矿资源化利用方式,

* **收稿日期**:2025-02-24
基金项目:西藏大学"青苗计划"培育项目(ZDQHJH23-06)
作者简介:贡嘎顿珠(1994—),男,西藏拉萨人,硕士研究生,助教,主要研究方向为固体废弃物资源化利用。E-mail:Kunga12@163.com

如聂庆民等[5]研究了铜尾矿中有价组分的二次提取,但该方法只能提高经济效益,无法大幅消纳堆存尾矿;陈贤树等[6]研究将尾矿拌合硅酸盐水泥后回填采空区,但此类方法不适用于矿产含硫的矿区,硫化矿物形成的酸性矿井水可能会破坏水泥-尾矿胶结物结构而溶出重金属离子等有害物质,污染周围土壤及水体[7];李杨[8]研究将尾矿作为建筑用砂掺入混凝土,但由于尾矿性质受成矿原理、选矿工艺等影响,性质差异较大,且选矿所用药剂、含硫矿物等可能降低混凝土品质,因此将尾矿作为填充物掺入混凝土存在一定限制。

地聚物是一种由硅氧四面体[SiO_4]和铝氧四面体[AlO_4]通过共用氧原子缩聚而成的硅铝酸盐聚合物,由硅铝原料在碱溶液作用下溶出硅铝单体,再反应聚合生成具有三维网络结构的硬化体[9],由于尾矿富含硅铝元素,也具有制成地聚物的潜力。地聚物耐酸、碱腐蚀能力较强,且其三维空间结构能够有效固化重金属离子,可以防止其中的重金属离子滤出形成污染[10],有利于进一步加大尾矿资源化综合利用。

由于尾矿活性较低,目前采用尾矿制备地聚物的途径,主要有两种[10]:一是直接将尾矿与偏高岭土、高炉矿渣等活性材料拌合后加入碱激发剂,由活性原料反应生成地聚物胶凝体,尾矿仅作为填充物拌入其中;二是对尾矿进行机械、加热等活化处理,使尾矿能够发生地质聚合反应,生成地聚物。两种途径中,前者为多组分地聚物,其中尾矿掺入量与地聚物性能呈反比,无法大量消纳尾矿;而后者由于机械活化效果普遍较差,主要采用加热活化方式。居辰轩等[11]采用铅锌尾矿制备地聚物,将尾矿加热至800 ℃后,所制备的地聚物其28 d抗压强度达到20.68 MPa,但能耗较高且活化效果一般。

热-碱复合作用能够高效破坏尾矿中Si、O、Al化学键,从而提升尾矿的地质聚合反应活性。本研究探究热-碱活化的各项参数对活化效果的影响,采用抗压强度表征活化效果,通过X射线衍射分析(X-Ray Diffraction,XRD)、傅里叶变换红外光谱分析(Fourier Transform Infrared,FTIR)等方法检测其微观性质,探讨尾矿热-碱活化机理。

1 试验

1.1 原料

本研究所用尾矿采自西藏甲玛铜矿,主要化学成分见表1。热-碱活化采用氢氧化钠(NaOH)作为碱熔剂,碱激发剂采用模数为1的偏硅酸钠($Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$)。

表1 尾矿主要化学成分的质量含量

Table 1 Mass content of major chemical compositions in the tailings %

SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
45.67	29.40	12.15	5.25	2.33

1.2 热-碱活化

采用碱砂比(碱熔剂与尾砂之质量比,A/M)、加热温度和加热时长3个指标设计活化试验,见表2。

表2 热-碱活化试验设计

Table 2 Design of thermal-alkali activation tests

试验组	A/M/%	温度/℃	时长/h
A0	0	500	2
A2	2	500	2
A4	4	500	2
A10	10	500	2
A20	20	500	2
A100	100	500	2
T0	10	0	—
T1	10	100	2
T3	10	300	2
T5	10	500	2
T7	10	700	2
D0.5	10	300	0.5
D1	10	300	1
D2	10	300	2
D3	10	300	3
D4	10	300	4

煅烧活化时,将按试验设计的A/M混合均匀的原料装入石墨坩埚后置于马弗炉内加热,加热速率为10 ℃/min,当炉内温度达到预定温度后开始计时,达到预定时长后快速将尾矿混合物从炉膛内取出倒入搪瓷盆铺平,使其在空气中冷却。将活化完成后的尾矿研磨均匀,然后按试验设计配合比制备成地聚物,并根据地聚物抗压强度表征活化效果。

1.3 制备地聚物

分别取420 g按照1.2节所述方法处理后的尾矿、110 g偏硅酸钠以及100 g水,按照下述步骤制备成地聚物。

(1) 制备硅酸钠溶液。将偏硅酸钠与水装入烧杯内使用磁力搅拌器搅拌,搅拌至固体颗粒完全溶解且溶液清澈。

(2) 制备地聚物浆体。将尾矿和硅酸钠溶液倒

入水泥净浆搅拌机的搅拌锅内,启动搅拌机搅拌 4 min,其中慢搅 2 min,停歇 15 s,再快搅 2 min。

(3) 装模与养护。将制备好的地聚物浆体倒入 4 cm×4 cm×4 cm 的三联方形模具内,不覆膜,在室温环境下养护 3 d,然后脱模并继续在室温环境养护至 7 d。

1.4 分析和测试

(1) 抗压强度测试。将 7 d 龄期的试样置于万能压力机中,测试其无侧限抗压强度(Unconfined Compression Strength, UCS),加载速率为 1 mm/min。

(2) X 射线衍射测试。取原料尾矿置于铜靶上,使用 Empyrean X 射线衍射仪测试得到 XRD 图谱,扫描范围 5°～85°,步长 0.02°,时间 0.01 s。

(3) 傅里叶变换红外光谱仪测试。取原料尾矿与溴化钾粉末以 100∶1 的质量比混合压制成片,用 Nicolet is54 傅里叶变换红外光谱仪测试得到 FTIR 图谱,波数范围 400～4 000 cm^{-1}。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度分析

图 1 为各试样的 7 d 抗压强度测试结果。其中碱砂比为 100%试样在煅烧活化后整体硬化成块,无法从坩埚中取出,未进行抗压强度测试。由图 1 可见,养护 7 d 后碱熔尾矿地聚物强度最高可达 15.58 MPa,为 T7 试样,最低强度为 2.55 MPa,为 T1 试样;未煅烧仅加碱的 T0 试样的强度为 1.40 MPa,未加碱仅煅烧的 A0 试样的强度为 1.37 MPa。

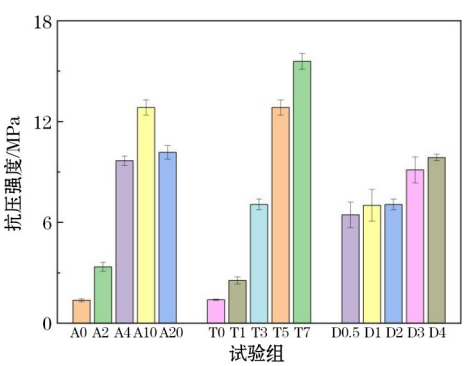


图 1 各试样养护 7 d 后的无侧限抗压强度

Fig.1 UCS of each sample after cured 7 days

2.1.1 碱掺量的影响

随着碱熔剂掺量提高,试样的抗压强度逐渐上升,在碱砂比 $A/M=10\%$ 时,达到最高强度 12.83 MPa,强度增幅达 936%,当 A/M 继续提高为 20% 时,强度下降至 10.16 MPa。试样抗压强度随 A/M 上升的原因为:尾矿中虽然 Si、Al 含量较多,但绝大部分以矿物晶体形式存在,如石英、云母等,因晶体结构稳定,化学活性低,一般情况下并不发生反应[10],本研究尾矿在 500 ℃煅烧 2 h 的 A0 试样其强度仅 1.37 MPa,与 T0 试样强度相近。而在热-碱的复合作用下,碱熔剂能够有效破坏晶体结构,提高尾矿中 Si、Al 元素的活性[7],使其能够与碱激发剂反应生成地聚物胶体;碱掺量越多,被破坏的晶体结构随之增多,活性 Si、Al 越多,继而地聚物胶体生成越多,使试样抗压强度上升。

A20 试样的强度相较 A10 降低则可能是由于制样配比导致的。为通过抗压强度体现活化效果,本研究采用统一配合比制备试样,以排除其他因素影响,在碱激发剂充足时,抗压强度与活化效果有较好相关性。A20 尾矿样活化后生成了更多的活性 Si、Al,但配比中的碱激发剂不足以使活性 Si、Al 全部发生反应。图 2 为不同碱砂比试样的照片,除 A20 外,其余试样表面均有白色物质生成,这是地聚物制备过程中较为常见的泛霜现象,该现象一般是因为碱激发剂过多所导致的[12]。当地质聚合反应完成后,过多的碱金属离子会随着水分的蒸发渗透至试样表面,形成白色霜状物质。

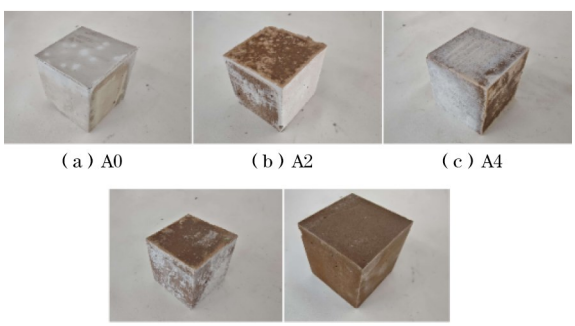


图 2 不同 A/M 试样照片

Fig.2 Photos of samples with different A/M

A20 试样表面无任何泛霜现象,说明 A20 试样中活性 Si、Al 过多而碱激发剂过少,这一方面使得 A20 试样生成的地聚物胶凝体仅略多于 A10 试样,另一方面 A20 试样中存在较多未反应的活性 Si、Al,此类物质虽然化学活性高于矿物晶体,但由于原子结构不稳定,力学性质劣于矿物晶体,作为填充物或被胶结物时,可能会成为薄弱点,在受压时较快发育裂缝,从而使试样快速破坏,降低了试样抗压强度。而 A100 试样在煅烧活化时硬化成块,其原因

可能是由于 NaOH 过多,NaOH 在当前温度下完成所有可活化晶体的破坏后,剩余 NaOH 直接作为碱激发剂与活性 Si、Al 反应生成地聚物,且在高温环境下反应速率较快,煅烧出炉时便已硬化成块。

2.1.2 煅烧温度的影响

掺入 10%氢氧化钠、未煅烧的 T0 试样其强度仅 1.40 MPa,随着煅烧温度上升,相同氢氧化钠掺量的试样其抗压强度逐渐上升,在煅烧温度为 700 ℃时,达到最高强度 15.58 MPa,强度增幅达 1 113%。当温度提高时,晶体吸收热量,因而降低了破坏其结构所需的能量,在同样的碱掺量下活化效果更高,但温度过高时,部分物质可能会重新结晶,反而降低活化效果[10]。

2.1.3 煅烧时长的影响

随着煅烧时长增长,地聚物强度逐渐上升,但上升幅度不高,煅烧时长从 0.5 h 增至 4 h 时,强度从 6.45 MPa 上升至 9.86 MPa,强度增幅仅 53%。其原因可能是尾矿的主要成分均为矿物晶体,晶体由于成分相同、结构规则,相同晶体的反应条件相对一致,不同晶体的反应条件叠加后使得尾矿的反应曲线呈阶梯状,在给定的热-碱条件下,能够被活化的晶体数量相差不大,而最低 0.5 h 的时长则足够发生反应,因此不同煅烧时长下试样强度整体变化不大。但由于矿物晶体不是理想晶体,其中会存在一定的畸变,因此导致部分原本需要更高反应温度条件的晶体也可以在当前热-碱条件下发生反应,但是反应速率较低,在较长时间内会缓慢发生反应,生成活性 Si、Al,使试样强度缓慢上升。

2.2 X 射线衍射图谱分析

图 3、图 5、图 7 分别为在不同条件下活化后尾矿的 XRD 图谱,图 4、图 6、图 8 则分别为根据以上 XRD 图谱结合衍射原理和 K 值法所求得的各物相相对含量。从图 5、图 6 中可以看出,未经煅烧的尾矿(T0)其 XRD 图谱无宽扁的衍射峰,说明原尾矿中无定型相的含量较少,主要为结晶相矿物。结合化学成分检测结果进行定性分析,发现尾矿中主要含硅钙石、石英、方解石、白云母和钙铁榴石等矿物,甲玛矿床是西藏冈底斯成矿带东段的超大型斑岩-矽卡岩铜多金属成矿系统,硅灰石、钙铁榴石为矽卡岩特征矿物,石英、方解石则为地壳常见矿物[12],分析结果与矿床特征基本一致。

2.2.1 碱掺量的影响

图 3 中随着 A/M 增大,所有晶体衍射峰强度逐渐降低,说明晶体结构发生破坏,晶体含量减少,同时在 6°～20°范围内出现了宽峰衍射,且衍射峰面积不断增大,说明发生结构破坏的晶体形成了无定形相。当 A/M 达到 100%时,宽峰衍射的范围扩大到 6°～30°,根据衍射原理,衍射角 2θ 越大,晶面间距越小,说明此时非晶相的结构更致密,可能是发生了地质聚合反应,非晶相内的活性 Si、Al 通过脱水聚合的方式形成了结构更致密的地聚物,与前述 A100 尾矿在煅烧后硬化成块的现象相符。

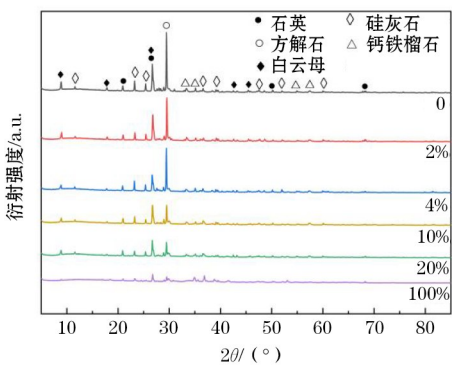


图 3 不同 A/M 尾矿样的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of tailings samples with different A/M

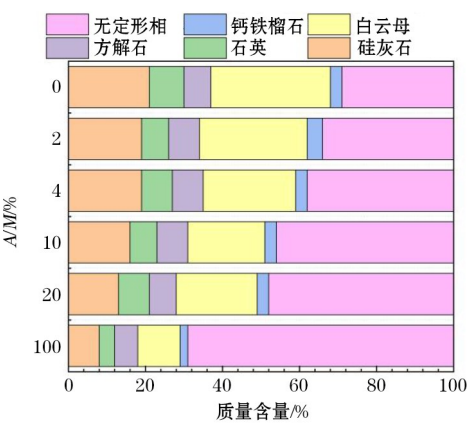


图 4 不同 A/M 尾矿样的物相含量

Fig.4 Phase content of tailings samples with different A/M

由图 4 可见,在 A/M 较低时硅灰石、石英、方解石和钙铁榴石的含量基本不变,无定形相主要由白云母转变形成[7]。在 A/M 较高时,有部分硅灰石、石英转变成无定形相。在 $A/M \leqslant 20\%$ 时,无定形相含量相差不大,而所制备地聚物强度相差较大,可能是由于非晶相物质的结构畸变程度不同所导致的[13],碱熔剂增多时,由于非晶相活性更高,碱熔剂对非晶相结构的破坏作用优于对晶体相结构的破坏作用,使非晶相物质出现更多结构畸变,在制备地聚物时,相同碱激发剂作用下,结构畸变更大的非晶体

能够溶出的更多活性 Si、Al,进而导致地聚物强度更高。

2.2.2 煅烧温度的影响

在图 5 中,随着煅烧温度的升高,晶体衍射峰强度变化较小,XRD 图谱中出现宽峰衍射,衍射范围不随煅烧温度变化。由图 6 可见,白云母含量随着温度升高逐渐减少,其他物相含量则变化较小,非晶相含量逐步增多,但相差不大,而由此制备的地聚物强度相差较大,这可能同样是由于非晶相结构的畸变程度不同所导致的[13],由于非晶相分子结构稳定性较差,在高温作用下容易发生破坏,形成结构畸变,使其活性进一步提高,但温度过高时可能使分子结构完全破坏,并重新排列结晶,形成新的晶体。

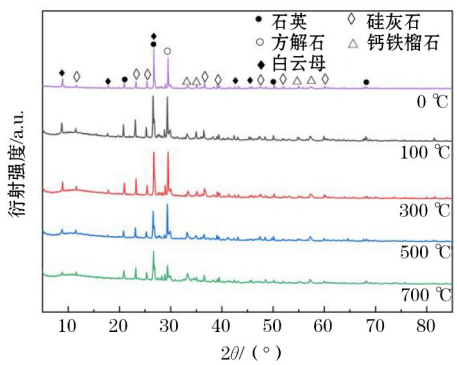


图 5 不同煅烧温度下的尾矿样 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of tailings samples calcined at different temperatures

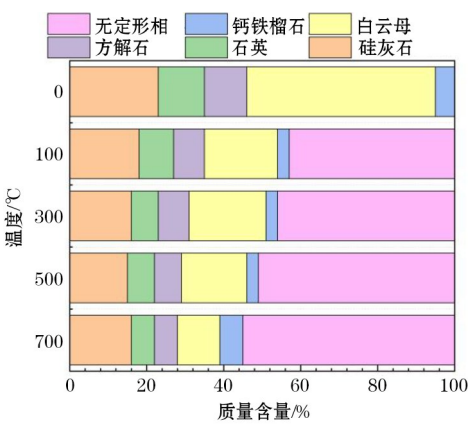


图 6 不同煅烧温度下的尾矿样物相含量

Fig.6 Phase content of tailings samples calcined at different temperatures

2.2.3 煅烧时长的影响

由图 8 可见,随着煅烧时长的增加,各矿物晶体含量略有减少,非晶相含量相应增加,对应地聚物试样的强度小幅增长,非晶相含量与地聚物强度相关性较好,说明相同碱掺量、相同煅烧温度下所产生的非晶相结构相似,煅烧时长并不改变非晶相结构,只是改变其生成量。

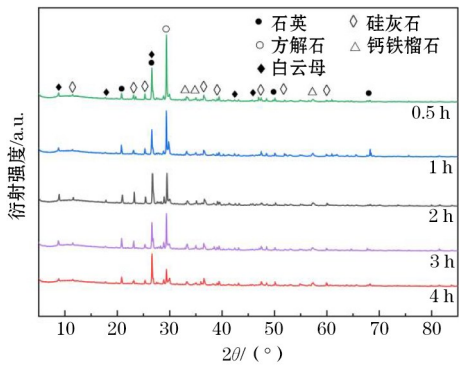


图 7 不同煅烧时长尾矿样的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of tailings samples calcined for different durations

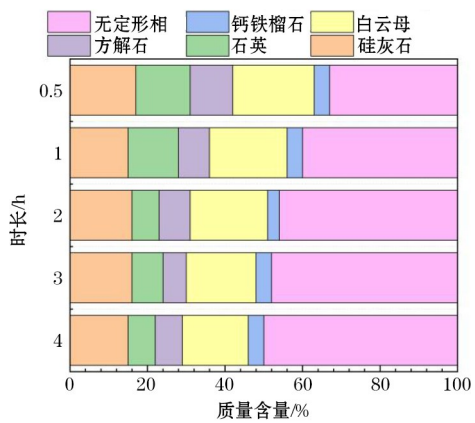


图 8 不同煅烧时长度尾矿样的物相含量

Fig.8 Phase content of tailings samples calcined for different durations

2.3 傅里叶变换红外光谱分析

为分析活化情况,对所有尾矿进行了 FTIR 测试,结果如图 9 至图 11 所示。图中 1 425 cm^{-1}处的吸收峰为 CO_3^{2-} 的反对称伸缩振动导致;Si—O—Si 和 Si—O—Al 的反对称伸缩振动吸收峰位于 1 100～900 cm^{-1}的范围,硅铝酸盐网络结构不同,则吸收峰位于不同的位置,1 010 cm^{-1}与 900 cm^{-1}是由此所致;875 cm^{-1}处的吸收峰为 CO_3^{2-} 面外弯曲振动所导致的;800 cm^{-1}处的吸收峰为 Si—O—Si 对称伸缩振动所导致的;712 cm^{-1}吸收峰为 CO_3^{2-} 面内弯曲振动所导致的,为方解石特征吸收峰;645 cm^{-1}处的吸收峰为 Si—O—Si 对称振动所导致的;515 cm^{-1}处的吸收峰为 Si—O—Al 弯曲振动所导致的;450

cm^{-1}处的附近吸收峰为 Si—O—Si 和 O—Si—O 弯曲振动所导致的[14]。

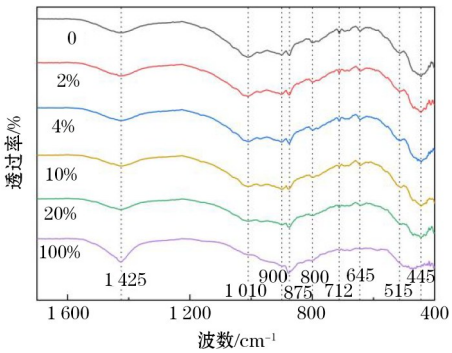


图 9 不同 A/M 尾矿样的 FTIR 图谱

Fig.9 FTIR patterns of tailings samples with different A/M

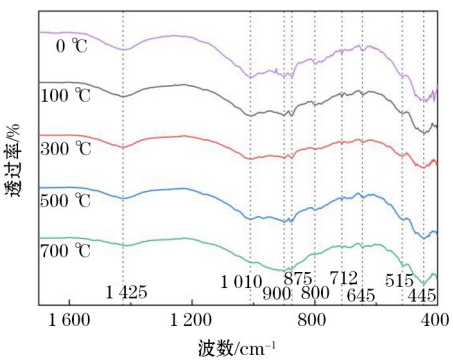


图 10 不同煅烧温度下的尾矿样 FTIR 图谱

Fig.10 FTIR patterns of tailings samples calcined at different temperatures

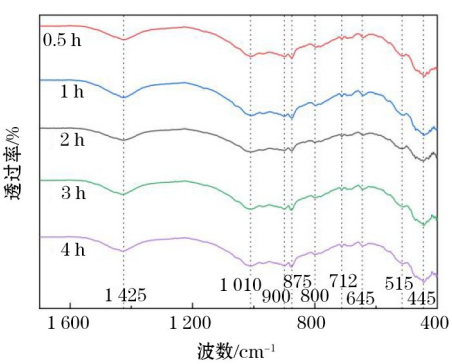


图 11 不同煅烧时长尾矿样的 FTIR 图谱

Fig.11 FTIR patterns of tailings samples calcined for different durations

随着 A/M 增大，在 $A/M=100\%$时，CO_3^{2-} 在 1 425 cm^{-1}和 875 cm^{-1}处的吸收率突然增强，而在煅烧温度增大时吸收率则逐渐减小，可能是由于碳酸根来源不同所导致的，在高 A/M 尾矿样中碳酸根来源于方解石和碳酸钠，而不同煅烧温度的尾矿中的碳酸根仅来源于方解石，随着 A/M 和煅烧温度增大，方解石逐渐减少，其 1 425 cm^{-1}、875 cm^{-1}及 712 cm^{-1}的吸收峰强度降低，但同时高 A/M 尾矿中，NaOH 与含硅矿物生成 Na_2SiO_3 以及 NaOH 本身与空气中的 CO_2 反应生成 Na_2CO_3，使除方解石特征峰 712 cm^{-1}外的其他 CO_3^{2-} 吸收峰增强，在 A100 图谱中强度骤增且峰型锐化。

1 010 cm^{-1}吸收峰的 Si—O—Si、Si—O—Al 来源于白云母[15]，随着 A/M 和煅烧温度增大，该峰强度逐渐降低，说明此时白云母含量逐渐减少，而该峰向低波数(900 cm^{-1})方向移动是由于 Al 基团替代了硅酸盐网络内的 Si 基团，替代程度越高，该峰越偏向低波数[16]，由此导致白云母内硅铝酸盐结构向无序结构演变，因而转变为无定形 Si、Al[17]，该峰随煅烧时长的变化较小，说明煅烧时间对 Si、Al 活化效果影响较低，与抗压强度及 XRD 分析结果相符。

白云母能够发生物相转变、溶出活性 Si、Al 的原因可能在于其层状结构，由于层状硅酸盐矿物的层间化学键较弱，且具有较强的离子交换能力，其化学活性相较其他硅酸盐矿物较高。有研究报道，同为层状硅酸盐矿物的高岭土在高温煅烧形成偏高岭土后可制备高性能地聚物[18]，因此层状硅酸盐矿物(云母、黏土矿物等)含量可能是影响尾矿用于制备地聚物的重要因素。

800 cm^{-1}和 780 cm^{-1}吸收峰为石英中 Si—O—Si 对称伸缩振动频率发生分裂而形成的，445 cm^{-1}吸收峰为石英中 Si—O—Si 对称变角振动所导致的，随着 A/M、煅烧温度和煅烧时间的增长，780 cm^{-1}和 445 cm^{-1}吸收峰强度小幅降低，说明少量石英转变为无定形 SiO_2[19]，在 A100 试样中，445 cm^{-1}吸收峰偏移至 475 cm^{-1}则可能是由于发生地质聚合反应形成网络状硅铝酸盐结构，使其中的 Si—O—Si 的振动频率向高波数方向偏移。645 cm^{-1}吸收峰的 Si—O—Si 来源于钙铁榴石，其吸收率较低且随着 A/M、煅烧温度、煅烧时间的变化较小。515 cm^{-1}吸收峰的 Si—O—Al 来源于白云母[13]，吸收率随着其分解转化而降低。

3 结论及建议

本研究通过热-碱活化方法显著提升了铜尾矿的地质聚合反应活性，成功制备了高性能的单组分

地聚物。研究得出如下两个主要结论。

(1) 热-碱活化相较于单独的热活化效果更为显著,样品的 7 d 抗压强度最高可达 15.58 MPa,较未活化样品提升了 10 倍以上。碱掺量、煅烧温度和煅烧时长对活化效果均有正向影响,其中碱掺量和煅烧温度的影响尤为突出,但碱掺量过高会导致尾矿在活化时直接发生地质聚合反应而无法利用。

(2) 通过 XRD 和 FTIR 分析,揭示了热-碱活化过程中尾矿物相和化学键的变化规律,特别是白云母通过基团取代发生结构畸变,转化为无定形相,从而显著提升了尾矿的活性。无定形相含量与试样强度正相关,但不呈线性关系。除无定形相含量,其结构同样影响活性 Si、Al 溶出量,进而对试样强度影响较大。

本研究为尾矿资源化利用提供了理论依据。尾矿 300～700 ℃的活化温度相较代替传统硅酸盐水泥 1 400 ℃的"两磨一烧"工艺能源消耗更低,且活化过程以 Si、O、Al 化学键变化为主,碳酸盐矿物基本不参与反应,相较水泥制备过程 CO_2 释出量极少,在节能减排方面具有较强优势。所制备地聚物不仅具有优异的力学性能,还具备较强的耐酸、碱腐蚀能力,能够有效固化尾矿中的重金属离子,防止其滤出造成环境污染。因此,热-碱活化尾矿可部分代替水泥,作为采空区回填、道路路面基层、建筑砖材等强度要求较低领域的胶凝材料。

本研究仍存在一定局限性:一是碱熔剂 NaOH 成本较高,其单价约 2 500 元/t,掺量 10%即提高成本 250 元/t,考虑能源、设备等费用,预计其单价不小于水泥;二是用活化后的尾矿制备地聚物需要使用碱性激发剂,在大规模生产时,碱溶液腐蚀性对设备及操作人员存在安全隐患;三是尾矿作为工业废弃物,其性质复杂多变,不同矿区、不同选矿工艺所产出的尾矿差异较大,因此活化尾矿的标准化生产方法及其地聚物性能的测定是影响活化尾矿大规模生产、利用的重要限制因素。

未来的研究一是可以探索 Na_2SiO_3、Na_2CO_3 等替代 NaOH 作为碱熔剂的可行性,以此降低产品成本;二是研究制备免碱地聚物前驱体,实现产品加水即可制成地聚物;三是研究测试尾矿地聚物抗压、抗折强度,水、温稳定性等工程性能及其耐久性,分析不同尾矿性质对上述性能的影响,为大规模利用尾矿提供理论基础。

参考文献(References):

[1] ADEYEMI Adesina. Synthesis, characterization, and efficacy of alkali-activated materials from mine tailings: a review[J]. Waste Management, 2025, 191:23-46.

[2] 费玲云,邹伟民,周美彦,等.尾矿资源化利用现状及生态化利用研究进展[J/OL].能源环境保护:1-13[2025-02-24]. https://doi.org/10.20078/j.eep.20250204.
FEI Lingyun, ZOU Weimin, ZHOU Meiyan, et al. Current status of tailings resource utilization and research progress in ecological utilization [J/OL]. Energy Environmental Protection:1-13[2025-02-24]. https://doi.org/10.20078/j.eep.20250204.

[3] 马晓红,冯晓倩,邵转玲,等.某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属累积特征及特定源风险评估[J/OL].环境化学:1-13[2025-02-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20250217.1305.004.html.
MA Xiaohong, FENG Xiaoqian, SHAO Zhuanling, et al. Soil heavy metal accumulation characteristics and specific source risk assessment of farmland around a lead-zinc tailings pond[J]. Environmental Chemistry:1-13[2025-02-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20250217.1305.004.html.

[4] 王昆,张峥,HUDSON-EDWARDS K A, 等. 尾矿的特性、灾害及其资源潜力[J]. 金属矿山, 2024(8):216-227.
WANG Kun, ZHANG Zheng, A.HUDSON-EDWARDS K, et al. Properties, disasters, and resource potential of mine waste tailings[J]. Metal Mine,2024(8):216-227.

[5] 聂庆民,李立园,邬海滨,等.从某铜尾矿中回收铜的试验研究[J].矿冶工程,2017,37(1):42-45.
NIE Qingmin, LI Liyuan, WU Haibin, et al. Recovery of copper resource from Cu-flotation tailings with technique of predesliming and flotation [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2017,37(1):42-45.

[6] 陈贤树,李桦,陈原望,等.固废基胶凝材料在黄金尾矿胶结充填中的研究与应用[J].新型建筑材料,2024,51(6):105-109.
CHEN Xianshu, LI Hua, CHEN Yuanwang, et al. Research and application of solid waste based cementitious materials in gold tailings cemented filling[J]. New Building Materials,2024,51(6):105-109.

[7] JENNI Kiventerä, PRIYADHARSHINI Perumal, JUHO Yliniemi, et al. Mine tailings as a raw material in alkali activation: a review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2020,27(8):1009-1020.

[8] 李杨.铁尾矿机制砂对混凝土性能影响的研究[D].长春:吉林建筑大学,2015.
LI Yang. Research on the effects of the mechanism of iron tailings sand perfomance to concrete[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University,2015.

[9] JOSEPH Davidovits. Geopolymer:chemistry & applications [M]. 5th ed. Saint-Quentin:Institut Géopolymère,2020.

[10] ZHANG Xiaolong, ZHANG Shiyu, LIU Hui, et al. Disposal of mine tailings via geopolymerization[J]. Journal of Cleaner Production,2021,284:124756.

[11] 居辰轩,王豪杰,侯浩波,等.热活化铅锌尾矿基碱激发胶凝材料的制备及性能[J].硅酸盐通报,2022,41(6):2071-2081.
JU Chenxuan, WANG Haojie, HOU Haobo, et al. Preparation and properties of alkali activated cementitious materials based on thermally activated lead-zinc tailings[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(6): 2071-2081.

[12] 冷秋锋,唐菊兴,郑文宝,等.西藏甲玛超大型矿床矽卡岩矿物组合及其分带模式[J].地质学报,2022,96(2):574-591.
LENG Qiufeng, TANG Juxing, ZHENG Wenbao, et al. Skarn mineral assemblage and zonation pattern in the Jiama superlarge deposit, Xizang[J]. Acta Geologica Sinica,2022, 96(2):574-591.

[13] 叶楠.拜耳法赤泥活化预处理制备地聚物及形成强度机理研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
YE Nan. Study on the preparations of geopolymer from pretreated bay red mud and mechanism of the strength formation[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2016.

[14] VIDAL L, JOUSSEIN E, COLAS M, et al. Controlling the reactivity of silicate solutions:a FTIR, Raman and NMR study[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2016,503:101-109.

[15] SSOUNI S, MIYAH Y, BENJELLOUN M, et al. High-performance of muscovite clay for toxic dyes' removal: adsorption mechanism, response surface approach, regeneration, and phytotoxicity assessment[J]. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2023, 8:100456.

[16] 崔潮,郃文玉,孙小惠,等.碱-矿渣-偏高岭土基地聚物干燥收缩研究[J].新型建筑材料,2024,51(6):94-100.
CUI Chao, TAI Wenyu, SUN Xiaohui, et al. Study on the drying shrinkage of alkali-slag-metakaolin based geopolymer [J]. New Building Materials,2024,51(6):94-100.

[17] ABDURABOH Alraae, ALI Moussadik, ABDELLAH Benzaouak, et al. Eco-friendly synthesis and catalytic activity of Cu nanoparticles deposited on expanded muscovite to reduce organic pollutants[J]. Results in Surfaces and Interfaces,2024,17:100343.

[18] 段立伟,罗安邦,陈英豪,等.偏高岭土-磷酸基地聚物的力学性能及微观结构分析[J].硅酸盐通报,2024,43(10):3694-3703.
DUAN Liwei, LUO Anbang, CHEN Yinghao, et al. Mechanical properties and microstructure analysis of metakaolin-phosphoric acid based geopolymer[J]. Bulletin of Chinese Ceramic Society,2024,43(10):3694-3703.

[19] 翁诗甫,徐怡庄.傅里叶变换红外光谱分析[M].第3版.北京:化学工业出版社,2016.
WENG Shifu, XU Yizhuang. Fourier transform infrared spectroscopy analysis [M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press,2016.