铅锌矿废石替代白云石用于铁矿烧结的工艺研究

杨聪聪[1]，夏光辉[1]，郭正启[1]，李小元[2]，刘 兵[2]，何晋勇[2]，阮志勇[3]，王子宏[3]
(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；2. 广西中金岭南矿业有限责任公司，
广西 来宾 545900；3. 广西柳州钢铁股份有限公司，广西 柳州 545001)

摘要： 为解决低成本、规模化消纳铅锌矿废石问题，本文针对广西某高钙镁型铅锌矿废石，基于烧结杯试验开展了铅锌矿废石替代普通白云石用于铁矿烧结的工艺研究，分析了配加铅锌矿废石对烧结矿产、质量与 SO_2、NO_x 气体污染物排放的影响。结果表明：试验用高钙镁型铅锌矿废石的主要物相为白云石，同时含有少量微细粒石英、黄铁矿和闪锌矿，其化学成分接近于烧结用普通白云石；当铅锌矿废石对普通白云石的取代占比不高于40%时，对烧结过程和烧结矿质量没有明显不利影响，且铅锌矿废石带入的Zn、S等有害元素均得到有效脱除。研究结果将为实现高钙镁型铅锌矿废石的规模化消纳和低成本高效利用提供新思路。

关键词： 铅锌矿；废石；白云石；铁矿；烧结；污染物
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)03－0063－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.041

Research on substitution of the waste rock in lead-zinc mines for dolomite in iron ore sintering process

YANG Congcong[1], XIA Guanghui[1], GUO Zhengqi[1], LI Xiaoyuan[2], LIU Bing[2],
HE Jinyong[2], RUAN Zhiyong[3], WANG Zihong[3]
(1. School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
2. Guangxi Zhongjin Lingnan Mining Industry Co., Ltd., Laibin 545900, Guangxi, China;
3. Guangxi Liuzhou Iron & Steel Co., Ltd., Liuzhou 545001, Guangxi, China)

Abstract: In order to solve such problems as low-cost and large-scale consumption of the waste rock in lead-zinc mines, based on the sinter pot test, research on substitution of the waste rock in lead-zinc mines for dolomite in the iron ore sintering process is carried out, focusing on the waste rock in a high calcium-magnesium type lead-zinc mine in Guangxi, and the effects of the waste rock in lead-zinc mines on sinter production and quality and SO_2 and NO_x gaseous pollutant emission are analyzed. The results show that the main phase of the waste rock in high calcium-magnesium type lead-zinc mine used in the experiment is dolomite, which contains a small amount of fine-grained quartz, pyrite and sphalerite, and the chemical composition of the rock is close to that of ordinary dolomite for sintering. When the proportion of the waste rock replacing ordinary dolomite is not higher than 40%, there is no obvious adverse effect on the sintering process and sinter quality, and such harmful elements as Zn and S brought in by the waste rock in lead-zinc mine are effectively removed. The results will provide new ideas for the large-scale consumption and low-cost and efficient utilization of the waste rock in high calcium-magnesium type lead-zinc mines.

Key words: lead-zinc mine; waste rock; dolomite; iron ore; sintering; pollutant

收稿日期： 2022－03－18；**修回日期：** 2022－04－09
基金项目： 湖南省重点研发计划项目(2022SK2075)
作者简介： 杨聪聪(1989—)，男，博士，副教授，从事烧结球团、低碳与氢冶金、固废资源化等基础理论与工艺研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

铅锌矿是我国重要的有色金属资源，储量巨大，并且具有贫矿多而富矿少、多金属共生、共伴生组分多的特点[1]。为了减少尾砂产率、缓解尾矿库库容压力，同时提高入选矿石品位、改善选别指标和降低选矿成本，采用重介质分选、XRT智能拣选等技术预先抛掉粗颗粒废石已成为低品位铅锌矿选矿的首选，并被广泛的应用于国内铅锌矿选厂中[2-3]。然而，随之而来的是大量铅锌矿废石的安全处置问题。以广西某铅锌矿选矿工艺为例，采用光电智能抛废技术对铅锌矿原矿进行预选，抛废率高达40%以上，废石产出量巨大[3]。铅锌矿废石中含有锌、铅、硫等有害元素，若得不到安全有效的处置和消纳，长期堆存不仅占用大量土地资源，还将存在造成环境污染和生态破坏的重大风险[4-5]。因此，如何低成本、规模化消纳铅锌矿废石已成为困扰铅锌企业的重大课题之一。

目前，国内外铅锌矿选矿企业对于废石的处置方式主要包括采空区回填、再选回收有价组分和制备建筑材料等。回填法是将废石进行固化处理并填充至铅锌矿采空区，通常为全尾砂胶结充填或高水固结全尾砂充填等方式，是目前处置铅锌矿尾矿的主流方案，但需要消耗大量的水泥以及其他胶凝材料，充填成本较高[6-7]。基于绿色矿山和循环经济理念，对铅锌矿废石进行资源化高值化利用已成为重要的发展趋势。根据废石中有价组分的含量和赋存特点，大量研究对铅锌矿废石进行再选回收其中的铅、锌、铁、硫、重晶石、长石和石英等有价组元，但存在工艺流程长、回收成本高、回收率低等问题，一定程度上限制了这些工艺的进一步应用[8-9]。与此同时，将铅锌矿废石破碎、磨粉并制成建材砖、水泥、砂石骨料等产品也是重要的资源化利用途径之一[10-11]。由于建材产品附加值低，销售半径小，严重依赖周边建材市场的规模，这也导致对铅锌矿废石的消纳能力有限，开发新的铅锌废石低成本、大规模、安全高效处置技术对促进矿山绿色高质量发展具有重要的现实意义。

广西某高钙镁铅锌矿废石的CaO和MgO质量分数分别达到27%和18%左右。鉴于烧结法是铁矿粉造块的重要手段，产品通常为高碱度烧结矿，其在我国高炉炉料结构中占主导地位，平均入炉占比为60%以上。同时，在高炉炼铁过程中，需保证渣中含有一定量的MgO以提高其流动性和脱硫能力，且烧结矿中MgO质量分数的提高也具有改善低温还原粉化性能的作用。而目前，高炉冶炼所需的镁主要通过烧结矿带入，生产中主要使用白云石来调节烧结矿中的MgO质量分数，每吨烧结矿的白云石消耗量约为30～80 kg[12]。基于此，本研究提出用铁矿烧结工艺安全高效处置铅锌矿废石的新思路，并基于烧结杯试验开展了相应的验证研究，考察了配加铅锌矿废石对烧结矿产、质量以及SO_2、NO_x气体污染物排放的影响，以便为铅锌矿废石规模化消纳和低成本高效利用技术的开发提供重要基础和指导。同时，可减少天然白云石大量开采对周边生态环境的破坏作用，对推动矿山绿色高质量发展具有重要的现实意义。

1 原料与研究方法

1.1 试验原料

本研究所用原料包括广西某铅锌矿选厂重介质分选抛废产出的铅锌矿废石，以及主要由铅锌矿选厂周边钢铁厂提供的烧结用混匀铁矿、白云石、生石灰、石灰石、焦粉，原料主要化学成分和粒度组成分别见表1和表2，铅锌矿废石的主要物相分析和光学显微结构如图1所示。

由表1和图1分析可知：铅锌矿废石的CaO和MgO质量分数分别为27.06%和18.15%，稍低于烧结用白云石；废石主要物相为白云石($CaCO_3 \cdot MgCO_3$)，占比约90%；同时，废石中还含有少量微细粒嵌布于白云石中的石英(SiO_2)、黄铁矿(FeS_2)和闪锌矿(ZnS)。铅锌矿废石的S和Zn质量分数较高，分别达1.43%和0.29%，根据矿相分析主要以硫化物形式存在，这可能会导致烧结矿残余S、Zn质量分数升高并增加烧结烟气中SO_2质量浓度，因而必须将其添加量控制在适宜范围内。由于铅锌矿废石来样粒度较粗，试验前预先将其破碎至<3 mm质量分数为83.49%，以与现场用白云石粒度相一致(表2)。

综合铅锌矿废石的化学成分和主要物相综合

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　原料主要化学成分和烧损(质量分数)

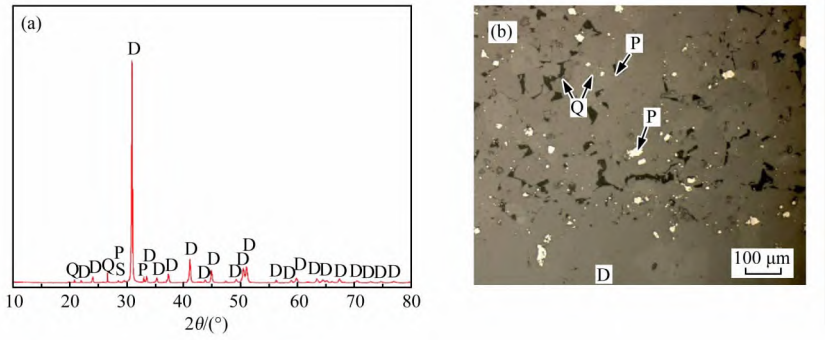
Table 1　Main chemical compositions and burning loss of raw materials　%

原料	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	S	P	Zn	Pb	烧损
混匀铁矿	62.19	2.32	5.51	2.06	0.11	0.22	0.024	0.089	—	—	3.35
铅锌矿废石	2.33	1.72	3.71	0.52	18.15	27.06	1.430	0.017	0.290	0.043	39.16
白云石	0.72	—	1.18	0.34	19.67	31.34	0.016	0.026	—	—	45.73
石灰石	2.10	—	7.06	2.10	0.52	48.06	0.024	0.034	—	—	38.25
生石灰	0.22	—	2.13	0.91	1.13	75.73	0.067	0.027	—	—	17.37
焦粉	1.63	—	6.31	4.44	0.12	0.92	0.690	0.077	—	—	85.52

表 2　原料的粒度组成(质量分数)

Table 2　Particle size distribution of raw materials　%

粒度/mm	混匀铁矿	铅锌矿废石	白云石	石灰石	生石灰	焦粉	返矿
>8	6.23	2.39	0	0	0	1.36	0
(6.3,8]	5.35	1.74	0	0.26	0	1.79	0
(5,6.3]	4.63	3.79	0.59	1.48	0	6.27	0
(3,5]	13.94	8.55	18.34	20.24	0	18.05	26.67
(1,3]	24.53	36.35	26.48	42.25	0	34.14	23.58
(0.5,1]	8.01	7.80	8.46	18.92	0	11.30	15.78
(0.25,0.5]	10.16	11.90	12.44	10.89	0	13.51	5.72
≤0.25	27.29	27.44	33.69	5.96	100	13.58	28.25



(a) 铅锌矿废石的 XRD 物相分析；(b) 铅锌矿废石光学显微结构

D—白云石($CaCO_3 \cdot MgCO_3$)；Q—石英(SiO_2)；P—黄铁矿(FeS_2)；S—闪锌矿(ZnS)。

图 1　铅锌矿废石的 XRD 主要物相和光学显微结构

Fig. 1　XRD phase and optical microstructure of zinc-lead waste rock

分析，用其替代部分普通白云石以调节烧结矿碱度和 MgO 质量分数，具备理论的可行性，铅锌矿废石对白云石的适宜取代配比需通过后续的烧结杯试验进行确定。

1.2　研究方法

原料及烧结矿的化学成分分析采用化学滴定法；铅锌矿废石主要物相分析采用 X 射线衍射分析仪(Rigaku D/max 2550)、光学显微镜(Leica DM4500P)等仪器。同时，基于实验室扩大型烧结杯(∅180 mm×700 mm)试验，考察了铅锌矿废石替代白云石对烧结过程的影响，配矿方案如表 3 所示。铅锌矿废石取代白云石配比分别为 0、20%、40%、60%和 100%共 5 个水平。

试验流程主要包括配料、混匀、制粒、烧结、成品检测等环节。首先，根据配矿方案及某钢铁厂现场烧结生产设定的烧结矿碱度为 1.95，SiO_2、MgO 质量分数分别为 5.5%、1.8%，生石灰用量为 3%，返矿外配比 30%等条件进行配矿；然后，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在∅600 mm×1 000 mm圆筒混合机中进行加水混合和制粒，转速为30 r/min，混合时间为3 min，制粒时间为5 min；在∅180 mm×750 mm烧结杯内加入1 kg铺底料(10~16 mm)，再将制粒后的混合料均匀装入烧结杯内，固定烧结料层高度为750 mm；烧结点火温度为(1 100±50) ℃，点火时间为1.5 min，点火负压为5 kPa，烧结负压为12 kPa，冷却负压为6 kPa，冷却时间为5 min，然后将烧结矿卸出在空气中自然冷却，随后进行烧结矿的落下、筛分及转鼓强度等冷态性能检测。

针对每个配矿方案均分别进行了焦粉用量和水分的优化，以便在返矿平衡和各自最佳烧结条件下对比不同配比铅锌矿废石时的烧结性能。烧结过程主要评价指标为：混合料的透气性指数(JPU)、垂直烧结速度、利用系数、固体燃料消耗和成品烧结矿转鼓强度，具体方法参考前期研究[13]。同时，试验采用Photon型便携式红外烟气分析仪研究了配加铅锌矿废石对烧结烟气SO_2和NO_x排放行为的影响。成品烧结矿的冶金性能包括还原度(*RI*)和低温还原粉化率($RDI_{+3.15\ mm}$)，分别按照GB/T 13241—2017和GB/T 13242—2017标准进行测定。

表3 铅锌矿废石替代白云石对烧结过程的影响

Table 3 Effect of substitution of zinc-lead waste rock dolomite on the sintering process

方案	铅锌废石配比(质量分数)/%	铅锌废石单耗/(kg·t^{-1})	原料配比(质量分数)/%						
			混匀矿	石灰石	白云石	铅锌矿废石	生石灰	焦粉	返矿
基准	0	0	59.11	6.70	4.01	0	3.00	4.10	23.08
S_1	20	~13	58.98	6.79	3.24	0.81	3.00	4.10	23.08
S_2	40	~25	58.83	6.89	2.45	1.65	3.00	4.10	23.08
S_3	60	~37	58.69	6.98	1.65	2.50	3.00	4.10	23.08
S_4	100	~59	58.41	7.21	0	4.20	3.00	4.10	23.08

注：铅锌废石单耗为生产每吨成品烧结矿所需的铅锌矿废石消耗量基于返矿平衡(1±0.05)条件下进行估算；计算烧结原料配比时，假定焦粉用量为4.1%。

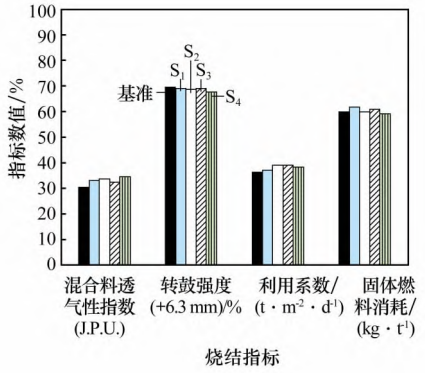
2 结果与分析

2.1 配加铅锌矿废石对烧结矿产、质量指标的影响

针对上述5组配矿方案，在烧结矿碱度为1.95，MgO质量分数为1.8%和焦粉用量为4.1%、水分为8.5%的最佳烧结工艺条件下，对比了不同比例铅锌矿废石取代普通白云石时的混合料透气性指数和烧结过程产、质量指标，结果如图2所示。

由图2可知，在相同制粒水分条件下，配加铅锌矿废石能稍微改善混合料透气性，但幅度不大，透气性指数处于30~35 JPU之间。结合表2中铅锌矿废石和白云石的粒度组成分析，尽管铅锌矿废石小于3 mm粒级质量分数达到了83.49%，但大于5 mm颗粒占比仍比白云石高，从而使制粒小球的平均粒径有所增加，透气性改善。相应地，垂直烧结速度由23.08 mm/min轻微增加到23.79 mm/min。

与此同时，随着铅锌矿废石取代白云石比例由0增加到100%，烧结矿的转鼓强度由69.48%轻微下降到67.69%，而利用系数由36.48 t/(m^2·d)提高至39.12 t/(m^2·d)，固体燃料消耗由59.90 kg/t轻微减少至59.14 kg/t。结合混合料性质分析，这可能是混合料透气性改善，使得烧结速度



废石配比(质量分数)/%：基准—0；S_1—20%；S_2—40%；S_3—60%；S_4—100%。

图2 不同配比铅锌矿废石取代白云石对烧结过程产、质量指标的影响

Fig. 2 Effect of substitution ratio of zinc-lead waste rock for dolomite on the sintering indices

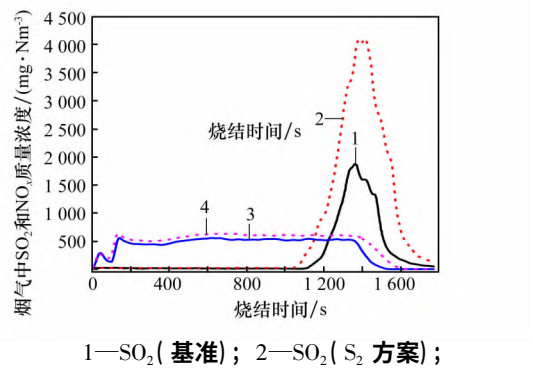
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

加快、高温保持时间缩短所导致[14]。

总体而言，由于铅锌矿废石与白云石的性质接近，且其在烧结混合料中所占比例不高，所以当用废石取代普通白云石配比提高到 40% ~60% 甚至 100% 时，各项烧结指标并未发生明显的变化。这表明，就对烧结产、质量指标而言，用铅锌矿废石取代白云石用于烧结是可行的。

2.2　配加铅锌矿废石对烧结烟气污染物排放量的影响

由于废石含 S 量较高，故本研究在最佳的焦粉用量为 4.1%，水分为 8.5% 条件下，仅针对基准和 S_2 方案，研究配加铅锌矿废石对烧结过程烟气污染物 SO_2 和 NO_x 排放特征的影响，结果如图 3 所示。由图 3 可知，在烧结过程中干燥预热带和燃烧带产生的 SO_2 气体与烧结料层下部过湿带和原始料带的水反应，因而 SO_2 质量分数在烧结前期未能检出，直至烧结末期过湿带和原始料带消失而开始集中释放并达到峰值[15]。与之不同，



1—SO_2(基准)；2—SO_2(S_2 方案)；
3—NO_x(基准)；4—NO_x(S_2 方案)

图 3　最佳烧结条件下基准和 S_2 方案烧结烟气中气体污染物 SO_2 和 NO_x 的排放特征

Fig. 3　Emission characteristics of gas pollutants SO_2 and NO_x in the sintering flue gas of the base case and S_2 scheme under corresponding optimal sintering conditions

NO_x 气体排放随着焦粉燃烧而贯穿烧结全过程，直至达到烧结终点，料层中的焦粉逐渐耗尽而开始急剧下降[16]。

与基准相比，配加铅锌矿废石时，烧结烟气中 NO_x 的排放峰值稍有增加，约为 600 mg/Nm^3，但总体上影响不明显。而废石较高的含 S 量，导致当其取代 40% 普通白云石时，烟气中 SO_2 排放质量浓度明显增加，排放区间有所变宽，峰值达到 4 000 mg/Nm^3 左右。这说明，用铅锌矿废石取代 40% 白云石将不可避免地增加烟气中 SO_2 质量浓度，但从排放峰值质量浓度来看，仍适用于目前主流的烧结烟气湿法脱硫工艺。因此，综合来看，废石取代普通白云石的配比不宜超过 40%。对于一个年产 800 万吨烧结矿的钢铁厂，每年可消耗至少 20 万吨铅锌矿废石，节省堆存成本 600 万元。

2.3　成品烧结矿性能评价

2.3.1　成品烧结矿化学成分和冶金性能

在最佳烧结条件下，基准、S_2 和 S_4 方案获得的成品烧结矿的化学成分和冶金性能如表 4 所示。由表 4 可知，3 种烧结矿的全铁为 56% 左右，FeO 质量分数为 6% ~8%，但 S_2 方案的烧结矿 FeO 质量分数稍低于基准，这是因为料层透气性有所改善，使料层中氧位(p_{O_2})有所增加。就有害元素而言，基准方案烧结矿的含 S 量为 0.041%，含 Zn 量为 0.013%，而用铅锌矿废石取代 40% 和 100% 白云石后，成品烧结矿的 S 和 Zn 质量分数并没有明显增加，与基准几乎维持同一水平，这说明废石带入的 Zn 和 S 元素在烧结过程中均得到了有效脱除。从原理上分析，原料中 S 和 Zn 元素的脱除，主要发生在烧结料层的干燥预热带和燃烧带。当料层温度较高时，同时离燃料(焦粉)颗粒较远的地方氧位(p_{O_2})较高，则发生硫化物的氧化脱除；而焦粉颗粒附近的区域具有较强的还原

表 4　成品烧结矿主要化学成分和冶金性能指标

Table 4　Main chemical compositions and metallurgical performance of sinter products

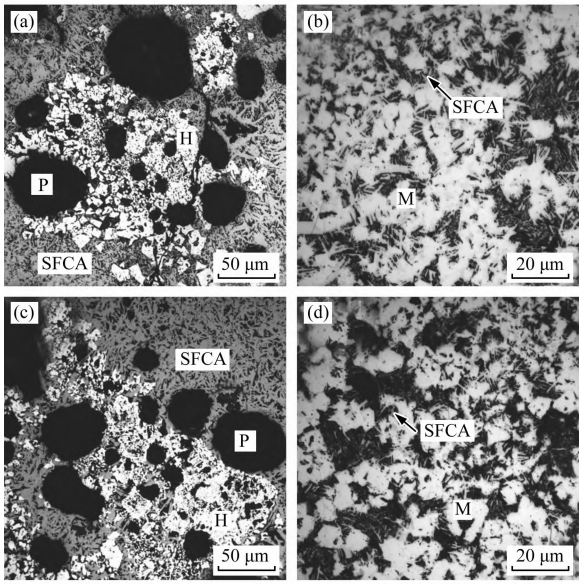
配矿方案	化学成分(质量分数)/%				RI/%	低温还原粉化指数/%	
	TFe	FeO	Zn	S		$RDI_{+3.15\ mm}$	$RDI_{-0.5\ mm}$
基准	56.02	7.18	0.013	0.041	82.57	73.99	5.68
S_2	56.10	6.54	0.018	0.039	82.48	73.23	5.68
S_4	56.05	7.11	0.019	0.052	85.20	74.16	5.08

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

性，有利于 Zn 组分的还原挥发[17]。因此，常规烧结工艺的脱硫率一般可达 90% 以上，脱锌率可达 50% 以上。另外，成品烧结矿的冶金性能表明，在配加废石取代 40% 白云石后，烧结矿的还原性和低温还原粉化性能均未发生明显变化，均可满足高炉冶炼要求；而当白云石被废石 100% 取代时，烧结矿的还原性和低温粉化性能均呈现有改善趋势，这可能因为烧结矿强度有轻微下降而伴随着孔隙结构得到一定发展。

2.3.2 成品烧结矿矿相微观结构

为了探究添加铅锌矿废石对烧结矿物相组成和孔隙结构的影响，进一步对基准和 S_2 方案的 2 组成品烧结矿矿相结构进行了分析，结果如图 4 所示。由图 4 可知，与基准方案相比，S_2 方案成品烧结矿的矿相组成和孔隙结构没有明显的变化。从固结情况来看，两组成品烧结矿的黏结相主要为复合铁酸钙，其与磁铁矿、赤铁矿共生紧密，结晶良好。



(a)、(b) 基准方案；(c)、(d) S_2 方案

H—赤铁矿；M—磁铁矿；SFCA—复合铁酸钙；P—孔隙

图 4 基准和 S_2 方案成品烧结矿的矿相微观结构

Fig. 4 Microstructure of sinter products made from base case and S_2 scheme

3 结 论

(1) 广西某高钙镁型铅锌矿废石的 CaO 和 MgO 质量分数分别为 27.06% 和 18.15%，主要以白云石($CaCO_3 \cdot MgCO_3$)形式产出，另含有少量嵌布于白云石的微细粒石英(SiO_2)、黄铁矿(FeS_2)和闪锌矿(ZnS)，铅锌矿废石的性质与烧结用白云石相似。

(2) 用铅锌矿废石取代白云石用于烧结具有良好的可行性，不会对各项烧结指标产生明显的不利影响。配加铅锌矿废石不可避免导致烧结烟气中 SO_2 质量浓度增加，但对成品烧结矿的化学成分、冶金性能和矿相结构没有明显影响。综合分析，废石取代普通白云石的比例不宜超过 40%。

(3) 采用铅锌矿废石替代普通白云石用铁矿烧结工艺，具有显著的社会经济生态效益，可以为实现碳酸盐质铅锌矿废石的规模化消纳和低成本高效利用提供新思路、新途径和重要指导。

参考文献:

[1] 唐攀科，王春艳，梅友松，等. 中国铅锌矿产资源成矿特征与资源潜力评价[J]. 地学前缘，2018，25(3)：31－49.
TANG Panke，WANG Chunyan，MEI Yousong，et al. Study on metallogenic characteristics and potential assessment of lead-zinc mineral resources in China[J]. Earth Science Frontiers，2018，25(3)：31－49.

[2] 李宇新，童晓蕾，李艳，等. 重介质选矿、X 射线分选在宜昌磷矿各矿层选矿的工业应用对比[J]. 化工矿产地质，2020，42(1)：77－82.
LI Yuxin，TONG Xiaolei，LI Yan，et al. Comparison of the industrial application of heavy medium beneficiation and X-ray separation of mineral dressing in mineral layers of Yichang phosphate mine[J]. Geology of Chemical Minerals，2020，42(1)：77－82.

[3] 苏振华，谈承忠，张笃，等. 光电智能抛废技术在低品位铅锌矿的试验研究[J]. 材料研究与应用，2021，15(2)：159－164.
SU Zhenhua，TAN Chenzhong，ZHANG Du，et al. Experimental research on photoelectric intelligent waste disposal technology in low-grade lead-zinc mine[J]. Materials Research and Application，2021，15(2)：159－164.

[4] 蓝卓越，高天锐，吕晋芳，等. 矿山废石对环境的污染及其综合利用研究现状[J]. 矿产保护与利用，2021，41(3)：126－131.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

LAN Zhuoyue，GAO Tian，LV Jinfang，et al. Research status of environmental pollution and comprehensive utilization of mine waste rocks [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2021，41(3)：126－131.

[5] KAN X Q，DONG Y Q，FENG L，et al. Contamination and health risk assessment of heavy metals in China´s lead-zinc mine tailings：a meta-analysis [J]. Chemosphere，2021，267：128909.

[6] 易龙生，米宏成，吴倩，等. 中国尾矿资源综合利用现状 [J]. 矿产保护与利用，2020，40(3)：79－84.
YI Longsheng，MI Hongcheng，WU Qian，et al. Present situation of comprehensive utilization of tailings resources in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2020，40(3)：79－84.

[7] 张静，刘再涛，李永新，等. 全尾砂和废石联合胶结充填体最佳配比及应用 [J]. 矿冶工程，2020，40(3)：10－14；19.
ZHANG Jing，LIU Zaitao，LI Yongxin，et al. Optimum proportion of total tailings and waste rock for cemented backfill and its practical application [J]. Ming and Metallurgical Engineering，2020，40(3)：10－14；19.

[8] 白成庆，颜顺德，潘仁球. 某铅锌矿尾矿降镁试验研究 [J]. 矿冶工程，2020，40(4)：78－80.
BAI Chengqing，YAN Shunde，PAN Renqiu. Experimental study on magnesium reduction for lead-zinc ore tailings [J]. Mining and Metallurgical Engineering，2020，40(4)：78－80.

[9] 孙肇淑. 从某铅锌矿尾矿中回收微细粒级黄铁矿试验研究 [J]. 矿冶工程，2016，36(4)：49－52.
SUN Zhaoshu. Experimental study on recovery of microfine pyrite from lead-zinc flotation tailings [J]. Mining and Metallurgical Engineering，2016，36(4)：49－52.

[10] 顾敏，罗里奥. 凡口铅锌矿废石生产建筑材料思路与成果 [J]. 绿色环保建材，2021(1)：3－4.
GU Min，LUO Liao. Ideas and achievements of waste rock production of construction materials from Fankou lead-zinc mine [J]. Green Environmental Protection Building Materials，2021(1)：3－4.

[11] 车哲，高恩，余东晓，等. 低镁资源作为烧结熔剂的工艺研究 [J]. 烧结球团，2021，46(5)：21－25.
CHE Zhe，GAO En，YU Dongxiao，et al. Research on technology of low-magnesium resources as sintering flux [J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(5)：21－25.

[12] 陈强，傅曙光，周鹏飞，等. 铁矿烧结熔剂优化试验研究 [J]. 烧结球团，2019，44(6)：28－33.
CHEN Qiang，FU Shuguang，ZHOU Pengfei，et al. Experimental research on flux optimization for iron ore sintering [J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(6)：28－33.

[13] 师本敬. 预压成型强化细粒镜铁矿粉烧结工艺与机理研究 [D]. 长沙：中南大学，2014.
SHI Benjing. Techonogy and mechanism of improving sintering performance of fine-graded specularite by pre-briquetting [D]. Changsha：Master´s Thesis of Central South University，2014.

[14] YANG C C，ZHU D Q，PAN J，et al. Some basic properties of granules from ore blends consisting of ultrafine magnetite and hematite ores [J]. International Journal of Minerals，Metallurgy，and Materials，2019，26(8)：953－962.

[15] 潘建，朱德庆，崔瑜，等. 铁矿烧结烟气中 SO_2 的排放规律 [J]. 中南大学学报(自然科学版)，2011，42(6)：1495－1500.
PAN Jian，ZHU Deqing，CUI Yu，et al. Emission rule of SO_2 in flue gas during sintering [J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2011，42(6)：1495－1500.

[16] 聂绍昌. 新钢烧结生产 NO_x 排放规律及减排措施 [J]. 烧结球团，2018，43(4)：73－77.
NIE Shaochang. NO_x emission laws and reduction measures for sintering production of Xin steel [J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(4)：73－77.

[17] 胡兵，甘敏，王兆才. 预还原烧结技术的研究现状与新技术的开发 [J]. 烧结球团，2017，42(6)：22－26；38.
HU Bing，GAN Min，WANG Zhaocai. Research status of pre-reduction sintering technology and development on the new technology [J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(6)：22－26；38.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵，不再另行支付)，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明，如有异议请来稿说明，本刊将作适当处理。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net