

## 陕西某水泥用灰岩矿废石综合利用试验

寿立永, 严鹏程, 韩鹏飞, 刘少峰

(中国建筑材料工业地质勘查中心陕西总队, 陕西 西安 710003)

**摘要:** 陕西某水泥用灰岩矿顶板及夹石为高 MgO 灰质白云岩, 总量达 3600 余万 t, 每年剥离废弃物约 100 万 t。经废石搭配生产试验, 混搭矿石 MgO 含量超过 2.3% 时水泥熟料质量稳定性出现大幅波动, 矿区大部分废石不能作为水泥生产原料进行综合利用, 由此造成矿山废石的大量堆积。在严重影响企业效益的同时, 也使企业承受巨大的环保压力。通过废石综合利用试验研究, 废石抗压强度平均 85.92 MPa、压碎值平均 11.15%, 均满足 II 类建筑石料质量要求, 是天然优质建筑石料原料。试验为矿区废石综合利用提供了新的方向, 废石资源化利用将取得显著的资源效益、环境效益、经济效益及社会效益。

**关键词:** 废石; 夹石; 建筑石料; 综合利用; 资源化利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.05.022

中图分类号: TD985 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 05-0142-06

陕西省某水泥用灰岩矿是水泥生产线配套石灰石原料矿山, 已探明资源储量 2.6 亿 t, 矿山开采规模近 450 万 t/年。无论从资源储量还是开采规模, 该矿山都是陕西省最大的水泥用灰岩矿山之一。该水泥用灰岩矿在全开采年限, 累计将剥离高 MgO 废石 3600 万 t, 每年开采剥离废石近 100 万 t。

因该矿山石灰石 MgO 含量普遍偏高, 剥离废石作为水泥原料搭配使用致使熟料 MgO 含量偏高, 影响水泥安定性, 导致水泥产品的质量稳定性差。废石堆放不仅占用大量土地, 而且严重破坏周边景观环境, 给矿山带来了严峻的生态环境问题。因此, 开展废石综合利用方向的研究工作, 提高资源的综合利用能力, 实现水泥用灰岩矿的优质优用、阶梯利用具有重要的现实意义<sup>[1]</sup>。

## 1 矿床顶板及夹石特征

该矿床顶板为寒武系呼狼湾组灰黄色厚层状白云岩, 与矿层马家沟组呈断层接触。经取样分析,

岩石 CaO 含量 32.89% ~ 35.39%, MgO 含量 11.05% ~ 16.01%。矿区构造较为简单, 断层和褶皱均不发育, 总体为一单斜构造。后期的构造活动、变质活动对岩石的结构无破坏作用。

矿体内部有 4 个非矿夹层, 岩性为白云岩、白云质灰岩。

J1 和 J2 夹层规模较大。其中 J1 夹层走向延伸长约 1200 m, 厚度 6.0 ~ 42.2 m, 平均厚度 22.0 m, 岩石中 CaO 含量 36.91% ~ 48.27%, 平均为 47.59%; MgO 含量 3.87% ~ 17.72%, 平均为 6.75%。J3 夹层走向延伸长约 800 m, 厚度 10.0 m。CaO 含量 34.41% ~ 49.20%, 平均为 44.28%; MgO 含量 4.39-15.08%, 平均为 10.40%。矿床顶板及夹石共计 3600 余万 t, 目前尚有 2855.45 万 t 未剥离。

## 2 废石资源化利用现状与存在的问题

该水泥用灰岩废石主要为矿山开采过程剥离的顶板及矿体内部夹石。顶板层 CaO 平均含量

收稿日期: 2019-08-20; 改回日期: 2019-09-25

作者简介: 寿立永 (1978-), 男, 高级工程师, 主要从事非金属矿综合利用技术研究工作。

39.29%，MgO 平均含量 8.61%。夹层 CaO 平均含量 45.68%，MgO 平均含量 7.02%，其 MgO 含量严重超标，不能满足水泥生产需要。

### 2.1 废石资源现状

自建矿以来累计剥离废石 885.0 万 t，平均每年剥离废石 110.6 万 t，2018 年剥离量达到 112.8 万 t（表 1）。

表 1 剥离废石量统计

Table 1 Statistics of the amount of waste rock stripped from limestone mines

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
产出量 / 万 t	151.9	135.5	110.5	89.5	110.3	83.5	91.0	112.8
合计 / 万 t	885.0							

废石除少部分作为水泥原料搭配外，仍有大量废石堆放于临时废石堆场，严重压覆矿体，制

约矿山后续正常开采。

### 2.2 废石特征及综合利用存在问题

#### 2.2.1 有害组分 MgO 含量高且变化不稳定

全矿区石灰石矿 CaO 平均含量 51.56%，MgO 平均含量 1.65%，有害组分 MgO 含量远高于陕西省内主要大型矿山平均水平（表 2），对 2018 年 2-5 月全部炮孔监测样进行统计（表 3）。

表 2 陕西省大型水泥用灰岩矿 MgO 含量变化

Table 2 MgO content variation in large cement limestone ore in Shaanxi province

	泾阳	铜川	凤翔	铜川	岐山	铜川
该水	蔡家	杨泉	东山	李家	西凤	尖草
泥灰	沟水	山水	水泥	沟水	岭水	坡水
岩矿	泥灰	泥灰	灰岩	泥灰	泥灰	泥灰
	岩矿	岩矿	矿	岩矿	岩矿	岩矿
CaO/%	51.56	55.19	54.32	54.90	54.07	53.94
MgO/%	1.65	0.27	0.58	0.34	0.75	0.34

表 3 2018 年 2 月 ~ 5 月全部炮孔监测样统计

Table 3 Statistics of borehole monitoring samples from February to May 2018

日期	MgO 含量 / %						
	2 月 10 日	2 月 11 日	3 月 8 日	3 月 15 日	3 月 23 日	3 月 28 日	4 月 1 日
最大值	6.68	19.33	7.26	13.73	18.63	9.06	2.76
最小值	0.71	0.36	0.31	0.78	2.86	1.37	0.85
平均值	1.86	10.56	2.09	2.78	12.29	3.11	1.54
变化系数	49.85	64.13	79.21	99.35	36.15	56.32	28.69
日期	MgO 含量 / %						
	4 月 2 日	4 月 5 日	4 月 10 日	4 月 12 日	4 月 20 日	5 月 2 日	5 月 9 日
最大值	4.20	9.03	5.01	3.78	19.23	8.25	6.33
最小值	1.16	0.83	1.18	0.93	5.00	0.67	1.06
平均值	2.71	1.67	2.01	1.84	13.72	1.94	2.94
变化系数	35.54	88.60	46.58	41.90	25.39	62.55	47.61

矿山 2 月 10 日 ~ 5 月 9 日炮孔监测单日有害组分 MgO 含量 1.54% ~ 13.72%，其中 2 月 11 日、2 月 23 日、4 月 20 日单日 MgO 含量高达 10.56% ~ 13.72%。日炮孔监测样 MgO 含量 1.54-13.72%，综合平均含量 4.36%。单日单炮孔 MgO 含量变化系数 28.69 % ~ 99.35%，平均 54.41%。说明部分夹石 MgO 含量高且变化不稳定，作为水泥原料搭配使用难度大。

#### 2.2.2 废石搭配过多影响熟料质量

矿山开采以来，该水泥用灰岩矿废石综合利用途径主要是作为水泥原料搭配使用。水泥生产线生产初期，经常出现原料 MgO 含量偏高影响熟料安定性和水泥后期强度质量问题。本次抽取 MgO 含量变化大、熟料质量不稳定时期 12 个批次数据（表 4），对石灰石原料 MgO 含量对熟料质量影响进行对比研究。

表 4 石灰石原料、水泥熟料质量情况  
Table 4 Quality of limestone raw materials, cement clinker

批次序号	石灰石 MgO/%	烧失量	熟料化学成分 /%				安定性	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
			SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	fCaO		3d	28d	3d	28d
1	1.47	0.45	21.72	64.70	2.40	0.38	合格	6.4	8.8	32.1	53.5
2	3.31	0.87	19.32	64.52	5.28	5.27	不合格	6.6	7.3	25.9	45.7
3	1.83	1.25	20.71	64.74	2.92	1.45	合格	5.9	8.5	30.7	54.1
4	1.87	1.54	20.44	64.20	3.10	1.10	合格	6.6	8.8	31.7	53.8
5	1.98	0.75	21.05	64.76	3.82	2.15	合格	6.7	8.6	28.7	48.9
6	1.35	1.24	21.51	64.16	2.24	0.22	合格	6.1	7.5	29.0	50.2
7	2.22	1.64	20.62	64.27	3.63	1.06	合格	6.2	8.0	31.5	54.4
8	2.29	0.76	20.14	64.84	3.81	3.34	不合格	6.3	7.2	27.2	48.7
9	3.02	1.38	19.64	64.69	4.97	3.97	不合格	6.3	7.0	28.1	48.5
10	1.48	0.97	21.64	64.67	2.52	0.24	合格	6.1	7.4	30.1	51.2
11	3.25	1.02	18.95	64.60	5.17	6.08	不合格	5.8	7.0	24.0	44.2
12	1.37	2.01	21.55	64.24	2.22	0.27	合格	6.8	8.2	32.2	53.5

经统计，当石灰石原料 MgO 含量小于 2.30% 时，生产出熟料 MgO 含量小于 3.63%，熟料各项指标正常，28 d 抗压强度普遍大于 50.5MPa；当石灰石原料 MgO 含量 2.30% ~ 3.31% 时，熟料 MgO 含量 3.81% ~ 5.28%，熟料大部分表现为安定性不合格，28 d 抗压强度降低 3.2 ~ 7.1 MPa。经统计研究，当 MgO 含量超过 2.30% 时会引起熟料质量大幅波动。

分析认为，出现这些现象的主要原因是搭配废石后 MgO 含量普遍升高而引起的。因为煅烧水泥熟料的过程中 MgO 具有弱碱性，使 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 出现离解现象，最终导致液相粘度降低并生成 C<sub>3</sub>S，煅烧过程中 C<sub>3</sub>S 晶格中会融入 MgO，当 MgO 的含量大于 C<sub>3</sub>S 的固溶能力便会生成方镁石晶体。方镁石水化速度很慢，要在半年至 1 年后才明显开始水化，而且水化生成氢氧化镁，体积膨胀 148%，因此会导致构件安定性不良。另外高 MgO 会导致

熟料烧结范围不断减小，出现结圈、结大球现象，进而影响整个烧成系统的运行<sup>[2-3]</sup>。

经对废石进行大规模搭配利用试验，目前主要将 MgO 含量低于 5% 的部分夹层与 MgO 含量低于 1% 的优质石灰岩进行搭配利用，大部分剥离物不能搭配利用，在开采场地临时堆放。

### 3 建筑石料加工性能试验研究

本次对矿区内夹石、石灰岩矿石通过从矿物成分分析、化学成分分析、抗压强度测试、坚固性测试、压碎值测试等方法手段入手<sup>[4]</sup>，对比研究岩石化学成分与物理性能的关系，进一步论证废石作为建筑石料综合利用的可行性<sup>[5-6]</sup>。目标是进一步推动矿山大量废石综合利用，解决矿山废石无处堆放的实际问题。

本次试验选定 6 件样品（表 5），其中夹石层采取 4 件、水泥灰岩矿石层采取 2 件，以便于对比研究。

表 5 样品基本特征  
Table 5 List of basic characteristics of samples

序号	岩石名称	颜色	矿物组成	结构构造	CaO (%)	MgO (%)	烧失量 (%)
1	灰岩	浅灰色	方解石	生物碎屑结构、细晶结构	53.24	0.54	42.56
2	灰岩	灰白色	方解石	细晶结构	51.50	1.80	42.19
3	白云质灰岩	深灰色	方解石、白云石	泥、细晶结构	50.21	4.31	40.42
4	白云质灰岩	褐灰色	方解石、白云石	泥、细晶结构	47.64	6.53	39.78
5	灰质白云岩	黑灰色	方解石、白云石	泥、细晶结构	43.54	10.64	38.22
6	灰质白云岩	灰黑色	方解石、白云石	泥、细晶结构	38.89	13.56	35.34

顶板及夹石岩性为白云质灰岩，呈深灰色～褐灰色，组成矿物方解石约 50%～80%，白云石在 18%～45%，另含少量泥质、铁质矿物，泥晶、细晶、粗晶结构，厚层状、块状构造，矿石断面呈砂糖状。

矿石呈浅灰色灰白色，主要由方解石矿物组成，含量达 95%～98%，白云石微量；细晶、亮晶、生物碎屑结构；厚层状、巨厚层、块状构造。矿石质纯性脆，贝壳状断口，见方解石细脉穿插。

### 3.1 抗压强度

根据《公路工程岩石试验规程》(JTGE 41-2005) 单轴抗压强度试验规程对试样进行测试，由中国建筑材料工业地质勘查中心陕西测试研究所承担。试验采用天然状态岩石试样测试。采用 SC300 钻石机、DQ-4 切石机、SHM-200 磨石机将试样加工为 (50±2) mm、高径比 2:1，每个样品制备三块，试验三次，试验结果取平均值。单轴抗压强度试验采用 2000kN 微机控制电液伺服 WAW-1000B 万能试验机进行测试。样品测试结果见表 6。

表 6 试样单轴抗压强度试验结果

样品编号	矿石				废石	
	1	2	3	4	5	6
天然抗压强度 /MPa	45.00	51.86	68.12	73.17	99.04	103.35
平均值 /MPa	48.43				85.92	

### 3.2 压碎值

根据《公路工程集料试验规程》(JTGE 42-2005) 粗集料压碎值试验规程对试样进行测试，由中国建筑材料工业地质勘查中心陕西测试研究所承担。采用天然石料破碎用 13.2 mm 和 9.5 mm 标准筛过筛，人工挑出针片状颗粒，每个样品制备 3 组，各 3000 g，测试结果取平均值。处理后试样桶

表 9 建筑石料矿产质量要求

Table 9 Comparison table of building stone mineral quality requirements

测试项目	母岩抗压强度 /Mpa			压碎值 /%			坚固性 / 质量损失 %		
	I 类	II 类	III 类	I 类	II 类	III 类	I 类	II 类	III 类
石料质量一般要求	90	60	45	< 10	< 20	< 30	< 5	< 8	< 12
本矿区废石平均质量	85.92			11.15			0.35		

表 7 试样压碎值试验结果

Table 7 Table of test results of crushed stone value

样品编号	矿石				废石	
	1	2	3	4	5	6
压碎值 /%	17.52	15.08	13.25	11.32	10.14	9.87
平均值 /%	16.30				11.15	

用 2000 k 压力测试机 10 min 左右压至 400 kN，稳压 5 s，卸荷后称量，计算压碎值。试验三次，取平均值，样品测试结果见表 7。

### 3.3 坚固性

根据《公路工程集料试验规程》(JTGE 42-2005) 粗集料坚固性试验规程对试样进行测试，由中国建筑材料工业地质勘查中心陕西测试研究所承担。本试验采用 4.75～9.5 mm、9.5～19 mm 两种粒级测试，4.75～9.5 mm 粒级 500 g；9.5～19 mm 粒级 1000 g，其中 9.5～16 mm 40%，16～19 mm 60%。采用饱和硫酸钠溶液 5 次浸泡和烘干循环。试验三次，结果取平均值，样品测试结果见表 8。

表 8 试样坚固性试验结果

Table 8 Table of test results of Aggregate firmness

样品编号	矿石			废石		
	1	2	3	4	5	6
4.75～9.5mm 质量损失	0.9	0.8	0.7	0.8	0.5	0.6
9.5～19mm 质量损失	0.3	0.1	0.0	0.1	0.3	0.3
总质量损失 /%	0.5	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4
总重量损失平均值 /%	0.4			0.35		

### 3.4 结果与讨论

#### 3.4.1 废石建筑石料质量评价

本矿区不符合水泥生产需要的顶板夹石废石质量指标整体满足 II 类建筑石料质量标准 (表 9)，其中 6 号样品达到 I 类建筑石料质量要求。整体品质高于陕西省关中地区一般建筑石料。

### 3.4.2 抗压强度、压碎值与 MgO 含量相关性

本矿区岩矿石单轴抗压强度随着 MgO 含量增加呈逐渐增大的趋势；岩矿石压碎值随着 MgO 含量增加呈逐渐减小（图 2）。岩矿石坚固性指标远高于建筑石料质量要求，其质量损失与 MgO 含量变化关联性差。

矿石矿物成分简单，方解石、白云石含量 98% 以上，本矿区矿石 MgO 含量与岩石强度呈正相关关系。MgO 含量高对水泥生产有害，恰有利于建筑石料强度的提高，综合利用可实现优质优用、阶梯利用。

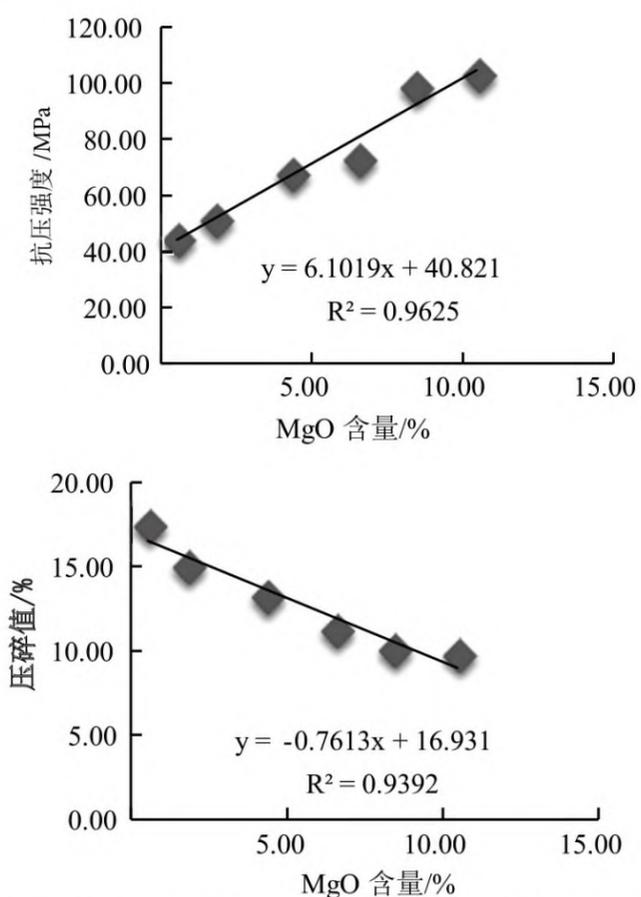


图 2 MgO 含量与单轴抗压强度、压碎值参数

Fig. 2 Correlation diagram between MgO content and uniaxial compressive strength and crushing value parameters

## 4 效益分析

### 4.1 资源效益分析

通过废石资源化利用，可实现矿山资源 100% 利用 [7-8]，实现矿山固废零排放。MgO 含量低的矿石作为水泥原料利用，MgO 含量高的夹石作为优质建筑石料原料利用，实现了资源的优质优用、梯级利用。每年将综合利用各类废石 100 万 t，相当于又增加了一处中型石灰岩矿山，资源综合利

用将会取得显著的资源效益。

### 4.2 环境效益分析

该矿山赋存有 3600 万 t 各类采矿废石，目前已经产生废石 800 万 t 在采场临时堆放，今后每年将产生近 100 万 t 废石。废石充分的资源化综合利用，近期将避免压占土地 133340 m<sup>2</sup>，远期将避免压占土地约 400020 m<sup>2</sup>，同时避免对地形地貌及景观破坏。废石的综合利用具有显著的环境效益 [9-11]。

### 4.3 社会经济效益分析

本矿山目前废石处理成本 20 元 /t，综合利用 100 万 t 废石企业每年减少废石处理资金投入约 2000 万元；按目前建筑石料市场价 60 元 /t 计算，综合利用 100 万 t 废石将增加销售收入约 6000 万元，废石综合利用给企业带来显著的经济效益。

## 5 结论

该水泥用灰岩矿顶板及夹层 MgO 含量较高，不满足水泥生产需要，累计将剥离高 MgO 废石 3600 余万 t，每年开采剥离废石近 100 万 t。通过搭配使用试验，仅少量夹石可搭配利用，过量搭配会引起熟料稳定性不合格、产品质量不稳定的质量问题。经夹石作为建筑石料综合利用试验，废石抗压强度平均 85.92 MPa、压碎值平均 11.15%，均满足 II 类建筑石料质量要求，是天然优质建筑石料原料，品质高于陕西省关中地区一般建筑石料。如果对废石作为建筑石料进行综合利用，将实现资源的优质有用、阶梯利用，将取得显著的资源效益、环境效益和经济社会效益，进而推动矿山企业绿色可持续发展。

### 参考文献：

[1] 杨志强, 王永前, 高谦, 等. 金川镍矿废弃物在充填采矿中利用现状与展望 [J]. 矿产综合利用, 2017(3):22-28.  
 Yang Z Q, Wang Y Q, Gao Q, et al. Current situation and prospect of the utilization of nickel waste in filling mining in Jinchuan Nickel mine [J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2017(3):22-28.  
 [2] 徐信文. 水泥熟料煅烧和水泥水化受氧化镁的影响分析

[J]. 中国石油和化工标准与质量,2017,37(9):102-103.

Xu X W. Analysis on the influence of magnesium oxide on cement clinker calcination and cement hydration [J]. China petroleum and chemical industry standards and quality,2017,37(9):102-103.

[3] 冯云. 浅谈氧化镁对水泥熟料质量的影响 [J]. 水泥工程,2006(2):28-29, 31.

Feng Y. Effect of Magnesium oxide on clinker quality of cement [J]. Cement Engineering,2006(2):28-29, 31.

[4] 谷彩虹. 石灰岩矿物与化学组成及其在沥青路面结构中的应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学,2014.

Gu C H. Study on mineral and chemical composition of limestone and its Application in asphalt pavement structure [D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2014.

[5] 李文臣, 张文强, 张徐. 建筑用石料地质勘查评价指标和样品布置采集方法探讨 [J]. 中国非金属矿工业导刊,2019(1):20-22.

Li W C, Zhang W Q, Zhang X. Evaluation index and sample arrangement collection method for geological exploration of stone materials used in construction [J]. China Non-metallic Mineral Industry Guide,2019(1):20-22.

[6] 宋念东, 杨宏伟. 王官营水泥灰岩矿地质勘探的总评价及开采利用 [J]. 中国水泥,2010(7):83-86.

Song N D, Yang H W. General evaluation and mining utilization of wangguanying Cement limestone mine geological exploration [J]. China Cement,2010(7):83-86.

[7] 李强, 高开渠, 孟庆冰, 等. 骨料线废石粉在 5000 t/d 生产线上的综合利用 [J]. 水泥,2018(5):34-36.

Li Q, Gao K Q, Meng Q B, et al. Comprehensive utilization of waste rock powder from aggregate line in 5000 T /d production line [J]. Cement,2018(5):34-36.

[8] 刘佳. 利用密云尾矿废石制备高性能混凝土的基础研究 [D]. 北京: 北京科技大学,2015.

Liu J. Basic Research on preparation of high-performance Concrete from waste rock of Miyun Tailings [D]. University of Science and Technology Beijing: Beijing, 2015.

[9] 张利珍, 赵恒勤, 马化龙, 等. 我国矿山固体废物的资源化利用及处置 [J]. 现代矿业,2012,27(10):1-5.

Zhang L Z, Zhao H Q, Ma H L, et al. Resource utilization and disposal of solid waste in mines in China [J]. Modern mining,2012,27(10):1-5.

[10] 齐文涛, 陈智伟. 海南岛矿山废石资源特征及综合利用研究 [J]. 中国矿业,2019,28(2):40-44.

Qi W T, Chen Z W. Study on the characteristics and comprehensive utilization of mine waste rock resources in hainan island [J]. China mining,2019,28(2):40-44.

[11] 张以河, 胡攀, 张娜, 等. 铁矿废石及尾矿资源综合利用与绿色矿山建设 [J]. 资源与产业,2019,21(3):1-13.

Zhang Y H, Hu P, Zhang Z, et al. Comprehensive utilization of waste rock and tailings resources in iron ore mine and green mine construction [J]. Resources and Industry,2019,21(3):1-13.

## Experimental Study on Comprehensive Utilization of Waste Rock in a Cement Limestone Mine in Shaanxi Province

Shou Liyong, Yan Pengcheng, Han Pengfei, Liu Shaofeng

( Shaanxi Branch of China Building Materials Industrial Geological Exploration Center, Xi'an, Shaanxi, China)

**Abstract:** In a cement limestone mine of Shaanxi, the limestone mine roof waste rock and mezzanine waste rock have a total reserve of 36 million tons and 1 million tons of waste per year. The production test shows that when the MgO content of mixed ore exceeds 2.3%, the quality stability of cement clinker fluctuates greatly. So most of the waste rock is not suitable for comprehensive utilization as cement production raw materials, resulting in massive accumulation of waste rock in the mine. At the same time, it seriously affects the corporate benefits and causes enterprises facing tremendous environmental pressure. The comprehensive utilization test of waste rock shows that the compressive strength of waste rock is 85.92Mpa on average and the average crushing value is 11.15%, which meets the quality requirements of Class II building materials and is a natural high-quality building stone material. The results provide a new direction for the comprehensive utilization of waste rock in mining areas, and it is expected to realize the resource benefit, environmental benefit, economic benefit and social benefit of the utilization of waste rock resources.

**Keywords:** Waste rock; Mezzanine waste rock; Building stone; Comprehensive utilization; Resource utilization