

贵州安龙县饰面用灰岩矿床地质特征及加工性能浅析

乔金矿

中国建筑材料工业地质勘查中心贵州总队资源勘查院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年5月13日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年7月23日

摘要

本研究以贵州安龙县饰面用灰岩矿床为研究对象,通过系统的野外地质调查、室内测试分析及工艺试验,揭示了该矿床的地质特征及其与加工性能之间的内在联系。研究表明,矿体赋存于三叠系中统垄头组地层中,呈层状产出,沿NE-SW方向延伸约1200米,出露宽度达130米,并可划分为4个岩性段。矿石自然类型包括泥晶灰岩、鲕粒灰岩等,主要矿物成分为方解石(CaCO_3 含量超过90%),具有泥晶、鲕粒、生物碎屑等结构和块状构造。物理性能测试显示,豆粒灰系列表现最优(密度为 2.85 g/cm^3 ,吸水率为0.49%),而木纹系列则表现出最佳的耐磨性能(15.5 l/cm^3)。放射性检测结果显示,各项指标均符合GB 6566-2010 A类标准($\text{IRa} \leq 0.1$)。基于上述研究结果,本研究较为创新性地提出了“地质特征-材料性能-加工工艺”协同优化探讨,为区域石材资源的合理开发提供参考。

关键词

饰面用灰岩, 地质特征, 加工性能

Geological Characteristics and Processing Properties of Graystone Deposits for Finishing in Anlong County, Guizhou Province

Jinkuang Qiao

Guizhou Resource Exploration Institute, China Building Materials Geological Exploration Center, Guiyang
Guizhou

Received: May 13th, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

This study focuses on the dimension stone limestone deposit in Anlong County, Guizhou Province, China. Through systematic field geological investigations, laboratory analyses, and processing tests, the geological characteristics of the deposit and their intrinsic relationship with processing properties were elucidated. The results indicate that the orebody occurs in the Middle Triassic Longtong Formation, exhibiting a stratified morphology extending approximately 1200 meters along the NE-SW direction with an outcrop width of 130 meters. The deposit can be divided into four lithologic sections. The natural types of ore include micritic limestone, oolitic limestone, and others, with calcite (CaCO_3 content > 90%) as the dominant mineral component, displaying micritic, oolitic, and bioclastic textures as well as massive structures. Physical property tests revealed that the “Doulihui” series performed optimally (density: 2.85 g/cm^3 ; water absorption: 0.49%), while the “Muwen” series exhibited the best wear resistance (15.5 l/cm^3). Radiological testing confirmed that all indicators comply with the Class A standards of GB 6566-2010 ($\text{IRa} \leq 0.1$). Based on these findings, this study innovatively proposes a synergistic optimization framework integrating “geological characteristics - material properties - processing techniques,” providing a scientific basis for the rational development of regional stone resources.

Keywords

Dimension Stone Limestone, Geological Characteristics, Processing Properties

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石材是地质作用形成的天然岩石，经开采加工后形成各种形状的材料，具备一定的块度、强度、稳定性、可加工性和装饰性能[1]-[3]。国外通过优化荒料规格尺寸和切割设备选型，探索兼顾经济效益与环境可持续性的最佳工程实践[4]，探究灰岩荒料加工及其与环境的关系，提出了荒料规格尺寸满足生态最高等级标准。国内更多关注于灰岩荒料的综合利用研究[5][6]，以其综合利用价值及其利用前景的分析，国内灰岩板材的开发前景良好。安龙县是重要沉积岩类石材产地，饰面石材品种丰富，用途广泛，档次高端，装饰效果优异，开发前景广阔，市场潜力巨大[7]。在市场需求的推动下，安龙县的石材产业实现了较快发展，区域内逐步形成了石材开采、加工及贸易等完整产业链[8]。但饰面石材的品质受控于矿床地质特征及加工工艺优化。安龙县地处右江盆地北缘，垭头组灰岩以质地均匀、装饰性强著称[9]。尽管已有学者关注其资源潜力[7]，但系统性的“地质 - 性能 - 工艺”关联研究尚且不足，因此，研究安龙县饰面用灰岩矿的地质特征，并了解其主要加工性能，对推动安龙县饰面用灰岩矿的发展具有重要的参考价值。

2. 区域地质背景

勘查区在区域上以北东 - 南西向正断层为主，发育少量北西 - 南东向及近南北向逆断层和区域向斜、背斜。其主要大地构造处于右江盆地内，位于华南板块西南缘与印支板块的结合部，是扬子陆块西南缘晚古生代至中生代的复合型裂谷盆地[9]。右江盆地西北为师宗 - 弥勒断裂，东北为普定 - 册阳断裂、紫云 - 都安断裂，南部为越北地块[10]。受区域伸展构造体制控制，勘查区发育典型的盆岭相间构造格局，

表现为断陷盆地与掀斜台地呈带状交替展布,并伴生系列阶梯状地垒-地堑构造组合[9]。该地区深部流体活动强烈,构造运动活跃,发育一系列区域性大型断裂。受多期构造-岩浆活动叠加及持续变形作用影响,最终形成以大规模褶皱-断裂体系为主体的基本构造格架[11]。这也为碳酸盐岩的形成提供了良好的构造格局(见图1),尤其对灰岩成为板材的资源利用和加工性能方面创造了良好的地质条件。

区内主要发育第四系(Q)和三叠系(T)地层。第四系呈零星分布于山麓、冲沟及低洼地区,三叠系出露地层为上统赖石科组(T_{3l})砂岩、黏土岩;中上统法郎组(T_{2-3f})灰岩、黏土岩;中统杨柳井组(T_{2y})白云岩及垄头组(T_{2l})灰岩。其中垄头组为饰面灰岩主要层位。

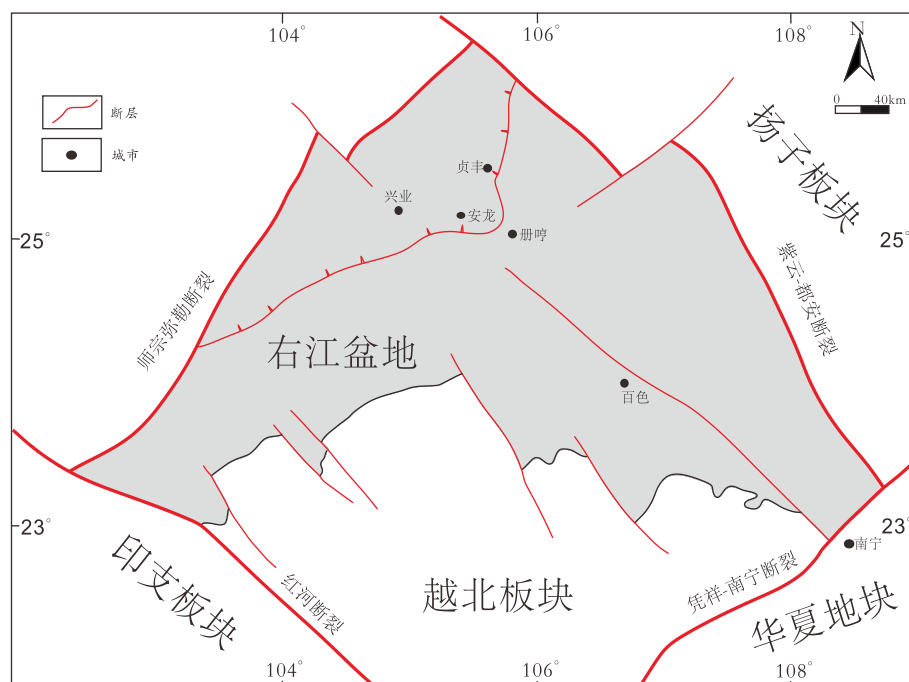


Figure 1. Regional geotechnical diagram (revised by Chai Wenju in 2024)

图1. 区域大地构造简图(据柴文举, 2024 修改)

3. 矿区地质特征

3.1. 地层

矿区出露的地层主要为三叠系中统垄头组和第四系地层。其中,第四系地层主要分布在勘查区的低洼地带,以褐黄色和土黄色的粘土为主,厚度在0.5~2.5 m。根据岩性组合特征,垄头组进一步划分为四段,具体描述如下:

第一段主要分布于勘查区南部,少量见于中部。该段岩性特征表现为浅灰色至灰白色的厚层至块状藻灰岩、条带灰岩、藻白云质灰岩、条带白云质灰岩、藻团块灰岩,夹杂豆粒灰岩、灰岩及白云质灰岩。其走向长度为434米至1439米,出露宽度为40米至365米,倾向延伸为60米至483米,厚度范围为70.35米至103.67米,平均厚度为79.85米,变化系数为28%。该段出露面积为0.20平方公里,底部由厚块状藻灰岩夹团块状豆粒灰岩组成,与第二段顶部的厚块状条带灰岩形成明显的分层标志。

第二段主要分布于勘查区中部,岩性以浅灰色至灰白色的厚层至块状泥晶条带灰岩为主,局部可见藻灰岩。由于长期遭受风化与剥蚀作用,该段岩层厚度存在一定变化。其在勘查区内沿走向的长度为73至1339米,出露宽度为48至325米,倾向延伸范围为44至485米,厚度介于51.58至68.66米之间,

平均厚度约为 60.8 米, 厚度变化系数为 15%, 出露总面积约为 0.19 平方公里。此外, 第二段底部的厚块状条带灰岩与第三段顶部的厚块状灰岩共同构成了二、三段之间的分层标志。

第三段主要分布于勘查区的中部和北部, 岩石呈浅灰色至灰白色, 以中厚层至块状泥晶条带灰岩为主, 并与中厚层至厚层状泥晶灰岩互层, 偶见藻灰岩夹层。该岩层多位于山顶区域, 因长期遭受风化和剥蚀作用, 其厚度变化较大。其走向长度介于 52 至 1216 米之间, 出露宽度为 42 至 376 米, 倾向延伸范围为 124 至 440 米, 厚度在 31.26 至 62.70 米之间, 平均厚度为 40.83 米, 厚度变化系数为 9%, 出露总面积约为 0.30 平方公里。其中, 底部的块状条带灰岩与第四段顶部的块状泥晶灰岩共同构成了第三段与第四段之间的分层标志。

第四段主要分布于勘查区北部, 岩性以浅灰色的厚层至块状泥晶灰岩为主, 偶见少量条带状白云质灰岩及白云质灰岩。该段走向长度为 32 至 680 米, 出露宽度为 65 至 405 米, 倾向延伸范围为 32 至 601 米, 厚度介于 35.30 至 121.54 米之间, 平均厚度为 75.93 米, 变化系数达 56%, 出露面积约为 0.18 平方公里。

3.2. 构造

3.2.1. 褶皱

区域内主要褶皱为雷公滩背斜。该背斜位于大田河西侧约 1 公里处, 全长约 19 公里。其北段轴线走向近 150° , 而南段则接近 0° 。核部由三叠系中统垄头组地层构成。南西翼同样为垄头组地层, 产状倾向 $230^{\circ}\sim 256^{\circ}$, 倾角为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$; 北东翼亦为垄头组地层, 但被 F5 正断层切割, 产状倾向 $42^{\circ}\sim 75^{\circ}$, 倾角为 $13^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。两翼产状局部呈现不对称性, 并具有膝状绕曲的特征。

3.2.2. 断层

区域内发育断层主要为笃山正断层、上阿河正断层。区内主要断裂构造形迹以北东展布的断层为主, 其中雷公滩断层形迹为近南北向延伸。

笃山断层位于梨树 - 笃山镇, 是一条正断层。该断层在区域内延伸长度为 10.7 公里, 走向为 65° 至 80° 方向, 倾向北西向, 切割了三叠系中统杨柳井组白云岩及垄头组灰岩。地层, 其上下盘均由该两组的地层构成, 并对笃山方向地下河管道的发育起到控制作用。

上阿河断层位于梨树河与红泥村一带, 同样为正断层。该断层在区域内长 4.4 公里, 走向为 35° 方向, 倾向北西, 倾角为 60° , 切割了三叠系中统杨柳井组白云岩及垄头组灰岩和上统赖石科组砂岩、黏土岩以及中上统法郎组灰岩、黏土岩地层。在其北西约 530 米处, 存在一条性质不明的断层, 该断层走向与上阿河断层相近, 倾向南东, 倾角为 65° 。两条断层之间发育有断夹块, 涉及的地层包括区内三叠系地层。这两条断层在北东部交汇于笃山正断层之上。

3.2.3. 节理

在勘查区内, 主要发育两组裂隙, 其走向分别为 $315^{\circ}\sim 345^{\circ}$ 和 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。这些裂隙多呈垂直于层面分布, 裂隙壁直立, 宽度范围从 1 mm 至 0.4 m 不等, 平均宽度为 1.2 cm。在山顶等特定位置, 裂隙的最大宽度可达 1.5 m, 深度在地表可见范围内为 0.52 m 至 7.87 m, 走向延伸长度在地表可见部分为 5 m 至 17 m, 平均为 6.95 m。裂隙底部常见碎石与粘土充填, 以张性裂隙为主。调查显示, 表层裂隙多发育于风化层中。

通过对勘查区节理面的统计(见表 1)及节理裂隙走向玫瑰花图分析发现(见图 2), 走向为 $332^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 和 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 的裂隙数量较多, 两侧数量逐渐递减, 裂隙宽度主要集中于 1 至 10 mm 之间。统计结果显示, 面裂隙率为 2.54%, 线裂隙率为 0.72%, 即 0.0072 条/m; 而钻孔编录后对裂隙的统计显示, 钻孔线裂隙率

为 4.38%，即 0.043 条/m。

Table 1. Statistical table of joint cracks

表 1. 节理裂隙统计表

裂隙走向(°)	条数	平均走向(°)	裂隙宽度(mm)	平均宽度(mm)	面裂隙率(%)
40~45	5	44	1~4	2.4	2.54
45~50	21	48	3~8	4.2	
50~55	18	53	3~5	3.3	
55~60	8	59	2~4	1.7	
60~65	3	63	3~4	2.7	
310~315	3	314	1~5	1.7	
315~320	6	317	2~5	2.8	
320~325	8	324	2~7	3.4	
325~330	7	326	1~2	1.2	
330~335	13	333	1~11	2.5	
335~340	14	339	1~8	2.4	
340~345	4	344	3~6	4.4	
345~350	3	346	2~7	3.2	
350~355	2	352	2~3	2.5	

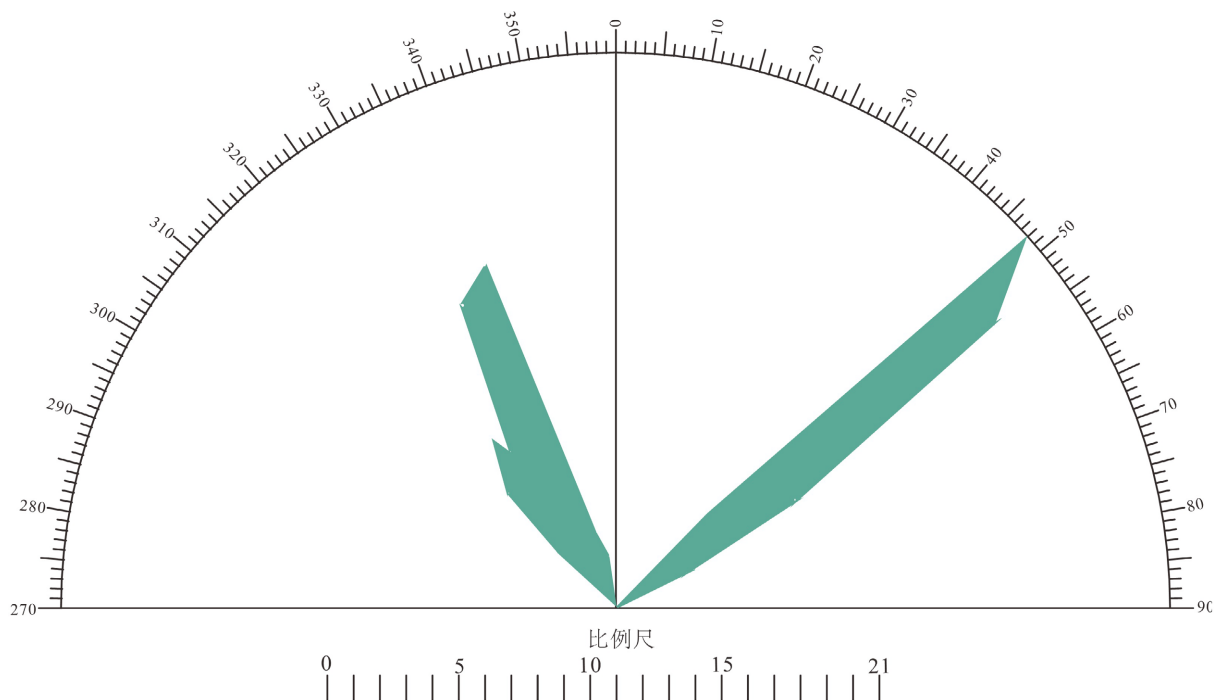


Figure 2. Rose diagram of joint orientation

图 2. 节理走向玫瑰花图

综合上述数据，根据勘查线的线裂隙率及钻孔线裂隙率计算得出，勘查区内的线裂隙率为 2.53%，即

0.015 条/m，面裂隙率为 2.54%。此外，裂隙在钻孔中表现为间断发育，未见延伸至地表的现象，对矿体的影响较小。

4. 矿床地质特征

4.1. 矿体特征

矿区内的饰面石材用灰岩矿赋存于三叠系中统垄头组地层中，主要岩性为泥晶灰岩、生物碎屑灰岩及白云质灰岩。矿体呈层状产出，整体裸露于地表，与地层产状一致，产状为 $9^{\circ}\sim 345^{\circ}\angle 12^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 。矿体沿 NE-SW 方向延伸，长度 70~1500 米，出露宽度 40~380 米，面积约为 0.9 平方公里，出露高程+978~+1126 米，在走向和倾向上均表现出良好的稳定性和连续性。

矿层单层厚度为 0.5~5.2 米，多数超过 1 米，以块状构造为主。矿体表面覆盖有 0.40~5.87 米厚的风化层，未见夹石及顶板。根据岩石组合特征，将矿体划分为四个矿层：

- I号矿层(垄头组第一段)：赋存豆粒灰系列和莫尼卡灰系列石材；
- II号矿层(垄头组第二段)：赋存豆粒灰、莫尼卡灰、木纹和维纳灰系列石材；
- III号矿层(垄头组第三段)：赋存木纹和维纳灰系列石材；
- IV号矿层(垄头组第四段)：赋存维纳灰系列石材。

矿体构造特征表现为发育两组主要节理：一组产状为 $132^{\circ}\sim 165^{\circ}\angle 24^{\circ}\sim 56^{\circ}$ ，另一组产状为 $220^{\circ}\sim 265^{\circ}\angle 24^{\circ}\sim 59^{\circ}$ ，节理密度为 2~7 条/米。地表岩溶洼地及岩溶漏斗的发育情况分析表明，岩溶裂隙主要集中在最低侵蚀基准面附近，以小型溶洞和溶蚀裂隙为主，部分区域存在泥质充填现象，地下水活动相对活跃。在勘查区内共发现 4 处溶洞发育，面岩溶率为 0.23‰。钻探结果显示，勘查区内 4 个钻孔分别见溶洞发育，单孔岩溶率分别为 0.74%、2.00%、0.44%和 1.44%，整体钻孔岩溶率为 0.32%。矿体厚度总体稳定，各矿层之间无明显地质界线，过渡自然，整体构成一个连续且稳定的饰面石材矿层(见图 3)。



Figure 3. Overview of the mining area
图 3. 矿区概况

4.2. 矿石类型

4.2.1. 矿石自然类型

矿区内的饰面用灰岩矿石类型丰富，依据其结构与构造特征，可划分为七种主要的自然类型：泥晶灰岩、泥晶条带灰岩、亮晶条带灰岩、亮晶藻灰岩、亮晶鲕灰岩、泥晶藻(鲕)灰岩以及泥-亮晶豆(鲕)粒灰岩。这些矿石均以无色方解石为主要矿物成分，展现出典型的泥晶-亮晶结构和鲕粒结构，在构造上则以块状和条带状为主。

从工业应用的角度来看，该矿区的矿石属于石灰岩类饰面用灰岩，主要岩性涵盖鲕粒灰岩、条带鲕粒灰岩及花斑状灰岩。实地调研表明，周边石材企业通常将其加工为台阶踏步石、路肩石、碑牌以及户外地面砖等产品。这些产品的用途更多取决于矿石的物理力学性能，而非其饰面花纹特征。

值得注意的是，目前国内尚未形成统一的饰面石材分类标准。除上述主要类型外，矿区还存在一些特殊类型的矿石，如弱白云石化藻灰岩和泥晶豆(鲕)粒灰岩。这些不同类型的矿石不仅反映了沉积环境和成岩作用的差异，也为石材的多元化开发和利用提供了重要的物质基础。因此，建议后续研究应着重探讨各类矿石的加工工艺适应性及其与物理性能之间的对应关系。

4.2.2. 花色品种

主要为维纳灰系列、木纹系列、莫尼卡灰系列、豆粒灰系列石材品种。

维纳灰系列石材：对应岩石类型为泥晶灰岩，板材饰面以浅灰-灰色为底色，局部含少量生物碎屑

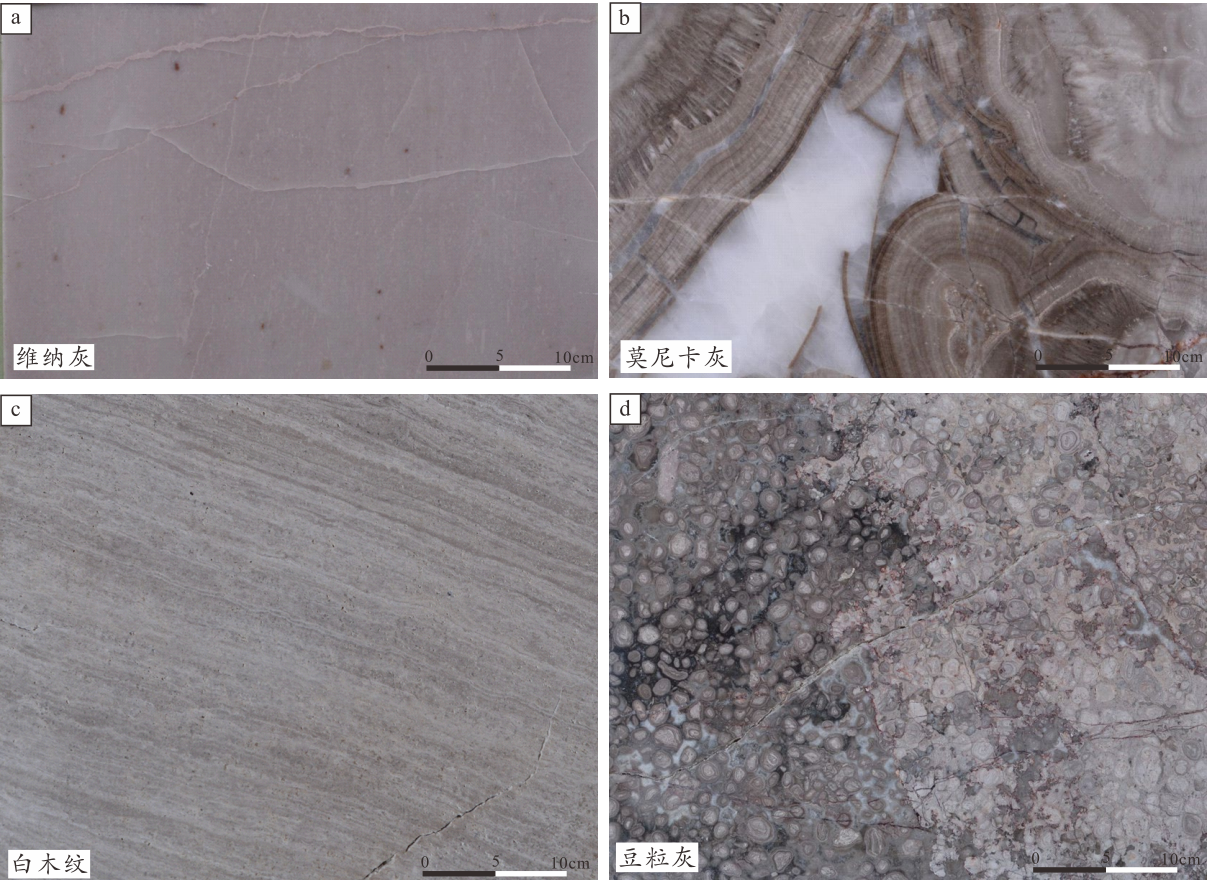


Figure 4. Characteristics of board color and variety
图 4. 板材花色品种特征

及岩屑,发育微裂隙为乳白色方解石充填(见图 4(a))。

莫尼卡灰系列石材:对应岩石类型为泥晶藻(鲕)灰岩、弱白云石化藻灰岩、泥晶藻(鲕)灰岩,板材型面以浅灰-灰色为底色,呈水平、绕区条带状纹路,局部含少量生物碎屑及豆粒,发育微裂隙为乳白色方解石充填(见图 4(b))。

木纹系列石材:对应岩石类型为泥晶条带灰岩、亮晶条带灰岩,板材型面以浅灰白、浅灰-灰色为底色,呈近直线条带状纹路,局部含少量生物碎屑及岩屑,发育微裂隙为乳白色方解石充填(见图 4(c))。其中颜色为浅灰白色的为白木纹,颜色为灰、深灰色的为灰木纹,白木纹和灰木纹呈互层状态,不能单独分层。

豆粒灰系列石材:对应岩石类型为泥晶豆(鲕)粒灰岩,板材型面以浅灰-灰色为底色,呈椭圆、圆状纹路,局部含少量生物碎屑及豆粒,发育微裂隙为乳白色方解石充填(见图 4(d))。

4.3. 矿石组构

4.3.1. 结构和构造

勘查区饰面用灰岩主要为中-厚层状块状构造产出,矿石整体性良好,质地均匀,延走向和倾向延伸连续、稳定,部分夹薄层泥质灰岩、白云质灰岩。

勘查区饰面用灰岩结构主要有泥晶、条带、鲕粒和生物碎屑结构。

泥晶结构(见图 5(a), 图 5(b)):几乎完全由泥晶组成,主要矿物成分为微晶方解石(CaCO_3),其含量超过 90%。次要矿物包括少量白云石、黏土矿物及有机质。方解石晶体呈他形至半自形晶,晶面发育不完全。单晶粒径范围为 $0.5\sim 4\ \mu\text{m}$ 。晶体间的接触关系以面接触为主,局部呈现点接触,晶体排列方式为随机定向,无明显优选方位。结构中含有生屑泥晶,生屑组分占比约为 10%~30%。

条带灰岩(见图 5(c), 图 5(d)):方解石含量为 85%~92%,黏土矿物占比 5%~12%,有机质含量为 0.3%~1.2%,黄铁矿微晶含量 1%~3%,粒径范围为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 。其韵律型明暗条带等厚交替,单层厚度为 1-5 mm。不规则型条带厚度变化超过 50%。总体岩石以含泥颗粒为主要支撑结构,生屑以腕足、介形虫和海百合为主,形态多为自形至他形。

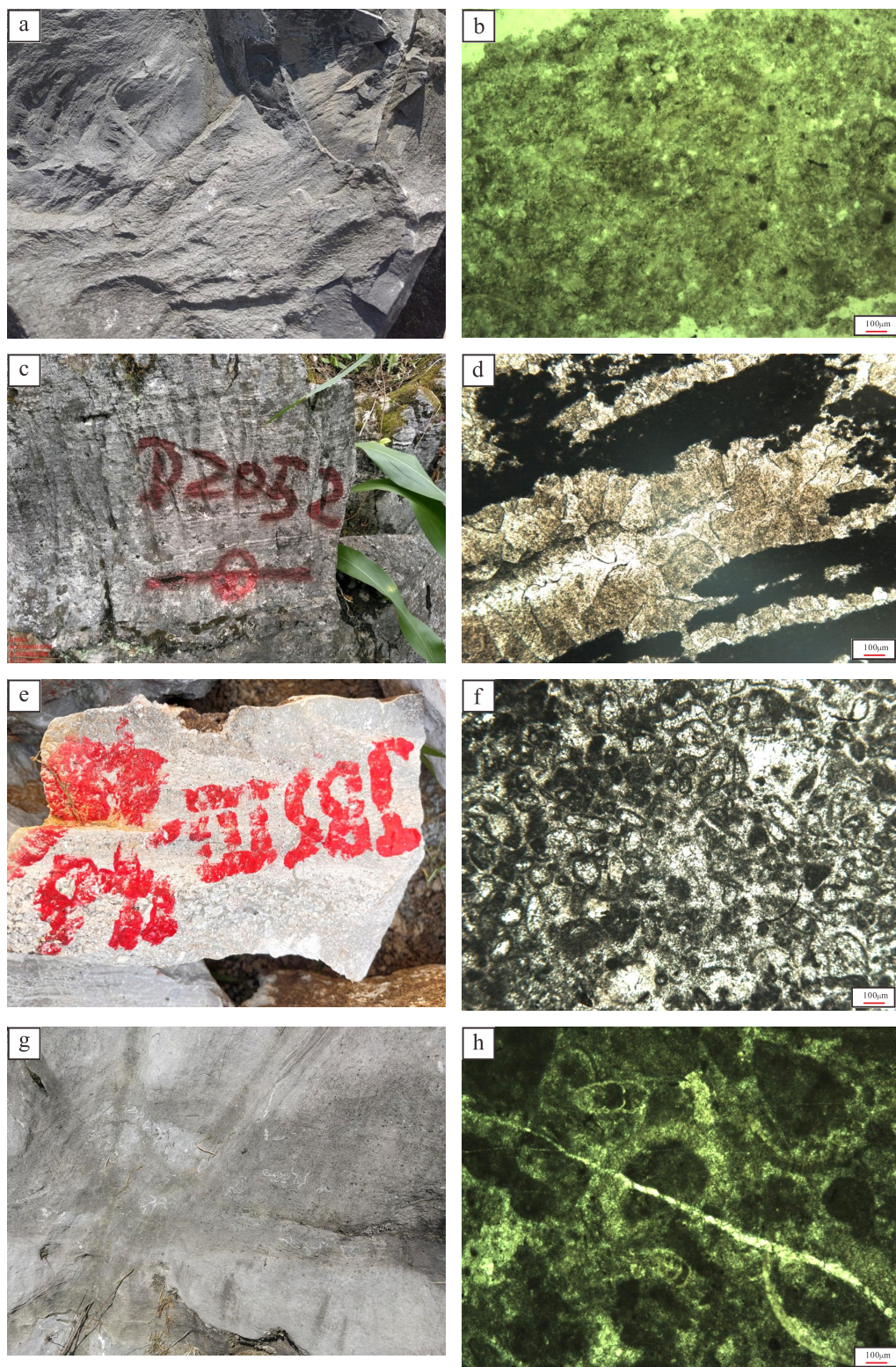
鲕粒结构(见图 5(e), 图 5(f)):这种类型的灰岩在勘查区较为常见,矿层通常较为稳定。鲕粒灰岩在矿层中的分布并不固定,主要由鲕粒矿物集合体组成,形态多为浑圆状或椭圆状,粒径一般在 $0.5\sim 1\ \text{cm}$ 之间。这些鲕粒集合体的分布无明显规律,可能呈现团聚状随机分散,也可能较为均匀地分布。岩石以鲕粒为主要支撑结构,并呈现亮晶胶结特征。生物碎屑以有孔虫和粗枝藻为主,少量包含海百合和腕足类。有孔虫形态为自形或半自形,部分轻微或强泥晶化;粗枝藻和海百合为他形,轻微泥晶化,粒度多为中细砂级,分选良好。

生屑碎屑结构(见图 5(g), 图 5(h)):主要矿物为方解石,其含量介于 70%至 95%之间, CaCO_3 纯度高于 90%。次要矿物包括黏土矿物和黄铁矿,其中黄铁矿呈星点状分布。有机质主要赋存于生物体的腔孔中,而生物成因的方解石几乎完整地保留了原始生物结构。岩石以含泥颗粒为主要支撑结构,生物碎屑以正常盐度环境下的头足类和海百合为主,其晶形从自形到半自形不等,分选程度从中等到较差。

4.3.2. 化学成分分析

对勘查区四种饰面石材(维纳灰、豆粒灰、木纹、莫尼卡灰)的化学成分进行了系统测试(见表 2),检测项目包括 CaO 、 MgO 、 SiO_2 、 TFe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 SO_3 及烧失量(L.O.I.)。数据以最大值、最小值、平均值形式呈现,结果显示不同品种石材的化学成分存在显著差异。

维纳灰的 CaO 含量稳定(35.87%), MgO 高达 17.8%,表明其为高镁石灰岩,可能属于白云质灰岩。豆粒灰的 CaO 含量最高(51.78%), MgO 最低(3.5%),符合纯石灰岩特征。木纹和莫尼卡灰的 CaO 与 MgO



a、b: 泥晶灰岩手标本和镜下特征; c、d: 条带状灰岩手标本和镜下特征; e、f: 鲕状灰岩手标本和镜下特征; g、h: 生物碎屑灰岩手标本和镜下特征

Figure 5. Characteristics of limestone structure construction for decoration

图 5. 饰面用灰岩结构构造特征

呈宽范围分布(CaO: 35.87%~51.78%; MgO: 3.5%~17.8%), 暗示其可能为混合成因或存在矿物分带性。所有品种的 SiO₂ 含量均低于 0.8%, TF₂O₃ (0.059%~0.077%)和 Al₂O₃ (0.11%~0.15%)含量极低, 说明矿石杂质少, 适合高品级饰面用途。K₂O、Na₂O、SO₃ 含量均未超过 0.04%, 进一步验证了石材的化学稳定性。

烧失量普遍较高(43.95%~45.74%), 与碳酸盐矿物(如方解石、白云石)在高温下的分解行为一致, 符合石灰岩的典型特征。维纳灰的 MgO/CaO 比值(≈0.5)显著高于其他品种, 可能反映原生沉积环境富镁或后期白云石化作用。豆粒灰的化学成分均一性可能指示单一矿物组成或勘查区域地质条件稳定。所有品种的化学成分均满足饰面石材低杂质要求(如 SiO₂ < 1%), 其中豆粒灰因高 CaO、低 MgO 特性, 可能更易抛光且耐候性佳; 维纳灰的高 MgO 含量可能增加机械加工难度, 但可提升抗酸蚀性能, 适用于户外环境; 烧失量数据提示需控制烧结工艺温度以避免石材失重开裂。

Table 2. Statistical table of chemical composition test results
表 2. 化学成分测试结果统计表

石材品种		检测项目 W(%)								
		CaO	MgO	SiO ₂	TFe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	L.O.I
维纳灰	最大值	35.87	17.8	0.76	0.077	0.15	0.029	0.034	0.013	45.74
	最小值	35.87	17.8	0.76	0.077	0.15	0.029	0.034	0.013	45.74
	平均值	35.87	17.8	0.76	0.077	0.15	0.029	0.034	0.013	45.74
豆粒灰	最大值	51.78	3.5	0.8	0.059	0.11	0.0091	0.016	0.04	43.95
	最小值	51.78	3.5	0.8	0.059	0.11	0.0091	0.016	0.04	43.95
	平均值	51.78	3.5	0.8	0.059	0.11	0.0091	0.016	0.04	43.95
木纹	最大值	51.78	17.8	0.8	0.077	0.15	0.029	0.034	0.04	45.74
	最小值	35.87	3.5	0.76	0.059	0.11	0.0091	0.016	0.013	43.95
	平均值	43.83	10.65	0.78	0.07	0.13	0.02	0.03	0.03	44.85
莫尼卡灰	最大值	51.78	17.8	0.8	0.077	0.15	0.029	0.034	0.04	45.74
	最小值	35.87	3.5	0.76	0.059	0.11	0.0091	0.016	0.013	43.95
	平均值	43.83	10.65	0.78	0.07	0.13	0.02	0.03	0.03	44.85

4.4. 物理性能及放射性分析

1) 物理性能

本测试对四种饰面石材(维纳灰、豆粒灰、木纹、莫尼卡灰)的五项关键物理性能指标进行了系统检测(见表 3), 包括体积密度(2.29~2.87 g/cm³)、吸水率(0.06%~1.92%)、压缩强度(干燥 45~115 MPa, 水饱和 57~161 MPa)、弯曲强度(干燥 10.5~19.3 MPa, 水饱和 9.1~19.7 MPa)耐磨度(10.4~19.7 l/cm³)。所有测试数据均符合《饰面石材矿产地质规范》(DZ/T 0291-2015)的最低要求, 但各品种表现差异显著(表 2)。豆粒灰表现最优: 密度最高(2.85 g/cm³), 吸水率最低(0.49%), 完全符合高密度石材标准, 维纳灰吸水率最高(1.81%), 接近中密度石材上限。木纹和莫尼卡灰密度相近(约 2.67 g/cm³), 但吸水率波动较大。

在压缩强度方面, 干燥状态测试则木纹 > 豆粒灰 > 维纳灰 > 莫尼卡灰, 水饱和状态则豆粒灰出现反常增强(104 MPa)。弯曲强度的木纹表现最优(干燥 15.5 MPa)。各品种水饱和和状态强度普遍下降,

仅豆粒灰例外。耐磨性能中木纹最佳(15.5 l/cm³)，维纳灰最差(12.3 l/cm³)，水饱和状态下耐磨度变化不显著。

根据测试结果分析，加工高密度石材(豆粒灰)需采用金刚石工具，注意木纹的各向异性可能影响加工精度。测试数据表明，豆粒灰完全符合高密度石材标准，是优质饰面材料，木纹具有最佳耐磨性能，适合高磨损场景，各品种性能差异主要可能与矿物组成和结构特征相关，对石材加工需要进一步深入研究。

Table 3. Statistical table of physical performance test results of ore
表 3. 矿石物理性能测试结果统计表

项目		体积密度 (g/cm ³)	吸水率/%	压缩强度/Mpa		弯曲强度/Mpa		耐磨度 (l/cm ³)
类别	结果			干燥	水饱和	干燥	水饱和	
维纳灰	含量	2.66~2.73	1.79~1.83	51~102	61~74	11.1~13.3	9.7~10.2	13~22
	平均值	2.69	1.81	75	66	12.3	9.95	17.5
豆粒灰	含量	2.84~2.87	0.45~0.53	67~92	87~117	10.5~12.2	11.9~12.2	20~21
	平均值	2.85	0.49	77	104	11.35	12.5	20.5
木纹	含量	2.43~2.77	0.06~1.73	76~115	57~82	12.5~19.3	10.4~19.7	14~20
	平均值	2.69	0.65	99	64	15.5	14.9	17.1
莫尼卡灰	含量	2.29~2.75	0.07~1.92	45~71	58~161	10.9~16	9.1~13.3	16~19
	平均值	2.66	0.54	60	95	13.4	11.4	17.3
DZ/T 0291— 2015 规范指标	低密度	≥1.76	≤12.0	≥12.0		≥2.9		≥10
	中密度	≥2.16	≤7.5	≥28.0		≥3.4		≥10
	高密度	≥2.56	≤3.0	≥55.0		≥6.9		≥10

2) 放射性

根据测试结果(见表 4)，放射性核素的分布特征如下：钍系元素(CTh)在豆粒灰中显著偏高，达到 50.17 Bq/kg，约为其他品种的 3.5 至 6.9 倍，其余品种范围为 5.16~12.58 Bq/kg。高钍含量可能指示样品中含有独居石等副矿物；镭系元素(CRa)在维纳灰中最高，为 13.55 Bq/kg，而木纹(6.72~12.21 Bq/kg)和莫尼卡灰(6.75~9.21 Bq/kg)的波动较为明显，其与铀矿化之间的相关性仍需进一步验证；钾同位素(CK)在维纳灰中呈现异常高值，达 489.5 Bq/kg，可能与其含钾长石矿物有关，而豆粒灰中钾同位素最低，仅为 46.68 Bq/kg，表明其贫钾特征。

通过放射性安全评价分析显示，内照射指数(IRa)所有样品均 ≤0.1 (国标 A 类限值为 1.0)，其中莫尼卡灰表现最优，仅为 0.05。外照射指数(Ir)所有样品均 ≤0.2 (国标 A 类限值为 1.3)，木纹和莫尼卡灰的部分样品甚至低于 0.1。综合分析认为，所有品种的放射性安全等级均满足 A 类装饰材料的要求(Ira≤1.0, Ir≤1.3)，可无限制地用于各类建筑装饰。优选材料为莫尼卡灰，其综合放射性最低(IRa 0.05, Ir 0.05)，其次是木纹(IRa 0.07, Ir 0.1)。

综上所述，放射性指标符合《建筑材料放射性核素限量(GB6566~2010)》及《饰面石材矿产地质勘查规范》(DZ/T 0291~2015)中 A 类装饰材料规定要求，具有良好的使用安全性。不同品种间的放射性特征差异显著：维纳灰为高钾型(489.5 Bq/kg)，豆粒灰为高钍型(50.17 Bq/kg)，而木纹和莫尼卡灰则属于低放射性型。

Table 4. Statistical table of radioactivity test results
表 4. 放射性测试结果统计表

石材名称		检测项目				
		钍(CTh)Bq/Kg	镭(CRa)Bq/Kg	钾(CK)Bq/Kg	内照指数 IRa	外照指数 Ir
维纳灰	最大值	12.56	13.55	489.5	0.1	0.2
	最小值	12.56	13.55	489.5	0.1	0.2
	平均值	12.56	13.55	489.5	0.1	0.2
豆粒灰	最大值	50.17	13.2	46.68	0.1	0.2
	最小值	50.17	13.2	46.68	0.1	0.2
	平均值	50.17	13.2	46.68	0.1	0.2
木纹	最大值	12.58	12.21	196.35	0.1	0.1
	最小值	5.16	6.72	44.11	0	0.1
	平均值	9.18	9.72	96.39	0.07	0.1
莫尼卡灰	最大值	8.61	9.21	66.06	0.1	0.1
	最小值	5.95	6.75	36.51	0	0
	平均值	7.28	7.98	51.29	0.05	0.05

5. 分析与讨论

5.1. 加工技术方法

本次工作以不小于图解与矿山收集荒料规格的荒料为对象，收集了勘查区周边同地层的生产矿山矿石的加工技术性能资料，对矿石的锯、切、磨、抛等各工序加工技术性能进行了了解。

矿山开采荒料后运送至加工厂，经锯、切、磨、抛等加工工序后成最终成品销售。

矿山开采：矿山开采首先需要剥离矿层上方的覆盖物和风化层，使矿层完全裸露。接着按照一定的边坡角度形成台阶，从上至下依次使用绳锯或圆盘锯对矿层进行切割，制成毛坯荒料。随后对毛坯荒料进行简单铲平和整饰，形成成品荒料，并通过汽车运输至石材加工厂。

板材加工：荒料的加工通常采用金刚石圆盘锯或条形锯进行锯解，将其加工成石板。对于材质较软的石材，也可使用金刚砂锯进行加工。

板材抛光：石材抛光一般采用毛毡加蜡，并配合不同颗粒粗细的金刚砂粉末进行处理。经过抛光后的板材被称为光板。

板材成品：光板通过切边机切割成所需的尺寸规格，或者根据客户需求定制特定规格进行进一步加工，最终成为成品并投入销售(见图 6)。

5.2. 装饰性能

5.2.1. 光泽度

根据测试数据分析(见表 5)，其显著性特征如下：维纳灰表现最优，平均光泽度最高(95.21 Gu)，且离散性最小(CV=4.5%)；豆粒灰与木纹表现出显著的各向异性，极差分别达到 27.6 Gu 和 27.7 Gu；莫尼卡灰则展现出最佳稳定性，在相近平均值下变异系数最低(5.7%)。维纳灰的高 MgO 含量(17.8%)促进了白云石晶体的定向排列，从而形成均匀的反射面；木纹的层状结构导致了 7.5%的变异系数，反映了沉积构造

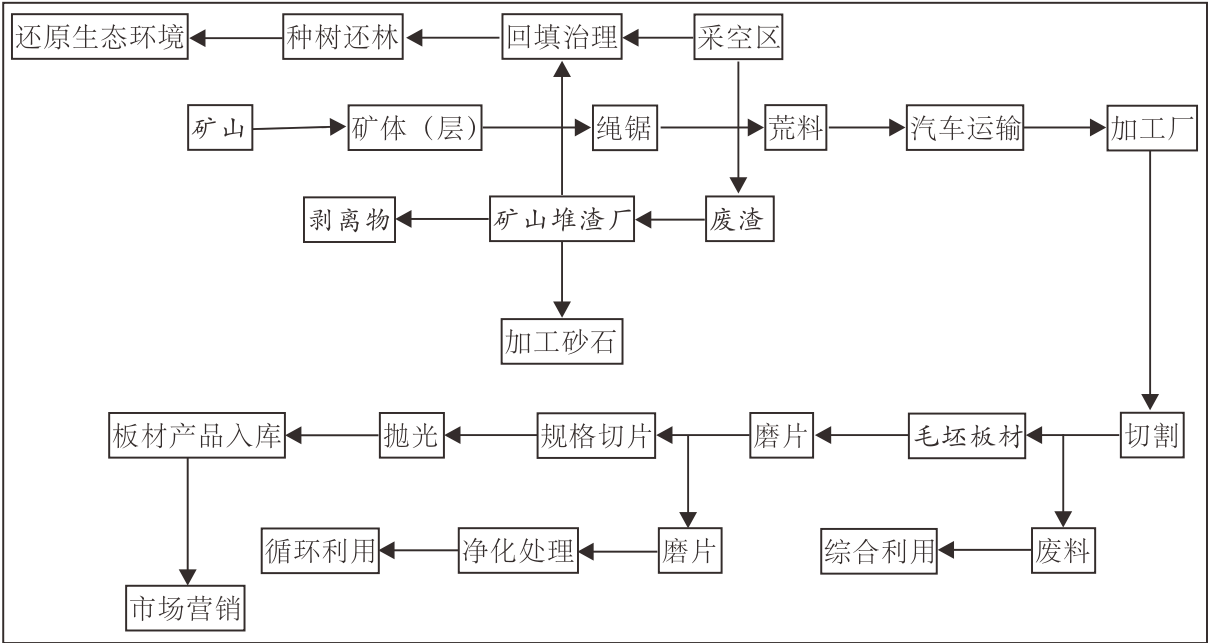


Figure 6. Stone mining and processing process flow chart
图 6. 石材开采与加工工艺流程图

对其光学性能的影响；豆粒灰的高密度(2.85 g/cm³)增加了抛光难度，建议优化磨料粒度配比以提升加工效果。

对其标准化应用进行评价与符合性评估：所有样品均满足 DZ/T 0291-2015 高等级饰面要求(≥70 Gu)，其中维纳灰更是达到了特级石材标准(≥90 Gu)。

综合分析表明，规范化测试体系有效验证了四种石材在光学性能上的差异：维纳灰作为优选的高光泽稳定型材料(95.21 ± 4.28 Gu)，具备优异的一致性；木纹因其较大的极差(27.7 Gu)而展现出最强的装饰可塑性；莫尼卡灰凭借最低的变异系数(CV = 5.7%)表现出最佳的工艺鲁棒性。

Table 5. Glossiness test data statistics (Unit: Gu)
表 5. 光泽度测试数据统计(单位: Gu)

石材品种	最小值	最大值	平均值	标准偏差*	变异系数(%)
维纳灰	87.7	104.8	95.21	4.28	4.5
豆粒灰	76.8	104.4	92.20	6.90	7.5
木纹	73.2	100.9	92.28	6.93	7.5
莫尼卡灰	79.1	100.2	92.32	5.28	5.7

*注：标准偏差通过极差法估算($s \approx R/2.5$)。

5.2.2. 装饰性能

石材装饰主要用于酒店、宾馆、礼堂、家居等，根据石材颜色均匀性、协调性、花纹等变化用途各异。一般情况下，颜色素静、色调单一暖色调石材可用于大面积墙体和地板铺设；冷色调石材主要用于点缀、突出之用，如酒店大厅背景墙框边、地角线、门套等；具有花纹石材可根据花纹形状不同行进拼花，根据不同需求拼结各异图案，主要用于豪华场所背景墙。

根据上述石材用途，结合四个勘查区内石材品种系列分析，豆粒灰、维纳灰系列石材可用于大面积

墙体和地板铺设装饰,可用于地角线、门套、背景墙框边等点缀装饰;木纹及莫尼卡灰用于大面积墙体和地板铺设,根据不同需求拼结各异图案,主要用于豪华场所背景墙及大厅铺设,档次较高;晶墨玉、残雪石材可用于大面积墙体和地板铺设装饰,可用于地角线、门套、背景墙框边等点缀装饰。

6. 结论

地质特征方面:矿床受北东向断裂及雷公滩背斜控制,垄头组灰岩可划分为四个连续矿层,平均厚度为 79.85 米,节理密度为 2~7 条/米,岩溶发育较弱(占 2.52%)。矿石类型与沉积环境密切相关:豆粒灰反映高能鲕粒滩相,而维纳灰则代表局限台地相。

材料性能方面:豆粒灰表现出最优综合性能(抗压强度达 104 MPa,符合高密度石材标准);木纹系列具有独特的装饰效果(光泽度极差为 27.7 GU),但表现出明显的各向异性。此外,其放射性安全性能优异(莫尼卡灰 IRa 值仅为 0.05)。

工业应用建议:开采工艺方面,推荐采用金刚石绳锯切割以提高成材率($\geq 53\%$);加工优化上,豆粒灰宜采用多级抛光(80~3000 目),木纹系列则需顺纹理进行加工。

产品定位:豆粒灰适用于高端地坪铺设,木纹灰岩则更适合艺术装饰用途。

后续研究方向:应进一步开展微观结构与光泽度的定量关系研究,建立全生命周期性能数据库,并开发低损耗加工工艺。

基金项目

贵州省毕节—黔西南黔石资源精查项目。

参考文献

- [1] 冉文瑞,王智勇,曾昭霞. 贵州石材资源及开发利用[J]. 矿产勘查, 2020, 11(4): 711-717.
- [2] 陈明华,冉维宇,蒋良兵. 贵州省天然饰面石材发展空间及布局分析[J]. 石材, 2021(2): 32-39.
- [3] 王振生,马腾飞. 河南省淇县二道庄矿区饰面石材用灰岩矿地质特征及开发利用前景[J]. 矿产勘查, 2022, 13(8): 1143-1149.
- [4] irin, E., Bonduà, S. and Elkarmoty, M. (2021) Environmental and Economic Optimization for Block Cutting of Dimension Stones in a Limestone Quarry. *Resources Policy*, 74, Article ID: 102396. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102396>
- [5] 陈国鑫,金齐钊. 贵州金沙长坝饰面用灰岩矿床地质特征及开发利用前景分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2024(6): 43-47, 51.
- [6] 奉贻龙. 广西南丹里湖八角当饰面用灰岩矿地质特征及开发利用前景[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2023(4): 37-39.
- [7] 刘桥. 贵州省安龙县坡歪矿区饰面石材用灰岩矿床地质特征及开发利用前景分析[J]. 资源信息与工程, 2024, 39(1): 41-45, 49.
- [8] 童俊,蒋韬,李云. 2022. 黔西南州安龙县“十四五”石材产业发展内部环境分析[J]. 石材, 2022(3): 40-44, 62.
- [9] 张能,黄启明,谭建政,等. 桂西右江盆地伸展构造特征[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 953-968.
- [10] 范军. 黔西南戈塘大型金矿床地质地球化学及成因研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [11] 柴文举. 黔西南戈塘金矿三维地质建模与成矿分析[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2024.