

广西贵港市港南地区玄武岩地质特征及开发利用前景浅析

陈涛

华润水泥(贵港)有限公司港南分公司, 广西 贵港

收稿日期: 2025年7月24日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月8日

摘要

本文以广西贵港市港南地区玄武岩为研究对象, 通过野外地质调查、岩相学分析、地球化学测试及物理性能试验, 系统研究了其地质特征、矿床成因及开发利用前景。研究表明, 该区玄武岩赋存于大瑶山凸起带南翼博白-岑溪深大断裂带控制的登山岭岩体(J₂β)上部岩相带, 呈似层状产出, 属亚碱性系列, 具有典型的斑状结构、块状、气孔及杏仁构造。主量元素显示其富集SiO₂ (42.60%~53.12%, 平均46.79%)、Al₂O₃ (9.09%~15.14%)及Fe₂O₃ (8.64%~12.60%), 碱总量(K₂O + Na₂O)为5.86%。矿石物理性能优异, 饱和抗压强度63.9 MPa~123 MPa (均值100.3 MPa)、吸水率0.51%~0.82% (均值0.63%)、磨耗损失率12.6%, 且具有低碱活性(膨胀率 < 0.01%)与符合A类建材标准的放射性水平(I_{ra} ≤ 0.4, I_γ ≤ 0.7)。矿床成因受印支-燕山期陆内裂谷背景下的基性岩浆侵入-喷溢作用及区域构造控制, 浅部风化带与放射性异常区需分级开发。综合评价表明, 该玄武岩矿床兼具优质建筑集料与高端新材料开发的潜力, 研究结果为区域玄武岩资源的高效利用提供了地质参考依据。

关键词

玄武岩矿, 地质特征, 矿床成因, 开发利用

A Brief Analysis of the Geological Characteristics and Development & Utilization Prospects of Basalt in Gangnan Area, Guigang City, Guangxi

Tao Chen

Gangnan Branch of China Resources Cement (Guigang) Co., Ltd., Guigang Guangxi

Received: Jul. 24th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 8th, 2025

Abstract

This study focuses on the basalt in Gangnan District, Guigang City, Guangxi, using field geological surveys, petrographic analysis, geochemical testing, and physical property experiments to systematically investigate its geological characteristics, ore genesis, and development potential. The research reveals that the basalt occurs in the upper lithofacies zone of the Dengshangling pluton ($J_2\beta$), which is controlled by the Baise-Cenxi deep fault zone in the southern wing of the Dayaoshan uplift belt. It is distributed in a sublayered manner, belongs to the subalkaline series, and exhibits typical porphyritic texture, massive structure, as well as vesicular and amygdaloidal textures. Major element analysis shows that it is rich in SiO_2 (42.60%~53.12%, average 46.79%), Al_2O_3 (9.09%~15.14%), and Fe_2O_3 (8.64%~12.60%), with a total alkali content ($K_2O + Na_2O$) of 5.86%. The ore exhibits excellent physical properties, including a saturated compressive strength of 63.9 MPa~123 MPa (average 100.3 MPa), water absorption of 0.51%~0.82% (average 0.63%), and abrasion loss of 12.6%. It also demonstrates low alkali reactivity (expansion rate $< 0.01\%$) and radiation levels that meet Class A building material standards ($IRa \leq 0.4$, $I\gamma \leq 0.7$). The genesis of the deposit is controlled by mafic magmatic intrusion and extrusion under the intracontinental rift setting of the Indosinian-Yanshanian period, as well as regional tectonics. The shallow weathering zone and areas with radioactive anomalies require graded development. Comprehensive evaluation indicates that this basalt deposit has potential for both high-quality construction aggregate and advanced new material development. The research findings provide a geological reference for the efficient utilization of basalt resources in the region.

Keywords

Basalt Ore, Geological Characteristics, Deposit Genesis, Development and Utilization

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

玄武岩作为基性喷出岩的典型代表，其矿物组成以辉石和基性斜长石为主，次要矿物包括钛铁氧化物(如磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿等)、正长石、石英或似长石以及沸石等[1][2]。该岩石具有高强度、优异耐磨性和良好耐腐蚀性等特性，在建筑、基础设施及高新技术领域具有重要的应用价值，广泛应用于化工、冶金、电力等工业部门。其突出的耐磨、抗压及抗腐蚀性能，使其成为公路、机场跑道及建筑装饰工程的理想材料[3]-[6]。玄武岩在全球分布广泛，我国玄武岩的应用呈现明显的区域分布特征。目前国内玄武岩矿石约 98.5%直接用于建筑领域，仅 1.5%应用于高端领域。市场规模从 2015 年的 10.40 亿元增长至 2022 年的 22.41 亿元，年均复合增长率达 11.59%，显示出显著的投资潜力和良好的发展前景[3]。随着社会经济的发展，玄武岩作为战略性资源，在工程建设及新型材料制造领域的应用将日益广泛[7]。大陆弧玄武岩在成因和成分特征上与洋内弧玄武岩存在一定差异。大陆弧环境产出大量钙碱性玄武岩，并伴有安山质、英安岩和流纹岩等岩浆岩组合，其成分特征较洋内弧玄武岩更为单一[8]。前人已采用多种方法对玄武岩的成因开展了大量研究[8]-[12]，但其成因机制等仍存在诸多争议。典型玄武岩的 SiO_2 含量介于 45%~53%之间，但由于构造环境及地幔源区的差异，其成分具有一定的变化范围。玄武岩通常具有斑状

结构, 且气孔构造和杏仁状构造发育, 不同地质区域的玄武岩表现出独特的地质特征和成分变化规律。系统研究玄武岩的地质特征, 不仅有助于深入理解其成因机制, 还能为资源开发利用前景评估提供地质依据, 为玄武岩资源的合理利用提供重要的参考资料。

2. 区域地质背景

该区域大地构造位置位于华夏古板块西南活动边缘的大瑶山凸起带南缘, 处于广西山字型构造前弧东翼地带。研究区地理范围涵盖桂东南梧州至玉林地区, 地处华南板块西南段扬子与华夏板块结合带。区域构造格局主要受吴川-四会断裂、陆川-岑溪断裂及博白-梧州断裂(统称博白-岑溪深大断裂带)、信宜-廉江断裂、黎村-文地断裂等多条北东-南西向断裂系统控制[13][14]。该区经历了多期构造运动叠加, 断裂与褶皱构造发育显著, 岩浆热液活动频繁, 形成复杂的地质环境。区内褶皱构造总体呈近北东向展布, 以木格背斜为典型代表; 断裂构造以北东向和北西向最为发育, 其次为近东西向断裂, 具有多期活动特征: 加里东期表现为张性特征, 对晚古生代沉积建造具有明显的控制作用; 印支期以压性活动为主; 燕山期则呈现左旋剪切特征并具有控岩作用, 后期被北西向断裂所切割改造。

3. 矿区地质特征

3.1. 地层

区域内出露的地层包括寒武系(ϵ)、泥盆系(D)、白垩系(K)及第四系(Q)(图 1)。其中: 寒武系主要分布于研究区北部, 呈北东-南西向展布, 岩性以砂岩、长石石英砂岩夹泥岩为主。在岩体接触带发育热液变质作用, 形成角岩或角岩化砂岩。泥盆系呈多块段分布, 集中分布于研究区东北部, 整体走向亦为北东-南西向。该地层为一套滨浅海相准地台型沉积建造, 底部为细粒石英砂岩, 上部为泥质粉砂岩夹少量不等粒石英杂砂岩。白垩系分布于研究区西南部, 呈北东-南西向展布, 岩性以紫红色厚层状砂岩、不等粒砂岩、粗粒长石石英砂岩为主, 夹泥质粉砂岩。第四系主要分布于研究区东北部和西北部, 主要由残坡积成因的粘土、亚粘土及岩屑砾石等物质组成。

3.2. 构造

研究区内褶皱与断裂构造发育显著, 褶皱以木格背斜为主控构造, 轴向呈北东 55° 延伸, 长约 22 km, 核部为寒武系基底, 两翼为泥盆系地层, 受岩浆与断层作用影响岩层产状变化明显。断裂构造主要发育北东向、北西向及南西向三组: 北东向以葵阳-北市大断裂和石人岭断层为主, 走向 $50^\circ\sim 60^\circ$, 倾向南东, 具有逆冲特征, 带宽 60 m~1000 m, 多期活动, 切割泥盆系至白垩系; 南西向以木梓断层为代表, 长约 25 km, 倾向北西, 为逆断层, 具有强硅化、拖曳褶皱及花岗岩脉充填, 影响泥盆系至印支-燕山期岩体; 北西向以乌村断层为主, 长约 13 km, 倾向南西, 逆断层特征, 影响泥盆系与寒武系; 石人岭断层为北东向重要组成, 长约 22 km, 具有硅化、拖曳褶皱及岩脉特征, 控制泥盆系与寒武系分布。

3.3. 岩浆岩

区内经历了印支期与燕山期两期岩浆侵入活动, 发育多期次花岗岩、闪长岩及辉绿岩类侵入体, 其中花岗岩类具有堇青石、矽线石、红柱石及紫苏辉石等特征矿物组合; 辉绿玢岩体主要分布于登山岭一带, 呈北东-南西向不规则展布, 具有明显的垂直分带特征, 自下而上发育辉绿玢岩、玄武玢岩及玄武岩, 构成浅成-次火山岩-溢出相完整岩相序列, 各岩相间渐变过渡, 普遍发育钠长石化、碳酸盐化及绢云母化蚀变, 玄武玢岩相以绿帘石化和绿泥石化尤为显著; 研究区位于该辉绿玢岩体上部岩相带, 主要岩性为玄武岩。

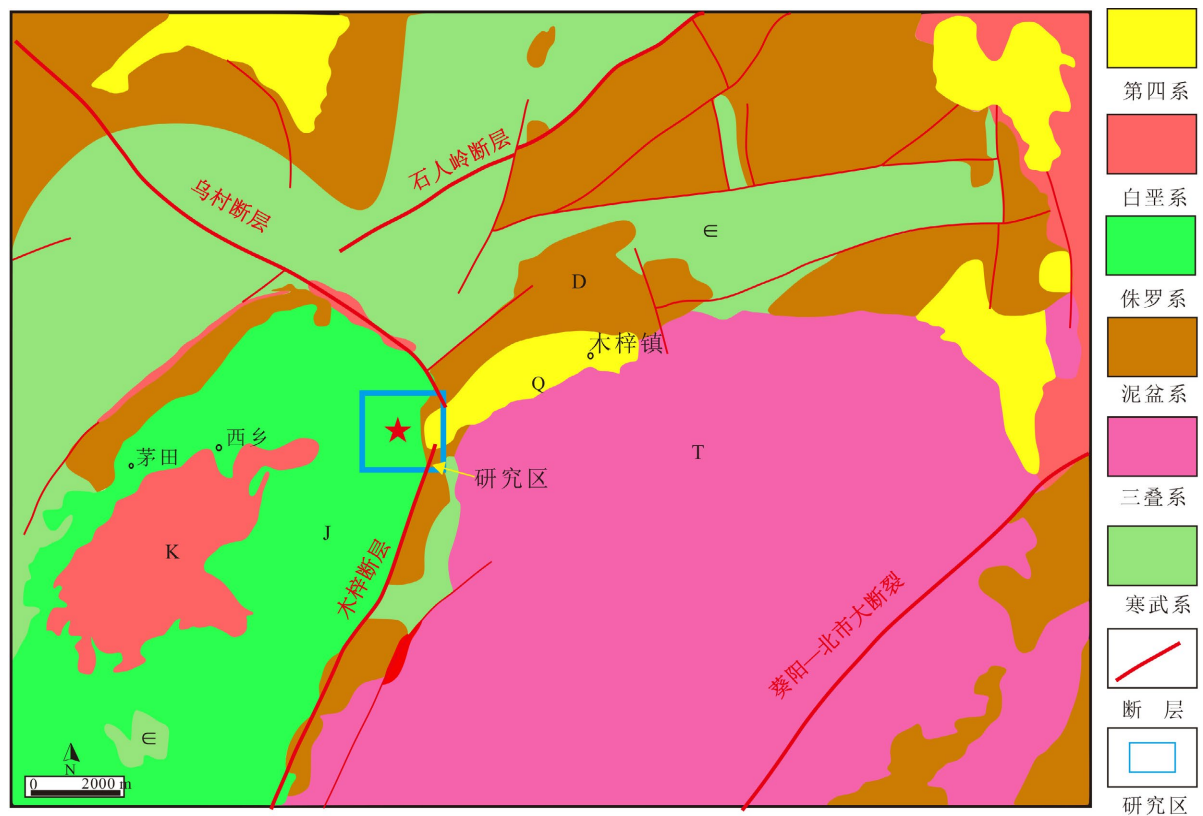


Figure 1. Regional geological sketch map
图 1. 区域地质简图

4. 采样与方法

本次研究样品采集于研究区钻孔及露头基岩，采样位置位于侏罗系登山岭岩体玄武岩层。采样过程中严格剥离岩(矿)石的风化表层，确保样品新鲜度，并系统控制矿体的整体性与矿石的完整性。采样方法以钻孔取样为主、基岩露头取样为辅，对原生玄武岩采用 1/2 切心法进行样品采集。所有基本分析样品统一送至广西第四地质队实验室进行检测，全过程控制损失率 $\leq 5\%$ 、缩分误差 $\leq 3\%$ ；矿区土壤样品送广西第四地质队实验室开展重金属专项分析，矿石样品送广西地质矿产测试研究中心实验室进行有毒有害元素浸出专项分析，岩石物理力学样品送广西有色勘察设计院实验室实施相关测试。

5. 矿床地质特征

5.1. 矿体特征

玄武岩矿体主要赋存于侏罗世登山岭岩体($J_2\beta$)，整体呈似层状产出，局部发育透镜状体，展布方向以近南北向为主，具有良好的延伸性与连续性(图 2 左)。矿体规模较大，南北向延伸 0.27 km~1.4 km，东西向宽 0.16 km~1.03 km，形态较规整且展布趋势稳定；受断裂或区域性构造运动影响，局部可见轻微错动、位移或变形，反映构造应力对岩浆岩体的局部改造。地表矿体多连续出露，但受第四系松散堆积物广泛覆盖，仅局部基岩裸露。

矿体表层普遍发育风化壳，原岩因风化作用颜色显著改变，多呈黄褐或暗褐色，差异风化致表面凹凸不平(图 2 右(a))；浅部岩体常见球状风化特征(图 2 右(b))，为物理-化学风化协同作用下沿节理裂隙分解形成的椭球状、圆球状残余体，呈不规则集中分布。矿石中局部发育与裂隙、节理走向相关的细脉状

或不规则状石英脉充填现象(图 2 右(c)), 反映后期热液或浅部流体改造; 矿体与下伏地层接触界面多不规则, 呈侵入或穿插关系, 局部具有推覆或底辟特征(图 2 右(d)), 可能指示岩浆活动具有穿透性及构造控制性。上述石英脉充填与不规则接触关系揭示矿体经历多期次构造 - 岩浆 - 热液事件叠加, 为成因机制、控矿规律及资源潜力研究提供一定的地质参考。

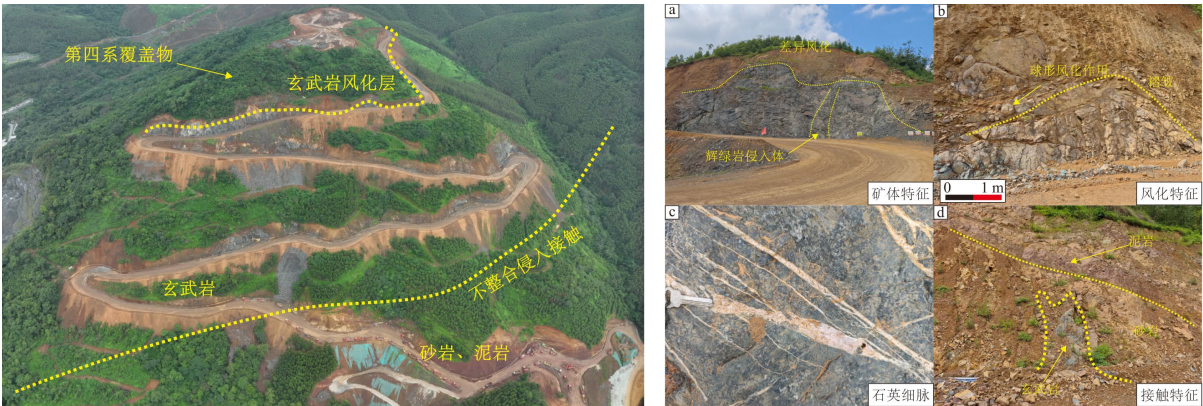


Figure 2. Schematic diagram of ore body characteristics
图 2. 矿体特征示意图

5.2. 矿石矿物及化学成分

研究区玄武岩主要由斑晶相(9%~53%)、基质相(44%~93%)及少量次生矿物组成。斑晶相以长石(3%~34%, 半自形 - 长柱状)、普通辉石(6%~31%)半自形短柱状为主, 含少量绿泥石集合体(1%~2%)和铁镁矿物假晶(1%~2%); 基质相以长石微晶(1%~40%, 斜长石为主)、不透明玻璃质(7%~75%)为主, 含普通辉石(2%~14%)、绿泥石斑点(1%~2%)及金属矿物(1%~2%); 次生矿物以不规则状方解石微脉(0.05 mm~2 mm)为主, 空间分布不均, 集中于矿体中上部, 向深部数量减少、脉体变细, 另见少量石英微脉发育。

研究区玄武岩矿床主量元素分析显示(表 1、表 2), SiO₂ 含量为 42.60%~53.12% (均值 46.79%), 属基性岩范畴, 与玄武岩特征相符; 主要氧化物中, Al₂O₃ (9.09%~15.14%, 均值 12.9%)、Fe₂O₃ (8.64%~12.60%, 均值 11.46%)、CaO (4.50%~12.38%, 均值 9.09%)、MgO (3.44%~7.53%, 均值 5.77%) 含量分布与玄武岩典型矿物组成相吻合; 碱金属氧化物 K₂O + Na₂O 均值为 5.86%, 表明该玄武岩属亚碱性系列。样品间化学成分差异显著, 如样号 401 的 SiO₂ 含量(44.38%~49.17%)明显低于样号 302 (46.05%~53.12%), 反映矿体内部成分差异; TiO₂ 含量为 0.62%~1.53% (均值 1.28%), 烧失量(LOI)为 2.36%~10.54% (均值 4.31%), 部分样品 LOI 偏高, 可能指示后期蚀变作用。基于氧化物特征可推断, 较高 CaO 与 MgO 含量预示辉石类矿物较丰富, 显著 Al₂O₃ 含量反映斜长石为重要的造岩矿物, 较高 Fe₂O₃ 含量则可能指示磁铁矿等铁氧化物的存在。

Table 1. Main chemical elements data table of the ore body
表 1. 矿体主要化学元素数据表

样号	分析结果(%) (范围值和平均值)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O + Na ₂ O
401	44.38~4.17	11.11~13.78	10.43~12.60	6.47~10.91	4.32~6.87	2.02~4.93	1.88~3.64	
	46.05	12.77	11.93	9.89	5.88	3.11	2.73	5.84

续表

402	43.65~50.36	11.06~14.06	9.68~12.19	9.01~10.97	4.98~7.37	2.77~5.51	1.32~3.24	
	47.47	12.46	11.15	9.44	5.95	3.75	2.32	6.07
001	42.6~52.11	9.09~14.04	8.64~12.11	4.5~11.22	4.10~7.53	1.45~4.42	1.11~3.14	
	46.31	12.52	11.21	9.11	6.2	2.76	2.35	5.11
301	47.59~50.26	13.67~14.43	10.62~11.81	6.66~8.93	3.44~6.09	2.75~4.54	1.47~3.7	
	48	13.91	11.19	7.64	4.56	3.54	2.69	6.23
003	46.2~51.80	9.9~15.28	9.22~11.77	6.56~11.58	4.68~8.3	1.62~5.93	1.38~4.66	
	47.56	11.8	11.31	10.31	7.06	3.27	2.39	5.66
302	46.05~53.12	12.77~15.14	9.03~12.4	5.57~10.33	3.97~7.05	2.26~4.17	1.96~4.9	
	47.47	13.95	11.69	8.25	4.91	3.51	2.93	6.44
501	43.25~46.96	11.05~13.82	10.42~12.57	7.19~12.38	4.38~7.53	2.29~3.81	1.71~3.58	
	44.94	12.33	11.37	9.62	6.14	2.99	2.47	5.46
002	43.73~51.63	11.77~15.14	9.63~12.9	6.29~11.89	4.16~6.53	1.9~5.84	1.60~5.12	
	46.53	13.45	11.81	8.48	5.43	3.55	2.53	6.08
矿区	42.60~53.12	9.09~15.14	8.64~12.60	4.50~12.38	3.44~7.53	1.45~5.93	1.11~5.12	
	46.79	12.9	11.46	9.09	5.77	3.31	2.55	5.86

Table 2. Data table for ore body combination analysis
表 2. 矿体组合分析数据表

数值	分析结果(%)			
	TiO ₂	SO ₃	Cl	LOI
最低~最高	0.62~1.53	0.03~1.26	0.0045~0.014	2.36~10.54
平均	1.28	0.4	0.007	4.31

5.3. 结构构造

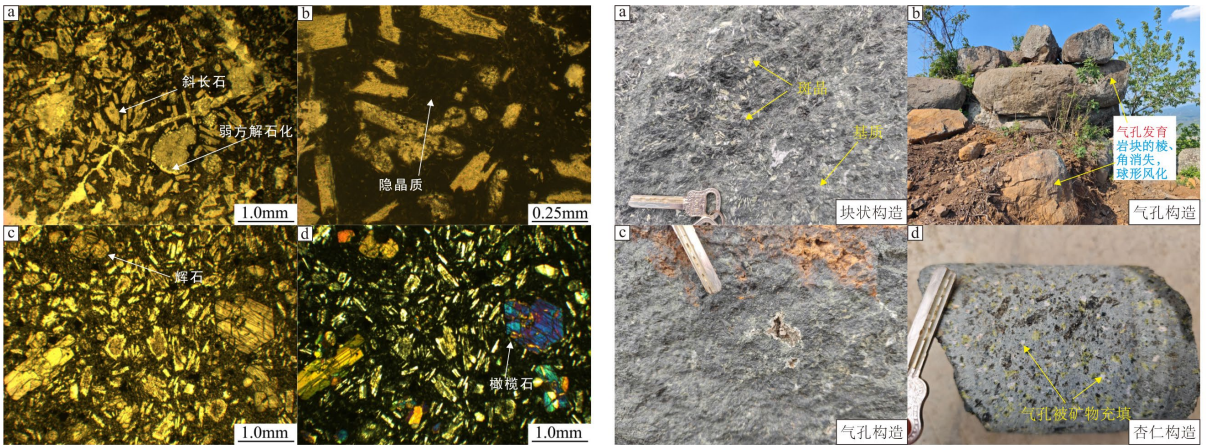


Figure 3. Ore structure and texture characteristics
图 3. 矿石结构、构造特征

基于岩相学观察，矿石呈现典型的斑状结构，其结构特征表现为显著的斑晶 - 基质两相分异。斑晶组分以斜长石为主，其晶体形态以半自形 - 自形板状为主，粒度范围为 0.2 mm~0.7 mm。斑晶普遍发育弱至中度绢云母化蚀变，并可见局部方解石化现象(图 3 左(a))。部分区域可见长条状斜长石呈杂乱排列，且发育较大晶体，肉眼可见(图 3 右(a))，其间隙被隐晶质或脱玻化玻璃所充填；另见少量细粒斜长石斑晶，粒径 <0.3 mm，其含量较低粒径小(图 3 左(b))。辉石斑晶呈半自形板状至粒状，发育典型的一组解理，最大粒径可达 1 mm (图 3 左(c))。此外，样品中尚见少量半自形蚀变橄榄石(图 3 左(d))，粒径约 1.0 mm。

基质部分主要由细粒隐晶质和玻璃质组成，呈现典型的填间结构(图 3 左(a))。具体而言，自形 - 半自形斜长石微晶构成刚性格架，其间隙被粒状矿物和残余火山玻璃共同充填，形成典型的间隐结构。该结构特征反映了岩浆在快速冷却过程中，早期结晶的斑晶与晚期残余熔体(包括微晶和玻璃质)之间的共生关系。

大部分矿石样品呈现出块状构造(图 3 右(a))。其矿物成分组成及内部结构相对稳定且均匀，这一特征间接指示了矿石形成过程中结晶作用的相对稳定性。从标本的宏观形态特征观察，可能存在结晶条件的周期性波动，从而导致矿石在特定方向上表现出矿物组合类型、含量比例、粒度分布以及晶体形态的规律性交替变化。该现象可通过矿石中斑晶与基质的分布特征得到进一步佐证。在岩浆喷发过程中，由于压力的快速降低，熔体中赋存的挥发性组分可能发生显著出溶。出溶的气体在上升过程中聚集并膨胀，进而在熔岩流的上部形成了大量气孔，从而发育典型的气孔构造(图 3 右(b)、图 3 右(c))。随着喷发过程的持续进行，这些早期形成的气孔在后续岩浆活动过程中被后期结晶矿物(如石英等)所充填，最终形成典型的杏仁构造(图 3 右(d))。

5.4. 围岩特征

研究区玄武岩矿床围岩主要由石英砂岩、粉砂岩及泥质粉砂岩夹泥岩组成，化学分析显示(表 3、表 4)，其 SiO₂ 含量差异显著(55.8%~79.55%)，平均 67.23%，整体属硅质岩类，其中石英砂岩 SiO₂ 含量最高(79.55%)，泥质粉砂岩最低(约 56%)，反映硅化程度分异明显；Al₂O₃ 含量 7.03%~11.72% (均值 10.28%)，泥质粉砂岩最高，显示较高粘土矿物含量；Fe₂O₃ 含量 2.5%~7.58% (均值 4.78%)，泥质粉砂岩铁含量突出，可能与铁质浸染有关；K₂O 含量普遍高于 Na₂O，粉砂岩 K₂O/Na₂O 比值高达 10.52，显示显著钾交代作用；泥质粉砂岩 CaO 和 MgO 含量较高，暗示含较多碳酸盐矿物。物理性质测试表明，石英砂岩吸水率最低(0.3%)，粉砂岩次之(0.44%)，二者均较致密、孔隙不发育；干燥状态下粉砂岩抗压强度最高(81.2 MPa)，石英砂岩次之(71.4 MPa)，饱和后各岩石强度均下降，但粉砂岩降幅小(3.7%)、强度保持好(78.2 MPa)，水稳定性更优；抗剪强度方面，干燥时粉砂岩略高于石英砂岩，饱和后差异缩小，可能水分对剪切性能的影响有限。

Table 3. Main chemical data table of surrounding rock
表 3. 围岩主要化学数据表

样号	样品名称	分析结果(%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Q1	石英砂岩	79.55	7.03	2.5	1.66	1.02	1.67	1.47
Q2	粉砂岩	76.94	11.07	3.94	0.2	0.81	2.63	0.25
Q3	泥质粉砂岩	55.8	11.72	5.12	8.95	2.57	4	1.82
Q4	泥质粉砂岩	56.63	11.32	7.58	6.42	3.88	5.98	1.77
	平均	67.23	10.28	4.78	4.31	2.07	3.57	1.33

Table 4. Physical properties data table of surrounding rock
表 4. 围岩物理性能数据表

样号	样品名称	吸水率(%)	抗压强度		抗剪断强度(MPa)	
			干燥状态	饱和状态	干燥状态	饱和状态
Q1	石英砂岩	0.3	71.4	63.4	40.7	39.8
Q2	粉砂岩	0.44	81.2	78.2	42.5	41.9

6. 矿石物性特征

6.1. 基础物性特征

1) 矿石抗压强度、抗剪强度和吸水率

玄武岩矿石的物理性能测试结果显示(表 5)，其吸水率介于 0.51%~0.82% (平均 0.63%)，整体偏低，表明矿石结构致密、孔隙率低，符合优质建筑石材的关键指标，与典型致密块状构造特征相符；但样品间差异(如 W14 最高 0.82%、W11 最低 0.51%)反映了矿石内部微观结构非均质性，可能与差异风化有关。饱和抗压强度范围为 63.9 MPa~123 MPa (平均 100.3 MPa)，绝大多数超过 85 MPa 的行业标准，满足高强度建筑石材要求；抗剪强度集中于 38.9 MPa~42.7 MPa (平均 41.4 MPa)。其中，W13 样品抗压强度最低 (63.9 MPa)，推测与其原生裂隙或蚀变矿物较多有关，暗示浅部玄武岩存在裂隙发育现象。

综合物理性能分析表明，该矿床主体由致密块状玄武岩构成，少量气孔状玄武岩对应较高吸水率样品；矿石普遍具有低孔隙率与高强度特征，反映岩浆冷却速率适中；力学性能显著差异(63.9 MPa~123 MPa)揭示矿床受构造活动影响明显，存在微裂隙发育带(低强度)与完整岩体(高强度)交替分布的特征；吸水率与抗压强度无显著相关性，说明次生蚀变并非强度主控因素，部分样品(如 W13、W22)强度偏低可能与绿泥石化等热液蚀变有关。

Table 5. Data on compressive strength, shear strength, and water absorption rate of basalt ore
表 5. 玄武岩矿石抗压强度、抗剪强度和吸水率数据

样号	吸水率(%)	饱和抗压强度(MPa)	饱和抗剪断强度(MPa)
W09	0.64	101	42.7
W22		86.6	
W23		110	
W25		110	
W26	0.62	108	38.9
W27		101	
W13		63.9	
W14		77.9	
W28	0.82	83.9	41.7
W29		113	
W30		121	
W37		121	
W38		85.4	

续表

W39		97.2	
W40		121	
W41		115	
W42		123	
W24		85.1	
W11	0.51	108	41.9
W15	0.55	91.6	42.4
W31		95.6	

2) 碱活性反应

通过对碱活性集料矿物组成比例及碱活性反应试验数据(表 6、表 7)分析表明, 该矿床玄武岩中碱活性矿物含量在 6%~10%间波动(如 K302 样品在 74 m 处达峰值 10%), 不同层位呈现显著非均质性分布特征, 可能与原始岩浆分异或后期热液蚀变有关, 局部区域(如 K001 随深度微增、K302 在 68 m~74 m 区间增至 10%)可能存在高活性矿物富集带; 碱活性反应试验显示, 绝大多数样品膨胀率极低(−0.003%至 0.007%), 未出现裂缝或酥裂等劣化现象, 且部分样品负膨胀率(如 K302、K003)可能为特定测试条件下的特殊收缩行为; 所有样品膨胀率均远低于 0.1%的危害阈值, 评定为“无潜在碱 - 硅酸反应危害”等级。综合判定该玄武岩碱活性反应风险可控, 具有优异的工程稳定性, 非常适合作为高品质骨料用于对耐久性要求重要的重要基础设施工程, 具备作为优质建筑集料资源开发的良好前景。

Table 6. Basalt alkali reactivity test data table

表 6. 玄武岩碱活性检验数据表

样号	采集位置	碱活性集料矿物所占比例
K302	68 m 处	8%
K001	87.3 m 处	6%
K001	211.5 m 处	7%
K501	33.9 m 处	7%
K302	74 m 处	10%
K402	75.8 m 处	8%
K003	19.2 m 处	9%

Table 7. Test data table for alkali-aggregate reaction of basalt

表 7. 玄武岩碱活性集料反应测试数据表

样号	膨胀率(%)	试样外观	评定结果
K402	0.007		
K001	0.001		
K302	−0.002	均无裂缝、酥裂、胶体外溢现象	均无潜在碱 - 硅酸反应危害
K003	−0.003		
K002	0.007		

3) 坚固性、压碎指标

数据分析显示(表 8)，试样坚固性损失率介于 2.7%~8.6%之间(平均值 4.63%)，呈现出显著的双峰分布特征：高值组(YJ1~YJ2)损失率达 8.5%~8.6%，低值组(YJ3~YJ7)为 2.7%~3.6%。压碎指标测试结果显示，6.0%~8.3%的波动范围(平均值 6.57%)，数值分布较为集中，但 YJ1 样品呈现异常高值(8.3%)。

Table 8. Rock firmness and crushing index data table
表 8. 岩石坚固性及压碎指标数据表

样号	取样位置(m)	分析项目	
		坚固性(%)	压碎指标(粗集料) (%)
YJ1	68	8.5	8.3
YJ2	87.3	8.6	6.1
YJ3	211.5	2.8	6
YJ4	33.9	2.7	6.8
YJ5	74	3.5	6.5
YJ6	75.8	3.6	6.2
YJ7	19.2	2.7	6.1
	平均	4.63	6.57

4) 硫酸盐及硫化物含量(SO₃ 质量分数)

从数据结果显示(表 9)，其空间分布特征分析，矿体坚固性损失率垂向变化无明显线性趋势，浅部(19.2 m~87.3 m)为 2.7%~8.6%，深部(211.5 m)为 2.8%；异常高值(>8%，如 YJ1~YJ2)可能指示浅部风化带或构造裂隙影响，低值(<4%)则反映新鲜完整岩体特征，成岩环境可能经历早期快速冷却形成致密岩体(YJ3~YJ7)、晚期缓慢冷却导致矿物粗化或差异风化的两期喷发过程，高值样品多位于现代风化面附近，低值受风化作用影响较小。硫元素方面，矿体中硫化物及硫酸盐 SO₃ 含量为 0.016%~0.45% (平均 0.19%)，呈明显垂向分带：浅部(<100 m)含量变化大(0.016%~0.45%)，深部(211.5 m)为 0.057%，硫主要以黄铁矿(60%~70%)为主，次为石膏等硫酸盐及微量磁黄铁矿；含量特征显示 0.3%可能反映热液活动(YJ2)，小于 0.1%则代表原生岩浆硫(YJ3、YJ6、YJ7)；基于 SO₃ 含量可划分为强氧化带(YJ2、YJ1，SO₃ > 0.25%，黄铁矿氧化显著)、过渡带(YJ4、YJ5，SO₃ 0.2%~0.25%)及原生带(YJ3、YJ6、YJ7，SO₃ < 0.1%，保存原始硫化物特征)，综合揭示了矿体受成岩、风化及热液作用共同影响的复杂蚀变与硫分异特征。

Table 9. Sulfide and sulfate content data table
表 9. 硫化物及硫酸盐含量数据表

样号	取样位置(m)	分析项目
		SO ₃ (%)
YJ1	68	0.28
YJ2	87.3	0.45
YJ3	211.5	0.057
YJ4	33.9	0.24
YJ5	74	0.22

续表

YJ6	75.8	0.044
YJ7	19.2	0.016
平均		0.19

5) 体积密度

根据数据分析(表 10)，样品密度主体范围为 2.78 t/m³~2.95 t/m³ (平均 2.84 t/m³)，符合典型致密玄武岩密度特征(行业标准 2.8 t/m³~3.0 t/m³)，其中高密度组(>2.90 t/m³)包括 X03、X20 等样品，可能富含比重较大的辉石和磁铁矿；低密度组(<2.80 t/m³)如 X17、X21 等，可能具有较高气孔率或较多次生蚀变矿物。湿度变化范围为 0.11%~1.38% (平均 0.32%)，主体集中在 0.15%~0.54%，X01 样品异常高值(1.38%)显著偏离主趋势，呈现高湿度与高密度的异常组合；密度与湿度呈弱负相关(R²=0.21)，但整体均质性良好(标准差 0.05 t/m³)。基于矿物组成推测，高密度样品可能含较多辉石和磁铁矿，低密度样品则气孔率较高或蚀变较强；湿度超过 0.5% 的样品(如 X01、X27)可能发育微裂隙或受局部含水带影响。XT03 样品高密度(2.95 t/m³)与中等湿度(0.58%)可能指示其为岩浆通道堆积体；主体密度集中于 2.81 t/m³~2.89 t/m³，反映中等冷却速率和稳定喷发环境，湿度异常点(如 X01、X27)可能对应构造破碎带或风化界面，综合揭示了矿体密度与湿度受矿物组成、冷却历史及局部地质作用共同影响的特征。

Table 10. Ore bulk density and moisture data table
表 10. 矿石体重及湿度数据表

样号	体重 (t/m ³)	湿度 (%)	样品 编号	体重 (t/m ³)	湿度 (%)
X01	2.83	1.38	XT17	2.79	0.3
X02	2.82	0.24	XT18	2.82	0.12
X03	2.95	0.58	XT19	2.85	0.19
X04	2.81	0.27	XT20	2.93	0.17
X05	2.86	0.35	XT21	2.78	0.24
X06	2.83	0.17	XT22	2.93	0.18
X07	2.86	0.16	XT23	2.8	0.18
X08	2.87	0.11	XT24	2.9	0.51
X09	2.86	0.21	XT25	2.78	0.27
X10	2.8	0.37	XT26	2.82	0.42
X11	2.81	0.38	XT27	2.78	0.54
X12	2.85	0.28	XT28	2.85	0.28
X13	2.86	0.48	XT29	2.79	0.26
X14	2.89	0.28	XT30	2.92	0.15
X15	2.83	0.36	XT31	2.88	0.28
X16	2.81	0.2	矿体平均	2.84	0.32

6.2. 矿石放射性强度

根据数据分析(表 11), 镭-232 的比活度范围为 26.6 Bq/kg~85.6 Bq/kg (平均值 44.15 Bq/kg), 钍-232 的比活度范围为 26.7 Bq/kg~83.2 Bq/kg (平均值 43.55 Bq/kg), 钾-40 的比活度范围为 633 Bq/kg~745.3 Bq/kg (平均值 676.4 Bq/kg)。内照射指数(I_{Ra})介于 0.1~0.4 之间, 外照射指数(I_γ)介于 0.3~0.7 之间。放射性核素的主要载体矿物可能包括钾长石(主要贡献钾-40)、锆石或磷灰石(含铀钍系列放射性核素), 以及次生蚀变矿物(通过吸附作用富集放射性元素)。异常样品的形成机制可能与放射性矿物富集条带的存在或后期热液活动的叠加改造有关。总体上, 矿床的放射性水平符合 A 类建材标准要求(I_{Ra} ≤ 1.0, I_γ ≤ 1.3), 但 87 号样品所在区域存在局部异常(不宜用作住宅内饰材料)。建议实施“分类开采 + 梯度利用”的资源开发模式。

Table 11. Ore radioactivity data table
表 11. 矿石放射性数据表

样号	镭-232 放射性比活度 (Bq/kg)	钍-232 放射性 比活度(Bq/kg)	钾-40 放射性 比活度(Bq/kg)	I _{Ra} 内照射指数	I _γ 外照射指数
85	32	26.7	745.3	0.2	0.4
86	32.4	35.5	680	0.2	0.4
87	85.6	83.2	647.4	0.4	0.7
88	26.6	28.7	633	0.1	0.3
技术要求 A 类: I _{Ra} ≤ 1.0 和 I _γ ≤ 1.3; B 类: I _{Ra} ≤ 1.3 和 I _γ ≤ 1.9; C 类: I _γ ≤ 2.8					

6.3. 玄武岩矿粗集料基本性能

根据(表 12)实验数据分析, 该玄武岩骨料物理性能优异, 压碎指标值介于 6.1%~15.9% (平均 10.48%), 显著低于规范 30%上限, L01 样品最优(6.1%), 完全满足特级骨料标准; 磨耗损失率仅 12.6%, 表观密度为 2.809 t/m³~2.88 t/m³ (均高于高速公路≥2.6 t/m³ 要求)。质量稳定性方面, 压碎值变异系数 38.2%, 评定为中等, 主要受 L01 和 L02 离散影响; 吸水率变异系数 7.9%、表观密度变异系数仅 1.1%, 分别评为优等和极优等级。低压碎值(6.1%~8.3%)反映岩石微晶结构完整、原生裂隙弱; 高表观密度(>2.8 t/m³)表明铁镁质矿物(特别是辉石)含量超过 40%、气孔率低于 3%; 优异的吸水率(0.6%~0.73%)、坚固性(≤3.6%)显示其抗冻融和化学稳定性强, 适用于严苛工程环境。颗粒形态上, L04 样品针片状含量较高(11.8%~13.4%), 可能受局部应力或流变构造影响; L01/L02 针片状含量低(2.6%~3.1%), 反映原生节理不发育、岩石各向同性显著, 整体具备作为高品质骨料的优良工程特性。

Table 12. Basic performance data sheet of ore coarse aggregate
表 12. 矿石粗集料基本性能数据表

测试项目	高速公路及一级公路		其他等级公路	数据结果(%)			
	表面积	其他层次		L04	L04	L01	L02
石料压碎值(%)	≤26	≤28	≤30	15.6	15.9	6.1	8.3
洛杉矶磨耗损失(%)	≤28	≤30	≤35	12.6	12.6		
相对表观密度(t/m ³)	≥2.6	≥2.50	≥2.45	2.816	2.809	2.86	2.88
吸水率(%)	≤2.0	≤3.0	≤3.0	0.7	0.73	0.6	0.7

续表

坚固性(%)	≤12	≤12		0	1	3.6	2.5
针片状颗粒含量(混合料) (%)	≤15	≤18	≤20	11.8	13.4	2.6	3.1
水洗法<0.075 mm 颗粒含量(%)	≤1	≤1	≤1	0.6	0.6	0.6	0.6
软石含量(%)	≤3	≤5	≤5	0.5	0.5	0.4	0.4

7. 讨论

7.1. 矿床成因

通过分析，玄武岩矿床形成于燕山期陆内拉张构造背景，其成矿过程受区域构造 - 岩浆耦合系统及岩浆演化作用的综合控制，成因机制可从构造控矿、岩浆演化与蚀变改造三个方面阐释。在构造控矿方面，矿床空间定位严格受北东向葵阳 - 北市断裂与北西向乌村断裂联合构造型式控制，二者构成深部岩浆上侵通道，并在应力叠加下形成基性岩浆浅部聚集的构造薄弱带；区域位于华夏古板块西南活动边缘，博白 - 岑溪等北东向深大断裂长期活动(印支期 - 燕山期)，为岩浆垂向迁移提供了关键的导通路径。

在岩浆演化与蚀变改造方面，成矿母岩浆源自富集岩石圈地幔部分熔融(源区 TiO_2 均值 1.28%， $\text{Mg\#}$ 值 0.42~0.55)，在陆内裂谷拉张背景下沿断裂上侵至浅成 - 次火山环境(深度 < 3 km)，上升过程中经历显著结晶分异 - 早期斜辉石优先晶出并分离结晶(SiO_2 与 CaO 负相关)，推动残余岩浆富硅演化(SiO_2 含量 42.60%~53.12%)，斜长石与辉石斑晶析出促使基质富玻璃质及微晶，形成典型的斑状结构；垂向分带表现为深部辉绿岩向上过渡为玄武岩(浅成相)，记录了岩浆从深部到近地表的连续演化。后期构造 - 热液活动对矿体形态及性质改造明显：构造活动导致局部位移变形，北东向逆断层控制岩体似层状展布并促进流体循环；多期次热液蚀变(如绿泥石化)叠加于原生岩相(高 LOI 均值 4.31%为标志)，部分区域形成石英脉；表生风化形成需分级开发的风化带，但深部原生矿体保留完整岩浆结晶结构。综合表明，该矿床属构造控矿型浅成基性岩床，成矿以岩浆分异为主导，控制元素分配与斑状结构，叠加断裂构造改造，决定空间展布及热液蚀变(影响矿石性质)的协同作用，其亚碱性系列($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 均值 5.86%)及大陆弧拉张构造背景为同类矿床勘探评价提供了一定的理论依据。

7.2. 矿床开发利用前景分析

玄武岩矿床具备显著的经济技术可行性与综合开发价值，其资源禀赋、物性指标等条件均满足多领域应用需求，建议通过“分类开采 - 梯度利用”模式实现资源高效配置。

7.2.1. 资源优势

1) 物性指标优异

矿石力学性能突出：饱和抗压强度平均值为 100.3 MPa(达标率 93%，最小值 85 MPa)，抗剪强度 41.4 MPa，压碎指标 6.57% (优于特级骨料标准)，抗剪强度 41.4 MPa，体积密度 2.84 t/m³，吸水率仅 0.63%，均远超公路与建筑工程对粗骨料的技术要求。耐久性表现卓越，坚固性损失率均值 4.63%，碱活性膨胀率 < 0.007% (无潜在碱 - 硅酸反应风险)，放射性内照射指数($I_{\text{ra}} \leq 0.4$)与外照射指数($I_{\text{r}} \leq 0.7$)均符合规定的 A 类建材标准，可安全应用于建筑结构及装饰领域。

2) 规模与开采条件

矿体空间展布稳定，南北向最大延伸 1.4 km，东西宽 0.16 km~1.03 km，主体为致密块状玄武岩(似层状产出)，地表第四系覆盖层薄，适合露天规模化开采。浅部风化带(局部位移变形区除外)及深部原生矿体均具有工业价值，资源连续性为高效开发提供了地质基础。

7.2.2. 应用方向与限制因素

该玄武岩矿床在建筑骨料、路面工程、新型材料及放射性管控等多领域均展现出良好的应用潜力与可行性依据,但各领域均存在特定限制因素需针对性控制。在建筑骨料领域,其压碎值介于 6.1%~15.9% (远低于国标 $\leq 30\%$ 的要求)、磨耗损失为 12.6% (优于相关规范标准),力学强度满足结构承载需求,但浅部风化带因坚固性损失 $> 8\%$,需予以剔除以避免对混凝土耐久性产生不利影响;在路面工程应用中,玄武岩具有高抗压强度(均值 $> 100 \text{ MPa}$)和低针片状颗粒含量(均值 $< 3.1\%$),适宜作为高等级路面集料,但 L04 区针片状颗粒含量偏高(13.4%),需通过分选工艺优化以满足工程规范要求;在新型材料领域,玄武岩具有低杂质特征(SO_3 均值 0.19%)、成分均一性良好(SiO_2 变异系数 $< 5\%$)及较高的 TiO_2 平均含量(1.28%,指示富钛矿石潜在高附加值),但其深加工技术(如玄武岩纤维制备)成本较高,需突破提纯与熔融等关键工艺瓶颈以提升资源利用效率;在放射性管控方面,95%区域放射性指标符合 A 类建材标准($I_{\text{ra}} \leq 0.4, I_{\text{y}} \leq 0.7$),辐射风险整体可控,但局部异常区需采取避让或预处理措施以确保应用安全性。

7.2.3. 开发策略与风险管控

港南地区玄武岩矿床可基于矿石质量差异实施科学分级利用与产业链延伸策略,以实现资源高效开发与多领域应用:采用三级梯度开发模式,I类料(抗压强度 $> 100 \text{ MPa}$)用作桥梁、高层建筑等关键结构的高性能混凝土骨料,II类料(85 MPa~100 MPa)加工为二级公路及机场跑道基层填料,风化带低强度/高蚀变矿石定向用于路基填充或生态修复工程,提升综合利用率;针对高钛含量(TiO_2 平均 1.28%)矿石,探索连续玄武岩纤维制备技术,通过提纯与熔融工艺开发航空航天用高端新材料,推动资源向高附加值领域转化;同时,采取针对性风险管控措施,通过三维地质建模精准识别构造破碎带以优化采掘方案,建立动态放射性监测网络并对异常区实施隔离开采保障安全性,结合绿色矿山标准同步规划复垦与废弃物利用以实现生态保护。综上,该矿床通过分级利用与产业链延伸,可兼顾传统基建与新兴材料需求,在技术可行、经济合理及环境友好条件下,具备显著资源开发潜力与长期经济效益。

8. 结论

港南地区玄武岩属亚碱性基性喷出岩,赋存于燕山期登山岭岩体($J_2\beta$)上部岩相带,受北东向葵阳-北市断裂与乌村断裂联合构造型式及燕山期岩浆活动联合控制,呈似层状产出;岩石具有典型的斑状结构与气孔-杏仁构造,主量元素显示富集 SiO_2 (46.79%),碱总量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)为 5.86%, TiO_2 均值 1.28%、 $\text{Mg\#}$ 值 0.42~0.55,符合亚碱性玄武岩成因属性特征。

矿床形成于印支-燕山期陆内裂谷拉张背景下的构造-岩浆耦合环境,深部基性岩浆沿北东向断裂上侵至浅成-次火山岩相环境,经辉石分离结晶主导的岩浆分异演化形成;后期受断裂切割与绿泥石化等热液蚀变及表生风化作用影响,形成“深部辉绿岩-浅部玄武岩”垂向分带序列及局部位移变形;综合判定该矿床为构造控矿型岩浆分异型矿床,成矿以岩浆分异为主导,断裂构造与热液蚀变为关键控矿因素。

该玄武岩矿石物性优异,饱和抗压强度平均值 100.3 MPa (达标率 93%)、抗剪强度 41.4 MPa,吸水率低(0.63%)、碱活性风险小、放射性符合 A 类建材标准,完全满足特级建筑骨料要求,适用于高速公路及机场跑道等高强度工程;建议采用“分类开采-梯度利用”模式,尤其关注中部致密原生矿体作高性能骨料与高等级公路填料,对浅部风化带及放射性异常区分级避让或加工为路基材料,高钛矿石(TiO_2 平均 1.28%)可探索提纯工艺以发展高端新材料;同时需通过三维地质建模管控构造破碎带、建立放射性监测网络保障安全,并结合绿色矿山标准实施生态修复,实现资源开发与环境保护协同。

参考文献

- [1] 刘欢,冯庭录,田真. 皖东南广德地区玄武岩地质特征及成因[J]. 现代矿业, 2020, 36(8): 50-52.

-
- [2] 梁成, 张华婧, 邓俊, 等. 山东省临朐-沂水地区橄榄玄武岩地质特征及开发利用研究[J]. 地质论评, 2023, 69(6): 2229-2238.
 - [3] 廖世龙, 王春连, 杨飞, 等. 中国玄武岩矿石和矿床类型、资源分布及工业开发利用现状[J]. 岩石矿物学杂志, 2025, 44(3): 710-726.
 - [4] 霍泳霖, 霍冀川, 张行泉, 等. 玄武岩的开发利用进展[J]. 材料导报, 2022, 36(6): 113-123.
 - [5] 冉启洋, 李士彬, 崔荣国, 等. 贵州省玄武岩资源及其开发利用[J]. 中国矿业, 2019, 28(6): 7-12.
 - [6] 蒲猛, 彭秀红, 冯鑫, 等. 四川省连续玄武岩纤维矿石原料研究现状[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2024(1): 16-19.
 - [7] 孟欣, 黄浩, 刘向荣. 玄武岩开发利用前景[J]. 居业, 2023(7): 227-229+232.
 - [8] 徐义刚, 王强, 唐功建, 等. 弧玄武岩的成因: 进展与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(12): 1818-1844.
 - [9] 孟乾坤. 福建新生代玄武岩岩浆演化特征及动力学意义[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.
 - [10] 牛晓露, 刘飞, 冯光英, 等. 海南岛北部晚新生代玄武岩成分演化及成因讨论[J]. 地质学报, 2022, 96(8): 2705-2724.
 - [11] 张招崇, 朱江, 程志国, 等. 大火成岩省的类型、成因及其地球系统意义[J]. 地质学报, 2022, 96(12): 4057-4090.
 - [12] 杨文健, 于红梅, 赵波, 等. 广西涠洲岛晚新生代玄武岩地幔源区及岩浆成因[J]. 岩石学报, 2020, 36(7): 2092-2110.
 - [13] 周岱, 龙文国, 王磊, 等. 云开地区早古生代竹雅-石板辉长岩锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 2017, 36(5): 726-737.
 - [14] 梁任鑫, 时毓, 庞超伟, 等. 桂东南岑溪-陆川地区斜长角闪岩的年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2024, 30(2): 178-195.