doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.001
引用格式：赵海洋，郭利杰，董峰，张雷. 西藏某矿山采场充填体原位取芯质量评价[J]. 矿冶，2026，35(1)：1-8.
ZHAO Haiyang, GUO Lijie, DONG Feng, ZHANG Lei. In-situ coring quality evaluation of stope backfill in a mine in Xizang[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 1-8.

西藏某矿山采场充填体原位取芯质量评价

赵海洋[1] 郭利杰[2,3] 董 峰[4] 张 雷[2,3]
（1. 西藏华泰龙矿业开发有限公司，拉萨 851400；
2. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160；
3. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心，北京 102628；
4. 福建省政和县源鑫矿业有限公司，福建 政和 353601）

摘 要：以国内某大型铜多金属矿的分段凿岩阶段空场嗣后充填开采工艺为背景，以一步骤充填体为研究对象，通过对井下原位取芯的374组试件进行强度测试，系统分析了灰砂比1∶4和1∶6两种充填体的强度分布规律。结果表明：灰砂比1∶4充填体强度范围为1.24~6.11 MPa，平均强度为2.66 MPa；灰砂比1∶6充填体强度范围为0.62~4.94 MPa，平均强度为2.46 MPa。两种配比充填体均表现出强度离散性大、整体均匀性较差的特点，反映出充填料浆在制备过程中工艺参数控制不够精确。扫描电镜微观分析表明，充填体强度主要来源于针棒状钙矾石形成的骨架结构及其中填充的C-S-H凝胶。强度差异则与水化产物（钙矾石和C-S-H凝胶）的生成量、未反应水含量以及孔隙率等因素相关。为提升充填质量，建议提高充填浓度，并确保胶凝材料下料的精确性与稳定性。

关键词：原位取芯；充填体强度；充填质量；微观结构；充填工艺参数
中图分类号：TD853 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0001-08

In-situ coring quality evaluation of stope backfill in a mine in Xizang

ZHAO Haiyang[1] GUO Lijie[2,3] DONG Feng[4] ZHANG Lei[2,3]
(1. HTL Mining Development Co. Ltd., Lasa 851400, China;
2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
3. National Centre for International Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China;
4. Fujian Zhenghe County Yuanxin Mining Co. Ltd., Zhenghe 353601, Fujian, China)

Abstract: Based on the sublevel drilling and subsequent backfill mining method employed in a large copper polymetallic mine in China, this study focuses on the primary backfill body as the research subject. Through strength testing of 374 sets of specimens obtained via in-situ coring underground, the strength distribution patterns of backfill materials with cement-sand ratios of 1∶4 and 1∶6 were systematically analyzed. The results indicate that for the backfill with a cement-sand ratio of 1∶4, the strength ranges from 1.24 MPa to 6.11 MPa, with an average strength of 2.66 MPa. For the backfill with a cement-sand ratio of 1∶6, the strength ranges from 0.62 MPa to 4.94 MPa, with an average strength of 2.46 MPa. Both mix ratios exhibit significant strength variability and poor overall uniformity, reflecting imprecise control of process parameters during the preparation of the backfill slurry. Scanning electron microscopy (SEM) microanalysis reveals that the strength of the backfill primarily originates from the skeletal structure formed by needle-or rod-shaped ettringite crystals, filled with C-S-H gel. The differences in strength are related to factors such as the quantity of hydration products (ettringite and C-S-H gel), the content of unreacted

收稿日期：2025-05-14
基金项目：国家科技重大专项(2024ZD1003705)；矿冶科技集团有限公司青年创新基金滚动支持项目(04-2342)
第一作者：赵海洋，学士，主要从事矿山采矿工程及工艺技术管理等研究。E-mail：526654270@qq.com
通信作者：郭利杰，博士，正高级工程师；E-mail：ljguo264@126.com

water, and the porosity within the backfill. To improve backfill quality, it is recommended to increase the backfill concentration while ensuring precise and consistent dosing of cementitious materials.

Key words: in-situ core sampling; backfill strength; backfill quality; microstructure; backfill process parameters

随着我国矿产资源开发逐步向深部延伸，充填采矿法因其对地表变形控制的有效性和资源回收率高的特点，已成为深部金属矿山开采的主流方法[1,2]。阶段空场嗣后充填法作为充填采矿的重要分支，通过一步骤充填体形成的人工矿柱支撑采场围岩，其充填体质量直接关系到二步骤回采的安全性和经济性[3,4]。西藏地区高寒高海拔的特殊环境对充填体性能提出了更高的要求，通常情况下，实验室内制作的充填体标准试件与井下实际充填体存在“尺寸效应”，小型试件难以反映井下复杂应力—渗流耦合场作用下的充填体实际性能[5]。因此，需要开展井下采场充填体原位取芯质量评价，揭示井下采场充填体真实力学行为，进一步优化实际充填配比参数设计，以期达到保证充填质量的同时降低充填成本的目的。

国内外学者针对井下充填体原位取芯及质量评价方面开展了较为广泛的研究工作。尾砂胶结充填体养护过程受采场原位温度、压力、孔隙水压力等因素影响，导致实验室制备的充填体试样与相同物料配比的采场原位充填体取芯试样的力学性能存在显著差异[6]。陈寅等[7]采用地质钻探的手段对掺加冶炼渣的混合骨料原位胶结充填体质量进行评价，试验结果表明，灰砂比为1∶4时，E3进路原位胶结充填体强度高于S4进路（未加冶炼渣），证明掺加冶炼渣优化了充填骨料级配，提高了原位胶结充填体强度。李宗楠等[8]分析了原位充填体强度影响因素，原位充填体强度较实验室标准试块强度存在损失情况，且水泥含量越低，其差距越大，高水泥含量下整体上表现强度损失不明显，中低水泥配比情况下，强度损失愈趋明显，约30%~40%。杨云飞等[9]采用地质钻孔取样方式，分析了不同采场内充填体的强度与变形特征。结果表明，不同采场内充填体性质存在一定的差异，即使处于同一采场内不同部位的充填体，其性质有时也存在较大的差异。这与颗粒级配和矿物成分的空间分布随采空区工艺条件而发生变化，造成充填料浆沉缩和固结硬化过程不同，以及充填胶凝材料离析对充填体局部性质产生较大影响有关。

本文以西藏某铜矿4420分段采场为工程背景，采用KY-600BL型钻机进行井下采场充填体原位取芯，同时，编录测试分析原位充填体抗压强度，结合扫描电子显微镜（SEM）对不同质量充填体微观结构分析，提出改善井下原位充填体质量相关措施，以期为高寒高海拔矿山充填配比参数优化，降低充填成本提供理论依据。

1　采场充填体原位取芯方案

1.1　原位取芯采场选择与要求

矿山采用分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法进行矿石回采，此方法一般在一步骤充填完成60 d后进行二步骤回采[10]，因此，选择充填结束60 d后的采场进行原位取样工作；同时，矿山采用“隔一采一”的方式进行回采，本研究选择相邻的两个一步骤采场开展研究工作，三个充填采场具体关系如图1所示。根据以上充填采场选择原则，结合矿山实际生产情况，最终选择4420分段2-3-2采场、2-3-4采场作为本次充填体原位取芯采场。

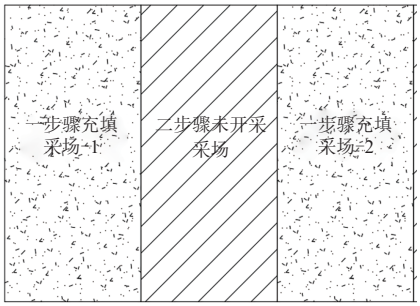


图1　本研究所选充填采场关系图

Fig. 1　Schematic diagram of the backfill mining area selected in this study

1.2　采场原位取芯设计

每个采场充填体原位取芯均设计两条取芯钻孔（图2），具体设计参数为：1）1#钻孔：倾角18°、长度64.1 m；2）2#钻孔：倾角0°、长度63.8 m。取芯钻机采用KY-600BL型履带式全液压岩芯钻机，钻杆为NQ75，外径75 mm，杆长1 500 mm。要求采样率不低于85%，取芯样本直径≥60 mm，偏斜率不大于1%。

1.3　原位充填体取芯及强度测试标准流程[11]

充填体原位取芯制备测试试件标准流程如下：

1）充填采场取样设计：主要包括充填采场选择、取样钻孔方位角、倾角、设备选型、钻孔参数等。

2）现场取样与编录：严格按照设计的方位角、倾

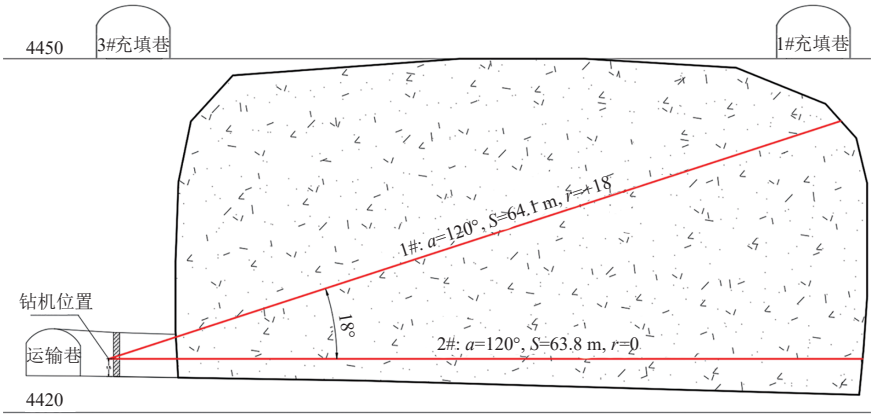


图2　充填体原位取芯钻孔设计

Fig. 2　Design of in-situ core sampling boreholes for backfill

角进行取样，要求采样率不低于85%，做好钻孔编号与采样样品编号，如图3、图4所示。试样须按顺序整齐的排放在岩芯箱内，对长度大于120 mm的试样用保鲜膜及胶带包裹密封，用于加工标准件作为强度测试试样。



图3　钻孔取样

Fig. 3　Core sampling from borehole



图4　所取样品编录

Fig. 4　Cataloging of collected samples

3）测试试样加工与编录：对钻孔所取大于120 mm的试样，加工成高度为120 mm（试样直径的2倍）标准件，并对标准件进行编号，记录对应井下所取位置，确定对应充填配比参数，如图5、图6所示。

4）强度测试：将井下所取原位充填体试样加工



图5　标准试件加工

Fig. 5　Preparation of standard specimens



图6　加工成型的标准试件

Fig. 6　Formed standard specimens

成高度120 mm的标准件进行单轴抗压强度测试。采用YAW-300C全自动抗折抗压压力机进行强度测试，压力机加载速率为2 mm·min^{-1}。

2　原位充填体强度测试

2.1　采场充填工艺参数统计

4420分段2-3-2采场、2-3-4采场均为一步骤开采采场，其充填工艺参数为：充填浓度：62%，采场底部8 m设计灰砂比为1∶4、采场中部17 m设计灰砂比为1∶6、采场顶部2 m设计灰砂比为1∶4，具体如图7所示。

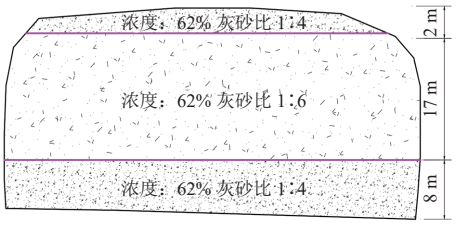


图7　充填体原位取样钻孔设计

Fig. 7　In-situ core sampling borehole design for backfill

2.2　采场充填体强度测试分布

1）4420分段2-3-2采场强度分布

4420分段2-3-2采场共取两条钻孔，其中：1#钻孔施工60 m，其中穿透充填灰砂比1∶4的充填体12 m，加工标准件16件；穿透充填灰砂比1∶6充填体48 m，加工标准件88件。强度测试结果如图8所示，可以看出充填灰砂比1∶4和1∶6强度测试结果离散性均较大，其中充填灰砂比1∶4最低强度2.57 MPa、最高强度4.35 MPa，平均强度3.31 MPa；充填灰砂比1∶6最低强度0.62 MPa、最高强度4.94 MPa，平均强度2.99 MPa。

2#钻孔施工60 m，全部穿透充填灰砂比1∶4充填体，加工标准件92件。强度测试结果如图9所示，可以看出充填灰砂比1∶4强度测试结果仍存在较大离散性，最低强度1.63 MPa、最高强度6.11 MPa，平均强度2.8 MPa。

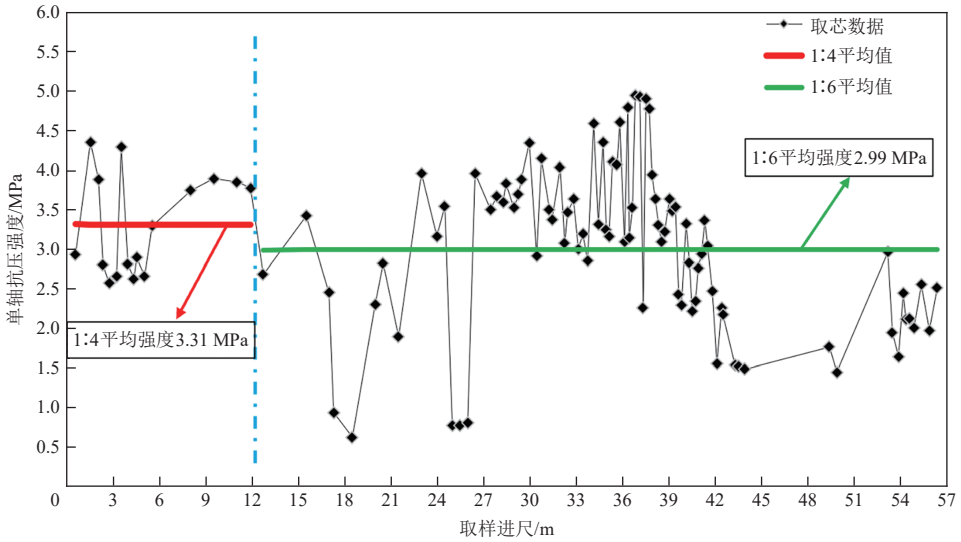


图8　1#钻孔取芯强度测试结果

Fig. 8　Core sampling strength test results of borehole #1

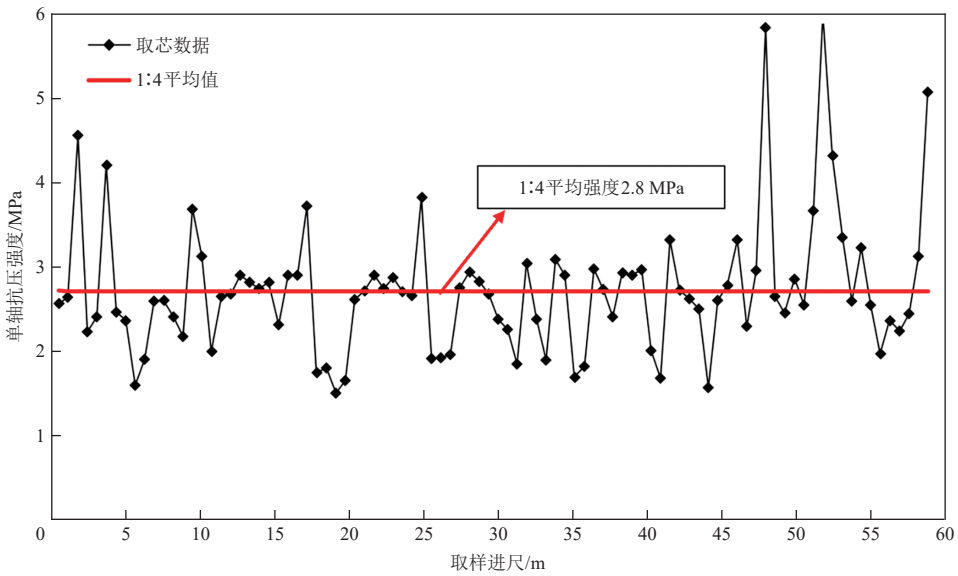


图9　2#钻孔取芯强度测试结果

Fig. 9　Core sampling strength test results of borehole #2

2）4420分段2-3-4采场强度分布

4420分段2-3-4采场共取两条钻孔，其中：1#钻孔施工60 m，其中穿透充填灰砂比1∶4充填体15 m，加工标准件17件；穿透充填灰砂比1∶6充填体45 m，加工标准件72件。强度测试结果如图10所示，可以看出充填灰砂比1∶4和1∶6强度测试结果均存在较大离散性，其中充填灰砂比1∶4最低强度1.68 MPa、最高强度3.95 MPa，平均强度2.3 MPa；充填灰砂比1∶6最低强度0.93 MPa、最高强度3.45 MPa，平均强度1.79 MPa。

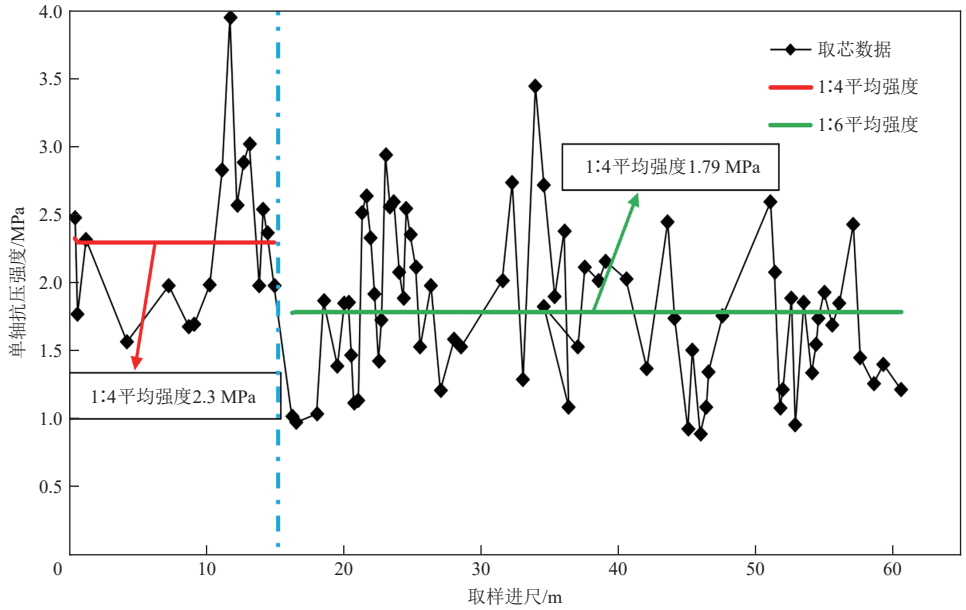


图10　1#钻孔取芯强度测试结果

Fig. 10　Core sampling strength test results of borehole #1

2#钻孔施工63 m，全部穿透充填灰砂比1∶4充填体，加工标准件91件。强度测试结果如图11所示，可以看出充填灰砂比1∶4强度测试结果仍存在较大离散性，最低强度1.24 MPa、最高强度5.96 MPa，平均强度2.47 MPa。

2.3　不同充填配比下原位充填体强度分析

2.3.1　灰砂比1∶4充填体强度分析

对两个原位取样采场灰砂比为1∶4充填体测试强度进行统计分析，统计强度数据共计216组，强度分布如图12所示。结果表明，充填灰砂比1∶4充填体，

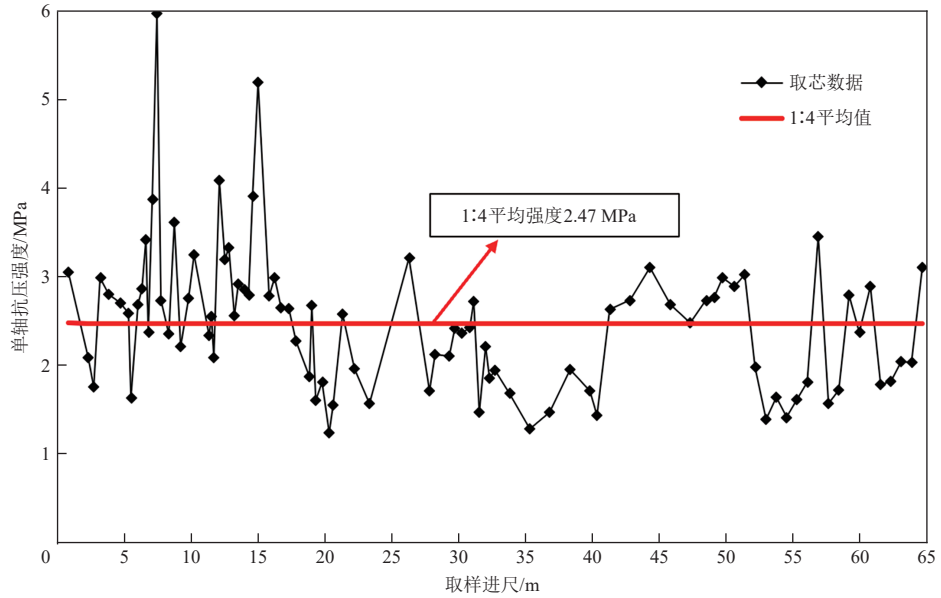


图11　2#钻孔取芯强度测试结果

Fig. 11　Core sampling strength test results of borehole #2

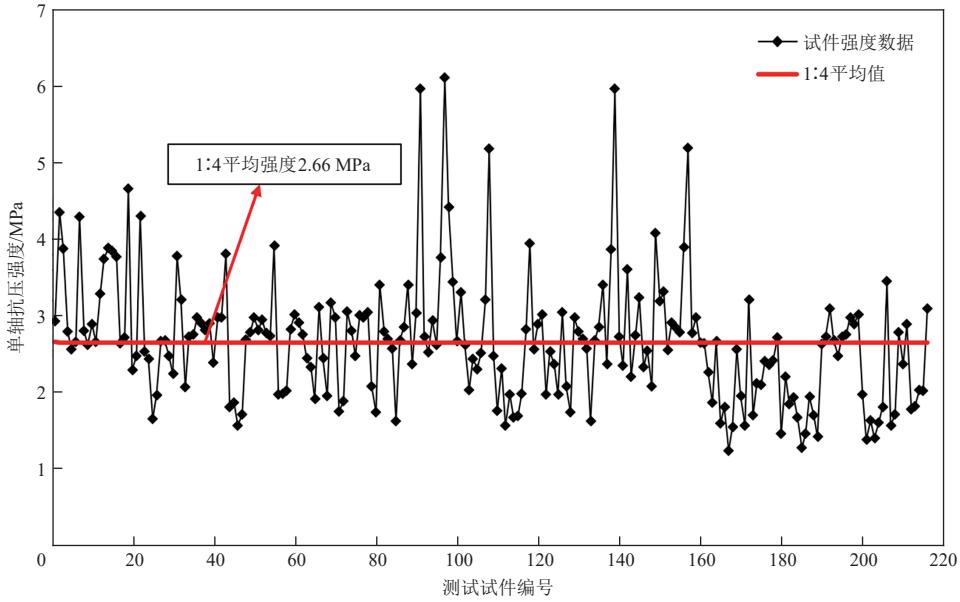


图12　配比1∶4钻孔取芯强度测试结果

Fig. 12　Strength test results of core sampling from borehole with 1∶4 mix ratio

最低强度1.24 MPa、最高强度6.11 MPa，平均强度2.66 MPa。整体来看，灰砂比1∶4条件下，充填体强度差异性较大，充填体整体均质性较差[12]，这与充填料浆制备过程中充填工艺参数控制不精确有关，最终表现为充填体强度差异较大[13]。充填体强度分布不均匀会为二步骤开采带来一定安全隐患[14]。

2.3.2　灰砂比1∶6充填体强度分析

对两个原位取样采场灰砂比为1∶6充填体强度测试结果进行统计分析，统计强度数据共计158组，强度分布如图13所示。结果表明，充填灰砂比1∶6充填体，最低强度0.62 MPa，最高强度4.94 MPa，平均强度2.46 MPa。整体来看，灰砂比同为1∶6条件下，

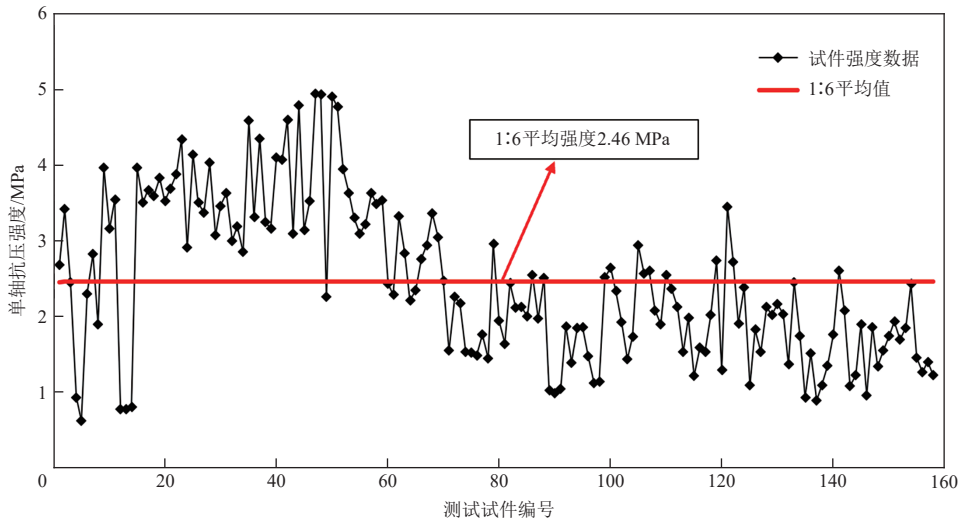


图13　配比1∶6钻孔取芯强度测试结果

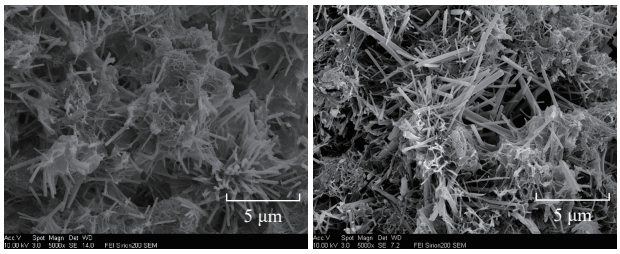
Fig. 13　Strength test results of core sampling from borehole with 1∶6 mix ratio

充填体强度差别较大，充填体整体均质性较差。

3　原位充填体微观结构分析

为进一步揭示造成充填体强度产生波动性的原因，采用扫描电子显微镜对强度为2 MPa和4 MPa充填体试样分别进行微观结构分析。图14为2、4 MPa充填体内部微观结构，可以看出充填体内部主要水化产物为针棒状钙矾石（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$）和少量毛刺状C-S-H凝胶，其中钙矾石起到骨架支撑作用，C-S-H凝胶则填充其中共同形成充填体强

度[15-17]。图14(a)中，2 MPa充填体内部钙矾石尺寸普遍较短，整体结构较疏松，而对应图14(b)充填体内部钙矾石、C-S-H凝胶数量明显增多，尺寸普遍较长，形成了致密的网络结构，充填体整体强度提高。这与充填浓度、胶凝材料下料量有关，充填浓度较低时，充填体中未反应的水含量增多，固结后充填体内部孔隙率增大，充填体整体结构疏松；此外，胶凝材料下料量减少则导致充填体内部水化产物数量减少，体系密实程度降低，充填体强度减小。因此，为了提高充填体强度，应严格控制充填料浆中含水量及胶凝材料下料量，即提高充填浓度同时保证灰砂比处于正常波动范围。



(a)2 MPa (b)4 MPa

图14 不同强度充填体的SEM形貌

Fig. 14 SEM iamges of backfill with different strength

4 结论

1）充填料浆制备生产过程中存在充填工艺参数控制不精确的问题：原位取样采场灰砂比为1∶4时，充填体最低强度1.24 MPa、最高强度6.11 MPa，平均强度2.66 MPa；原位取样采场灰砂比为1∶6时，充填体最低强度0.62 MPa、最高强度4.94 MPa，平均强度2.46 MPa，充填体强度差异性较大，充填体整体均质性较差。

2）充填体强度分布不均匀会为二步骤开采带来一定安全隐患，应在二步骤开采设计中，严格控制靠近充填体的炮孔数量与装药量，防止出现充填体倒塌引起安全事故及增加二步骤回采贫化率的现象。

3）针棒状水化产物钙矾石形成骨架支撑结构，C-S-H凝胶填充其中是充填体形成强度的原因。强度产生差异性的原因与充填体内部水化产物钙矾石、C-S-H凝胶生成数量，充填体中未反应水的含量，孔隙率及孔径分布，体系密实程度有关。为了提高充填质量，应提高充填浓度，同时保证胶凝材料下料量精确且稳定。

参考文献

[1] 杨小聪, 郭利杰. 尾矿和废石综合利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
YANG X C, GUO L J. Comprehensive utilization of tailings and waste rocks[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.

[2] 郭利杰, 刘光生, 马青海, 等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4182-4200.
GUO L J, LIU G S, MA Q H, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4182-4200.

[3] 张雷, 郭利杰, 许文远, 等. 细尾砂在矿山充填应用中关键工艺与材料的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 102-112.
ZHANG L, GUO L J, XU W Y, et al. Research on crucial technological and material issues of applying fine tailings to mine filling: a review[J]. Materials Reports, 2023, 37(23): 102-112.

[4] 吴爱祥, 王洪江. 金属矿膏体充填理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
WU A X, WANG H J. Theory and technology of paste backfilling for metal mines[M]. Beijing: Science Press, 2015.

[5] 李一帆, 张建明, 邓飞, 等. 深部采空区尾砂胶结充填体强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 865-868.
LI Y F, ZHANG J M, DENG F, et al. Experimental study on strength characteristics of tailings cement backfilling at deep-seated mined-out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 865-868.

[6] 郭利杰, 贾冲, 赵越, 等. 矿山原位环境尾砂胶结充填体力学性能研究进展[J]. 矿冶, 2024, 33(3): 317-328.
GUO L J, JIA C, ZHAO Y, et al. Research progress on the mechanical properties of cemented tailings backfill under in-situ conditions[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(3): 317-328.

[7] 陈寅, 郭利杰, 魏晓明, 等. 掺加冶炼渣的混合骨料原位胶结充填体质量评价研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(增刊1): 234-237.
CHEN Y, GUO L J, WEI X M, et al. Quality evaluation of in situ cemented backfill of mixed aggregate with smelting slag[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(Sup.1): 234-237.

[8] 李宗楠, 王果, 郭利杰. 原位充填体强度影响因素分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(增刊1): 31-34.
LI Z N, WANG G, GUO L J. Analysis on influence factor of in-situ-filling strength[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2015, 67(Sup.1): 31-34.

[9] 杨云飞, 邓代强, 龙云刚, 等. 采空区充填体原位采样与力学性能检测[J]. 中国钼业, 2024, 48(5): 25-32.
YANG Y F, DENG D Q, LONG Y G, et al. In situ sampling

and aechanical performance testing of filling materials in goaf[J]. China Molybdenum Industry, 2024, 48(5): 25-32.

[10] 李欣, 郭利杰, 许文远, 等. 某铁矿全尾砂胶结充填体力学性能研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(增刊2): 420-424.
LI Y, GUO L J, XU W Y, et al. Study on mechanical properties of cemented filling with full tailings in an iron mine[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(Sup.2): 420-424.

[11] 常悦, 赵志云, 王向玲, 等. 矿渣-粉煤灰基胶凝材料性能调控及其在铅锌矿尾砂胶结充填中的应用[J]. 有色金属工程, 2023, 13(4): 93-101.
CHANG Y, ZHAO Y Z, WANG X L, et al. Performance control of slag fly ash based cementitious materials and the utilization in lead/zinc mine tailings based cemented paste backfill[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(4): 93-101.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 金属非金属矿山充填工程技术标准: GB/T 51450—2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022-09-08.
State Administration for Market Regulation, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for filling engineering of metal and nonmetal mines: GB/T 51450—2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022-09-08.

[13] 孙德民, 任建平, 焦华喆, 等. 某矿全尾砂胶结充填物料性能研究[J]. 金属矿山, 2012(3): 6-9.
SUN D M, REN J P, JIAO H Z, et al. Study on the properties of the unclassified tailings cemented backfill materials in a mine[J]. Metal Mine, 2012(3): 6-9.

[14] 裴启涛. 影响胶结充填体质量的主要因素及控制措施[J]. 现代矿业, 2009(增刊1): 99-102.
PEI Q T. Main factors affecting the quality of cemented fill and control measures[J]. Modern Mining, 2009(Sup.1): 99-102.

[15] 周礼, 林卫星, 欧任泽. 全粒级碎石胶结充填材料及泵送试验研究[J]. 黄金, 2017(6): 37-40.
ZHOU L, LIN W X, OU R Z. Experimental research on full graded gravel cement filling materials and their pumping[J]. Gold, 2017(6): 37-40.

[16] 付毅, 王劼. 含C_4A_3S矿物硅酸盐水泥充填性能研究[J]. 矿冶, 2009, 18(4): 4-8.
FU Y, WANG J. Study on the backfill property of the silicate cement containing C_4A_3S mineral[J]. Mining and Metallurgy, 2009, 18(4): 4-8.

[17] 张雷, 郭利杰, 魏晓明, 等. 矿渣基胶凝材料充填试验及胶结体微观结构演化研究[J]. 有色金属工程, 2023, 13(5): 84-93.
ZHANG L, GUO L J, WEI X M, et al. Study on filling test of slag based binder and microstructure evolution of backfill[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(5): 84-93.