

MIM 在地下矿山项目评价的应用

Application of MIM in Evaluation of Underground Mine Project

翟建波, 孙学森, 王凯, 景觅(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:本文基于国外某铜矿项目评价,系统地介绍了MIM在地下矿山资源模型创建、岩石力学研究、采场三维设计、工程三维设计、通风三维模拟、采掘进度计划、投资估算、财务分析等项目评价流程中的应用,探索了一种新的咨询设计方法和手段。

关键词:地下矿山; 项目评价; 三维设计; 新设计流程

中图分类号: TD672 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)03-0020-06

Abstract: Based on the evaluation of a foreign copper mine project, this paper introduces the application of MIM in project evaluation procedures including establishment of underground mine resource model, rock mechanics research, 3D design of pit, 3D engineering design, 3D simulation of ventilation, excavation schedule, cost estimate and financial analysis, etc. and explores a new consulting design method and approach.

Key words: underground mine; project evaluation; 3D design; new design procedure

1 前言

矿山项目评价结果是资源开发、矿权转让等投资行为决策的重要依据,通过从技术和经济两方面进行大量的分析研究工作来评价项目^[1]。目前,开展矿山项目评价采用的设计方式仍停留在二维、经验、类比,通过人工计算工程量和材料量等阶段,设计效率低,不精确和不直观,并开始探索三维设计的应用^[2],并利用三维矿山软件开展数字化工作,进行计划编制^[3-4],三维采场爆破设计^[5]。伴随着矿业走出去以及资源全球化战略布局的发展,国内咨询设计单位承接的国际矿业项目快速增长,国内传统的设计思维、设计方法和工具等受到了巨大的冲击。项目评价工作提出了新要求。

中国工程院院士于润沧提出了矿山信息模型(MIM)的概念,通过MIM技术体系建设,实现矿山真三维可视化设计,协同工作,技术经济评价和全生命周期模拟^[6],基于上述矿业发展背景和MIM技术,介绍了MIM在国外某地下铜矿项目评价上的应用案例,探索国内咨询设计发展的新趋势。

国外某地下铜矿位于非洲中部,1977年矿山投产,矿山两度被淹,于2018年重新投产,矿山主要回

采285 m以上矿体。矿山采用主斜坡道+副井+斜井+回风井的开拓方式,设计生产规模60万t/年。

矿体走向长度2000 m,倾角25°~30°,真厚度1~12 m;采矿方法为点柱式上向水平分层充填法、两步骤上向水平分层充填法和房柱采矿法。矿床涌水量大,约8万m³/d。

2 项目评价流程

考虑矿山项目评价会涉及诸多专业的三维设计,例如地表选矿厂、建筑、总图、管廊等。本文主要聚焦在矿山地下,并详细介绍MIM在项目评价流程的应用,主要流程为资源模型创建、岩石力学研究、采场三维设计、工程三维设计、通风三维模拟、采掘进度计划、投资估算、财务分析。

2.1 资源模型创建

矿山通过地表勘探,共完成870个钻孔(其中720个见矿),形成了钻孔数据库,利用国际知名矿业软件Datamine RM完成建模、品位估值和资源分级等工作,得到矿化体的线框模型、块模型和地层模型。

按照边界铜品位2.0%进行资源量估算,考虑矿山是恢复生产矿山,建模时需扣除历史采空区,扣除后的资源量见表1。

2.2 岩石力学

根据巴顿岩体质量Q分类指标、岩体地质力学分类(RMR)等分类条件,对岩芯进行岩体质量分类,并对岩样开展相关的岩石力学试验,获得GSI、

[作者简介] 翟建波(1986-),男,高级工程师,经济师,从事矿业咨询设计和项目管理、数字化设计、智慧矿山和矿业国际化技术研究。

[引用格式] 翟建波,孙学森,王凯,等. MIM在地下矿山项目评价的应用[J]. 中国矿山工程,2022,51(3):20-25+89.

RMR、Q、UCS、弹性系数、摩尔库仑和霍克布朗力学参数等。

表 1 国外某地下铜矿估算资源量表

| 级别 | 资源量/万 t | 铜品质/% | 砷品位/% |
|-----|---------|-------|-------|
| 探明的 | 150 | 6.33 | 0.92 |
| 控制的 | 1 100 | 5.34 | 0.96 |
| 小计 | 1 250 | 5.45 | 0.96 |
| 推断的 | 1 200 | 4.75 | 1.14 |
| 合计 | 2 450 | 5.10 | 1.05 |

基于上述已获得岩石力学数据和推荐的采矿方法,结合地下水、地应力分布规律等其他因素,根据 Mathews 稳定图表法和 Obert & Duball 的矿柱设计理论分别进行采场跨度分析和矿柱设计分析,并进一步利用 FLAC^{3D} 等三维数值模拟软件进行数值分析,最终确定点柱式上向水平分层充填法、两步骤上向水平分层充填法和房柱采矿法的采场结构参数、开采顺序优化以及开采对地表的扰动范围等稳定性评价内容。

2.3 采场设计

基于伦敦金属交易所近十年的铜价及其他技术经济因素确定本次设计的铜价为 6 600 \$/t,成本估算的参数见表 2。

表 2 成本估算的主要参数表

| 描述 | 单位 | 数量 |
|----------|-------|---------|
| 采矿成本 | \$/t | 52.65 |
| 选矿成本 | \$/t | 12.50 |
| 管理成本 | \$/t | 21.5 |
| 铜精矿品位 | % | 47.7 |
| 硫化矿铜精矿品位 | % | 50 |
| 氧化矿铜精矿品位 | % | 23 |
| 精矿湿度 | % | 10 |
| 冶炼回收率 | % | 96.75 |
| 冶炼成本 | \$/t | 82.5 |
| 精炼成本 | \$/lb | 0.082 5 |
| 铜精矿运输成本 | \$/t | 80 |
| 阴极铜运输成本 | \$/t | 165 |
| 关税 | \$/t | 260 |
| 资源税率 | % | 6 |

基于上述参数对采矿的最低边界品位进行计算分析,确定点柱式上向水平分层充填采矿法、两步骤上向水平分层充填采矿法和房柱采矿法的边界铜品

位分别为 2.17%、2.48% 和 1.93%。

结合采矿方法、中段划分及边界品位等因素,利用 Datamine MSO 模块对采场进行优化设计,具体如图 1 所示,图中浅色区域为点柱式上向水平分层充填法,深色区域为两步骤上向水平分层充填法,粉色区域为房柱法。

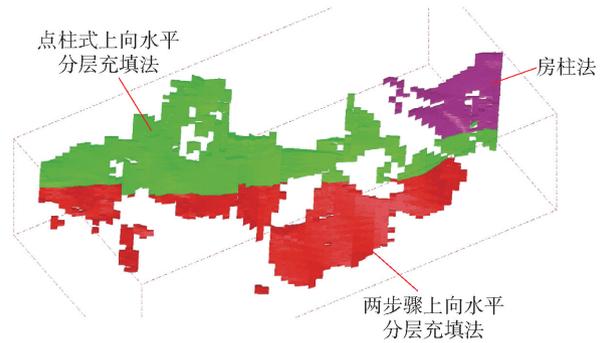


图 1 采场设计

2.4 工程设计

基于已有工程、开拓系统、区域划分,中段划分、采矿方法、井巷工程等设计原则,利用 Datamine Studio 3 进行开拓工程、采准工程、硐室工程等三维设计,设计矿山井下工程系统如图 2 所示,图中左边区域为新建井下工程,右边区域为已有工程。

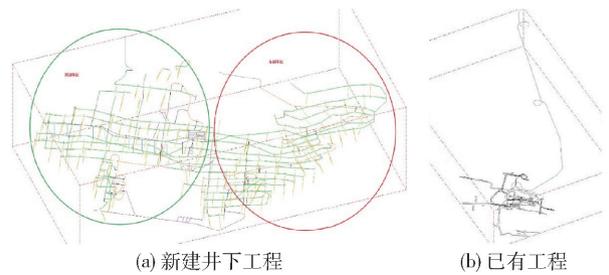


图 2 矿山井下工程系统

2.5 通风模拟

基于井巷工程的设计参数、阻力系数等因素,将三维设计工程数据导入通风模拟仿真软件 Ventsim 中,可以得到全矿的通风数据,通风建构物的布置及风机的选型等,使得数据的真实性、精确性、模拟性、可视化等大大提高。通风系统如图 3 所示。

2.6 采掘进度计划

基于已完成的矿山井下工程和采场设计,获得了三维的工程线数据和采场实体数据。根据设备和通过大件的尺寸、设备之间、设备与支护(或管缆)之间的安全间隙,人行道、架线、管缆敷设、通风、稳定性等要求确定井巷工程的断面和坡度等参数,井巷工程设计参数见表 3。

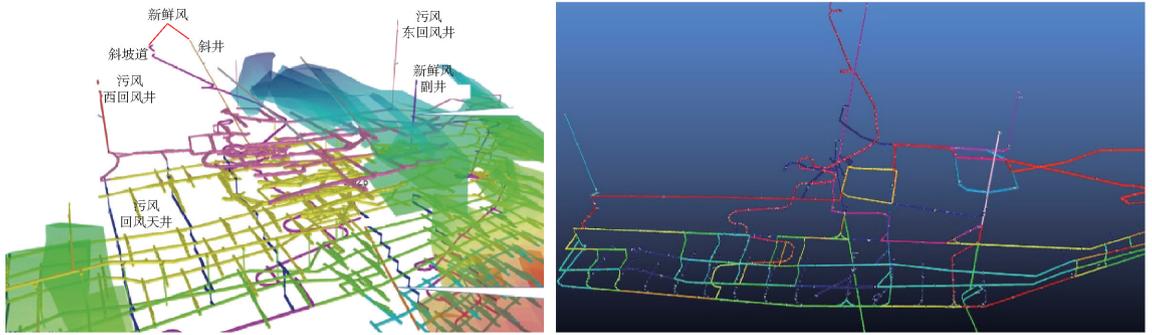


图3 通风系统图

表3 井巷工程主要参数表

| 序号 | 描述 | 断面类型 | 长度/m | 宽/m | 高/m | 布置间距/m | 坡度 |
|----|--------|-------|-------|--------|-----|----------|------|
| 1 | 回风井 | 圆形 | | φ4.5 | | | -90° |
| 2 | 其他硐室 | 1/3 拱 | 20 | 7 | 7 | | |
| 3 | 排水硐室 | 1/3 拱 | 40 | 6 | 14 | | |
| 4 | 排水钻孔 | 圆形 | | φ425mm | | | -90° |
| 5 | 疏干巷道 | 1/3 拱 | | 3.9 | 4.2 | | 3‰ |
| 6 | 斜井 | 1/4 拱 | | 4 | 3.5 | | -25° |
| 7 | 斜坡道 | 1/5 拱 | | 5 | 5 | | -8° |
| 8 | 维修巷道 | 1/5 拱 | 15 | 5 | 5 | | |
| 9 | 分段联络道 | 1/5 拱 | 30~35 | 5 | 5 | | |
| 10 | 下盘分段巷道 | 1/5 拱 | 矿体走向长 | 5 | 5 | 每 25 m 高 | 3‰ |
| 11 | 风井联络道 | 1/4 拱 | | 4 | 4 | | |
| 12 | 回风天井 | 圆形 | 25 | φ3 | | | -90° |
| 13 | 错车道 | 1/3 拱 | 20 | 7.5 | 5 | 300~400 | 3‰ |
| 14 | 分层联络道 | 1/3 拱 | | 4.5 | 4.5 | 100~150 | ±8° |

其中下盘分段巷道根据采矿方法不同,距离矿体下盘边界的距离不同,对于点柱式上向水平分层充填法和两步骤上向水平分层充填法,取90~100 m,对于房柱采矿法,取50~60 m。

在进行采掘进度计划编制前,还需确定工程的成巷速度指标和采场生产指标以及采矿影响因子等。井巷的成巷速度指标见表4,采场生产指标见表5,采矿影响因子见表6。

设计完成上述参数后,利用 Datamine Studio 5D-Planner 建立井巷工程和采场实体模型,具体如图4所示,并设置依赖关系、成巷速度、回采速度,将块体模型数据接入,然后导入 EPS/EPS Intouch 软件完成采掘进度计划,通过数据分析可得到矿山全生命周期的生产进度计划和掘进计划,采掘进度计划模型如图5、图6所示。

表4 井巷成巷速度指标表

| 序号 | 描述 | 每月进尺/m |
|----|--------|--------|
| 1 | 回风井 | 100 |
| 2 | 其他硐室 | 30 |
| 3 | 排水硐室 | 30 |
| 4 | 排水钻孔 | 60 |
| 5 | 疏干巷道 | 70 |
| 6 | 斜井 | 60 |
| 7 | 斜坡道 | 80 |
| 8 | 维修巷道 | 100 |
| 9 | 分段联络道 | 80 |
| 10 | 下盘分段巷道 | 70 |
| 11 | 风井联络道 | 60 |
| 12 | 回风天井 | 60 |
| 13 | 错车道 | 70 |
| 14 | 分层联络道 | 80 |

表5 采场生产指标表

| 采矿方法 | 点柱式上向水 | 两步骤上向水 | 房柱采矿法 |
|----------|--------|--------|-------|
| | 平分层充填法 | 平分层充填法 | |
| 每月生产能力/t | 15 000 | 15 000 | 3 600 |

表6 采矿影响因子表

| 序号 | 描述 | 因子 | 备注 |
|-----------------------|----------|-------|------------------------|
| A 点柱式上向水平分层充填法 | | | |
| 1 | 采矿损失率 | 39.5% | |
| | 包含:矿柱 | 18.9% | 点柱 5 m × 5 m |
| | 上盘和下盘 | 7.2% | 上盘和下盘的边界回采损失 |
| | 水平矿柱 | 13.4% | 每隔 75 m 垂高留 10 m 的水平矿柱 |
| 2 | 贫化 | 8.2% | |
| | 包含:上盘和下盘 | 7.2% | 上盘和下盘的边界废石混入贫化 |
| | 充填贫化 | 1.0% | |
| B 两步骤上向水平分层充填法 | | | |
| 1 | 采矿损失率 | 9.8% | |
| | 包含:上盘和下盘 | 9.8% | 上盘和下盘的边界回采损失 |
| 2 | 贫化 | 8.2% | |
| | 包含:上盘和下盘 | 7.2% | 上盘和下盘的边界废石混入贫化 |
| | 充填贫化 | 1.0% | |
| C 房柱采矿法 | | | |
| 1 | 采矿损失率 | 22.4% | |
| | 包含:矿柱 | 12.9% | 点柱 5 m × 5 m |
| | 间柱和顶柱 | 9.5% | 采场间柱 3 m 和顶柱 4 m |
| 2 | 贫化 | 8.0% | |
| | 包含:过采 | 5.0% | 上盘和下盘 10 cm 过采 |
| | 铲运机出矿贫化 | 3.0% | |

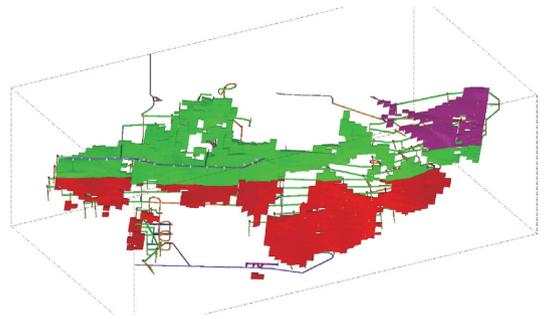


图4 井巷工程和采场模型

有的进度计划数据信息,可以通过数据后处理得到不同的输出成果,按采区统计的生产进度计划如图7所示,按采区统计的掘进进度计划如图8所示,矿山各中段的生产开始时间和结束时间如图9所示,矿山关键硐室工程完成时间点如图10所示,按中段统计的生产进度计划如图11所示。

2.7 投资估算和财务分析

通过对井巷工程进行综合单价估算,导入 EPS 进度计划软件,可以进行投资估算(包含基建投资和运营投资),可以得到全生命周期内每年的投资,且在计划进行变化时,自动更新投资,节省投资估算工作时间,提高工作效率,为后续财务分析提供了精确的投资估算和发生时间点。井巷工程单价见表7,按各类工程统计每年的投资估算如图12所示。

基于投资估算结果,考虑营收、成本、税金等因素,建立财务模型,进行敏感性分析,得出项目的经济指标,例如财务净现值,项目回收期,财务内部收益率。项目现金流如图13所示。

3 MIM 应用前景

20 世纪 80 年代,我国咨询设计企业逐渐丢掉

利用矿业三维软件完成的采掘进度计划包含所

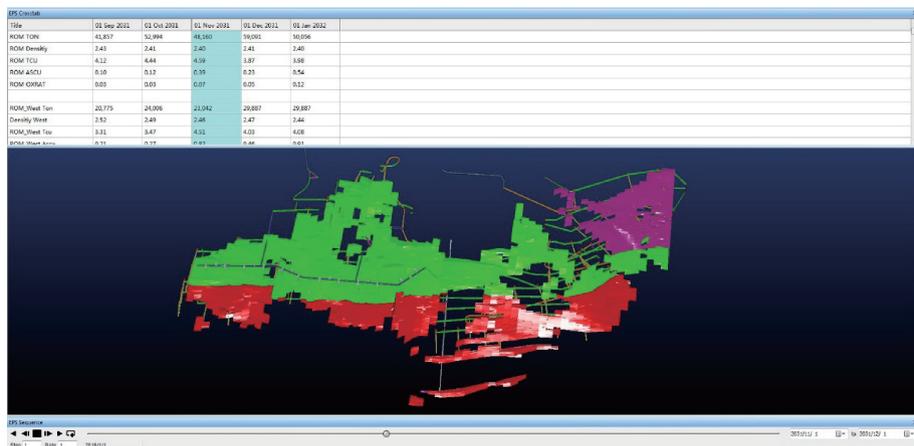


图5 采掘进度计划数据与可视化联动模型

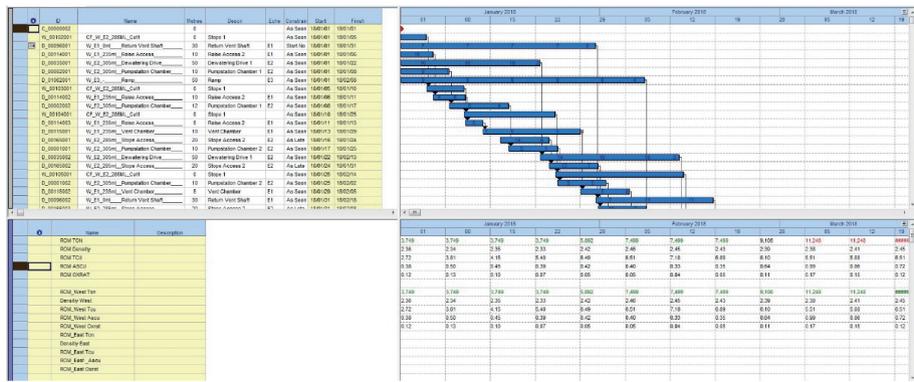


图6 采掘进度计划数据模型

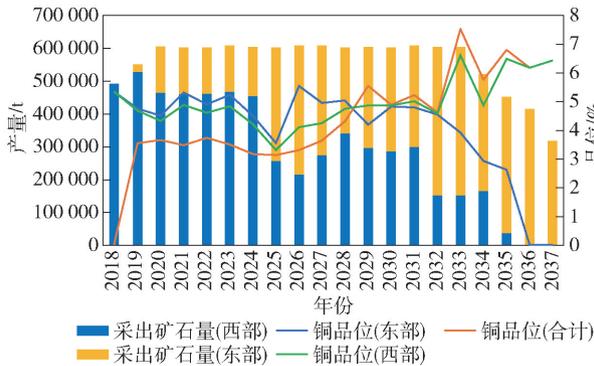


图7 生产进度计划图(按采区统计)

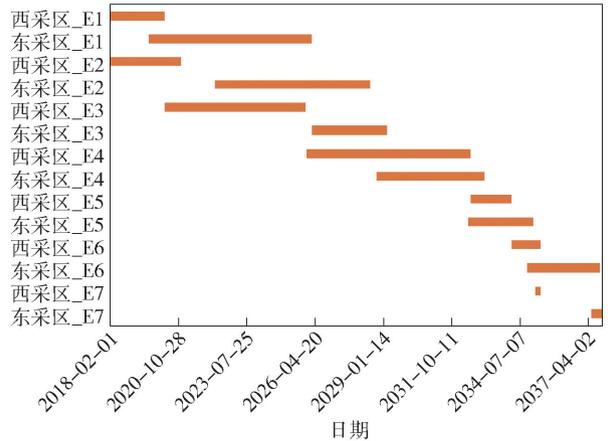


图9 各中段生产时间线(按采区统计)

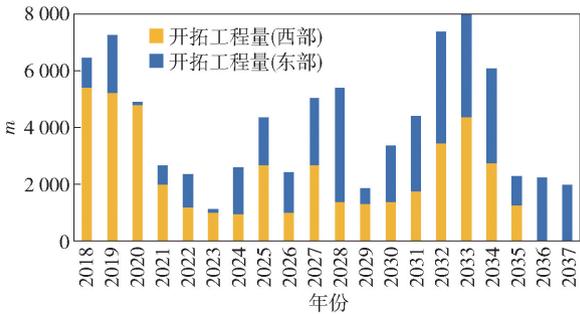


图8 掘进进度计划图(按采区统计)

图板,进入二维CAD绘图阶段,经过几十年的发展,设计方法和设计理念虽已趋于成熟,但多是根据专业技术人员的经验或类比结果,用AUTOCAD之类的二维绘图软件进行绘图,再通过人工统计计算工程量与材料量,再通过OFFICE软件编辑设计文档等,这使得咨询设计工作效率低,协同差,结果无法自动可视化,更不易模拟和仿真,很难检验其正确性

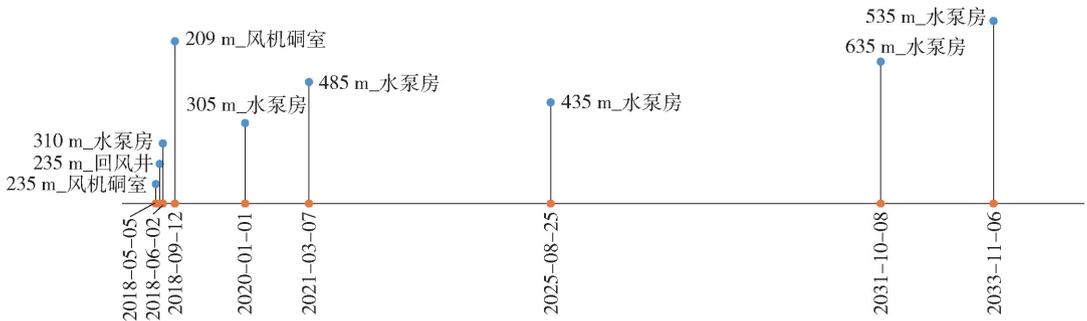


图10 井下主要硐室完成里程碑

和科学性,无法满足数字化设计和智能矿山建设的需求。

启三维设计探索,经过数十年的探索,发展仍然较慢。但近些年随着互联网、物联网、人工智能、大数据、区块链等计算机技术的快速发展,且考虑国

国内从20世纪末开始逐步引进三维软件,开

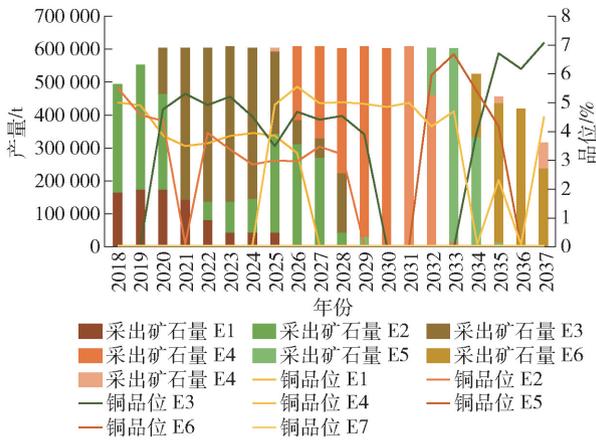


图 11 生产进度计划图(按中段统计)

内人口老龄化和劳动力成本的上升,智能矿山成为矿业发展的趋势,而 MIM 是未来智能矿山的信
息数据基础。因此,MIM 的发展将从源头上解决
智能矿山实施困难的问题,对于促进智能矿山的
建设有着重大意义。

表 7 井巷工程单价表

| 序号 | 描述 | 每米单价/ \$ |
|----|--------|----------|
| 1 | 回风井 | 3 800 |
| 2 | 其他硐室 | 12 000 |
| 3 | 排水硐室 | 22 000 |
| 4 | 排水钻孔 | 400 |
| 5 | 疏干巷道 | 3 300 |
| 6 | 斜井 | 3 200 |
| 7 | 斜坡道 | 5 800 |
| 8 | 维修巷道 | 5 400 |
| 9 | 分段联络道 | 5 400 |
| 10 | 下盘分段巷道 | 5 400 |
| 11 | 风井联络道 | 3 400 |
| 12 | 回风天井 | 2 000 |
| 13 | 错车道 | 9 200 |
| 14 | 分层联络道 | 3 800 |

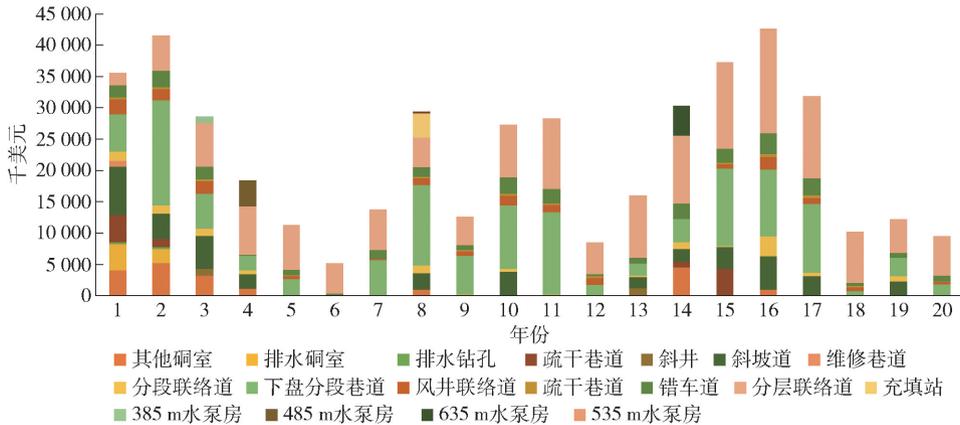


图 12 每年投资估算图(按工程统计)

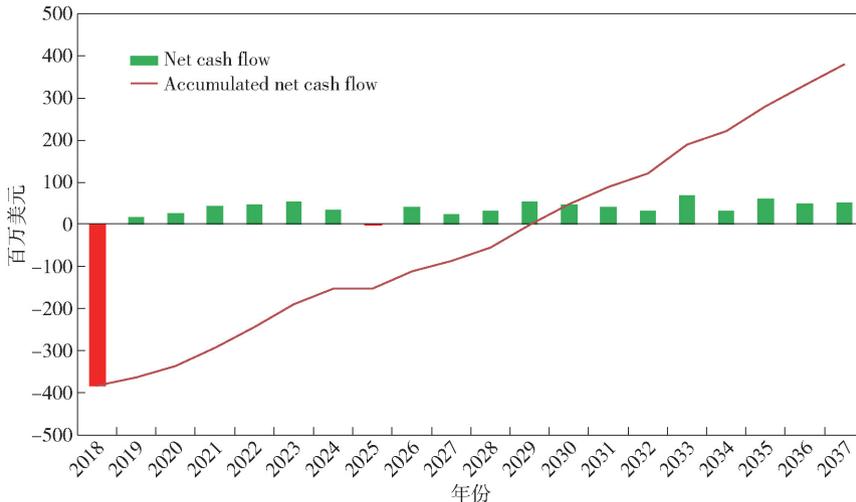


图 13 项目每年现金流图