

# 煤矿超深竖井 TBM 大巷施工物料运输方案研究\*

吴根生, 白玉杰, 孙 义

(中国水利水电第六工程局有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

**[摘要]** TBM 在煤矿大巷开挖领域的应用日益增加, 施工物料在巷道内运输对 TBM 施工效率、安全和质量具有重要影响。针对深井 TBM 大巷施工物料运输困难问题, 开展全面分析研究, 应用分块设计技术对 TBM 刀盘等大部件进行针对性设计, 并开发了辅助运输工装, 以克服 TBM 大件井下运输尺寸问题; 对斜巷物料运输技术方案进行全流程设计, 解决了长距离、大坡道物料提升困难难题; 对 TBM 物料运输效率进行全面分析, 为现场物料调度方案提出建议。从大件设备运输、长距离坡道运输、运输效率提升 3 个角度出发, 分析主要问题, 提出全新设计方案, 顺利完成了超深竖井 TBM 大巷物料运输, 保障了 TBM 效率。

**[关键词]** 隧道掘进机; 竖井; 物料运输; 煤矿巷道; 方案

[中图分类号] TD82 [文献标识码] A [文章编号]

## Material Transportation Solutions for Ultra-deep Vertical Shaft TBM Excavation in Coal Mines

WU Gensheng, BAI Yujie, SUN Yi

(Sinohydro Bureau 6th Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110179, China)

**Abstract:** Application of TBM in coal mine excavation is increasing, and the transportation of construction materials within the tunnel significantly impacts efficiency, safety, and quality of TBM. To address the challenges of materials transportation for deep vertical shaft TBM operations, a comprehensive analysis was conducted. Block design technology was applied for targeted design of large TBM components like the cutter head, and auxiliary transportation tools were developed to overcome size issues for underground transportation of large TBM parts. A full-process design was implemented for inclined shaft material transportation, solving difficulties associated with long-distance and steep slope material lifting. The efficiency of TBM material transportation was thoroughly analyzed, and the recommendations for on-site material scheduling were proposed. By examining issues from the perspectives of large equipment transportation, long-distance inclined transportation, and efficiency improvements, new design solutions were proposed, ensuring successful material transportation for ultra-deep vertical shaft TBM operations, maintaining TBM efficiency.

**Keywords:** tunnel boring machine (TBM); vertical shaft; material transportation; coal mine roadway; schemes

### 0 引言

\* 中国电力建设股份有限公司科技项目 (DJ-XDXM-2021-38)

[作者简介] 吴根生, 正高级工程师, E-mail: nej-wgs@163.com

[通信作者] 孙 义, 工程师, E-mail: 290651027@qq.com

[收稿日期] 2024-01-09

随着我国浅部煤炭资源枯竭, 千米深井日益增多。传统的矿山法无法满足在高压、高地温环境下安全、快速施工岩石巷道的需求<sup>[1]</sup>。因此, 将 TBM 应用于煤矿深井巷道施工是一种有效的技术途径, 也是巷道掘进的前提和保障<sup>[2,3]</sup>。

然而, 深井 TBM 大巷施工也面临着众多挑战, 其中之一是物料运输问题。首先,

煤矿 TBM 需在井下狭窄空间进行组装。受制于矿井、巷道断面形状、运输设备承载能力, TBM 大型组件、物料运输非常困难<sup>[4]</sup>。其次, 深井 TBM 掘进作业物料运输过程与传统山岭 TBM 隧道存在显著区别, 无法直接套用传统施工过程物料运输经验<sup>[5-6]</sup>。TBM 破岩步进应与支护物料运输同步进行, 以确保推进结束后可立即开展支护作业, 提高施工效率<sup>[7]</sup>。因此, 合适的物料调运组织和高效的物料运输设备是保障上述工序有效衔接的基础之一<sup>[8]</sup>。

基于上述分析, 需在 TBM 施工前进行全面分析研究。开发合适的运输装备, 提出完备的运输调度方案, 以确保 TBM 组件、物料顺利运输, 提高施工效率。

## 1 依托工程及物料运输条件限制

### 1.1 工程概况

高家堡煤矿位于陕西省咸阳市长武县, 是一座现代化大型矿井。该煤矿计划采用 TBM 工法将既有西区辅助运输大巷扩建延

伸至西部矿井。TBM 始发前矿井已投产, 拟在既有西区辅运巷道末端扩挖硐室, 进行 TBM 组装、始发。TBM 始发、掘进过程所需物料均须通过既有运输系统输送。

施工现场垂直物料吊运由副井承担, 井深 800m、直径 8.5m, 运输容器为一罐笼, 长、宽、高为 5.8, 2.4, 3.8m, 最大荷载 370kN。井底运输巷道断面净宽、高为 4.5, 2.8m, 全长 3 300m, 主要的物料运输装备为有轨胶轮车、铲板车, 最大荷载 250kN。

根据扩建巷道设计要求, 巷道全长 5 856.9m, 最大埋深 930m。现场采用 1 台敞开式 TBM 施工, 刀盘直径 6.5m, 整机长 167m。TBM 在既有辅运巷道扩建硐室始发, 掘进 1 098m 后, 需调整方向至 299°, 转弯弧长为 154m。然后, 按 299°方位开始掘进, 施工坡度为 0.5%, 共掘进 670m。然后以 6°起坡穿越煤层, 共 487m。最后, 再按 0.5%坡度继续掘进, 直至达到西部矿井边界, 如图 1 所示。

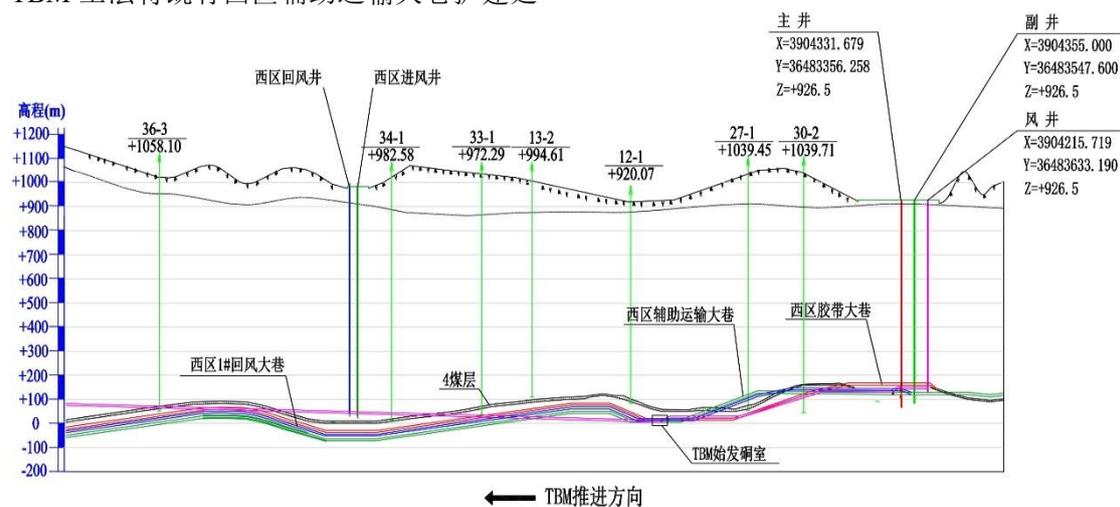


图 1 工程剖面

Fig.1 Profile of the project

### 1.2 运输限制条件分析

1)本工程为深井下 TBM 掘进施工, 需将 TBM 构件运输到地下巷道进行组装, 传统施工经验并不适用。首先, 受矿井运输系统尺寸限制, 需对 TBM 大件进行拆解, 使得拆分块长、宽、高均小于罐笼长、宽、高 5.8, 2.4, 3.8m; 拆分块长度或高度小于既有巷道断面宽度 4.5m, 宽度小于断面高度 2.8m。其次, 拆分块质量应小于罐笼、巷道

运输胶轮车、铲板车最大承载力 370, 250kN。

2)TBM 施工到斜坡段后, 现场物料运输车牵引能力不足, 需增添设备, 辅助牵引物料运输车顺利通过斜坡段。

## 2 TBM 大件运输方案

矿井物料经由副井罐笼垂直吊运, 井下使用胶轮车或铲板车在巷道中运输。受制于承载力、结构形状, 常规尺寸 TBM 大件无

法通过既有系统运输至组装硐室，需进行针对性设计。

### 2.1 刀盘分块设计

使用分块设计方法将刀盘拆解成小块运输。刀盘拆解方法遵循以下原则，即拆解后刀盘最大不可拆分块质量应该小于罐笼、井下运输车的最大承载力，长度和高度应小于罐笼和巷道断面的最大通过尺寸。对于运输来说，期望能将刀盘拆解成尽可能小的分块，方便运输。但随着分块增多，刀盘的整体刚度会下降，不利于 TBM 施工过程中破岩掘进，也不利于组装。基于上述考虑，将刀盘拆分为 5 块，包括 1 块中心块和 4 块边块。最大不可拆解件为中心块，长、宽、高为 3.45, 1.68, 3.45m，重 32t，如图 2 所示。

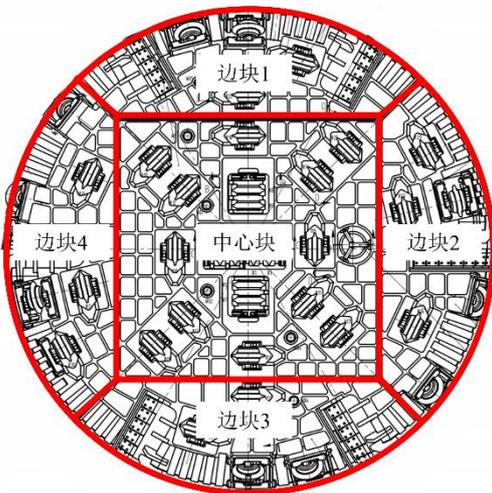
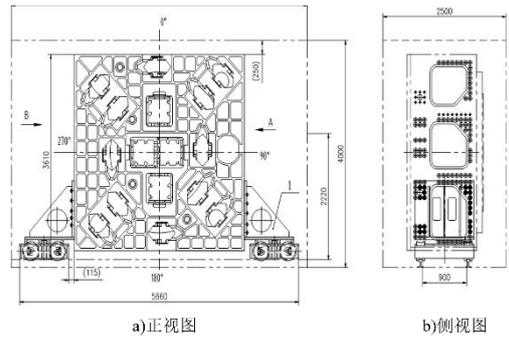


图 2 刀盘分区示意

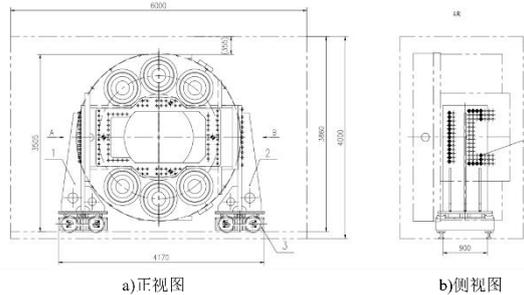
Fig.2 Block design of cutterhead

### 2.2 刀盘分块运输设计

经过分块设计后的部分 TBM 组件质量超过井下巷道运输板车承载力，需针对性设计运输装备以满足井下巷道设备运输需要。设计了一种可在深井下狭小空间内运输 TBM 中心块、主驱动的工装轮，如图 3 所示。工装轮能在运输轨道上自由牵引，可适应不同的轨道转弯半径，能最大限度减少运输空间限制。



a 中心块工装轮



b 主驱动工装轮

图 3 中心块、主驱动工装轮设计

Fig.3 Design of center block and main drive auxiliary transportation tools

在运输 TBM 组件前，将运输工装轮组置于轨道上，通过螺栓连接组件与支座。随后，利用吊装设备将 TBM 大件整体落在工装轮组上，实现运输，如图 4 所示。由于该装置中支座与组件采用螺栓连接，因此可方便拆卸。该装置安装简单、易于操作，同时具有重复使用优势。



图 4 主驱动工装轮实际安装效果

Fig.4 Installation effect of main drive auxiliary transportation tool

## 3 TBM 施工物料运输设备选型

TBM 施工过程中, 高效物料运输是保证 TBM 高效掘进的基础。运输设备的输送能力是决定物料运输效率的关键因素之一, 在施工设计阶段, 对物料运输设备进行全面的运输能力验算, 确保满足 TBM 施工需求。

### 3.1 竖井运输设备选型

副井是连通地面与井下巷道的交通枢纽, 承担全矿井材料、人员、大型物件的垂直提升任务。在设计阶段, 需根据负荷能力、提升效率需求, 为竖井配备合适的提升容器。依据本工程特点, 需着重考虑提升设备对 TBM 大件、施工物料的运输能力。

#### 3.1.1 提升容器确定

提升容器为一宽一窄罐笼和交通罐带平衡锤, 罐笼主要负责岩石渣料、物料、人员运送, 交通罐主要负责人员运送。罐笼最大承载 37t, 自重 40t; 交通罐带平衡锤最大承载 0.8t, 自重 4t。

#### 3.1.2 提升钢丝绳、提升机选择

采用式(1)~式(3)进行钢丝绳安全系数验算。

$$F_{j-m} = \frac{1}{n}(Q + Q_z) + ph_0 + q(H + H_w) \quad (1)$$

$$m = \frac{Q_d}{F_{j-m}} \quad (2)$$

$$m_a = A - 0.005H_c \quad (3)$$

式中:  $F_{j-m}$  为钢丝绳所受最大静张力(kN);  $Q$  为容器有效荷载(kN);  $Q_z$  为容器自重(kN);  $p$  为主绳单位长度自重 (kN/m);  $h_0$  为容器卸载位置到天轮中心线距离 (m);  $q$  为尾绳单位长度自重 (kN/m);  $H$  为矿井深度(m);  $H_w$  为尾绳环高度 (m);  $m$  为钢丝绳实际安全系数;  $Q_d$  为钢丝绳中所有钢丝的破断力总和(kN);  $m_a$  为规定的钢丝绳安全系数;  $A$  为既定安全系数, 在升降人员时取 9.2, 升降物料时取 8.2;  $H_c$  为钢丝绳提升高度(m)。

根据计算, 罐笼在满员升降工况下, 规定钢丝绳安全系数为 8.76; 在满载提升物料工况下, 规定钢丝绳安全系数为 7.76。交通罐满员升降工况下, 规定钢丝绳安全系数为 8.78。最终, 罐笼、交通罐选择的主钢丝绳、提升尾绳参数如表 1, 2 所示。根据复核校验, 罐笼在满员、满载工况下, 主钢丝绳实际安全系数分别为 9.84, 8.1, 均大于允许安

全系数, 符合要求。

表 1 主钢丝绳性能指标

Table 1 Performance indicators of main steel wire rope

项目	一宽一窄罐笼	小罐带平衡锤
型号	58 ZBB 6×28+SFC 1770ZZ/SS	24 ZBB 6×36WS+FC 1670ZS/SZ
主钢丝绳根数 $n_1$ /根	4	2
钢丝绳直径 $d_1$ /mm	58	24
公称抗拉强度 $\sigma_{B1}$ /MPa	1 770	1 670
最小钢丝破断拉力总和 $Q_{d1}$ /kN	2 640	389
单位长度质量 $P_{k1}$ /(kg·m <sup>-1</sup> )	13.9	2.19
最粗钢丝直径 $\delta_{max}$ /mm	≤4	≤1.8

表 2 提升尾绳性能指标

Table 2 Performance indicators of the tail rope

项目	一宽一窄罐笼	小罐带平衡锤
钢丝绳尺寸/mm	196×31	58×13
公称抗拉强度 $\sigma_{B2}$ /MPa	1 470	1 470
单位长度质量 $P_{k2}$ /(kg·m <sup>-1</sup> )	18.60	2.16

#### 3.1.3 提升机选型

根据钢丝绳承受的最大静张力及在主摩擦轮上所受的最大静张力差, 确定罐笼、交通罐提升机型。

根据计算, 提升最大件(重 37t)时, 钢丝绳在主摩擦轮上所受最大静张力为 1 303kN; 宽罐提升最大件、窄罐配 2 个特制平衡矿车时, 钢丝绳在主摩擦轮上所受最大静张力差为 183.1kN。因此, 选用 JKMD-5.5×4P (III) 型落地式多绳提升机, 最大提升力 1 450kN, 承受最大静张力差 450kN。

采用同样方式选择交通罐提升机型, 计算所得钢丝绳最大静张力、最大静张力差分别为 88, 4.5kN, 选择 JKMD-2.25×2 (I) 型提升机, 最大提升力 105kN, 承受最大静张力差 30kN。

### 3.2 斜巷提升绞车选型

根据巷道设计要求，TBM掘进过程中需经历6°上坡施工。在上坡掘进时，需增设绞车辅助物料车牵引运输。TBM上坡施工阶段，在TBM4号滑车与1号拖车间的连接桥处增设5号滑车，绞车安设于5号滑车上。待设备全部穿过6°上坡段后，将绞车安设在6°上坡段顶盘处。根据上坡段物料车受力特点，简化物理学模型，如图5所示。最大需牵引力计算公式由式(4)~式(7)给出。单次运输最大质量单位为1辆满载6m³砂浆罐车或2辆满载矿车，按车自重7t、物料自重14.4t合计21.4t进行最大牵引力计算。

$$F = (G_1 + G_2)\sin\alpha + f_1 + f_2 \quad (4)$$

$$G_2 = P_s \times L \times g \quad (5)$$

$$f_1 = \mu_1 G_1 \cos\alpha \quad (6)$$

$$f_2 = \mu_2 G_2 \cos\alpha \quad (7)$$

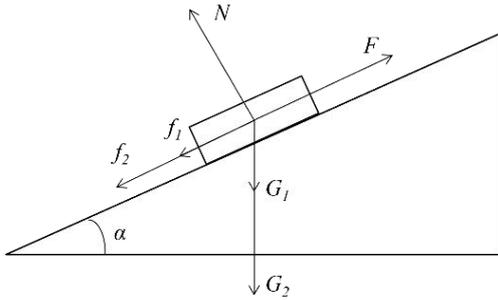


图5 绞车提升重物受力模型

Fig.5 Force model of winch lifting heavy object

式中： $F$ 为单钩提升最大牵引力(kN)； $G_1$ 为满载砂浆罐车总重(kN)； $G_2$ 为提升钢丝绳总重(kN)； $f_1$ 为砂浆罐车运行阻力(kN)； $f_2$ 为钢丝绳运行阻力(kN)； $P_s$ 为钢丝绳单位长度质量(m/kg)； $L$ 为斜坡道总长(m)，取490m； $g$ 为重力常量，取9.8N/kg； $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 分别为砂浆罐车、钢丝绳运行阻力系数，分别取0.02、0.2。

最后计算得到所需最大牵引力为28.6kN。基于巷道运输系统既有设备，选择JD-4型调度绞车，最大能提供40kN牵引力，满足施工需求。

### 4 TBM施工物料运输分析

充分的物料运输效率分析有利于进行全面的施工规划，恰当衔接TBM掘进施工各工序，助力TBM高效施工。

#### 4.1 竖井运输效率

5阶段速度图通常用于描述机械运动的加速、匀速和减速过程，常用于竖井罐笼提升效率运算。根据提升机性能参数，计算运输速度、确定最大班作业时间。使用5阶段速度图的计算过程如表3所示。载人罐笼最大速度 $v_{max}$ 不得超过式(8)计算值，且 $\leq 12\text{m/s}$ 。最大加速度 $\leq 0.75\text{m/s}^2$ 。根据计算结果，最大加速度取 $0.6\text{m/s}^2$ ，最大速度取值 $10\text{m/s}$ 。

$$v_{max} = 0.5\sqrt{H_c} \quad (8)$$

表3 5阶段速度计算

Table 3 Five-stage velocity calculation

序号	名称	计算公式	计算结果	
			JKMD-5.5×4(III)	JKMD-2.25×2(I)
1	主加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	$a_1$	0.6	0.6
	主加速时间/s	$t_1=v/a_1$	16.67	13.93
	主加速距离/m	$H_1=0.5vt_1$	83.33	58.23
2	主减速度/(m·s <sup>-2</sup> )	$a_3$	0.6	0.6
	主减速时间/s	$t_3=(v-v_4)/a_3$	15.83	13.1
	主减速距离/m	$H_3=0.5(v+v_4)t_3$	83.11	58.03
3	爬行速度/(m·s <sup>-1</sup> )	$v_4$	0.5	0.5
	爬行距离/m	$H_4$	3	3
	爬行时间/s	$t_4=H_4/v_4$	6	6

	制动速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	$a_5$	1	1
4	制动时间/s	$t_5 = v_4 / a_5$	0.5	0.5
	制动距离/m	$H_5 = 0.5v_4t_5$	0.125	0.125
	正常提升速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v$	10	8.36
5	等速距离/m	$H_2 = H_1 - (H_1 + H_3 + H_4 + H_5)$	636.935	687.115
	等速时间/s	$t_2 = H_2 / v$	63.7	82.19
6	一次运行时间/s	$t = t_1 + t_3 + t_4 + t_5 + t_2$	102.7	115.72
	休止 升降人员		204	56
7	时间 提矸	—	40	—
	/s 设备、材料		88	—
	一次 升降人员		306.7	343.44
8	提升 提矸、煤	—	142.7	—
	时间 设备、材料		190.7	—
	/s			

根据表 3，可确定 TBM 掘进过程各工序的提升时间。按不同工序的提升需求，计算各工序提升作业时耗。计算结果如表 4 所

示，最大班工人下井时间为 15.34min，最大班作业时间为 3.45h，小于最大班作业最大时间 30min 与 4.5h，符合要求。

**表 4 各工序作业时间**

**Table 4 Operating time for each operation**

序号	作业项目	单位	每班提升量	每班提升次数/次	一次提升时间/s	每班作业时间/s
1	下井人员	人	247	3	306.7	920.1
2	提升人员	人		2	306.7	613.4
3	升降其他人员	人	—	2	306.7	613.4
4	提矸	车	120	30	142.7	4281
5	下放坑木	车	2	2	190.7	381.4
6	材料设备	车	10	10	190.7	1 907
7	水泥沙石	车	10	5	190.7	953.5
8	雷管、炸药	车	1	1	670	670
9	保健	车	2	2	190.7	381.4
10	其他	车	9	9	190.7	1 716.3
11	合计	—	—	—	—	12 437.5

#### 4.2 巷道运输效率

TBM 开挖断面直径 6.5m，根据以往经验，在岩石强度较高、完整岩体条件下，每个掘进需水泥砂石、坑木、钢筋网、锚杆

等物料约 1 车。在岩石强度较低、破碎地质带，每环需物料约 5 车。因此，在项目规划中，按每个掘进 2 车物料需求量计算物料运输时耗。

既有西区辅运大巷长 3 300m, 在该段采用胶轮车运输物料。由于坡道起伏, 忽略两端加减速阶段, 认为整个运输过程为匀速运动, 运输时间计算由式 (9) 得到, 其中  $t_1$  为既有巷道运输时间 (s);  $l_1$  为巷道长度 (m), 取 3 300m;  $v_c$  为胶轮车运输速度(m/s)<sup>[9]</sup>。计算得既有巷道运输时间为 397.6s, 往返时长 795.2s。

$$t_2 = \begin{cases} \frac{x}{v_c} & 0 \leq x < 1922 \\ 240.25 + \frac{x-1922}{v_d} & 1922 \leq x < 2412 \\ 240.25 + 350 + (x - 1922 - 490)/v_c & 2412 \leq x \leq 5856.9 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $t_2$  为扩建巷道物料运输耗时(s);  $x$  为当前 TBM 掘进距离(m);  $v_d$  为绞车拉升速度 (m/s), 取 1.4m/s。

由式(10)可看出, 当 TBM 未到达上坡段时, 单次运输最大耗时 240.25s, 往返耗时 480.5s; 当 TBM 在上坡段掘进时, 单次运输最大耗时 590.25s, 往返耗时 1180.5s; 当 TBM 穿过上坡段后, 单次运输最大耗时 1 020.8s, 往返耗时 2 041.7s。

### 4.3 物料运输效率分析

理想情况下, TBM 在一次掘进循环完成后, 物料车已按时抵达 TBM 支护铺设处, 实现掘进与支护工序的及时衔接。这要求物料往返运输时间不大于 TBM 一次掘进循环时间。根据以往经验<sup>[10-11]</sup>, 相似刀盘直径 TBM 一次掘进循环时间平均约为 40min。由表 4 可知, 2 辆物料运输车往返提升时间为 762.8s, 因此在 TBM 掘进巷道中运输时间最大为 1 637.2s。由式 (10) 可知, 在 TBM 穿过上坡段后可能会出现物料运输不及时的情况, 对应的掘进距离  $x$  为 4 238.8m。因此, 在 TBM 里程 >4 238.8m 后应尽量提高物料运输速度, 保证物料输送及时性。

## 5 结语

基于高家堡煤矿西区辅运大巷开拓工程, 开展了 TBM 施工物料运输研究, 得到如下结论。

1) 针对煤矿竖井与巷道运输能力限制, 提出 TBM 刀盘分块设计技术, 针对性设计了大块物件运输装备工装, 克服了因 TBM 组件尺寸过大难以在竖井与深井大巷中运

$$t_1 = \frac{l_1}{v_c} \quad (9)$$

TBM 施工段全长 5 856.9m, 前 1 922m 与后 3 444.9m 为平段, 中间 490m 为 6°上坡段。上坡段需使用 JD-4 型调度绞车辅助运输, 绞车单次可牵引满载矿车 2 辆。车辆在平段以最大运输速度匀速前进, 在上坡段以最大拉伸速度匀速上升。巷道运输时耗由式 (10) 给出。

输的难题。

2) 对 TBM 施工物料运输难点进行全面分析, 对主要运输设备进行选型分析。

3) 通过运输效率分析, 在 TBM 开挖里程 >4 238.8m 后, 须提高物料运输速度, 才能保证 TBM 掘进与支护工序的及时衔接。

### 参考文献:

- [1] 徐国耀. TBM 在煤矿巷道中应用的可行性研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- XU G Y. The feasibility analysis of applying TBM into construction of coal mine tunnel [D]. Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [2] 范京道, 封华, 宋朝阳, 等. 可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 499-514.
- FAN J D, FENG H, SONG Z Y, et al. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai Coal Mine [J]. Journal of China coal society, 2022, 47(1): 499-514.
- [3] 李潮, 鲁义强, 陈召, 等. 矿用硬岩巷道机械化掘进破岩形式研究现状及展望 [J/OL]. 煤炭科学技术: 1-11 [2024-01-03].
- LI C, LU Y Q, CHEN Z, et al. Research status and prospect of rock breaking form in mechanized excavation of mining hard rock roadway [J/OL]. Coal science and technology: 1-11 [2024-01-03].

- 
- [4] 刘海波.煤矿井下长距离斜巷轨道运输问题分析及应对技术研究[J].机械管理开发,2023,38(3):214-215,218.
- LIU H B. Analysis of long-distance underground slanting tunnel track transportation problems in coal mines and research on coping technology[J]. Mechanical management and development, 2023, 38(3): 214-215,218.
- [5] 杨垒.大断面煤矿TBM组装流程及关键技术[J].中国新技术新产品,2021(17):94-96.
- YANG L. Assembly process and key technologies of TBM in large cross-section coal mine[J]. New technology & new products of China, 2021(17): 94-96.
- [6] 周广稳,甄耀祖.电动物料转运系统在埋深式竖井开挖施工中的应用研究[J].四川水利,2019,40(5):44-46.
- ZHOU G W, ZHEN Y Z. Application research of electric material transfer system in excavation construction of deeply buried shaft[J]. Sichuan water resources, 2019, 40(5): 44-46.
- [7] 杨建喜,张进,李世民,等.开敞式TBM隧道仰拱衬砌同步施工关键技术[J].隧道建设,2017,37(5):622-629.
- YANG J X, ZHANG J, LI S M, et al. Key technologies for synchronous construction of inverted arch lining of tunnel bored by open TBM[J]. Tunnel construction, 2017, 37(5):622-629.
- [8] 岳顺利,吴青瑜,严定成.高原地区长大隧道TBM物料运输施工措施[J].云南水力发电,2022(9):273-277.
- YUE S L, WU Q Y, YAN D C. Construction measures for TBM material transportation of large and long tunnels in plateau area[J]. Yunnan water power, 2022(9):273-277.
- [9] 煤炭工业济南设计研究院有限公司,中国煤炭建设协会勘察设计院委员会.煤矿井下辅助运输设计规范:GB 50533—2009[S].北京:中国计划出版社,2009.
- Coal Industry Jinan Design & Research Co.,Ltd.,Survey and Design Committee of China Coal Construction Association.Code for design of underground auxiliary haulage system of coal mine:GB 50533 — 2009[S].Beijing:China Planning Press, 2009.
- [10] 李厚峰.复杂地质环境对TBM掘进速度的影响[J].人民黄河,2018,40(11):119-121.
- LI H F. Research on the influence of complex geological environment on TBM tunneling efficiency[J]. Yellow River,2018, 40(11):119-121.
- [11] 王旭,李晓,苏鹏程.预测TBM掘进速率的难点及对策研究[J].现代隧道技术,2009,46(4):71-76.
- WANG X, LI X, SU P C. Research on the difficulties and countermeasures of predicting TBM advance rate[J]. Modern tunnelling technology,2009,46(4): 71-76.