

大规模矿山的长距离胶带输送系统设计探讨

Design and Discussion of Long Distance Belt Conveyor System in Large Mine

张伟, 李琳光(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:国外某大型矿山,生产规模达6000万t/a,且地处内陆地区,矿体狭长,距离选矿工业场地较远、地势起伏陡峭、地形自然坡度大。该项目矿石运输兼具运量大、运距长、运输难度大等特点。对于大规模矿山而言,带式输送机因其具有运输量大、可长距离运输、自动化程度高、并能实现连续运输的优势,在矿山生产过程中发挥着极其重要的作用。与此同时,由于需要输送的距离越来越长,单段带式输送机很难满足矿山整体的散料输送要求,大运量、大角度接力运输的带式输送机系统得到普遍应用。本文借鉴现有矿山带式输送机接力系统的生产数据,以该大型矿山为背景,对带式输送机系统的可靠性和能耗情况进行分析计算,为类似项目提供参考。

关键词:带式输送机; 接力运输; 可靠性; 有效运行时间; 能耗

中图分类号: TD528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0060-05

Abstract: A 60 million tons/a scale mine abroad is located in an inland area. The ore body is narrow and far from the mineral processing industry site, with steep terrain and natural slopes. The transportation of ore in this project is characterized by high volume, long distance, and high difficulty in transportation. For large-scale mines, belt conveyors play an extremely important role in the production process due to their advantages of large transportation capacity, long-distance transportation, high degree of automation, and the ability to achieve continuous transportation. At the same time, due to the increasing distance required for conveying, single section of belt conveyor is difficult to meet the overall requirements of bulk material transportation in mines. Belt conveyor systems with large capacity and large angle relay transportation are widely used. This article draws on the production data of the system of existing mining belt conveyor to analyze and calculate the reliability and energy consumption of the belt conveyors system against the background of this large mine, providing reference for similar projects.

Key words: belt conveyors; relay transport; reliability; effective operating time; energy consumption

1 前言

2021年,我国铁矿石资源消费量达到14.2亿t,全球占比高达63.1%^[1]。而我国已探明铁矿储量中可利用量有限,且品位低、开采条件差,一是贫矿多,贫矿储量占总储量的80%;二是多元素共生的复合矿石较多^[2]。长期以来,我国进口铁矿石依存度非常高,尤其近年来,进口铁矿石价格不断突破历史新高,每年需要花费大量外汇进口铁矿石。

国外某大型铁矿资源储量大,品位高,属于世界级大矿,加快推进该矿山的开采对缓解国内铁矿石进口压力有着非常积极的作用。该矿地处内陆地区,矿体狭长,距离选矿工业场地较远、地势起伏大、

地形自然坡度大,运输难度较大。

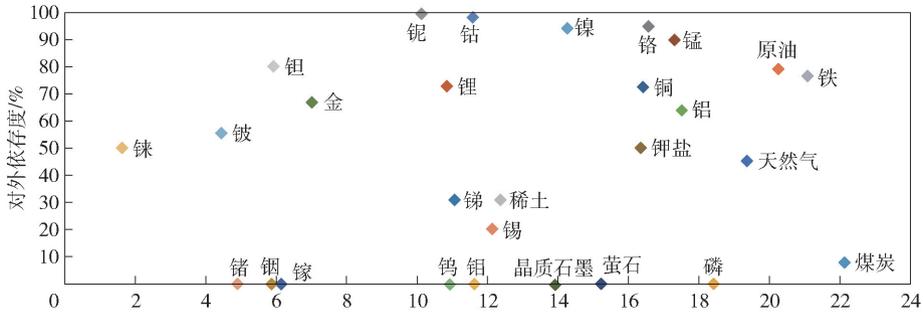
与此同时,随着长距离带式输送机制造技术和设计理念的发展成熟,带式输送机的运输结构简单、运输量大、运距长、装卸便利、可靠性高、运输效率高等优势得以充分发挥^[3],能够极好的适应地形变化,解决大规模矿山散状物料的运输问题。

该矿山拟采用露天开采方式,通过带式输送机系统将破碎后矿石运输至选矿厂,矿山生产规模为6000万t/a。

一期工程开采其中两个矿区,采场矿石经破碎后由矿石胶带输送系统运输至选矿厂。其中,南部矿区矿石破碎后依次经排料胶带机、S3、S2、

[作者简介] 张伟(1986—),男,河北保定人,高级工程师,主要从事矿山机械相关的咨询、设计及研究工作。

[引用格式] 张伟,李琳光.大规模矿山的长距离胶带输送系统设计探讨[J].中国矿山工程,2024,53(1):60-64+78.



注:①横坐标是以 e 为底数消费量(吨)为真数的自然对数;②铁为品位 60.5% 铁矿石,磷为 P₂O₅ 30% 磷矿石,锰、铬为矿石,萤石为氟化钙含量,钾盐为 K₂O,稀土为 REO,铝、铜、镍、锡、钨、钼、钽、铋、锂、金、铀、钨、钼、钽、锆、铍、铀等为金属。

图 1 2021 年我国主要矿产消费量与对外依存度情况

S1 等四段胶带机运输至选矿厂;北部矿区矿石破碎后依次经排料胶带机、N4、N3、N2、N1 等五段胶带机运输至选矿厂。南、北两个矿区最大生产规模均为 4 000 万 t/a,共计产出矿石 6 000 万 t/a。两个矿区的矿石均需通过带式输送机系统接力运输至选矿厂。

串联布置是机械系统中最常见的方式之一。对于大规模、长距离带式输送机系统,不可避免的会需要采用串联布置方式。由于串联系统中,每条带式输送机的运行是相互独立的,每条带式输送机的运行情况都会影响到整个输送系统的运行,每条带式输送机的停机都会造成整个系统的停机。本文以国外某大型露天铁矿为背景,对采用带式输送机系统接力运输时,运输系统的有效工作时间和能耗情况进行分析,为类似项目提供参考。

2 串联系统的可靠性

2.1 串联系统的可靠性模型

串联布置是机械系统中最常见的模型之一^[4],系统可靠性框图如图 2 所示。



图 2 串联系统可靠性框图

假设串联系统中有 n 个零部件,且相互独立,每个零部件的可靠度为 $R_i(t)$,则其数学模型为

$$R_s(t) = R_1(t)R_2(t)\cdots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (1)$$

式中: $R_s(t)$ 为系统的可靠度; $R_i(t)$ 为第 i 个零部件的可靠度。

通常情况下,系统的可靠度是随着组成串联系统零件数的增大而降低,其在数值上总是小于或等于最不可靠零部件的可靠度,即:

$$R_s(t) \leq \min \{ R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t) \} \quad (2)$$

从式(1)和式(2)可以看出,整个系统的可靠性主要受到串联系统中零部件的数量和各零部件自身的可靠性的影响。

2.2 串联带式输送机系统的可靠性分析

长距离带式输送机系统设计应尽可能减少分段数量、增加单条带式输送机的长度,减少中间转载环节^[5]。对于本项目而言,矿体狭长,距离选矿工业场地较远、高差较大,同时,生产规模要达到 6 000 万 t/a,单条带式输送机运输距离有限,不可避免的需要采用多段带式输送机接力运输的方式。除受到串联系统中带式输送机数量的影响,接力运输的带式输送机系统的可靠性还受到单条带式输送机的可靠性的影响。

对于接力运输的带式输送机系统而言,系统的可靠性直接影响到其有效作业时间,也就成为系统运输能力的计算基础,将决定系统的最小运输能力要求。由于该项目为新建矿山,带式输送机可靠性数据参考类似项目收集到的数据。

根据国外某矿山长距离、大运量带式输送机 2017—2018 年生产数据的统计分析,平均每年生产情况如下。

- (1) 日历时间:8 760 h。
- (2) 计划停机时间:678 h。
- (3) 意外(非计划)停机时间及待机时间:445 h。
- (4) 当前系统可靠性:94.5%。
- (5) 系统年均运行时间:7 637 h。

(6)平均每年非计划停机时间及次数见表1。

表1 某矿山长距离带式输送机平均每年非计划停机时间及次数

停机原因	操作原因	电气故障	机械故障	动力故障
平均每年非计划停机时间/h	79.09	99.87	130.05	28.06
平均每年非计划停机次数/次	76	100	79	43

考虑到该条带式输送机已服务约20年和当时建造的技术水平等因素,在本项目上认为当前技术进步和装备水平提高,依据上述数据对带式输送机因操作、电气及机械故障造成的非计划停机时间和次数进行相应调整,并参考该项目执行情况,给出推荐的检修制度和计划停机时间。

1) 矿山生产时间:7 920 h

矿山工作制度为每年330 d,每天3班,每班8 h。

2) 计划停机时间

- ① 每两周停机检修一次,每次8 h;
- ② 每半年停机检修一次,每次5 d;
- ③ 半年检当周不进行周检。

因此:计划停机时间为432 h。

3) 非计划停机时间

所参考项目自动控制水平一般,本项目通过采用高水平的自动控制系统减少人为因素造成的停车、选用先进的驱动装置及配套电控设备等措施,尽可能减少因电气或机械故障停机及检修的次数和时间。

考虑动力故障的影响作用于整个系统,而非单条胶带机,对于单条胶带机故障停机时间主要考虑操作原因(人为)、电气故障和机械故障。

因操作、电气及机械故障造成的非计划停机时间见表2。

表2 带式输送机(单条)平均每年非计划停机时间

停机原因	操作原因	电气故障	机械故障	合计
平均每年非计划停机时间/h	50	62	81	193

注:①不同运量、长度、配置的带式输送机故障率不同,为简化计算,此处按相同计;

②非计划停机时间根据年计划运行时间进行折算,并假定技术进步可使故障率降低1/3。

因此,单条带式输送机的可靠度为

$$R_i(t) = 1 - \frac{\text{计划外停机时间}}{\text{矿山生产时间} - \text{计划检修时间}} = 1 - \frac{193}{7\,920 - 432} = 97.42\% \quad (3)$$

动力故障时间单独计算,与矿山实际情况有关,为简化计算过程,参照该矿山情况,按年停机时间28 h考虑。

以北部矿区矿石运输为例,计算串联带式输送机系统的可靠度。

该系统共5条带式输送机,该系统的可靠度为

$$R_s(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t) \times R_4(t) \times R_5(t) = 87.76\% \quad (4)$$

即,不考虑动力故障停机及外部因素导致的非满载运行时间等因素,带式输送机系统计划外停机时间为

$$(\text{矿山生产时间} - \text{计划停机时间}) \times (1 - \text{系统可靠度}) = 917 \text{ h} \quad (5)$$

根据经验,外部因素导致的非满载运行时间按720 h计,同时,考虑动力故障停机时间,该系统年有效工作时间(EOT)为

$$\text{EOT} = \text{矿山生产时间} - \text{计划停机时间} - \text{系统非计划停机时间} = 5\,823 \text{ h/a} \quad (6)$$

按照系统生产任务4 000万t/a、矿石含水率最大10%计算,考虑1.2倍的生产不均衡系数,串联带式输送机系统小时运输能力应不小于9 200 t/h。

3 系统的能耗要求

北部矿区和南部矿区带式输送机基本参数见表3。

从表中可以看出,矿区的胶带输送系统中,既包含可能发电的下运带式输送机,也包含耗电的上运带式输送机,且由于矿山生产需要,北部矿区和南部矿区的生产任务会发生变化,运量也随之改变,使得整个系统的能耗情况变得非常复杂。

为更准确的计算出整个系统的能耗情况,首先需要逐条计算带式输送机在不同运量、不同工况下的轴功率。各条带式输送机在不同工况下的轴功率见表4。

以其中的S3胶带机为例,线路布置如图3所示。从图上可以看出,S3胶带机既有水平和上运段,又有下运段,结合表4中的数据可以看出,该条胶带机既存在发电工况,也存在电动工况。D、E为上运或水平段,当仅上运段或水平段有料时,该条带式输送机处于最大电动工况,A、B、C为下运段,当

表3 带式输送机基本参数

	运量/ $t \cdot h^{-1}$	带宽/mm	带速/ $m \cdot s^{-1}$	水平长度/m	提升高度/m
S区排料胶带机	4 600	2 400	3.15	50	0
S3	9 200/4 600	2 000	4.5	3 085	-90
S2	9 200/4 600	2 000	4.5	3 237	-262
S1	9 200/4 600	2 400	3.15	218	29
N区排料胶带机	4 600	2 400	3.15	50	0
N4	4 600	1 600	4.5	1 111	-120
N3	4 600/9 200	2 000	4.5	2 778	-93
N2	4 600/9 200	2 000	4.5	3 276	-262
N1	4 600/9 200	2 400	3.15	193	29

表4 带式输送机不同工况下的轴功率

	运量/ $t \cdot h^{-1}$	不同工况下的轴功率/kW			
		空载	满载	最大电动工况	最大发电工况
S区排料胶带机	4 600	34	63	—	—
S3	9 200	1 725	1 569	5 540	-3 969
	4 600	1 725	1 647	3 633	-1 683
S2	9 200	1 832	-4 956	1 832	-4 956
	4 600	1 832	-2 155	1 832	-2 155
S1	9 200	103	1 030	—	—
	4 600	103	567	—	—
N区排料胶带机	4 600	34	63	—	—
N4	4 600	347	-1 222	662	-1 439
N3	4 600	1 176	948	1 831	-734
	9 200	1 176	-1 089	2 849	-1 745
N2	4 600	1 852	-2 142	2 071	-2 239
	9 200	1 852	-4 937	2 290	-5 131
N1	4 600	102	557	—	—
	9 200	102	1 011	—	—

时,各条带式输送机的料将逐渐卸载,A、B、C段无料,而D、E段有料的情况也是极大可能发生的。依此类推,需要对各条带式输送机可能出现的工况进行分析。

而对于系统而言,并非是对上述所有工况进行排列组合,而应对系统可能发生的工况进行分析,判断该工况发生的概率分析,按照经常发生、可能发生、小概率事件和不可能发生的情况进行分类,将能够通过合理化控制从而避免发生的情况进行剔除,从而得到生产中需要考虑的工况。

为简化计算过程,以S区生产2 000万t/a矿石为例。在矿山正常生产时,可能出现以下工况,具体情况见表5。

系统启动时,带式输送机自下游到上游依次启动,停车时,带式输送机自上游到下游依次停车。实际生产过程中,采用的是延时启动的控制策略,在上游物料到达下游胶带机前,使下游胶带机达到额定运行状态。为简化计算过程,此处按系统启动时所有带式输送机均启动,停机时均停机考虑。表6为对应表5正常生产时可能出现的能耗情况。从表中可以看出,启动过程中,当物料由S2胶带机向S1胶带机转运时,出现了发电工况。

根据表4可以看出,S3和S2胶带机均为既有发电工况又有电动工况的情况,还需要针对单条胶带机的工况进行分析。S3胶带机分析如前所述,S2胶带机因整体各段均为下运,实际生产中最大发电

仅下运段有料时,该条带式输送机处于最大发电工况。对于S3而言,空载和满载工况是一定存在的;当带式输送机开始上料时,极大可能出现A、B、C段有料,而D、E段无料的情况,即,最大发电工况是很可能出现的;同样的,当带式输送机系统准备停机

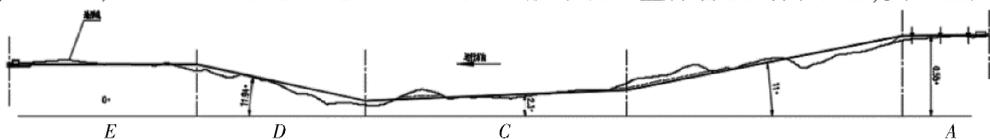


图3 带式输送机S3线路布置图

表5 S区带式输送机系统可能出现的工况(正常生产)

		可能出现的工况(对应运量,t/h)							
S区排料胶带机	0	4 600	4 600	4 600	4 600	0	0	0	0
S3	0	0	4 600	4 600	4 600	4 600	0	0	0
S2	0	0	0	4 600	4 600	4 600	4 600	0	0
S1	0	0	0	0	4 600	4 600	4 600	4 600	0

表6 S区带式输送机系统可能出现的能耗情况(正常生产)

		可能出现的工况(对应功率,kW)							
S区排料胶带机	34	63	63	63	63	34	34	34	34
S3	1 725	1 725	1 647	1 647	1 647	1 647	1 725	1 725	1 725
S2	1 832	1 832	1 832	-2 155	-2 155	-2 155	-2 155	1 832	1 832
S1	103	103	103	103	567	567	567	567	103
轴功率(发电)	0	0	0	-2 155	-2 155	-2 155	-2 155	0	0
轴功率(耗电)	3 694	3 723	3 645	1 813	2 277	2 248	2 326	4 158	3 694

工况就是发生在满载下运时。因此,系统可能出现 的工况见表7和、表8。

表7 S区带式输送机系统可能出现的工况(正常生产,考虑下运带式输送机的不同工况)

		可能出现的工况(对应运量,t/h)									
S区排料胶带机	0	4 600	4 600	4 600	4 600	4 600	0	0	0	0	
S3	0	0	仅下运段有料	4 600	4 600	4 600	4 600	仅上运和水平段有料	0	0	0
S2	0	0	0	0	4 600	4 600	4 600	4 600	4 600	0	0
S1	0	0	0	0	0	4 600	4 600	4 600	4 600	4 600	0

表8 S区带式输送机系统可能出现的能耗情况(正常生产,考虑下运带式输送机的不同工况)

		可能出现的工况(对应功率,kW)									
S区排料胶带机	34	63	63	63	63	63	34	34	34	34	34
S3	1 725	1 725	-1 683	1 647	1 647	1 647	1 647	3 633	1 725	1 725	1 725
S2	1 832	1 832	1 832	1 832	-2 155	-2 155	-2 155	-2 155	-2 155	1 832	1 832
S1	103	103	103	103	103	567	567	567	567	567	103
轴功率(发电)	0	0	-1 683	0	-2 155	-2 155	-2 155	-2 155	-2 155	0	0
轴功率(耗电)	3 694	3 723	1 998	3 645	1 813	2 277	2 248	4 234	2 326	4 158	3 694

从表8中可以看出,启动过程中,当物料由排料胶带机向S3胶带机转运时,已经出现了发电工况,而非前述表6的时间点。

此外,由表4可以看出,若考虑最不利情况,S区带式输送机系统最大发电轴功率为-3 838 kW,发生在S3胶带机仅下运段有料、S2胶带机满载运行、其他胶带机停机的情况;最大耗电轴功率为6 095 kW,发生在S3胶带机仅上运和水平段有料、S2胶带机空载运行、排料胶带机及S1胶带机满载运行时。与表8给出的能耗情况相比,发电量和耗

电量都大了很多,经过分析可知,系统发生上述工况的概率较低,且均可通过合理控制避免该情况发生。

依据上述结果,可得到对应2 000万t/a生产规模时,S区带式输送机系统在生产过程中的最大发电量和最大耗电量,同理,N区也是如此。从而可得到矿区带式输送机系统运行时最大耗电量及发电量,以及对应的发生时间,为合理安排设备起停时间、调配系统能耗需求、合理选择发电站配置等提供依据。

(下转第78页)