

高海拔地区地下矿山压气设施的设计及优化

魏国昌^{1,2}

¹中冶沈勘秦皇岛工程设计研究总院有限公司, 河北 秦皇岛

²河北省绿色智能矿山工程设计技术创新中心, 河北 秦皇岛

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年3月30日; 发布日期: 2023年4月10日

摘要

在高海拔地区, 由于大气条件的变化引起空压机工况的变化。空压机站设计中需根据所处位置的气候特点、生产用气要求等, 通过相应的修正系数合理计算, 选择合适的设备及生产流程, 以保证空压机站满足生产需要。通过选用变频控制空压机、对风量进行优化计算等以降低系统能耗, 实现节能降耗和资源合理利用。

关键词

高海拔, 螺杆空压机, 压力损失, 变频, 冷却方式

Design and Optimization of Underground Mine Air Compressor in High Altitude Area

Guochang Wei^{1,2}

¹MCC SKET Qinhuangdao Co., Ltd., Qinhuangdao Hebei

²Hebei Province Green Intelligent Mine Engineering Design Technology Innovation Center, Qinhuangdao Hebei

Received: Feb. 28th, 2023; accepted: Mar. 30th, 2023; published: Apr. 10th, 2023

Abstract

In the high altitude area, the atmospheric condition change causes the air compressor working condition change. In the design of the air compressor station, it is necessary to select the appropriate equipment and production flow through the reasonable calculation of the corresponding correction coefficient, according to the climatic characteristics of the location and the requirements of production gas, etc., to ensure that the air compressor station to meet production needs. In order to reduce the energy consumption of the system and realize the energy saving and reasonable utilization of resources, the air compressor is controlled by frequency conversion and the

文章引用: 魏国昌. 高海拔地区地下矿山压气设施的设计及优化[J]. 矿山工程, 2023, 11(2): 161-167.

DOI: 10.12677/me.2023.112021

air flow is optimized.

Keywords

High Altitude, Screw Air Compressor, Pressure Loss, Frequency Conversion, Cooling Mode

Copyright © 2023 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

目前随着社会的不断进步和科学技术的蓬勃发展,空压机得到了广泛的应用,比如气动机械设备的驱动、地下矿山压缩自救系统的气源等。开采矿山,尤其是地下开采的矿山,使用空气压缩机是非常广泛的。空压机是利用压缩空气能够对外做功来驱动气动工具和设备,利用压缩空气作为动力来源能够避免产生电火花从而引发爆炸维修,而且压缩空气具有较好的柔韧性和抗冲击性能,可以用做变负荷情况时的动力来源,气动机械设备排出来的废气可以帮助地下矿井巷道通风和降温,改善地下矿山井下开采的工作环境,而且在突发灾变的时候地表空压机站能通过压气管网向井下输送新鲜的空气,为井下滞留的人员提供氧气,避免因氧气不足窒息死亡,降低安全风险,为应急救援提供了保障。在不同的气候条件下,通过合理计算和修正选择合适的设备和生产流程,既能满足生产需要,又能达到节约能源降低消耗的目的[1]。

2. 空压机发展历史

空气压缩机简称空压机,它的种类繁多。空压机是工业生产中一种经常使用的通用机械设备,按工作原理可以分为两大类:容积型空压机和速度型空压机[2]。容积型空压机的运行特点,气体压力的变化是由于空压机气缸中气体的体积被压缩减小,单位气体体积中分子的密度增加。速度型空压机的运行特点,气体的压力的变化是由于分子的速度转化而成,先使气体分子在空压机中达到一个非常高的运动速度,然后在扩压器中急剧降速,使分子的动能转化为位能。根据常规的分类形式,容积式空压机有往复式和回转式等,回转式空压机可分为滑片式、转子式、螺杆式等,往复式空压机可分为活塞式、膜式等;速度型空压机可分为轴流式、混流式和离心式等。

前些年我国金属非金属矿山广泛使用容积型、往复式、活塞式的空压机,其次是螺杆式和滑片式空压机。在我国活塞式空压机占总产量的70%以上,但该类型机组尺寸大、质量大、易损件多,近年来发展速度已明显落后于离心式和螺杆式空压机。

国外从上世纪30年代开始研究离心式空压机,近年来的发展速度很快。在主要的工业国家,离心式空压机的产量比例逐年提升,其排气量一般在 $12\text{ m}^3/\text{min}$ ~ $400\text{ m}^3/\text{min}$ 之间。同时对改进离心式空压机的结构、降低比功率、减少噪声等方面取得了显著的效果。离心式空压机有向中、小容量发展的趋势,一般单机排气量在 $60\text{ m}^3/\text{min}$ 以上时,建议选择离心式空压机。在化工、石油、冶金、建材等矿山开采和物料输送项目上,离心式空压机的应用比较广泛。

1950年前后,螺杆式空压机能够实现了工业化生产。在动力用空压缩领域里,螺杆式空压机的发展速度已经明显超过了活塞式空压机。螺杆式空压机非常多的优势,比如外形紧凑、质量轻、结构简单、零件少等,因此在移动空压机中更具有优越性。目前在我国,螺杆式空压机已经广泛应用于化工、冶金、

建材矿山开采的多个领域。

在美国、日本和西欧，移动式空压机中也以螺杆式和滑片式为主。近年来，螺杆式空压机的排气量范围不断向大和小的两个方向发展。因此这个类空压机的适用范围也在不断扩大。螺杆式空压机当排气压力范围为 0.7 MPa~0.8 MPa 时，比功率在 4.85 kW/(m³/min)~5.8 kW/(m³/min)。排气量增大时其运转时的噪声也会增大，且属于高频的转子对材料要求高，加工难度大，因此在今后一段时期内，小容量的空压机以发展螺杆式空压机为主，而对大中容量的空压机则发展活塞式和离心式为主。近年来的统计数据表明：西欧、美国、日本等国家，在选择 40 m³/min 以下的空气压缩机时，选螺杆式的占 70%~80%。

3. 地下矿山压气设施设计一般原则

压缩空气站应设置于地表，且宜采用集中布置[3]。空压机站宜靠近用气负荷的中心，运输方便，水电等能源供应条件良好，并应有留有扩建规模的可能性。

压缩空气站区附近应无可燃性、腐蚀性气体和有毒性气体；与排土场、烟囱、排风井等污染源的最小距离不应小于 150 m，并应位于排土场、烟囱、排风井等污染源全年风向最小风频的上风侧。空压机站与其他建筑设施的间距应符合有关国家工业企业设计卫生标准的规定，并应符合现行国家标准如《工业企业总平面设计规范》等的有关要求。

一般以全矿最大的耗气量作为供气量。按用气负荷分布和供气量大小，确定空压机型号和台数。空压机的供气能力应满足矿山设计生产能力时的气动设备用气量之外，还应满足矿山其他用气需要，如压风自救系统等。空压机站内一般应选择同类型号的设备产品，不宜超过两种，并兼顾基建、生产的延续使用。站内安装空压机台数一般为 3~5 台，不宜超过 6 台，备用台数按大于计算供气量的 20% 考虑，但不得少于 1 台。机组检修时，必须确保计算供气量。移动式空压机的备用量应不少于计算供气量的 30%，并且不应少于 1 台。空气压缩机与储气罐之间应装设止回阀，空气压缩机与止回阀之间的排气管道应装设放气阀。储气罐室外布置时应布置在阴凉的地方，必要时可以加设顶棚，与站房外墙的净距离不宜小于 3 m。

对于扩大生产规模的老矿山，既要考虑生产规模的扩大，用气量可能增加，又要考虑生产工艺流程的改变引起的压气系统的优化，还要考虑充分利用现有压气设备设施，避免投资浪费。

4. 高海拔地区压气设施配置

4.1. 高海拔地区气候变化

高海拔地区的温度、湿度、气压等因素变化，给空压机站的使用带来了生产能力下降，总压缩比增高、排气温度上升等一系列问题[4]。

空气的密度、温度、压力、湿度、重量等参数都随海拔高度的变化而变化。密度、温度、气压、重量等都会随海拔高度的增加而递减，根据实验空气动力学，当海拔高度 $H < 11,000$ m 时，大气压力、温度和密度可分别由《采矿设计手册：矿山机械卷》中的公式求得[3]：

$$P = P_0 \left(1 - \frac{1}{44300} H \right)^{5.264} \quad (1)$$

$$T = T_0 - 0.0065H \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{1}{44300} H \right)^{4.256} \quad (3)$$

式中： P ——海拔高度为 H 时的大气压力，Pa；

- T ——海拔高度为 H 时的大气温度, $^{\circ}\text{C}$;
 ρ ——海拔高度为 H 时的大气密度, kg/m^3 。
 P_0 ——空压机在 0 m 标高工作条件时的大气压力, Pa ;
 T_0 ——空压机 0 m 标高工作条件时的大气温度, $^{\circ}\text{C}$;
 ρ_0 ——空压机 0 m 标高工作条件时的大气密度, kg/m^3 。

4.2. 高海拔地区压气设施选型计算

压气设施应保证在整个矿山生产服务期限内, 供给各类气动工具足够数量、压力的压缩空气, 同时保证经济合理性。金属非金属地下矿山常用的气动工具主要有凿岩机、井下凿岩台车、井下凿岩台架、风镐、气动装岩机、天井气动设备、气动绞车、露天钻机、气动闸门等。各类用气设备用气量在 $0.5\text{ m}^3/\text{min}\sim 25\text{ m}^3/\text{min}$ 之间, 用气压力在 $0.35\text{ MPa}\sim 0.7\text{ MPa}$ 之间。

压气设施配置主要需要的资料: 气动工具的台数、型号、使用地点及距离; 各中段平面布置图及巷道断面图; 井口及各中段标高等等。

压气设施选型设计主要任务: 选择空压机的类型及数量, 选择附属装置, 确定压气管道。

以某地下开采铁矿为例, 对压气设施进行选型计算。某铁矿地表海拔高度为 3600 m , 井下用气设备分别为 4 台 7655 凿岩机、2 台 YSP45 凿岩机、2 台 YGZ90 凿岩机、1 台 QZJ-100B 潜孔钻、1 台 PZ-5A 型砵喷机; 设备用气工作压力 $0.2\text{ MPa}\sim 0.7\text{ MPa}$ 。

$$Q_{\max} = 1.05K_G K_L K_X K_T \sum K_m n_i q_i \quad (4)$$

式中: Q_{\max} ——全矿最大耗气量, m^3/min ;

K_G ——高原修正系数;

K_L ——管网漏气系数;

K_X ——考虑吸气管、过滤器、消声器等阻力引起的压缩机生产能力下降的系数, 可取 1.01;

K_T ——气动工具的同时工作系数, 根据生产时气动工具使用状态选取;

K_m ——气动工具磨损系数, 其值为凿岩机 1.15, 其他 1.10;

n_i ——第 i 种气动工具的工作台数;

q_i ——第 i 种气动工具的耗气量。

该矿地表标高为 3600 m , 属于高海拔地区, 按公式(3)计算可得当地的空气密度大约为海平面密度的 0.7 倍, 空气密度变小会直接导致空压机生产能力减弱。由于海拔较高的地区大气压力相对较低, 空气密度变小, 使得空压机的实际生产能力比原设计有所减小。因此在实际工程设计中必须根据工程所在地区的海拔高度, 考虑相应的修正系数, 同时在电机的选择上选择高原型电机。根据中国建筑工业出版社出版的《采矿设计手册》, 25 N 附近高原修正系数查表或按以下公式计算:

$$K_G = \frac{P_0 T_H}{T_0 P_H} K_0 \quad (5)$$

式中: T_H 、 P_H 分别为空压机安装地点的历年气温最高月份的平均温度($^{\circ}\text{C}$)和平均大气压力(MPa)。

经计算, K_G 为 1.52。根据上述公式(4)计算可得全矿最大耗气量:

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= 1.05K_G K_L K_X K_T \sum K_m n_i q_i \\ &= 1.05 \times 1.52 \times 1.1 \times 1.01 \times 0.86 \times (1.15 \times 45.2 + 1.1 \times 20) \\ &= 112.8\text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

选定空压机的类型和数量。根据空压机站一般设计原则, 本矿设计选用 4 台 LGF-40.5/8 风冷螺杆式

空压机。该类型产品为工业和信息化部节能机电设备(产品)推荐目录(第二批)的推荐设备产品。正常生产时 3 台空压机工作, 1 台空压机备用。当井下发生灾变时 1 台工作, 可满足井下最大班人员的压风自救系统需要。考虑高海拔地区地表冬季气温将低于 0℃, 水冷空压机需要考虑水源、罐道保温、冷却塔等因素, 设计采用风冷螺杆空压机, 可有效避免以上因素带来的干扰。

空压机规格参数如下:

冷却方式: 风冷;

额定排气压力: 0.8 Mpa;

公称容积流量: 40.5 m³/min;

驱动电机功率: 250 kW;

实测容积流量: 45.9 m³/min;

实测机组输入比功率: 6.59 kW/(m³/min)。

4.3. 附属设施

空压机站附属设施较多, 滤风器、后冷却器等都随设备带来。

空压机制备的压缩空气会含有微量水分, 同时喷油螺杆空压机本身就会产生少了油分, 这样的压缩空气直接应用会损坏气动工具设备。设计在井下各中段马头门低洼处设置压缩空气油水分离器, 用于分离压缩空气中凝聚的水分和油分等杂质, 可以使压缩空气得到进一步净化。

空压机站的储气罐既有缓解气流对压缩气体供应的扰动和冲击, 也有储存气体的作用。经综合考虑, 每个空压机选用 1 个容量为 6 m³ 的储气罐。空压机站选用的储气罐采用专业厂家生产的合格设备。储气罐安装有安全阀和压力表, 安全阀、压力表定期校准。为了防止由于储气罐安全阀堵塞等原因导致储气罐内压力急速上升而造成事故, 在储气罐出口管路正对气流方向上安装释压阀, 其释放压力为空压机最高工作压力的 1.2~1.4 倍, 当储气罐内压力超过释压阀的释压临界点时, 释压阀的活塞阀门自动打开, 达到释放压力、保障安全的目的。储气罐还可以利用罐体较大的表面积冷凝分离压缩空气中的大量水分, 有效缓解油水分离器的负荷。空压机站储气罐下的通畅均会设置排水阀, 定期排出储气罐罐内的积水, 以免罐内积水对压缩空气造成二次污染[5]。

为防止事故发生, 要定期对安全阀、压力表、释压阀等进行检查。此外, 为了便于手动关停电动机, 在易于操纵的地方设置一个按钮, 用于切断电动机的电源。

4.4. 压气管网布置

设计预选 1 条 $\Phi 159 \times 4.5$ 无缝钢管作为主压气管, 计算长度 400 m; 支管选用 $\Phi 108 \times 4$ 无缝钢管, 计算用气点最远端距离主压气管长度为 650 m。对各段压气管的压力损失进行校核计算。

$$\Delta P_i = 10^{-6} \frac{1.15l_i}{d_i^5} Q_i^{1.85} \quad (6)$$

式中: ΔP_i ——第 i 段压气管的阻力损失, Pa;

l_i ——第 i 段压气管的长度, m;

d_i ——第 i 段压气管的内径, m;

Q_i ——第 i 段压气管的计算流量(自由状态), m³/min。

经计算, 主压气管压力损失为 0.038 MPa, 支管压力损失为 0.04 MPa, 合计管道压力损失为 0.078 MPa, 符合相关规范要求, 满足气动工具工作压力要求。

采用胶管连接设备, 胶管内径可按气动工具接口直径选大一级, 以减少阻力损失。由于阻损甚大,

胶管不易过长，一般应控制在 20 m 左右。

5. 压气设施优化措施

5.1. 采用变频空压机

设计的供气量是按照最大用气设备使用情况计算的，实际使用时极有可能达不到最大耗气量，由于井下用气设备的数量是随时变化的，采用工频机长期运转的情况下，不调节必然有部分能源会造成浪费。从优化设备运行及降低能耗的角度考虑，建议选用 3 台工频空压机，1 台变频空压机。正常生产时除 1 台工频机备用外，其余空压机工作。根据流体力学，风量与转速成正比、风压与转速的平方成正比、轴功率与转速的三次方成正比[6]。当风量减少时，空压机电机转速下降时消耗的功率也降低很多。如当风量下降为额定风量的 80%，电机转速也下降为 80%，轴功率将下降到额定功率的 51%。尽管实际计算降低的能耗还需要考虑其他影响因素，但是采用节能变频调速控制技术在保证供气量情况下的节能效果也是很客观的[7]。

5.2. 增设余热回收装置

空压机运转过程中会产生大量的热能，这些能源如果不加以利用，就会造成白白的浪费。空压机余热回收是指一款新型高效的余热利用设备，靠吸收空压机废热来把冷水加热的，没有能源消耗。回收的热能可以用于解决员工的生活、工业用热水等问题，也可以用来做井口预热[8]。为满足空压机站余热回收的要求，每台空压机内置热回收机，功率 5.5 kW/台，待设备温度达到工作温度后启动，并将多余热量通过换热器回收至热水管道。

5.3. 优化管道布置

地下矿山压气管网布置，一般会采用树枝状系统。管道布置应考虑：长度短，拐弯少，且应避免急弯；管件(闸门、三通、弯头、减压阀、安全阀等)要合理使用。管道通过调整管径和管件合理使用，可以有效降低管道压力损失，保证用气设备用气压力。主管每隔 500 m~600 m，在低洼处设置油水分离器；支管设置油水清除装置。露天压气管道采用沿地敷设，在穿越公路或者铁路时应加套管埋设。另外需考虑管道防腐防锈措施。根据规程规范要求，对压气管进行涂色，并标注管道类型、介质流向等。

6. 结论

空压机是气动工具的动力源，在金属非金属地下矿山生产过程中起着不可或缺的作用。压气设施在设计中需要仔细考虑空压机站所处位置的气候特点，通过详细计算选择合适的压气设备及附属设施，来保证满足生产的需要。通过各自优化措施，可以有效地节能降耗及资源合理化利用，产生一定的经济效益。通过对空压机在高海拔地区地下矿山使用条件下的配置计算，可达到经济合理的目标，同时满足安全、环保、节能、消防等的规定。

(1) 通过采用变频空压机、节能变频控制技术等措施，能够有效降低空压机能耗，避免资源浪费。

(2) 增设余热回收装置、靠吸收空压机废热转化为热能，避免资源浪费，可有效回收热量。

优化管道布置，合理使用管件及管径，能够有效降低管道压力损失，保障用气压力。

参考文献

- [1] 魏国昌, 王丽萍, 张晓波, 等. 地下矿山压气设施设计应注意的几点问题[J]. 矿山机械, 2020, 48(8): 69-71.
- [2] 何美香, 叶昭. 空气压缩机高原配置计算[J]. 新材料新装饰, 2014(5): 514-515.
- [3] 张梦麟. 采矿设计手册: 矿山机械卷[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989: 542-543.

- [4] 汤守礼. 论压气与通风设备在高海拔矿山的应用[J]. 中国矿业, 1993(8): 9-14.
- [5] 沈帅, 姚瑶, 高敏. 高原地区水泥厂空压机组设计及优化[J]. 新世纪水泥导报, 2013, 19(5): 47-49.
- [6] 沈帅, 姚瑶, 高敏. 高原条件下空压机组设计及优化[J]. 中国水泥, 2014(3): 82-84.
- [7] 伍路旺, 卢美鸿. 变频式螺杆空压机的自动控制系统设计[J]. 能源技术与管理, 2021, 46(3): 134-135.
- [8] 高相家, 何明. 空压机组节能运行管理系统的应用[J]. 中国设备工程, 2014(9): 52-54.