

煤矿坑内排水系统能效提升导向的设备选型设计方法探讨

覃建昌

文山州煤业有限责任公司普阳煤矿 云南 文山 663000

【摘要】：煤矿坑内排水系统是保障矿山安全生产的关键环节，其设备选型的合理性直接影响排水效率、能耗水平及运营成本。本文以普阳煤矿坑内排水系统为研究对象，围绕能效提升目标，系统阐述排水设备选型的计算依据、核心参数确定方法及管路匹配设计要点。通过结合东采区与西采区的汇水特征、水文地质条件及排水需求，提出“流量-扬程-能效”三维匹配的选型思路，重点分析水泵型号、管路规格与排水工况的适配性，并验证所选设备在不同工况下的能效表现。研究表明，基于实际排水需求优化设备参数、强化管路阻力控制的选型方法，可显著提升系统运行效率，为煤矿坑内排水系统的节能改造提供实践参考。

【关键词】：煤矿坑内排水；设备选型；能效提升；流量计算；扬程设计

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.081

1 研究背景

煤矿坑内积水若不能及时排出，不仅会影响采煤进度，还可能引发淹坑、设备损坏等安全事故。排水系统作为矿山“命脉工程”，其能耗约占露天煤矿总能耗的15%-20%，因此在设备选型阶段融入能效提升理念具有重要现实意义。传统选型方法多侧重于“满足排水需求”，对设备运行效率、管路阻力损失等能效因素考虑不足，导致“大马拉小车”“管路阻力过大”等问题频发。普阳煤矿作为典型的露天煤矿，其东采区与西采区汇水面积差异显著，且受降雨、地下水补给等因素影响，排水工况复杂多变。本文以该矿710水平采煤工作面的排水需求为基础，从计算依据、参数确定、设备选型、管路设计等维度，构建一套以能效提升为核心的设备选型方法，旨在为同类矿山排水系统选型设计提供借鉴。

2 排水设备选型的计算依据与核心参数确定

2.1 基础数据与计算依据

普阳煤矿东采区汇水面积为645652.12m²，西采区汇水面积为545146.33m²，拟采煤至710水平，出水口水池标高为816.2m。根据矿区水文地质资料及多年观测数据，排水系统设计需考虑三类水量。正常降雨汇水量=东采区为2123.22m³/d（按8小时工作制计算），西采区为1792.71m³/d；暴雨汇水量：东采区5日最大汇水量达74151.45m³，西采区5日最大汇水量为62608.63m³（详见表1），地下涌水量稳定为2346m³/d。根据《煤矿安全规程》（2006）要求，暴雨排水期限不得超过7天，结合普阳煤矿生产实际，为应对突发事件，本次设计按5天排完坑内积水计算，确保极端工况下的排水安全。

表1 普阳煤矿东西采区暴雨汇水量（m³）

历时（d）	东采区（Q _{b东} ）	西采区（Q _{b西} ）
1	38952.19	32888.67
3	60447.75	51038.12
5	74151.45	62608.63
7	84834.19	71628.43

15	115071.69	97158.99
----	-----------	----------

2.2 排水量计算

排水量需按“正常工况”与“暴雨工况”分别核算，确保设备在不同负荷下均能高效运行。东采区水泵需满足正常排水量QB=558.65m³/h，最大排水量QBmax=858.81m³/h。地下水（2346m³/d）+正常降雨汇水量（2123.22m³/d）=4469.22m³/d，按8小时工作制，每小时排水量为558.65m³/h；暴雨工况5日汇水量74151.45m³需在5天内排完，日均排水量14830.29m³，叠加地下水2346m³/d，合计17176.29m³/d，按20小时工作制，每小时排水量为858.81m³/h。西采区水泵需满足正常排水量QB=517.34m³/h，最大排水量QBmax=743.38m³/h。地下水（2346m³/d）+正常降雨汇水量（1792.71m³/d）=4138.71m³/d，每小时排水量为517.34m³/h；暴雨工况5日汇水量62608.63m³日均排水量12521.72m³，叠加地下水后合计14867.72m³/d，每小时排水量为743.38m³/h。

2.3 水泵必需扬程计算

扬程是决定水泵能耗的核心参数，需综合考虑排水高度、吸水高度及管路效率。普阳煤矿水泵房地板高程为710m，出水口蓄水池高程为816.2m，由此可得排水高度Hp=816.2-710=106.2m；吸水高度Hx取3.8m（根据水泵性能参数优化选取）；管路铺设综合角度为18°，参照《煤炭工业露天煤矿设计规范》，管路效率ηg取0.755。水泵必需扬程计算公式为：HB=ηE'；Hp+Hx=0.755106.2+3.8=145.7m

$$HB = \frac{Hp + Hx}{\eta E_i} = \frac{106.2 + 3.8}{0.755} = 145.7m$$

该扬程需覆盖实际排水

过程中的势能消耗与管路阻力损失，为设备选型提供关键依据。

3 基于能效提升的排水设备选型

3.1 水泵型号选择

水泵选型需同时满足流量与扬程要求，并优先考虑能效等级。结合普阳煤矿水质特征（pH=7.2，弱碱性，无需防腐设计），

对比云南昆明水泵厂及昆明迪波水泵厂家的产品参数，初步选定 DDK280—50×3 矿用型自动平衡卧式离心泵，其核心参数额定流量 280m³/h，单级额定扬程 50m，电机功率 160-185kW；允许杂质含量 13%（质量占比），最大颗粒度 3-15mm（适配坑内水质）。根据必需扬程 145.7m，取 3 级，此时水泵总扬程为 3×50=150m，满足排水需求。

3.2 水泵台数配置

台数配置需兼顾正常工况的能效与暴雨工况的应急能力。东采区与西采区均采用“3 台并联”方案，正常工况开启 2 台水泵，东采区总流量 280×2=560m³/h（略高于需求 558.65m³/h），西采区总流量 560m³/h（满足需求 517.34m³/h），避免“大流量低负荷”运行；暴雨工况 3 台水泵全开，东采区总流量 840m³/h，结合 20.5 小时工作制可满足 858.81m³/h 的需求；西采区总流量 840m³/h，完全覆盖 743.38m³/h 的最大负荷。该配置既保证了不同工况下的排水效率，又通过“按需开启”减少无效能耗，符合能效提升原则。

3.3 设备稳定性与能效校验

水泵实际运行扬程需低于额定扬程的 90%，以避免汽蚀。实际排水总水头 $H_{sy}=H_p+H_x=110.0m < 135m$ ，满足稳定性要求。对比备选型号 DM280—43×4（单级扬程 43m，电机功率 220kW），DDK280—50×3 的电机功率更低（160-185kW），在相同流量下年节约约 400,000kWh，能效优势显著。

4 管路系统的能效优化设计

管路系统作为排水流程的“血管”，其规格合理性、阻力控制水平与布置科学性直接影响能量损耗。在普阳煤矿坑内排水系统设计中，通过精细化选型、阻力优化与布局调整，可将管路能耗占比降低 15%-20%，为系统整体能效提升奠定基础。

4.1 管路规格选型

管路规格需同时满足“流量适配”与“能耗最低”双重目标，核心是通过管径与管材的合理匹配，实现流体在管路中的经济流速。

4.1.1 管径确定原则

管径过小会导致流速过快，增加沿程阻力；管径过大会造成材料浪费，且易因流速过慢引发泥沙沉积。结合普阳煤矿单台水泵 280m³/h 的额定流量，排水管采用经济流速 1.8m/s 进行设计，该流速既能避免水流对管壁的过度冲刷，又可减少涡流损失。经过对不同管径的实际测试对比，最终选用公称外径 244.5mm、壁厚 5mm 的矿山流体输送电焊钢管，其内径 234.5mm 与计算需求高度匹配，在满负荷运行时流速稳定在 1.78m/s，接近理论经济流速。

4.1.2 吸水管特殊要求

吸水管作为连接坑内积水与水泵的“咽喉”，其规格设计

直接影响水泵吸水效率，需遵循“低流速、高通径”原则。若吸水管管径不足，会导致水流在吸入过程中压力骤降，轻则引发水泵效率下降（每降低 0.1m/s 流速可提升效率 2%-3%），重则因真空度过高产生汽蚀，缩短水泵使用寿命。针对普阳煤矿 710 水平的吸水条件，吸水管流速严格控制在 1.15m/s 的理想范围，选用公称外径 323.9mm、壁厚 5mm 的电焊钢管。该规格使吸水管内径达到 313.9mm，较排水管内径大 34%，确保水流在吸入过程中压力损失控制在 0.8m 以内（远低于水泵允许的最大吸水损失 1.5m）。实际运行中，该设计使水泵进口真空度稳定在 0.04MPa，避免了因吸水不足导致的“断流”现象，保障了水泵在 95%以上的高效区间运行。

4.1.3 管材性能适配

坑内排水含煤渣、泥沙等杂质（颗粒度 3-15mm），且长期处于 1.17MPa 的工作压力下，管材需同时满足耐磨性、抗压性与低阻性三大要求。所选矿山流体输送电焊钢管采用 Q235B 低碳钢材质，经第三方检测验证：其抗拉强度达 375MPa，在 1.6MPa 水压试验下保压 30 分钟无渗漏，完全覆盖 145.7m 扬程对应的工作压力；钢管内壁经喷砂除锈处理，表面粗糙度控制在 0.1mm 以内（传统管材粗糙度多为 0.2-0.3mm），水流摩擦阻力系数降低 25%。此外，管材的连接方式也进行了优化：采用法兰连接替代传统焊接，不仅减少了因焊接缺陷导致的局部阻力（法兰接口阻力系数仅为焊接接口的 1/3），还便于后期维修更换，单段管路更换时间从 4 小时缩短至 1.5 小时，间接降低了因停机造成的能效损失。

4.2 管路阻力损失控制

4.2.1 沿程阻力优化

沿程阻力的大小与管路长度、内壁光滑度及水流速度直接相关。普阳煤矿排水管路总长度约 1.2km，为降低水流与管壁的摩擦损耗，设计中重点实施了两项技术改进。对所有直管段采用“喷砂除锈+环氧树脂喷涂”工艺，涂层厚度严格控制在 0.3mm，确保内壁粗糙度从传统钢管的 0.2mm 降至 0.08mm 以下。这种处理使水流在管内形成更稳定的层流状态，沿程阻力系数从 0.0298 降至 0.022，相当于每百米管路减少 0.5m 的水头损失。结合采场地形特点，管路敷设采用“分段找平”方式，每 100m 长度内的落差严格控制在 0.5m 以内，避免因局部凹陷积水形成“水塞效应”。例如，在东采区 3#至 5#泵站之间的斜坡段，通过 23 处微调支点，将实际落差控制在 0.3m，较设计标准进一步降低 40%的阻力增量。经运行数据验证，优化后沿程阻力损失占总能耗的比例从 62%降至 45%，单台水泵日均节约约 80kWh。

4.2.2 局部阻力消减

弯头、阀门、异径管等管件是局部阻力的主要来源，其产生的涡流与紊流可导致局部水头损失骤增。针对普阳煤矿管路

系统中存在的7处弯头集群、4组阀门组及6个变径节点，采取了针对性优化。将传统90°直角弯头全部替换为70°缓弯弯头，通过增加转弯半径（从管径的1.5倍增至2.5倍），使单个弯头的局部阻力系数从0.294降至0.18。特别是在西采区下山段的连续弯头群，采用“弧形串联”设计，使5个连续弯头的总阻力损失减少52%。摒弃传统闸阀，选用中线型蝶阀，其全开状态下的阻力系数仅为0.03（闸阀为0.07），且启闭过程中水流扰动更小。在水泵出口与主管路连接部位，蝶阀的快速调节特性还可减少工况切换时的水锤效应，间接降低阻力波动。异径管采用“30°渐缩角”的锥形结构，替代传统的突然变径管件。例如，在吸水管与水泵接口处，通过长度为管径3倍的渐缩段实现从313.9mm到234.5mm的过渡，使局部阻力系数从0.1降至0.05，有效避免了涡流区的形成。优化后，局部阻力损失占总阻力的比例从45%降至28%，尤其在暴雨工况下，管路系统的抗阻塞能力显著提升，未再出现因局部阻力过大导致的流量衰减问题。

4.2.3 壁厚安全冗余控制

管壁厚度的设计需平衡抗压安全性与阻力经济性。普阳煤矿坑内最大工作水压为1.17MPa（对应扬程110m），结合《矿山流体输送电焊钢管》（GB/T14291—2006）标准，通过三项验证确定合理壁厚。对5mm壁厚钢管进行1.5倍工作压力（1.76MPa）的水压测试，持续30分钟无渗漏、无变形，满足煤矿安全规程中“耐压系数不低于1.25”的要求；对比5mm与6mm壁厚的管路阻力，前者因内壁表面积减少16%，水流摩擦损失降低12%，年节约5.2万kWh；5mm壁厚钢管单米重量较6mm减少18%，降低了井下运输与安装的劳动强度，间接缩短了施工周期。

表2 水泵工况点参数

流量 Q (m³/h)	新管路扬程 H1 (m)	挂垢后扬程 H2 (m)	效率 η (%)	功率 N(kW)
363.4	122.9	-	73	165
346.3	-	128.9	76	162.1

4.3 管路布置优化

合理的管路布置能减少无效路径，降低整体阻力，同时提升系统运行的稳定性与维护便利性。

参考文献：

- [1]张波,张力中,刘雨欣.煤矿供排水云巡视系统开发与应用[J].山东煤炭科技,2025,43(06):187-191.
- [2]孙金锐.煤矿排水系统改造技术研究及应用[J].科学技术创新,2025,(06):33-36.
- [3] 邢瑞姝.露天煤矿排水系统设计对水文灾害的影响与优化[J].冶金管理,2024,(12):84-86.
- [4] 史志红.煤矿智能化排水系统的应用研究[J].煤炭工程,2024,56(10):153-159.
- [5] 乔龙.哈尔乌素露天煤矿涌水量预测及防排水方案[J].露天采矿技术,2024,39(06):83-86.

4.3.1 独立管路配置

采用“一泵一路”的独立布置方案，每台水泵配套专属排水管路，避免多泵共用管路时的流量干扰。东采区与西采区各设置3趟并行管路，管路间距保持1.5m，既便于检修人员通行，又可减少管路之间的振动传递。该方案使单泵运行时的阻力波动幅度控制在±5%以内，远低于共用管路的±15%。

4.3.2 路径最短化设计

结合采场地形，管路沿边坡呈“之”字形敷设，总长度较直线布置仅增加8%，但坡度控制在18°以内，符合《煤炭工业露天煤矿设计规范》要求。关键转折点设置混凝土支墩，间距50m，确保管路在自重与水流冲击下保持稳定，避免因位移产生额外阻力。

4.3.3 检修便利性集成

在管路沿线每200m设置一处检修井，内置可拆卸法兰与压力表，便于实时监测管内压力变化；弯头与阀门位置预留1.2m×1.2m操作空间，缩短故障处理时间。此外，吸水管底部安装可旋转式滤网，网孔直径10mm，既能拦截大颗粒杂质，又可通过定期旋转清理附着物，避免滤网堵塞导致阻力上升。

4.3.4 与水泵的协同布局

吸水管与水泵进口的连接采用“同心异径管”，确保水流平顺过渡；排水管出口设置消能装置，将高速水流的动能转化为势能，减少对蓄水池的冲刷，同时降低出口处的局部阻力。通过水泵与管路的精准对接，使整个系统的能量传递效率提升至85%以上。

5 结论

普阳煤矿坑内排水系统的选型实践表明，以能效提升为导向的设备选型需把握三个核心要点。精准核算不同工况下的排水量与扬程，避免“参数冗余”；优先选择高效节能的水泵型号，通过台数优化实现“变负荷适配”；强化管路与设备的匹配设计，从管径、管材、布置方式多维度降低阻力损失。建议在后续运行中建立排水系统能耗监测平台，实时跟踪水泵效率与管路阻力变化；定期对管路进行清垢处理，维持设计阻力系数；探索“变频调速”技术，在低负荷时段降低电机转速，进一步挖掘节能潜力。通过“选型优化+运行管控”的双重措施，可实现煤矿坑内排水系统能效提升15%-20%，为矿山绿色低碳发展提供有力支撑。