IC 73.020
CCS D91

# 团　体　标　准

T/CECA-G 0298—2024

# 矿井回风余热直接利用系统技术规程

## Technical regulation for mine return air waste heat direct utilization system

2024-07-03 发布　　2024-07-04 实施

中国节能协会发布

# 目　　次

前 言 ..... 1
1 范围 ..... 1
2 规范性引用文件 ..... 1
3 术语和定义 ..... 1
4 系统基本构成 ..... 2
5 技术要求 ..... 3
6 测试计算 ..... 12
7 验收 ..... 12
8 安全运行 ..... 16
附录 A （资料性）·井筒防冻负荷及矿井回风中可提取热量计算 ..... 18
附录 B （资料性）·换热管换热面积及总管数确定 ..... 19
附录 C （资料性） 换热管材质及规格 ..... 20
附录 D （资料性） 测试计算 ..... 22
附录 E （资料性）风-风换热系统运行状况日报表 ..... 24
附录 F （资料性）工程质量验收记录 ..... 26
参考文献 ..... 34

# 前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国节能协会提出并归口。

本文件主要起草单位：山东美天能源科技股份有限公司、中国矿业大学、国家能源集团宁夏煤业有限责任公司金凤煤矿、国家能源集团宁夏煤业有限责任公司麦垛山煤矿、宁夏煤矿设计研究院有限责任公司、冰山冷热科技股份有限公司、鄂尔多斯市能源局、徐州迅风冷暖科技有限公司、河南平煤神马节能科技有限公司、安徽恒源煤电股份有限公司煤矿、陕西美天绿能科技有限公司、山东绿能工矿余热综合利用产业技术研究院有限公司、神木未来碳中和研究院、神木市美天绿碳管理有限公司。

本文件主要起草人员：袁晓丽、孙猛、魏京胜、钮涛、李慎君、韩志强、姜官军、程首亮、谷海涛、苏国栋、程伟、曹和平、刘冠男、李田、李刚、贺立国、高军宝、王喆、赵龙飞。

本文件首次制定。

# 矿井回风余热直接利用系统技术规程

## 1 范围

本文件规定了矿井回风余热直接利用系统基本构成、技术要求、测试计算、验收与安全运行。

本文件适用于矿井回风温度15~40℃、冬季需进行井筒防冻的矿井。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注明日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；未注明日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB150-2011 压力容器

GB/T 700 碳素结构钢

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB12348 工业企业厂界环境噪声排放标准

GB50205 钢结构工程施工质量验收规范

GB50215 煤炭工业矿井设计规范

GB50243 通风与空调工程施工质量验收规范

JB/T 8690 通风机噪声限值

NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定

《煤矿安全规程》（2023版）

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 井筒防冻 wellbore anti-freezing

冬季对进入矿井的冷空气加热，防止在井筒井壁、罐道梁、支架等结冰的技术措施。

3.2 矿井回风 mine return air

经由回风井井口所排放出的空气。

3.3 回风显热 sensible heat of return air

矿井回风在热传递过程中，不发生相变而释放的热量。

3.4 回风潜热 latent heat of return air

在温度保持不变的条件下，矿井回风中的水蒸汽遇冷凝结成水的相变过程中所放出的热量。

3.5 风-风间壁式换热器 wind-wind interchangeable heat exchanger

新风和矿井回风两种冷热流体被固体壁面（管或板）隔开，不相混合，通过间壁进行热交换的装置。

3.6 换热塔 heat exchanger tower

内部包含至少一组风-风间壁式换热器，设有新风、回风静压箱及其配套设施的整体换热结构。

3.7 静压箱 static pressure box

用于增加新风与回风的静压，降低其动压，实现稳定气流、减少振动、提升送风效果的装置。

3.8 “Y”型连接风道 "Y " shaped air connecting duct

设置在回风井扩散口与换热塔间，连接通风机和换热塔的 Y 型风道，用于引入回风至换热塔。

3.9 自动切换风阀 automatic switch air valve

矿井回风井口设置的自动切换风道阀门装置，位于回风井扩散口与换热塔 Y 形连接风道间。该装置主要用于两个主要通风机的切换运行，非供暖季时保持常开状态，反风实验时封闭备用主要通风机风道。

3.10 自动安全风门 automatic safety ventilation door

设置在换热塔回风静压箱顶部，用于紧急情况下保证矿井通风安全的常闭自动安全风门。当换热器堵塞或回风阻力增大时，该风门可自动打开，形成临时回风排放通道。

3.11 新风进风风道 fresh air intake duct

用于将外界低温新风引入换热塔的风道。

3.12 新风送风风道 fresh air supply duct

用于将换热塔内加热后的新风送入防冻井口的风道。

3.13 矿井回风余热直接利用系统 mine return air waste heat direct utilization system

以风-风间壁式换热器为基本换热器，通过逆流或交叉方式换热提取矿井回风中的显热和潜热用于直接加热入井新风，实现井筒防冻的系统。

3.14 漏风率 air leakage rate

风道系统在工作压力下空气渗入或泄漏量与其额定风量的百分比。

## 4 系统基本构成

矿井回风余热直接利用于井筒防冻的系统采用间壁式风-风直接换热技术，以矿井回风的显热和潜热为热源，将矿井回风中的热量高效传递给入井新风。该系统由“Y”型连接风道、矿井回风-新风间壁式换热塔、新风送配风系统、井口动态自动封闭系统、补热系统等组成，如图1所示。

4.1 “Y”型连接风道

为了将回风引入换热塔内的回风进风静压箱，需拆除矿井主要通风机的弧形出风口，并制作“Y”型连接风道。

4.2 回风-新风间壁式换热塔

回风-新风间壁式换热塔，由多组模块化的风-风换热器，新风侧与回风侧的进、出风静压箱等部件组合而成。此塔作为热量传递的关键场所，能够有效地将回风中蕴藏的热量传递至新风之中，实现热量的高效回收与利用。

4.3 新风送配风系统

新风送配风系统由进风风道、送风风道、风机机组及其附属的风道桥架等构成。其中，进风风道与换热塔新风进风静压箱相连接，负责引入新鲜空气；送风风道从换热塔新风出口延伸至防冻井口，确保新风的顺畅传输；风机机组及其配套的风道桥架负责新风的动力输送和分配，保证整个系统的稳定运行。

4.4 井口动态自动封闭系统

对于有人员、物料下井的进风副井，应安装动态自动封闭系统。该系统可自动封闭井口，减少无序风流入井。

4.5 补热系统

为确保极寒气候下井筒安全稳定运行，井口需配备补热设施。这些设施可采用清洁能源方案，如电蓄能补热技术和空压机余热回收，确保高效可靠的补热效果。

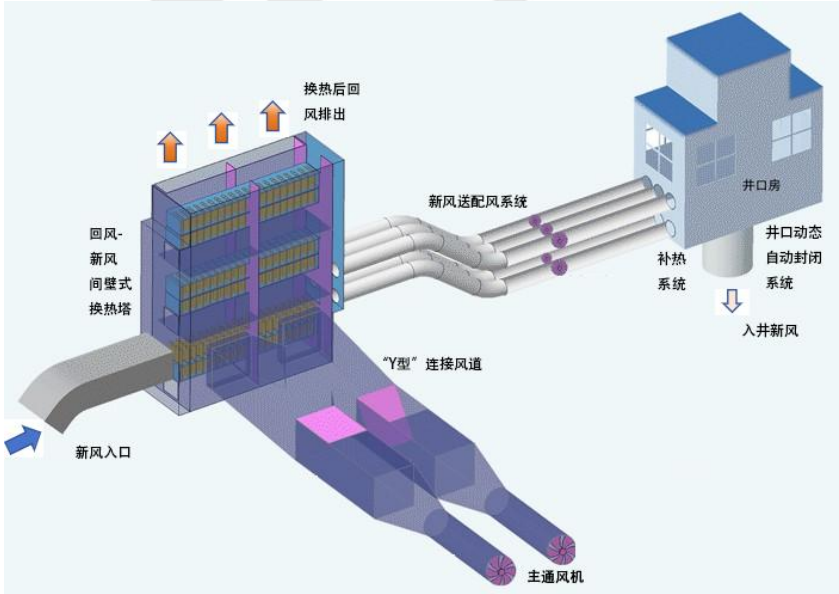



图 1 矿井回风余热直接利用系统示意图

## 5 技术要求

5.1 安全技术要求

5.1.1 为满足井筒防冻的需求，新风经间壁式换热器加热后送入进风井，进风井井口以下的空气温度（干球温度）应在 2℃以上。

5.1.2 回风侧总阻力由换热塔内部换热器的流动阻力和“Y”型连接风道的流动阻力组成。总阻力造成的压力损失不能影响主通风机的正常运行。

5.1.3 新风进风风道的入口与换热器的回风排风口之间应保持至少 30m 的距离，以避免部分矿井回风短路重新入井。

5.1.4 在主要通风机进行反风操作时，供风量应达到正常风量的 40%以上。矿井回风井扩散口处应安装自动切换风阀，以自动调节风量，确保漏风率不超过 1%。

5.2 井筒防冻负荷及回风可提取热量分析要求

5.2.1 在设计矿井回余热直接利用系统时，应首先对井筒的防冻负荷进行准确计算，并评估回风中可提取的热量。若评估结果显示回风中可提取的热量不足以满足井筒的防冻需求，设计者应寻找其他可用的热源，以确保热源总量能够满足井筒的防冻要求。井筒防冻负荷和回风可提取热量的计算方法详见附录A。

5.2.2 设计中还应考虑极端天气条件下的补热措施，以保证系统在任何情况下均能正常运行，防止井筒结冰。

5.3 换热器技术要求

5.3.1 回风余热利用率

用实际运行时回风进出口焓差与设计工况进出口焓差的比值作为矿井回风余热利用率，按公式（1）计算。回风余热利用率应不低于80%，以确保系统的有效性和经济性。

$$\eta = \frac{h_{\mathrm{h,in}} - \mathrm{h}_{\mathrm{h,out}}}{\Delta h_{设计}} \times 100\% \qquad (1)$$

式中：

$\eta$——回风余热利用率；

$h_{\mathrm{h,in}}$—实际运行时回风换热前的焓值，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

$h_{\mathrm{h,out}}$—实际运行时回风换热后的焓值，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

$\triangle h_{设计}$——设计工况进出口焓差，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

5.3.2 冷热流体布置

a）为提高换热效果，新风和回风的流向宜设计成逆流换热或交叉换热；

b）冷热流体通道设计通常遵循回风走管外原则，特殊情况下为提高效率也可进行回风走管内设计，但需考虑清洗措施并做好防冻预案；

c）换热管可根据现场情况采用垂直、倾斜或水平布置。

5.3.3 换热管形式

a）换热管形状可采用圆形、矩形、椭圆形、扭曲形；

b）为提高换热效率，建议在管内外设置翅片和内插件。

5.3.4 换热管换热面积及总管数确定

换热管换热面积及总管数确定计算方法见附录B。

5.3.5 换热管材质及规格

换热管材质及规格要求见附录C。

5.3.6 换热器外形尺寸

a）换热器是换热塔内的基本换热器，需在工厂内完成加工制造并确保质量合格。加工完成后，应采用独立包装方式封装，以满足运输条件。

b）为确保换热器运输顺畅安全，应考虑运输环节对货物尺寸的限制，防止超宽超高。

5.3.7 质量要求

a）换热器宜采用模块化设计，以便于运输和现场安装，提高施工效率；

b）为确保换热器密封性能，所有焊接部位应满焊处理，避免回风渗入新风，保障系统稳定及新风纯净；

c）换热器表面应涂抹具备耐蚀性、防渗性和柔韧性的涂料保护层，以抵抗腐蚀性介质侵蚀，防止水分和腐蚀性物质渗透，确保涂料层紧密结合、不易脱落，并适应温度变化和机械应力。

5.4 换热塔技术要求

5.4.1 换热塔安装位置

换热塔宜布置在回风井口附近，且距离进风井井口的距离宜小于 300m。

5.4.2 新风静压箱

a）换热塔新风入口宜设静压箱，将新风风速降低至 2.5m/s 以内，确保新风均匀分配至各换热器；

b）换热塔新风出口处宜设静压箱，以确保换热后的新风均匀分配至各送风管路；

c）静压箱内平均风速宜控制在 2~2.5m/s。若空间有限，可适当提高风速至 3m/s 以减少静压箱体积；

d）静压箱的材质选择应基于耐腐蚀性、强度、耐久性和成本效益等因素，可使用镀锌钢板、玻璃钢、铝板、不锈钢等；

e）静压箱内的内贴材料应根据吸声、保暖和防火等要求进行选择，可选择岩棉、玻璃棉等吸声保暖材料；

f) 静压箱的表面板材应选用具有良好防腐性能、具备足够的强度和耐久性的金属材料，以适应长期使用环境。

5.4.3 回风静压箱

a）矿井回风井扩散口处应制作“Y”型连接风道，用于连接两台矿井主要通风机排风口和换热塔；

b）回风静压箱位于换热塔回风进风侧，与矿井回风扩散口的“Y”型连接风道相连。回风静压箱内部宜设置导流板以减小风阻，确保两台主要通风机的风量能均匀流入换热塔内各换热器回风入口。

5.4.4 自动安全风门

在换热塔矿井回风静压箱顶部设置自动安全风门。当换热器堵塞或回风阻力增大时，风门可自动打开排风，保障通风安全。

5.4.5 风阻要求

a）回风侧阻力由换热器流动阻力和回风风道流动阻力组成，总阻力造成的压力损失不能影响主通风机的正常运行。否则，需在换热塔顶部排风侧加装风机；

b）换热塔内新风侧流动阻力及新风送风管道总阻力需由新风风机克服。应优化换热塔内部结构及送风管路布置，在满足换热量要求的前提下，尽可能降低流动阻力以节省能耗。

5.4.6 钢结构及其地基基础

a）结构钢应选用 Q235B 钢，其质量应符合 GB/T 1591 规定；

b）所有钢结构均设计为抗震结构，钢材的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值应不小于 1.2。钢材应具有良好的可焊性及明显的屈服台阶，且伸长率应大于 20%，屈服点不宜超过其标准值 10%；

c）钢结构应满足风荷载计算要求，确保结构的稳定性和安全性；

d）所有钢材宜选用焊接结构用钢，并应按照现行标准进行拉伸试验、弯曲试验、V 型缺口冲击等试验及熔炼分析；

e）预埋件采用 Q235 钢，其质量应符合 GB/T 700 的规定；

f）进行钢结构设计前，需验算地基承载能力。若天然地基承载力不足，需采取换填或加固措施，确保地基稳定、换热塔基础可靠。

5.4.7 换热塔自动清洗系统技术要求

a）在换热塔的设计阶段，应预先对矿井回风中可能存在的结垢成分进行分析，并根据分析结果制定出除污方案；

b）宜在“Y”型连接风道处集中设置可拆卸过滤网，并对过滤网进行定期清洗或更换；

c）换热塔日常维护时，可用目视检查积垢。难以直接观察时，可通过监测热交换器运行数据间接判断，根据关键参数变化趋势制定清洗、维修或更换计划。

d）对自动清洗不理想的死角和区间，可人工使用柱塞泵产生的高压水，通过特殊喷嘴喷射垢层。必要时，可添加化学清洗剂辅助。

5.4.8 换热塔排污技术要求

a）在设计污水排放系统时，应充分考虑回风中由于水蒸汽凝结换热产生的凝结水水量。凝结水水量可按照公式（2）计算

$$W = 3600\rho_{\mathrm{h}}L_{\mathrm{h}}(d_{\mathrm{h}} - d_{\mathrm{L}}) \qquad (2)$$

式中：

$W$——冷凝水的出水量，单位为千克每小时（kg/h）；

$L_{\mathrm{h}}$, $\rho_{\mathrm{h}}$——符号同前；

$d_h$——换热前矿井回风中的含湿量，单位为千克每千克干空气，kg/kg（干）；

$d_L$——换热后矿井回风中的含湿量，单位为千克每千克干空气，kg/kg（干）。

b）换热塔内应设自动疏水、排水系统，及时汇集凝结水和污水，并顺利排至污水收集系统；

c）污水排放系统应采取防冻措施，防止排水管和换热塔底部结冰。

5.4.9 换热塔内部防结霜技术要求

a）换热塔设计阶段应进行详细的热力分析和计算流体动力学模拟，确保换热塔高效传热，同时避免结霜积聚的风险；

b）换热塔设计阶段还应对换热塔模型进行实际工况下的严格测试，以验证和优化设计，减少结霜问题的发生；

c）实际运行阶段，需在换热器内部设置摄像头和温度、流速传感器，加强对易结霜位置的监测；根据监测结果，可采取电辅助加热、减小新风风量等方法，确保换热器内部不结霜；

d）为确保换热塔在极端气候条件下能够稳定运行，有效预防和应对内部结霜（结冰）等突发情况，保障设备安全及生产稳定，应提前编制《换热塔内部防结霜（结冰）应急预案》。应急预案通过详细规定应急处置流程、方法、人员分工及物资保障等措施，提高应对换热塔内部结霜（结冰）事件的响应速度和处置能力，确保在紧急情况下能够迅速、有序地开展除霜（除冰）工作，最大程度地减少损失。

5.5 风道技术要求

5.5.1 新风风道包括进风风道和送风风道，进风风道形式可采用矩形、圆形等形式，送风风道宜采用圆形方式。

5.5.2 新风进风风道入口距换热器回风排风口的距离应不小于 30m。

5.5.3 新风送风风道宜采用架空方式进行安装，并在其外部敷设保温材料，以确保其良好的保温性能；

5.5.4 新风风道的尺寸可根据新风的风量计算，风道内新风风速不宜大于 15m/s。

5.5.5 新风进风风道和送风风道应优先采用直管设计，在无法实现直管布局时，应在拐弯处设置导流板，以减少局部阻力。

5.5.6 当新风风量较大，单个风道施工困难时，可采用多个风道并联的方式，但风道数量不宜过多。

5.5.7 新风风道内外侧均应均匀、完整地涂抹专业防腐涂料，以提升其使用寿命和防腐蚀能力。

5.5.8 新风风道为中压风道，需承受正压 500-1500Pa 和负压 1000-500Pa，保持不变形、不开裂，漏风量小于总风量的 5%。

5.5.9 当新风送风风道架空布置时，需设置可靠的钢支架结构。对于直径 2000mm 或边长大于 2500mm 的超宽超重特殊风管，其支架需专门设计。

5.6 新风风机技术要求

5.6.1 新风风机的风量和风压应满足新风的输送要求，当多组新风风机并联选型时，应考虑风机的并联特性，并联的新风机组不宜过多。

5.6.2 新风风机的噪音等性能指标应符合标准 GB12348、JB/T 8690 要求。

5.6.3 新风风机应采用变频控制技术，以便根据外界气温的实时变化，实现新风量的自动调节功能。

5.6.4 压入式送风将新风风机置于换热塔前，抽出式则置于后。优选压入式以保证新风质量，避免回风混入。具体安装位置、布局及接口需根据现场实际和建筑、机电安装标准确定，确保安全。

5.7 自动切换风阀技术要求

5.7.1 矿井回风井扩散口处应设置自动切换风阀，方便通风机切换运行。非供暖季时，风阀保持常开状态。反风实验时，备用通风机风道需封闭。

5.7.2 自动切换风阀的电控设备、电缆应为防爆产品；筏板坚固、不变形，四周密封胶条与风道密实相接，漏风率≤1%，在主要通风机进行反风操作时，供风量应达到正常风量的 40%以上。

5.7.3 自动切换风阀应支持现场操作与远程自动调控，以便于灵活调节。

5.8 补热系统技术要求

5.8.1 矿井回风-新风换热器宜按照十年极端最低温度的算术平均值进行设计，以防止换热器投资过大。

5.8.2 必要时需在井口设置补热装置，以防止极端天气出现时换热器的换热能力不足，造成井口结冰。

5.8.3 补热装置可以采用电蓄能补热、空压机余热及其他可行的清洁能源。

5.9 井口封闭技术要求

5.9.1 设计新风管道井口布置时，遵循“加热新风优先”原则，确保优先入井。

5.9.2 为防止低温空气过多进入井口，应进行密封。对于无法封闭的大门，应设置保暖挡帘。

5.9.3 进风副井用于上下人员和物料，需在井口两侧补建车辆连廊，设置两道自动开关风门和挡车器，确保加热新风优先入井，减少无序风流。

5.10 安装技术要求

5.10.1 换热塔安装技术要求

a）换热塔结构应采用符合行业标准的钢结构材料，并按照设计图纸施工；

b）结构构件的制造应遵循 GB50205 的相关标准；

c）所有钢构件在制作前均应先到现场实际放线复测，复测完毕后做施工大样，复核无误后方可下料；

d）钢材加工前应进行校正，使之平整，以免影响制作精度；

e）焊接时，应合理选择焊接工艺和顺序，以降低钢结构焊接应力和变形。切割部位需准确、切口整齐，切割前清除表面铁锈、污物，切割后清除毛刺、熔渣和飞溅物。

5.10.2 换热器安装技术要求

a）换热器的安装工作应严格依据施工图图纸的指示和要求进行组装施工，确保施工过程的精确性和规范性；

b）为确保运输及操作过程中的构件完整性和稳定性，应采取必要措施，严防构件发生变形或损坏现象；

c）在换热器安装前，应进行详尽检查，确保安全稳定使用。检查重点包括：检查换热器是否损坏，核实数量、长度和垂直度等参数是否符合设计要求，测量安装接头处螺栓孔尺寸是否满足安装要求；

d）换热器吊(安)装时，应采取有效措施，确保结构的稳定，并防止产生过大变形；

e）换热器安装完成后，应详细检查运输、安装过程中涂层的擦伤；

f）不应利用已安装就位的构件起吊其他重物，不应在构位上加焊非设计要求的其他物件。

5.10.3 自动安全风门及风阀安装技术要求

a）在换热塔出风口预留自动安全风门的安装位置；

b) 在主通风机出风口与“Y”型连接风道相接处，需预留适当空间，以便于自动切换风阀的安装；

c）选用的自动风门、成品风阀及部件应具有合格的质量证明文件；

d）成品风阀质量应符合下列规定：

——风阀规格应符合产品技术标准的规定，并应满足设计和使用要求；

——风阀应启闭灵活，结构牢固，壳体严密，防腐良好，表面平整，无明显伤痕和变形，无裂纹、锈蚀等质量缺陷；

——风阀内的转动部件应为耐磨、耐腐蚀材料，转动机构灵活，制动及定位装置可靠；

——电动、气动安全风阀的安装应保证执行机构动作的空间；

e）安装安全风门前，应全面检查外观，确保完好无损且无杂物。安装后，应进行调试与细致检查，并定期维护和保养，发现损坏及时修复或更换，以确保其长期稳定运行。

5.10.4 新风风道支架连廊安装技术要求

a）支架的高度、宽度、间隔距离及平面布置均严格遵循设计要求；同时，风机安装部位应设置检修平台，以确保设备维护工作的顺利进行；

b）支架的钢结构材料应符合设计要求，以确保其结构的稳固性和安全性；

c）支架的预埋件位置应正确、牢固可靠，埋入结构部分应除锈、除油污，并不应涂漆，外露部分应做防腐处理；

d）支架与预埋件焊接时，焊接应牢固，不应出现漏焊、夹渣、裂纹、咬肉等现象；

e）支架焊接应采用角焊缝满焊，焊缝高度应与较薄焊接件厚度相同，焊缝饱满、均匀，不应出现漏焊、夹渣、裂纹、咬肉等现象；

f）支架制作与安装的成品保护措施应包括下列内容：

——支架制作完成后，应用钢刷、砂布进行除锈，并应清除表面污物，再进行刷漆处理；

——支架明装时，应涂面漆；

g）支架制作与安装的安全和环境保护措施应包括下列内容：

——支架安装进行吊装时，严禁下方站人；

——安装支架用的梯子应完好、轻便、结实、稳固，使用时应有人扶持；

——脚手架应固定牢固，作业前应检查脚手板的固定。

5.10.5 风机安装技术要求

a）风机安装前应检查电机接线正确无误，并进行通电试验，检查叶片转动是否灵活、方向是否正

确，机械部分应无摩擦、松脱，无漏电及异常声响；

b）风机安装应符合下列规定：

——风机安装位置应正确，底座应水平；

——安装时应固定在隔振底座上，底座尺寸应与基础大小匹配，中心线一致；隔振底座与基础之间应按设计要求设置减振装置；

——风机吊装时，吊架及减振装置应符合设计及产品技术文件的要求；

c）风机与风管连接时，应采用柔性短管连接，风机的进出风管、阀件应设置独立的支、吊架。

5.10.6 风道安装技术要求

a）金属风管与配件制作宜选用成熟的技术和工艺，采用高效、低耗、劳动强度低的机械加工方式；

b）金属风管与配件制作前应具备下列施工条件：

——风管与配件的制作尺寸、接口形式及法兰连接方式已明确，加工方案已批准，采用的技术标准和质量控制措施文件齐全；

——加工场地环境已满足作业条件要求；

——材料进场检验合格；

——加工机具准备齐全，满足制作要求；

c）金属风管与配件的制作应满足设计要求，并应符合下列规定：

——表面应平整，无明显扭曲及翘角，凹凸不应大于 10mm；

——风管边长(直径)小于或等于 300mm 时，边长(直径)的允许偏差为±2mm；风管边长(直径)大于 300mm 时，边长(直径)的允许偏差为±3mm；

——管口应平整，其平面度的允许偏差为 2mm；

——矩形风管两条对角线长度之差不应大于 3mm；圆形风管管口任意正交两直径之差不应大于 2mm。

d）风管制作在批量加工前，应对加工工艺进行验证，并应进行强度与严密性试验；

e）金属风管与配件制作的成品保护措施应包括下列内容：

——下料时，应避免板面划伤；

——成品风管露天放置时，应码放整齐，并应采取防雨措施，叠放高度不宜超过 2m；

——搬运风管时，应轻拿轻放，防止磕碰、摔损。

f）金属风管与配件制作的安全和环境保护措施应包括下列内容：

——制作场地应有安全管理规定和设备安全操作说明，不应违章操作；

——制作场地应划分安全通道、操作加工和产品堆放区域；

——加工机具操作时，操作人员的身体应与机具保持一定的安全距离，应控制好机具启停及加工件的运动方向；

——现场分散加工应采取防雨、雪、大风等设施；

——加工过程中产生的边角余料应充分利用，剩余废料应集中堆放和处理。

5.11 保温技术要求

5.11.1 新风风道保温

a）为减少散热损失，保温层其厚度可按经济厚度方法计算；

b）保温材料的主要性能要求：在平均温度为 25℃时热导率值不大于 0.050 W/(m·K)，密度不大于 300kg/m$^3$；

c）保温层宜采用高压聚乙烯高倍发泡体橡塑材料、岩棉保温板等，保温层外侧采用钢板或其它材料作为保护层。

5.11.2 换热塔外部及“Y”型连接风道应采用高压聚乙烯高倍发泡体橡塑材料、岩棉保温板等进行保温。

5.12 配电系统技术要求

5.12.1 配电系统应按照二级负荷要求的标准进行设计，以确保其稳定运行和供电可靠性。

5.12.2 为保证供电的安全性、可靠性，宜采用低压 380V 双回路供电。

5.12.3 为确保风机设备能够顺利采用变频器启动运行，应在每台风机旁设置专用的就地控制箱，以便于操作与管理。

5.12.4 电缆敷设可根据实际情况选择电缆沟、桥架或穿管等不同的方式。

5.13 智能化监控系统技术要求

5.13.1 在风管上安装各类传感器时，应确保在风管保温施工之前完成测压孔的开设工作。对于测压点与风管连接处，应采取严格的密封措施，以确保系统的稳定性和安全性。

5.13.2 监测与控制系统的安装应符合设计要求及现行国家标准的有关规定。

5.13.3 监测与控制系统安装时，应采取避免电磁干扰的措施。

5.13.4 不同的监测与控制系统对接时，其接口协议应一致。

5.13.5 矿井回风余热直接利用井筒防冻系统的运行方式，建议以自动监控技术为核心，结合云计算处理数据，并通过手机应用程序实现远程控制，辅以必要的人工干预。

5.13.6 智能化监控系统的监控范围应包括以下内容：

a）换热塔回风的进风、出风温度及相应的风速、风压；

b）换热塔新风的进风、出风温度及相应的风速、风压；

c）井口混合后入井新风温度；

d）各新风风管的风压、风速、出口风温；

e）换热器内部特定位置的风速、温度；

f）新风风机的启动、运行、故障信号。

5.13.7 自控系统应具备基于监测数据进行预警与报警的能力，以确保系统的稳定运行和及时响应潜在风

险。

5.13.8 自控系统应能够依据所获取的监测数据，运用大数据分析方法进行深度处理，同时结合外界气温的实时变化，自动对运行模式进行灵活调节。

## 6 测试计算

### 6.1 间壁式换热器换热量计算

风-风间壁式换热器的换热量可用新风实际获取的热量来衡量，按附录D的公式计算。

### 6.2 间壁式换热器风阻计算

6.2.1 风速测量

为确保换热器高效运行，应采用高精度设备测量换热器新风侧入口速度、新风侧出口速度、回风侧入口速度、回风侧出口速度、风机入口处速度、风机出口处速度，以全面了解换热器的性能状况，为优化设计和提高运行效率提供保障。

6.2.2 静压测量

为准确分析换热器的工作状态及风阻情况，应对换热器的多个关键部位进行压力测量。具体包括：换热器新风侧入口处的压力 $P_1$，新风出口侧的压力 $P_2$，回风侧入口处的压力 $P_3$，回风侧出口的压力 $P_4$，风机入口处的压力 $P_5$，以及风机出口处的压力 $P_6$ 等。

6.2.3 风阻测试与计算

新风侧（和回风侧）的风阻可根据换热器新风侧（和回风侧）入口和出口的压差计算，计算公式见附录 D。

## 7 验收

### 7.1 换热器验收

7.1.1 换热器及换热管的尺寸偏差应符合本标准和设计文件的要求，换热管数量、材质符合设计要求。

7.1.2 碳素钢、低合金钢换热管管端外表面应除锈至呈现金属光泽。管端清理长度为：

a) 对焊接接头，管端清理长度应不小于换热管外径，且不小于 25mm；

b) 对胀接接口，管端清理长度应不小于强度胀接长度，且不应影响胀接质量。

7.1.3 换热管直管或直管段长度大于 6000mm 时允许拼接，且应符合以下要求：

a) 对接焊缝应进行焊接工艺评定，评定时试件的数量、尺寸、试验方法应符合 NB/T 47014 的规定；

b) 直管段的对接焊缝不应超过一条；U 形管的对接焊缝不应超过两条；最短直管长不应小于 300mm，且应大于管板厚度 50mm 以上；

c) 对接接头的管端坡度应采用机械方法加工，焊前应清理干净；

d) 对口错边量不应超过换热管壁厚的 15%，且不大于 0.5mm，并不应影响穿管；

e) 对接后应进行通球检查，以钢球通过为合格，钢球直径应按表 7-1 选取。

表 7-1 钢球直径（mm）

| 换热管外径 $d$ | $d$≤25 | 25<$d$≤40 | d>40 |
|---|---|---|---|
| 钢球直径 | 0.75$d_1$ | 0.8$d_1$ | 0.85$d_1$ |
| 注：$d_1$——换热管内径。 | | | |

7.1.4 换热器应进行耐压试验

a) 耐压试验的方法及要求应符合国标 GB150-2011 的规定， 耐压试验主要是进行管程试验。

b) 试验中发现的不满足要求的换热管应及时更换；对于无法更换的有缺陷换热管，允许堵管，但堵管根数不宜超过 1%，堵管方法应得到采购方认可，保证堵管后不影响设备的安全性，出厂资料应标记处堵管位置，并提供给采购方。

7.1.5 防腐检验

完成防腐施工后，需要进行质量检验，以确保施工质量符合规范和设计要求。检验项目包括涂层厚度、附着力、硬度、耐腐蚀性等方面。储运安装时应避免碰和敲击涂层，涂层发生机械损伤后应使用涂料进行修补。

7.1.6 出厂资料

a) 制造单位应向热交换器采购方提供出厂资料，并应提供使用说明书；

b) 热交换器出厂资料应满足国标 GB150-2011 中的要求。

7.2 换热塔验收

7.2.1 自动安全风门灵敏可靠，当换热器堵塞、回风阻力增大时，自动安全风门可自动打开，形成临时回风排放通道。

7.2.2 自动切换风阀阀板制作坚固，不变形，四周有密封胶条，与风道相接密实，漏风率≤1%，支持实现远程自动调控和现场操作控制，相关电气设备均为矿用防爆型。

7.2.3 换热器自清洗系统可实现自动、定期清洗除污。

7.2.4 排污系统排水功能正常，能及时将污水及冷凝水顺利排至污水收集系统。

7.2.5 静压箱的风量、风压、尺寸和噪声等数据符合设计要求，各部件运转正常，无松动和漏风等现象。

7.2.6“Y”型连接风道漏风率≤1%，任意一个主要通风机的风量均可以均匀流入换热塔回风入口处。

7.2.7 钢结构为抗震、防风结构，承载能力满足设计要求。

7.3 风机验收

7.3.1 风机应附带装箱清单、设备说明书、产品质量合格证书和性能检测报告等随机文件，进口设备还应具有商检合格的证明文件。

7.3.2 风机安装前，应进行开箱检查验收，并形成书面的验收记录。

7.3.3 风机就位前应对其基础或支架进行验收，合格后再安装。

7.3.4 风机的性能、技术参数应符合设计要求，出口方向应正确；叶轮旋转应平稳，每次停转后不应停留在同一位置上。

7.3.5 落地安装时，应按设计要求设置减震装置，并应采取防止设备水平位移的措施。

7.3.6 监测安装孔开孔位置应正确，不应有遗漏。

7.4 风道及支架连廊验收

7.4.1 风道

a）风道的材料品种、规格、性能与厚度应符合设计要求。当风道板材厚度设计无要求时，应按 GB 50243 的规定执行；

b）风道制作所用的板材、型材以及其他主要材料进场时应进行验收，质量应符合设计要求及国家现行标准的有关规定，并应提供出厂检验合格证明。工程中所选用的成品风管，应提供产品合格证书或进行强度和严密性的现场复验；

c）金属风管规格应以外径或外边长为准，非金属风管和风道规格应以内径或内边长为准。用板材卷制的圆筒或矩形风筒，周长的允许上偏差为 10mm，下偏差为零。圆筒同一断面的最大内径和最小内径之差，不应大于该断面公称直径 DN 的 0.5%，风筒直线度允许偏差不应大于风筒长度的 1‰；

d）保温层材质、厚度符合设计要求，表面平整，不应有破损和脱落现象；室外防潮层或保护壳应平整、无损坏；

e）风道的软性接管位置应符合设计要求，接管应正确牢固，不应有强扭。

7.4.2 支架连廊

a）钢结构的材质、规格型号、焊接等应满足设计要求；

b）支架连廊的尺寸、间距、平面布置等应满足设计要求；

c）支架的承载力要满足设计要求；

d）支架的油漆应均匀，不应有透底返锈现象。

7.5 配电系统验收

7.5.1 所有电气设备所用元器件、材料均符合设计要求，并均为合格产品。实行生产许可证或强制性认证(CCC 认证)的产品，应有许可证编号或 CCC 认证标志，并应抽查生产许可证或 CCC 认证证书的认证范围、有效性及真实性。

7.5.2 电气设备的外露可导电部分应单独与保护导体相连接，不应串联连接，连接导体的材质、截面积应符合设计要求。

7.5.3 柜、台、箱的金属框架及基础型钢应与保护导体可靠连接；对于装有电器的可开启门，门和金属框架的接地端子间应选用截面积不小于 $4mm^2$ 的黄绿色绝缘铜芯软导线连接，并应有标识。

7.5.4 设备整体安装符合设计和相关规范要求，防鼠板、隔板齐全，底座平整、牢固、无晃动，联排设备整齐划一、美观。

7.5.5 电气一次接线与二次接线符合设计图纸或说明书的要求，接线正确无误，牢固可靠。

7.5.6 母排安装规范、牢固，无虚接现象、绝缘套完整无损。

7.5.7 防雷、接地系统符合设计和规范要求（测试接地电阻）。

7.5.8 电缆敷设符合设计和规范要求，无中间电缆接头、无硬弯曲现象，编号标志正确、明显。

7.5.9 试运行前，相关电气设备和线路应试验合格；各类柜、台、箱的仪表及指示灯指示正常。

7.5.10 电动机应试通电，并应检查转向和机械转动情况，电动机试运行应符合下列规定：

a）空载试运行时间宜为 2h，机身和轴承的温升、电压和电流等应符合建筑设备或工艺装置的空载状态运行要求，并应记录电流、电压、温度、运行时间等有关数据；

b）空载状态下可启动次数及间隔时间应符合产品技术文件的要求；无要求时，连续启动 2 次的时间间隔不应小于 5min，并应在电动机冷却至常温下进行再次启动。

7.5.11 电气动力设备的运行电压、电流应正常，各种仪表指示应正常。电动执行机构的动作方向及指示应与工艺装置的设计要求保持一致。

7.6 智能化监控系统验收

7.6.1 热工仪表及控制装置安装前应进行检查和校验，精度等级应符合规定，并应有完整的校验记录。

7.6.2 测温元件安装具体要求：

a）为确保测温元件能够准确反映测试温度，应当将其安装在具有代表性的位置。对于室外温度传感器而言，其安装位置应满足通风良好、有效遮阳以及避免干扰等要求，以确保其测量结果的准确性和可靠性；

b）进风井筒温度传感器安装位置：在距地面 50m 和 100m 处各安装 1 个传感器；

c）换热塔回风温度传感器安装位置：

——回风进风口温度监测：安装在“Y”型连接风道靠近换热塔入口侧；

——回风出风口温度监测：每层换热器中部回风出口各安装 1 个，取平均值；

d）各新风风道风压、风速及出口风温监测：

——风压、风速监测位置：风机前向 10 倍风道直径的直管段处；

——出风口温度监测位置：距出风口 5m~10m 处。

7.6.3 监测与计量装置的输出模式和精度应符合设计文件的要求。 风-风换热系统运行状况日报表可参考附录 E 并结合实际情况灵活调整。

7.6.4 监控系统安装完成后应进行调试和检测，监控中心的通信、数据计算、监测、显示及储存应符合设计要求。

7.7 其他辅助系统验收

7.7.1 相关的辅助设备（电源、接地、防雷等）安装调试完毕

a) 电源系统的安装符合电气安全规范，电源线路和配电箱功率符合需求；

b) 所有电气设备均已正确接地，接地电阻符合规范要求；

c) 防雷系统（包括外部避雷针和内部浪涌保护器）安装符合规范要求；

d) 所有辅助设备调试完成，包括电源系统的电压和电流测试，接地系统的连续性测试，以及防雷

系统的响应测试；

e) 各辅助设备能够与主设备协同工作，满足系统运行的需求；

f) 连接点的紧固性、电缆的规范敷设以及设备接地状况核查正常；

7.7.2 排水泵应满足最大水量情况下的排水要求；

7.7.3 辅助换热设备应满足极限情况下的辅助供热要求；

7.7.4 井口封闭系统工作正常。对于人员、车辆经常进出而无法封闭的大门，挡帘严密性好；进风井为上下人员物料时，封闭系统可动态、自动控制；

7.7.5 工程质量验收记录可参考附录 F 的格式进行。

## 8 安全运行

### 8.1 管理制度

8.1.1 为了确保矿井回风余热直接利用系统安全运行，应当制定一套全面且严谨的安全运行管理制度，包括安全操作章程、应急处理预案以及巡回检查制度等重要内容。

8.1.2 为了保障管理制度的有效执行，必须对运行与管理人员进行系统的培训，使其能够深入理解并严格遵守相关规定。运行与管理人员在执行职务时，必须严格按照有关规章制度行事，确保各项工作的安全、有序进行。

### 8.2 智能化监控系统

8.2.1 智能化监控系统宜采用就地 PLC 控制技术结合工控机控制模式，确保操作的高精准度和高效率，为系统的稳定运行提供保障。

8.2.2 智能化监控系统应支持将关键数据实时传输至微信小程序或专用手机 APP 端，实现数据的无缝对接、即时共享和远程访问。通过远程访问功能，用户可以实时监视系统状态，进行远程调控。

8.2.3 智能化监控系统应配备一套完备的报警机制，能够在第一时间发现并响应运行中的异常情况，确保了系统在面对各种突发情况时，能够迅速采取措施，保障系统的安全与稳定运行。

8.2.4 系统的操作界面设计应简洁直观，易于理解和操作。无论是专业技术人员还是普通用户，都能快速上手，高效管理。

### 8.3 系统维保

8.3.1 系统运行期间，应定期巡检巡查，及时排查安全隐患，杜绝设备带病运行，杜绝一切运行事故发生。

8.3.2 供暖季结束后，应根据现场的运行情况和存在问题，编制“夏季检修计划”，有计划、有步骤地进行换热器清洗，风道维修，风机、电机维修，风阀、安全风门、供电及自控系统吹灰维修等。

### 8.4 运维团队

8.4.1 运维团队应经常进行安全培训、技能培训，不断提高安全技术素质。

8.4.2 应建立矿井回风直接利用系统技术档案。技术档案应包括施工图图设计、调试报告、年度运维记

录、能耗状况记录、节能改造技术资料等。

## 附录 A （资料性）·井筒防冻负荷及矿井回风中可提取热量计算

井筒防冻负荷按公式（A.1）计算

$$Q_{\mathrm{f}} = \beta \rho c L_{\mathrm{in}} (T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{lim}}) \tag{A.1}$$

式中：

$Q_{\mathrm{f}}$——井筒防冻负荷，单位为千瓦（kW）；

$\beta$——井筒防冻负荷富余系数，建议取 1.1；

$\rho$——空气密度，单位为千克每立方（kg/m³）；

$c$——空气定压比热，单位为千焦每千克每摄氏度（kJ/[kg·℃]）；

$L_{\mathrm{in}}$——井筒进风量，单位为立方每秒（m³/s）；

$T_{\mathrm{in}}$——井口进风温度，单位为摄氏度（℃）；

$T_{\mathrm{lim}}$——十年的年极端最低温度的算术平均值，单位为摄氏度（℃）。

矿井回风中可提取热量 $Q_{\mathrm{k}}$ 可按公式（A.2）计算

$$Q_{\mathrm{k}} = L_{\mathrm{h}} \rho_h (1 - \theta_{\mathrm{h}})(h_{\mathrm{h,in}} - h_{\mathrm{h,out}}) \tag{A.2}$$

式中：

$Q_{\mathrm{k}}$——矿井回风中可提取热量，单位为千瓦（kW）；

$L_{\mathrm{h}}$——矿井回风总风量，单位为立方每秒（m³/s）；

$\rho_{\mathrm{h}}$——回风换热前密度，单位为千克每立方（kg/m³）；

$\theta_h$——回风漏风率；

$h_{\mathrm{h,in}}$—回风换热前的焓值，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

$h_{\mathrm{h,out}}$—回风换热后的焓值，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

## 附录 B （资料性）·换热管换热面积及总管数确定

换热管的总传热系数 $K$ 以外表面积为计算依据，按公司（B.1）计算

$$K=\frac{1}{\frac{1}{h_{\mathrm{i}}}\frac{d_0}{d_i}+\frac{d_0}{2\lambda_b}\ln\frac{d_0}{d_{\mathrm{i}}}+\frac{1}{h_{\mathrm{o}}}} \tag{B.1}$$

式中：

$h_{\mathrm{i}}$—换热管内侧流体的对流换热系数，单位为瓦每平方米每摄氏度，W/(m$^2$·℃)；

$h_{\mathrm{h}}$—换热管外侧的对流传热系数，单位为瓦每平方米每摄氏度，W/(m$^2$·℃)；

$\lambda_b$—换热管壁的导热系数，单位为瓦每米每摄氏度 W/(m·℃)；

$d_{\mathrm{i}}$，$d_{\mathrm{o}}$—换热管内、外管径，单位为米（m）。

传热温差取对数平均温差△$T$ 按公式（B.2）计算：

$$\Delta T_{\mathrm{m}}=\varphi\frac{(T_{\mathrm{h,o}}-T_{\mathrm{x,i}})-(T_{\mathrm{h,i}}-T_{\mathrm{x,o}})}{\ln(\frac{T_{\mathrm{h,o}}-T_{\mathrm{x,i}}}{T_{\mathrm{h,i}}-T_{\mathrm{x,o}}})} \tag{B.2}$$

式中：

φ——修正系数，当回风与新风逆流时取 1，其他情况需参考《热交换器原理与设计》计算；

$T_{h,\mathrm{i}}$、$T_{h,\mathrm{o}}$—分别回风入口、出口温度，单位为摄氏度（℃）；

$T_{x,\mathrm{i}}$、$T_{x\mathrm{o}}$—分别新风入口、出口温度，单位为摄氏度（℃）。

换热器传热面积 $A$ 公式（B.3）计算：

$$A=\Psi\frac{Q}{K\cdot\Delta T_m} \tag{B.3}$$

式中：

$Q$—井筒防冻逐时最大热负荷，单位为瓦（W）；

ψ——换热面积富裕系数，建议取 1.2；

$K$，△$T_m$—含义同上。

换热管总管数 $N$ 按公式（B.4）计算：

$$N=\frac{A}{\pi d_0 l} \tag{B.4}$$

式中：

$l$—为管长，单位为米（m）。

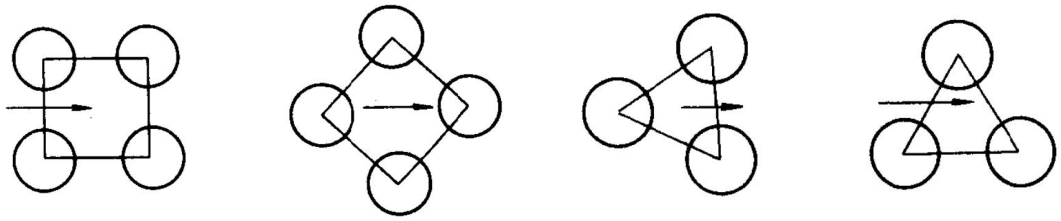
## 附录 C （资料性） 换热管材质及规格

换热管的材料和规格可参考表 C.1，管材厚度应满足结构计算的最低厚度要求。

表 C.1 换热管的材料和规格

| 材料 | 换热管规格 | |
|---|---|---|
| | 外径（mm） | 厚度（mm） |
| 碳钢<br>低合金钢 | ≥14~30 | 2~2.5 |
| | >30~50 | 2.5~3.0 |
| | 57 | 3.5 |
| 不锈钢 | ≥14~30 | >1.0~2.0 |
| | >30~50 | >2.0~3.0 |
| | 57 | |
| 铝<br>铝合金 | ≤34 | 2.0~3.5 |
| | 36~50 | |
| | >50~55 | |
| 铜 | 10 | 1.0~3.0 |
| | 11~18 | |
| | 19~30 | |
| 铜合金 | 10~12 | 1.0~3.0 |
| | >12~18 | |
| | >18~25 | |
| | >25~35 | |
| 钛<br>钛合金 | 10~30 | 0.5~2.5 |
| | >30~40 | |
| | >40~50 | |

换热器内换热管的排列型式主要有以下四种（图 C.1），优先选用正方形或转角正方形排列，管间通道沿整个管束应该是连续的，且要保证 6mm 的清洗通道。



（a）正方形　（b）转角正方形　（c）三角形　（d）转角三角形

图 C.1 换热管排列形式

换热管中心距应为管子外径的 1.25 倍以上，在采用焊接方法连接管板和管子时，管间距可以小些，但要保证壳程清洗时有 6mm 的清洗通道。常用的换热管中心距见表 C.2。

表 C.2　换热管中心距（mm）

| 换热管外径 *d* | 10 | 12 | 14 | 16 | 19 | 20 | 25 | 30 | 32 | 35 | 38 | 45 | 50 | 55 | 57 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 换热管中心距 *s* | 13-14 | 16 | 19 | 22 | 25 | 26 | 32 | 38 | 40 | 44 | 48 | 57 | 64 | 70 | 72 |

## 附录 D （资料性） 测试计算

回风-新风间壁式换热器的换热量可按公式（D.1）计算

$$Q_{\mathrm{tol}} = \rho_x c_x L_{\mathrm{x}} (T_{\mathrm{x1}} - T_{\mathrm{x2}}) \tag{D.1}$$

式中：

$Q_{\mathrm{tol}}$——回风-新风间壁式换热器的换热量，单位为千瓦（kW）；

$\rho_x$——新风密度， 单位为千克每立方（kg/m³）；

$c_x$——新风比热容， 单位为千焦每千克每摄氏度（kJ/[kg·℃]）；

$L_{\mathrm{x}}$——新风风量，单位为立方每秒（m³/s）。

$T_{x1}$——加热后新风温度，单位为摄氏度（℃）；

$T_{x2}$——加热前新风温度，单位为摄氏度（℃）；

动压可根据测量的风速按照公式（D.2）计算

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2} \tag{D.2}$$

静压与动压之和为全压，全压可按公式（D,3）计算

$$P_q = P_j + P_d \tag{D.3}$$

测出测量断面面积 $F$ 及计算出空气的平均流速 $\bar{v}$ 后即可按公式（D.4）计算空气体积流量 L

$$L = A \cdot \bar{v} \tag{D.4}$$

式中：

$P_{\mathrm{d}}$—— 空气的动压，单位为帕（Pa）；

$v$ —— 空气的流速，单位为米每秒（m/s）；

$\bar{v}$ —— 空气的平均流速，单位为米每秒（m/s）；

$A$—— 测量断面的面积，单位为平方米（m²）；

$P$——测量断面上空气密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；

$P_{\mathrm{j}}$——空气的静压，单位为帕（Pa）；

$P_{\mathrm{q}}$——空气的全压，单位为帕（Pa）；

$L$——空气体积流量，单位为立方米每秒（m³/s）。

新风侧风阻可根据换热器新风侧入口和出口的压差，按公式（D.5）计算

$$\Delta P_x = P_{x,\mathrm{in}} - P_{x,\mathrm{out}} \tag{D.5}$$

式中：

$\Delta P_{\mathrm{x}}$——新风侧风阻，单位为帕（Pa）；

$P_{\mathrm{x,in}}$——新风入口压力，单位为帕（Pa）；

$P_{\mathrm{x,out}}$——新风出口压力，单位为帕（Pa）。

回风侧风阻可根据回风侧入口和出口的压差按公式（D.6）计算

$$\Delta P_{\mathrm{h}} = P_{\mathrm{h,in}} - P_{\mathrm{h,out}} \tag{D.6}$$

式中：

$\Delta P_{\mathrm{h}}$——回风侧风阻，单位为帕（Pa）；

$P_{\mathrm{h,in}}$——回风入口压力，单位为帕（Pa）；

$P_{\mathrm{h,out}}$——回风出口压力，单位为帕（Pa）。

风机实际工作状态点可按照公式（D.7）计算

$$P_{q,\mathrm{fan}} = P_{q,\mathrm{in}} - P_{q,\mathrm{out}} \tag{D.7}$$

式中：

$P_{q,\mathrm{fan}}$——风机的全压，单位为帕（Pa）；

$P_{q,\mathrm{in}}$——风机入口处的空气全压，单位为帕（Pa）；

$P_{q,\mathrm{out}}$——风机出口处的空气全压，单位为帕（Pa）。

## 附录 E （资料性）风-风换热系统运行状况日报表

日期：

| 时间 | 加热后新风温度（℃） | | | | | | 井筒温度（℃） | | | 回风温度（℃） | | 室外温度（℃） | 风机运行状况 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# | 测点 1 | 测点 2 | 平均 | 入口 | 出口 | | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# |
| 1:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0:00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

值班员：　　运维班长：

## 附录 F （资料性）工程质量验收记录

工程质量验收相关记录见表F.1~表F.7。

表F.1 换热器安装质量验收记录

| 工程名称 | 风-风换热井筒防冻系统 | 分项工程名称 | 换热器安装 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 施工单位 | | 项目负责人 | | 监理 | |
| 序号 | 主控项目设计要求及<br>有关质量验收规范之规定 | 施工单位<br>质量评定结果 | 现场检查问题 | 现场质量检查验收评定意见 | 备注 |
| 1 | 换热器外形尺寸：长、宽、高；换热器重量及数量 | | | | |
| 2 | 换热管数量、材质、管长、外径、壁厚、形状等 | | | | |
| 3 | 换热管的焊接（胀接）质量符合设计及相关规范要求 | | | | |
| 4 | 有无堵管，堵管根数不宜超过 1% | | | | |
| 5 | 有耐压实验报告，且符合 GB150 的规定 | | | | |
| 6 | 防腐检验：包括涂层厚度、附着力、硬度、耐腐蚀性等符合设计要求 | | | | |
| 7 | 出厂资料应满足 GB150 中的要求，包括且不限于：产品合格证、耐压试验报告、换热管质量报告、产品说明书等 | | | | |

表F.2 换热塔安装质量验收记录

| 工程名称 | 风-风换热井筒防冻系统 | 分项工程名称 | 换热塔安装 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 施工单位 | | 项目负责人 | | 监理 | |
| 序号 | 主控项目设计要求及<br>有关质量验收规范之规定 | 施工单位<br>质量评定结果 | 现场检查问题 | 现场质量检查验收评定意见 | 备注 |
| 1 | **钢结构：**⑴所有钢材均为焊接结构用钢，结构钢规格型号符合设计要求，符合 GB/T 1591 规定；⑵钢结构为抗震、防风结构；⑶焊接质量符合设计要求；⑷预埋件采用 Q345B 钢，其质量应符合国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 的规定。⑸钢结构设计之前应对地基承载能力进行验算，并设计出可靠的换热塔基础。若地基承载力不满足承载力要求，需要对地基进行换填或加固 | | | | |
| 2 | **静压箱：**⑴材质、外形尺寸、结构形状等符合设计要求；⑵换热塔外部防腐、保温、吸声等符合设计要求；⑶静压箱内导流板布置合理，平均风速在 2-2.5m/s 以内 | | | | |
| 3 | **“Y”型连接风道：**⑴材质、外形尺寸、结构形状等符合设计要求；⑵防腐、保温等符合设计要求；⑶漏风率≤1% | | | | |
| 4 | **自动安全风门：**⑴成品自动风门须有产品合格证、检测报告；⑵材质、外形尺寸、结构形状、防腐、密封等符合设计要求；⑶执行机构灵敏可靠，漏风率≤1% | | | | |
| 5 | **自动切换风阀：**⑴成品自动切换须有产品合格证、检测报告；⑵材 | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 质、外形尺寸、结构形状、防腐、密封等符合设计要求；⑶结构牢固，转动机构灵活，制动及定位装置可靠；⑷阀板制作坚固，不变形，四周有密封胶条，与风道相接密实，漏风率≤1%；⑸相关电气设备均为矿用防爆型 | | | | |
| 6 | **自动清洗系统：**⑴自清洗系统的材质、安装、布置等符合设计要求；⑵实际运行测试，具有自动清洗功能，无漏水现象；⑶相关电气设备均为矿用防爆型。⑷“Y”型连接处续集中设置可拆卸过滤网 | | | | |
| 7 | **排污系统：**⑴自动疏水、排污系统符合设计要求，排污功能满足运行需要；⑵有防冻措施 | | | | |

表F.3 风道及支架连廊安装质量验收记录

| 工程名称 | 风-风换热井筒防冻系统 | 分项工程名称 | 风道及支架连廊安装 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 施工单位 | | 项目负责人 | | 监理 | |
| 序号 | 主控项目设计要求及<br>有关质量验收规范之规定 | 施工单位<br>质量评定结果 | 现场检查问题 | 现场质量检查验收评定意见 | 备注 |
| 1 | 风道的材料品种、规格、性能与厚度应符合设计要求。当风道板材厚度设计无要求时，应按 GB50243《通风与空调工程施工质量验收规范》的规定执行 | | | | |
| 2 | 用板材卷制的圆筒或矩形风筒，周长的允许上偏差为 10mm，下偏差为零；圆筒同一断面的最大内径和最小内径之差，不应大于该断面公称直径 DN 的 0.5%，风筒直线度允许偏差不应大于风筒长度 L 的千分之一 | | | | |
| 3 | 保温层材质、厚度符合设计要求，表面应平整，不应有破损和脱落现象；室外防潮层或保护壳应平整、无损坏 | | | | |
| 4 | 风道的软性接管位置应符合设计要求，接管应正确牢固，不应有强扭；监测安装孔开孔位置应正确，不应有遗漏 | | | | |
| 5 | 支架的承载力要满足设计要求；钢结构的材质、规格型号、焊接等应满足设计要求 | | | | |
| 6 | 支架连廊的尺寸、间距、平面布置、检修平台等应满足设计要求 | | | | |
| 7 | 支架的油漆应均匀，不应有透底返锈现象 | | | | |
| 8 | 提供风道、支架、保温等主材的合格证、检测报告 | | | | |

表F.4 风机安装质量验收记录

| 工程名称 | 风-风换热井筒防冻系统 | 分项工程名称 | 风机安装 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 施工单位 | | 项目负责人 | | 监理 | |
| 序号 | 主控项目设计要求及<br>有关质量验收规范之规定 | 施工单位<br>质量评定结果 | 现场检查问题 | 现场质量检查验收评定意见 | 备注 |
| 1 | 风机须有合格证、产品说明书、检测报告等 | | | | |
| 2 | 风机安装前，应进行开箱检查验收，并形成书面的验收记录 | | | | |
| 3 | ⑴新风风机的安装位置、出口方向符合设计要求；⑵风机两端通过柔性短管与风道连接 | | | | |
| 4 | 落地安装时，应按设计要求设置减震装置，并应采取防止设备水平位移的措施 | | | | |
| 5 | ⑴风机的性能、技术参数、控制方式（变频）等应符合设计要求；⑵现场进行通电试验，检查叶片转动是否灵活、转向是否正确，机械部分应无摩擦、松脱，无漏电及异常声响，且每次停转后不应停留在同一位置上 | | | | |

表F.5 配电系统安装质量验收记录

| 工程名称 | 风-风换热井筒防冻系统 | 分项工程名称 | 配电系统安装 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 施工单位 | | 项目负责人 | | 监理 | |
| 序号 | 主控项目设计要求及<br>有关质量验收规范之规定 | 施工单位<br>质量评定结果 | 现场检查问题 | 现场质量检查验收评定意见 | 备注 |
| 1 | ⑴配电柜、箱规格型号、数量、安装位置符合设计要求；⑵仪表及指示灯指示正常；⑶开关标识、安全标识、工作牌齐全，张贴、悬挂规范 | | | | |
| 2 | ⑴实行生产许可证或强制性认证(CCC 认证)的产品，应具有许可证编号或 CCC 认证标志；⑵设备及材料的合格证、说明书、检测报告等齐全 | | | | |
| 3 | 设备整体安装符合设计和相关规范要求；防鼠板、隔板齐全，底座平整、牢固、无晃动，联排设备整齐划一、美观 | | | | |
| 4 | 电气一次接线与二次接线符合设计图纸或说明书的要求 | | | | |
| 5 | 母排安装规范、牢固，无虚接现象、绝缘套完整无损 | | | | |
| 6 | 防雷、接地系统符合设计和规范要求 | | | | |
| 7 | 电缆敷设符合设计和规范要求 | | | | |

表F.6 智能化监控系统安装质量验收记录

| 工程名称 | 风-风换热井筒防冻系统 | 分项工程名称 | 智能化监控系统安装 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 施工单位 | | 项目负责人 | | 监理 | |
| 序号 | 主控项目设计要求及<br>有关质量验收规范之规定 | 施工单位<br>质量评定结果 | 现场检查问题 | 现场质量检查验收评定意见 | 备注 |
| 1 | 热工仪表及控制装置安装前应进行检查和校验。 | | | | |
| 2 | 室外温度传感器应安装在通风、遮阳、不受干扰的位置。 | | | | |
| 3 | 井筒温度传感器安装位置：距地面 50m、100m 处各安装 1 个，取其平均值。 | | | | |
| 4 | 回风进风口温度监测：安装在“Y”型连接靠近换热塔一侧端口；回风出风口温度监测：每层换热器横向中部回风出口处各安装 1 个，取其平均值。 | | | | |
| 5 | 新风风道风压、风速监测位置：风机前向 10 倍风道直径处，且应为直管段；新风风道出风口温度监测位置：距出风口 5m~10m 处。 | | | | |
| 6 | 监测数据正确，采集、传输、存储、处理等各系统工作正常；自控、报警、报表、信息推送等功能正常。 | | | | |
| 7 | 监测与计量装置的输出模式、精度、信息范围应符合设计文件的要求；手机 APP 功能正常。 | | | | |
| 8 | 监控设备、各类仪表等须有合格证、产品说明书、检测报告。 | | | | |

表F.7 其他辅助设备安装质量验收记录

| 工程名称 | 风-风换热井筒防冻系统 | 分项工程名称 | 其他辅助设备安装 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 施工单位 | | 项目负责人 | | 监理 | |
| 序号 | 主控项目设计要求及<br>有关质量验收规范之规定 | 施工单位<br>质量评定结果 | 现场检查问题 | 现场质量检查验收评定意见 | 备注 |
| 1 | 换热塔排水泵须满足最大水量情况下的排水要求；相关电气设备为防爆型。 | | | | |
| 2 | 辅助换热设备满足极限情况下的辅助供热要求；相关电气设备满足煤安防爆。 | | | | |
| 3 | 井口封闭系统工作正常。对于人员、车辆经常进出而无法封闭的大门，挡帘严密性好；进风井为上下人员物料时，应设置动态自动封闭系统，相关电气设备要满足煤安防爆。 | | | | |
| 4 | 各类辅助设备等须有合格证、使用说明书、检测报告等。 | | | | |

## 参考文献

[1] GB/T 150-2011. 压力容器. 北京：中国标准出版社.

[2] GB/T 700-2006. 碳素结构钢. 北京：中国标准出版社.

[3] GB/T 1591-2008. 低合金高强度结构钢. 北京：中国标准出版社.

[4] GB 12348-2008. 工业企业厂界环境噪声排放标准. 北京：中国标准出版社.

[5] GB 50205-2020. 钢结构工程施工质量验收规范. 北京：中国标准出版社.

[6] GB 50215-2015. 煤炭工业矿井设计规范. 北京：中国标准出版社.

[7] GB 50243-2016. 通风与空调工程施工质量验收规范. 北京：中国标准出版社.

[8] JB/T 8690-2014. 通风机噪声限值. 北京：中国机械工业联合会.

[9] NB/T 47014-2011. 承压设备焊接工艺评定. 北京：中国电力企业联合会.

[10] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社， 2011.

[11] 孙猛，姜官军，冯继哲等. 竖井乏风废热提取用于井口防冻的现场实测[J]，深圳大学学报（理工版），2022，39(6): 637-641.

[12] 左强，李康，陈建刚等. 煤矿回风余热用于井筒防冻的潜力分析[J]. 中国煤炭，2019， 45(1): 147-152.

[13] 史美中，王中铮. 热交换器原理与设计（第6版）[M].南京：东南大学出版社，2018.