 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i8.11438

# Design and Application of Waste Heat Recovery System in a Thai PCB Manufacturing Plant

**Hongting Zhou**

Aoyi Architectural Engineering Design Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

**Abstract**

Recovering waste heat has emerged as a key strategy for enhancing energy efficiency and mitigating carbon emissions across modern industrial operations. Printed circuit board (PCB) manufacturing—driven by stringent quality and environmental control standards—is inherently energy-intensive, generating substantial exhaust air streams from its processing machinery. To sustain precise temperature, humidity, and slight positive pressure conditions within cleanrooms, large volumes of conditioned outdoor air must be introduced continuously. Concurrently, auxiliary systems—including air compressors and hot pressing units—generate considerable low-grade thermal energy, most of which is conventionally dissipated into the ambient environment via cooling towers. This practice not only represents a major loss of recoverable energy but also contributes to localized thermal pollution, intensifying the urban heat island phenomenon near the facility. Moreover, the production process itself demands a consistent supply of thermal energy—particularly for humidification during colder months. Harnessing this otherwise wasted thermal output could substantially lower operational expenditures. Using a real-world PCB manufacturing plant in Thailand as a case study, this paper investigates the feasibility of repurposing waste heat from air compressors and hot presses to fulfill cleanroom humidification requirements in winter, while advancing the concept of "energy cascading"—a systematic approach that prioritizes sequential, high-value utilization of thermal energy across multiple applications.

**Keywords**

air compressor; hot press; waste heat recovery; hierarchical heat utilization; operational cost savings

# 泰国某 PCB 厂房余热回收系统的设计与应用

周红婷

奥意建筑工程设计有限公司，中国·广东 深圳 518000

**摘　要**

废热回收在当今工业生产过程中已成为提升能源利用率、降低碳排放的主要方式之一。印刷电路板由于工艺制造需求，属于一种高能耗产业，工艺设备需排除大量的废气，为保持生产车间温湿度及微正压要求，需同时补充大量的新风。与此同时动力系统（如空压机、热压机）产生大量的废热，都需要通过冷却塔直接排放到室外大气中，造成严重的能源浪费，还加剧了厂区周边的热岛效应。同时工艺设备生产又需要大量的热量，厂区需要配置稳定的热源，如果废热能够实现循环利用，将能最大程度的为业主节省一部分运行成本。本文以泰国某PCB厂房为例，深入分析如何利用空压机及热压机的废热解决冬季洁净室加湿热负荷需求。以及通过“能源梯级利用”实现废热最大利用效率。

**关键词**

空压机；热压机；余热回收；热量梯级利用；节约运行成本

## 1 项目概况

本项目位于泰国巴真武里府 304 工业园，是一处现代化电子工业基地。本项目总用地面积 113697.37m$^2$，本期总建筑面积为 65685.84 m$^2$，地上共 8 栋建筑。其中包括一栋洁净生产厂房、一栋化学品仓库、一栋环保处理站、一栋员工食堂以及 4 栋门卫。

【作者简介】周红婷（1988–），女，中国江西萍乡人，本科，中级，从事暖通设计研究。

## 2 设计范围

本次设计范围为本项目的工艺空调系统设计、通风系统设计、废气系统设计。

## 3 室外气象参数与负荷特性分析

### 3.1 室外设计计算参数

泰国属于热带地区，受季风影响较大，存在明显的季节性温湿度差异。根据 ASHRAE 气象数据库及当地历史气象记录分析：

夏季：高温高湿，极端干球温度可达 41.7℃，极端湿球温度 30.4℃。此阶段主要为空调冷负荷，无需供热。

冬季：存在低温低湿现象。极端干球温度可低至 13.3℃，相对湿度 25%。

| 设计参数 | 夏季 | 冬季 |
|---|---|---|
| 空调计算干球温度(℃) | 36.5 | 18 |
| 空调计算湿球温度(℃) | 29 | 13.3 |
| 大气压力 hPa | 1007.8 | 1007.8 |

### 3.2 室内设计计算参数

由室内设计参数表可知，厂区大部分车间需全年保持恒温恒湿。由于 PCB 洁净生产厂房含有大量的工艺废气需排至室外，车间内需补充更多的新风量维持车间正压及保证车间湿度要求。夏季需消耗大量的制冷量进行降温除湿，冬季需对干燥的空气进行加湿。从焓湿图可知，当冬季室外温度很低，无论采用何种方式，空气都无法达到加湿效果，必须将空气加热后，再能进行等焓加湿。

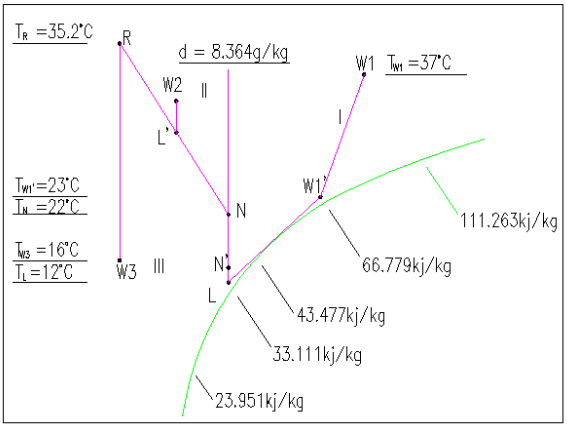
洁净厂房室内设计参数

| 房间名称及用途 | | 温度(℃) | | 相对湿度(%) | | 新风量标准 ($m^3$/h/per) | 洁净度等级 | | 正压值 Pa | 噪声限值 (dB(A)) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 夏季 | 冬季 | 夏季 | 冬季 | | 静态 | 动态 | | |
| 一层 | PP开料 | 22±2 | 22±2 | 50±5% | 50±5% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 预叠房 | 22±2 | 22±2 | 50±5% | 50±5% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 内层曝光 | 22±2 | 22±2 | 55±5% | 55±5% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 内层涂布 | 22±2 | 22±2 | 55±5% | 55±5% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 内层烤炉 | 环境温度 | 环境温度 | 常规 | 常规 | *3 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | AOI | 24±4 | 24±4 | ≤70% | ≤70% | *3 | 10000 | 100000 | +20 | 65*2 |
| | 包装 | 23±3 | 23±3 | ≤60% | ≤60% | *3 | 10000 | 100000 | +15 | 65*2 |
| 二层 | 外层曝光 | 22±2 | 22±2 | 50±5% | 50±5% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 树脂塞孔 | 22±2 | 22±2 | 50±10% | 50±10% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 开油/油墨 | 22±2 | 22±2 | 55±5% | 55±5% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 绿油 | 22±2 | 22±2 | 55±5% | 55±5% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 曝光 | 22±2 | 22±2 | 55±5% | 55±5% | *4 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | RO84烤板 | 环境温度 | 环境温度 | 常规 | 常规 | *3 | 1000 | 10000 | +20 | 65*2 |
| | 测试/FQC | 24±3 | 24±3 | 50±10% | 50±10% | *3 | 10000 | 100000 | +20 | 65*2 |

注：*1.新风量按补偿室内排风量和保持室内正压值所需新风量之和及保证每人每小时新风量不小于40$m^3$两者的大值选取。

*2.噪声限值为生产厂房在工艺设备不运行状态下的限值要求。

图1




## 4 洁净室冬季热负荷计算与优化

以本项目开料车间新风处理机组（MAU）为例，探讨冬季空气处理过程及节能策略。

如右图 1：

室内设计状态点 (N)：22 ± 2℃ , 50 ± 5% RH

室内露点状态点 (L)：

室外计算状态点 (W)：取冬季极端工况，

根据焓湿图（h-d 图）分析，当室外状态点位于需加热加湿区域（III 区）时，空气处理过程通常为：先加热后等焓加湿。

方案 A：

室外新风 W3 点，等湿加热至到室内 R 点，再经等焓加湿，至室内状态点 N 。

$$Q_1 = \frac{\rho \cdot L_{fresh} \cdot (h_R - h_W)}{3600}$$

代入数据计算：

$$Q_1 = \frac{1.2 \times 8000 \times (43.477 - 23.95)}{3600} \approx 52\ \text{kW}$$

方案 B：

室外新风加热至 R’ 点，使其经过等焓加湿后直接达到室内露点 L，再送入室内。

$$Q_2 = \frac{\rho \cdot L_{fresh} \cdot (h_{R'} - h_W)}{3600}$$

代入数据计算

$$Q_2 = \frac{1.2 \times 8000 \times (33.111 - 23.95)}{3600} \approx 24.5\ \text{kW}$$

总结分析：方案 B 比方案 A 单台设备可减少热负荷约 27.5 kW。从节能角度考虑，方案 B 更有优势。但工艺生产

必须可靠安全，考虑各种环境及不可预料的各种因素存在，热源设备选型时，总容量仍按最不利热负荷预留容量。经统计，本项目冬季空调系统总热负荷需求约为 1500 kW。

## 5 热源系统设计

本项目热源主要由两部分组成：空调冬季加热与工艺设备用热，用热总需求约 2300 kW。主要热源形式如下：

1）水源热泵机组作为稳定热源。项目设置 2 台螺杆式水源热泵机组，单台制热量 1154 kW。根据业主提供的资料，工艺设备一般 60% 左右同时换热，按照此比例计算，热泵容量足以覆盖极端工况下的工艺设备的用热需求。

2）空压机组热回收作为补充热源，本项目设置 2 台微油水冷螺杆空压机组，单台功率 315 kW。

设置 2 台离心式空压机组，单台功率 650 kW。根据工程经验值，水冷空压机可回收热量约为轴功率的 65%~75%。保守按 65% 计算，本项目可回收热量总量为：

$$Q_{rec} = (315 \times 2 + 650 \times 2) \times 65\% \approx 1254\ \text{kW}$$

热压机高温油系统热回收作为补充热源。热压机根据工艺需求配置 12 台，单台热压机释放的热量约 1900kw，可回收热量约 750kW，其余依靠冷却塔散热至室外。热压机实际同时 4 台设备交替使用，可回收总热量约 3000kw，相当于 40% 的废热被重新再利用。考虑使用时间根据工艺的需求有所不同，所以回收的总热量并非恒定，回收热只能作为补充，不能作为恒定的热源。

为保障工艺系统 24 小时不间断运行，设计采用了“优先利用余热，水源热泵补充调节”的供热方式。

## 6 热量多级回收利用

针对泰国气候低温时间短的特点，不再单独设置空调专用热源，而是采用了能量梯级利用方案，本项目设置 3 个独立的热水箱，分别为 65℃（高温）、55℃（中温）、45℃（低温），通过水箱缓冲热源波动。

1）一级利用（工艺供热）：热回收系统及热泵制取的高温热水供到 65℃水箱，回水接 55℃水箱，工艺设备用热通过水泵从 65℃水箱抽水，送到每层设备经换热后，再回到 55℃水箱。

2）二级利用（空调供热）：工艺设备换热后的回水，直接作为空调系统的供水热源，用于 MAU 冬季加热。

3）三级利用（热泵提效）：热压机产生的高温油回收热量，用于提升 55℃水箱温度，进而提高热泵机组的进水温度，提升热泵机组的 COP 值。

## 7 回收系统原理

### 7.1 空压机热回收原理

多级压缩回收：以离心空压机组为例，第一、二级压缩产生的热量需靠外部冷源冷却至设备正常运行的温度，此部分的热量适合考虑热回收；第三级压缩热通常用于干燥机再生用热，不能设置回收系统。

双板换保护系统：为确保空压机安全运行，系统设计采用了“应用板换”与“保护板换”串 / 并联结构。

正常回收模式：空压机内部循环的冷却水流经“应用板换”，将多余的热量传递给热回收水系统。空压机内部循环水再经过保护板换与冷却水换热，再回到空压机组。

保护模式：当末端用热需求减少或热回收水泵故障导致回水温度过高时，则全部通过保护板换与冷却水换热，通过冷却塔散至室外大气，确保空压机排气温度不超标。

### 7.2 热压机系统热回收原理

工艺要求进热压机的冷却水需≤ 45℃，然而从热压机出来的冷却水温可达 70℃，甚至更高的温度。如果不设置回收，需全部利用冷却塔散热。高温闭式冷却塔设备费用较高，如果大部分的热量能够回收，同时降低了运行的成本，对冷却塔的损耗也相应减少。

热压机的出水先经过一组板换，换热后，水温大概降低到 60℃，再经过冷却塔冷却后到 45℃，回到热压机。板换的二次侧进水 50℃，60℃出水再通过水泵送到热水箱。

### 7.3 水源热泵蒸发测回收原理

水源热泵冷凝侧提供热水，蒸发侧则蒸发吸热，可以吸收介质的热量，从而降低介质的温度。因此蒸发测的进水接入中温水系统回水（19℃）总管，将 19℃水温降至 13℃，再 13℃送到到中温水系统供水总管。为避免出水温度过高而影响中温水系统的供水温度。热泵蒸发侧通过调节水流量来控制蒸发侧出水温度恒定为 13℃。单台热泵为中温水系统提供约 1400kw 的冷量，2 台热泵同时使用则提供冷量 2800kw（此负荷为满负荷运行时的总热负荷）。此部分回收的冷量也是相当可观的。

## 8 结论与效益分析

综上所述，洁净厂房应用空压机组及工艺设备余热回收，不仅减少热泵的启动运行时间，还提升热泵的 COP 值，降低设备运行成本；回收装置为板式换热器，前期投入成本低，回收周期短；系统配置不同水温的水箱，具备一定的储水功能，解决了回收热与用热时间不同步的问题；随着 AI 的普及几发展，为此服务的上下游产业，也在蓬勃发展，洁净厂房需求增加，控制投资成本，节约运营成本，以及相应国家节能减排政策，是每个企业，已经相关设计需要不停的探索的课题。

### 参考文献

[1] ASHRAE气象网站

[2] 王志军，殷小涛，印制电路板厂房暖通空调节能设计分析(J).清洁生产与环保,2020(4):49-52

[3] 许校彬,邵勇,陈金星,等.印制电路板制造中节能改造技术探索与实践(J).印制电路信息,2022,30(9):56-60