

寒冷地区单晶炉循环冷却水系统设计及应急策略

朱丽叶

(中国电子系统工程第二建设有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 循环冷却水系统在单晶硅生长过程中起着关键作用, 其功能主要是控制生长腔内温度梯度以及其他部位的温度波动, 如炉体、主轴、电缆等, 确保晶体生长环境的稳定, 并提高单晶硅的品质。本文以宁夏某光伏企业单晶项目为案例, 通过分析循环冷却水对晶体生长过程的重要性, 对比分析不同循环冷却水系统方案, 并以甲方具体技术需求为依据, 选择合适的方案对其设计参数进行总结分析, 并基于安全性提出其他应急措施设计, 以期相关人员提供参考。

关键词 光伏行业; 寒冷地区; 单晶炉; 循环冷却水; 温度控制

中图分类号: TN3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.14.003

0 引言

随着新能源半导体行业的快速发展, 对单晶硅该上游工艺的稳定性提出了更高要求, 而单晶炉作为核心设备, 其运行环境的精准温控至关重要。循环冷却水系统在维持单晶炉高温运行时的温度稳定中发挥着关键作用, 直接影响晶体生长质量和设备寿命。本文以宁夏某项目为例, 结合当地气候特征, 深入探讨单晶炉循环冷却水系统的设计要点和应急策略, 旨在确保系统在极端条件下的稳定运行, 为寒冷地区单晶硅生产提供技术参考和实践借鉴。

1 案例项目概况

案例项目为某 20 GW 拉晶项目一期工程 2 GW 拉晶厂房及配套工程的设计建造, 本项目采用的是 CZ (Czochralski) 法的直拉单晶炉, 其工作温度通常达到或超过 1 400 °C。

项目一共有 120 套单晶炉设备, 每套设备中有多部件需要循环冷却水降温, 且其自带水冷配水系统, 由其将外部循环冷却水分配至需水冷的各个部位。冷却水技术需求由厂务技术人员根据老厂运行经验及单晶炉设备厂家提供设计参数综合考虑后提出, 具体为: 平均时冷却水总用水量 4 320 m³/h, 最大时冷却水总用水量 5 540 m³/h, 进水温度 28±2 °C, 回水温度温升 3~5 °C, 用水点压力 0.30 MPa。

项目位于宁夏银川地区, 为寒冷地区, 夏季室外湿球温度为 22.1 °C, 与进水温度接近, 这为用冷却塔直接进行降温提供了理论基础。另外, 甲方提出要求,

在任何突发情况下, 如停水或停电, 必须能够及时提供循环冷却水系统的备用水源和电源。这是因为单晶炉内生产环境温度极高且需要高精度的温控环境, 水冷系统一旦失效, 炉内温度很易超限, 各部件会产生不可逆转的损害, 导致生产进度受影响, 严重时会发生安全事故。冷却水系统的设计直接影响炉体的温控精度、能效、设备寿命以及晶体生长的质量。

2 冷却水在单晶炉生产中的重要性

单晶硅是半导体和光伏产业的核心材料, 直拉单晶炉型式尽管不同, 总的说来, 主要由炉体、加热系统、水冷系统、真空系统、氩气装置和电气装置五大部分组成。炉体主要由生长腔室、提拉主轴和外部筒体组成^[1], 生产过程中均需要循环冷却水, 既能有效散热, 又能维持稳定的温控效果。

2.1 提拉主轴

提拉主轴为中空水冷结构, 在晶体生长炉内, 温度极高, 主轴若无冷却措施, 会因直接接触高温环境而温度骤升。主轴本体为不锈钢材质, 提拉机构为钨丝材质, 大温差会使其热胀冷缩^[2], 从而无法精准传递提升速度, 易使晶体生长速率不稳, 甚至产生缺陷或断裂。冷却水能将主轴温度维持恒定。

2.2 水冷热屏

生长腔室组件的结构设计由内向外分为四层, 分别为水冷热屏、坩埚、石墨加热器以及保温毡。水冷热屏为双层锥状筒形结构, 有利于氩气流通, 材质为 316 不锈钢板。

在单晶炉中,晶体生长速度与晶棒轴向的温度梯度密切相关,二者呈正相关关系^[3]。也就是说,当晶棒轴向的温度梯度增大时,晶体的生长速度也会相应加快。为了有效提升单晶硅的生产效率,采用了水冷热屏组件来对单晶硅棒进行冷却,以此来增大晶棒的轴向温度梯度。

2.3 其他主要部位

生长腔室外为筒体炉壁,与水冷热屏一样为双层结构,以便于冷却水在中空结构中流通循环,一方面辅助水冷热屏控制炉内生产温度,另一方面控制炉壁与外部生产环境的温差,保证外部生产环境的稳定。

单晶炉用电功率大,单套设备额定功率达 305 kW,电缆长时间处于大负荷工作状态下,因此需采用管内水冷措施,防止内部导线因产生热膨胀而断裂^[4]。

另外,单晶炉配套使用的真空泵也需冷却水进行运行过程中的降温。

3 循环冷却水系统方案确定

3.1 工艺冷却水系统分类

工艺冷却水系统(Process Cooling Water System, 简称 PCW)是工业生产中用于调节和控制设备温度、保障工艺稳定性的重要设施。它通过冷却水流动在设备内部或周围的冷却通道中,带走设备在生产过程中产生的热量,从而保持设备、生产线或工艺过程中的温度稳定,避免过热,确保生产效率和设备安全。

按工艺冷却水供回水温度要求和冷源供回水温度是否可协调一致,工艺冷却水系统可分为以下两类:(1)由冷源直接通过工艺设备换热盘管进行降温冷却;(2)冷源需经过板换换热,间接对工艺设备进行降温冷却。

按工艺冷却水系统压力是否与大气相通,工艺冷却水系统可分类以下三类:(1)顶部开式冷却水系统;(2)底部开式冷却水系统;(3)闭式冷却水系统。

3.2 单晶炉工艺冷却水系统方案确定

单晶炉对冷却水系统供水温度的要求为 26~30℃,当地夏季室外湿球温度为 22.1℃,完全可以采用闭式冷却塔^[5]为单晶炉直接降温。

循环水箱不仅可以起到供循环水泵吸水的作用,其有效容积在高峰期或突发情况下也可供应急使用。单晶炉的应急需求较一般工艺冷却水系统更大,而且大得多。本项目甲方对循环水容积的大小提出了比较严格的要求,循环水箱会非常大,又因项目所在地在宁夏银川,为寒冷地区,因此循环水箱设计为混凝土水池形式,可以更好地保温防冻,更耐使用。

循环水池及冷却塔如设于钢结构屋面,荷载可达 30 kN/m²,荷载覆盖面积大,若置于屋面会造成土建造

价成本急剧上升,因此循环水池及冷却塔设于室外靠近单晶区的位置,是更为合适的选择。

由此可得出,本项目单晶炉工艺冷却水系统采用闭式冷却塔提供的冷却水作为冷源,并直接对单晶炉降温,无需使用板式换热器进行换热。系统形式采用底部开式冷却水系统。

4 单晶炉工艺冷却水系统方案设计要点

4.1 系统设备选型

120 台单晶炉冷却水平均总用水量为 4 320 m³/h,考虑一定的热损耗并取整后取单晶炉冷却水系统设计流量为 4 800 m³/h。工艺循环冷却水系统主要由闭式冷却塔、工艺循环冷却水泵、柴油泵、袋式过滤器、加药装置、管道、阀门、仪表、管件及附件、支吊架、保温材料等组成。考虑到宁夏寒冷天气,冷却塔需作保温设计,本项目的单晶炉工艺冷却水系统主要设备选型如下:

1. 方形逆流闭式冷却塔 6 用 1 备,单台参数: Q=800 m³/h, N=73 kW,湿球温度: 22.1℃,进出水温: 32/27℃,风机变频。

2. 循环水泵 6 用 2 备,变频,单台参数: Q=800 m³/h, H=35 m, N=160 kW。

3. 旁滤水泵 2 台,单台参数: Q=100 m³/h, H=15 m, N=22 kW。

4. 袋式旁滤过滤器 2 台,单台参数: 处理流量: 100 m³/h, 过滤精度≤10 μm, 阻力<0.05 MPa。

如上设备构成一整套工艺冷却水系统,各主管中间设控制阀,将系统分为可独立使用的两个子系统,分别为 1 个冷却模块。闭式冷却塔总体为 6 用 1 备,两个子系统共用备用冷却塔一台;工艺循环冷却水泵总体为 6 用 2 备,两个子系统分别为 3 用 1 备;两个子系统分别设置一套旁滤装置:旁滤水泵+旁滤过滤器;系统整体采用一套加药装置,通过其中一套旁滤装置的回水管向循环水池加药。具体系统示意图见图 1。

4.2 循环水池的设计

根据冷却塔选型对应的基础尺寸,在水池四周留一圈宽度为 900 mm 的检修通道,可得循环水池的平面占地尺寸为 39.6×12.8 m。池壁考虑保温设计为 350 mm 厚,池内净平面尺寸为 38.9×12.1 m。

一般的开式循环冷却水系统循环水池有效容积按总循环水量的 5%~10% 设计。本项目对生产安全性要求极高,因此按 25% 设计,则本项目循环水池有效容积需 4 800×25%=1 200 m³。考虑抗浮设计成本,水池池底高度为 -0.900 m,考虑水泵有一定的自吸高度,设计最低水位为 -0.600 m。最高高度设计为 +2.200 m,循

环水池实际有效容积可达 $38.9 \times 12.1 \times 2.8 = 1\,318\text{ m}^3$, 满足要求。值得注意的是, 即便循环水池容积如此之大, 水池有效满足的应急时间也才15 min, 运行团队还需根据该时间制定详细周密的应急预案。

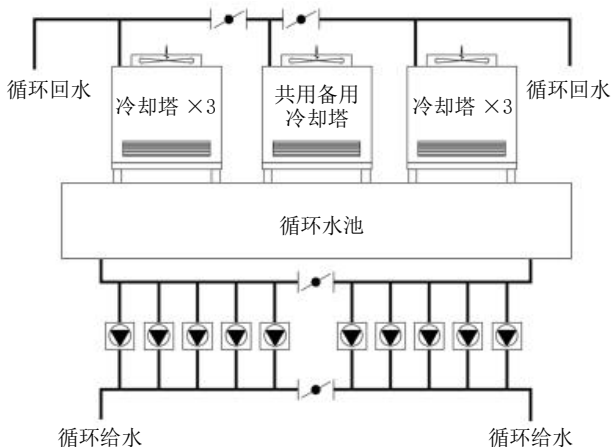


图1 单晶炉工艺冷却水系统示意图

4.3 循环水池补水水质及水量

本项目单晶炉工艺冷却水系统采用冷却塔提供的冷却水作为冷源, 又因为系统温度较一般系统更高, 结垢现象会随着水温升高而严重, 因此冷却水系统对水质的要求也较高。本项目另设计有纯水系统, 故单晶炉工艺冷却水系统补水可考虑采用该纯水系统的一级RO出水供给, 水质可达电导率 $\leq 10\text{ }\mu\text{S/cm}$ 。循环水泵出水干管设电导率仪监测水质, 运行过程若发现水质低于 $35\text{ }\mu\text{S/cm}$, 则采用加药和排水的方式保证水质的稳定。

应急补水采用生产水泵供给的生产水。补水水量由甲方老厂单GW运行经验数据作为参考, 小时平均用量 $1.26\text{ m}^3/\text{h}$, 小时变化系数取1.5, 高时补水量则为 $1.89\text{ m}^3/\text{h}$ 。因此一级RO水补水管及生产水补水管管径均取DN50即可, 一级RO补水管设备用。

4.4 其他应急措施设计

4.4.1 水位监测报警

单晶炉工艺冷却水系统发生事故状态分为水源无法正常供应和动力源无法供给两种^[6]。水源是否可正常供应需要靠水位监测, 本项目除设置溢流报警水位+2.250外, 还需设置低报警水位+2.100和超低报警水位+1.000, 均可根据现场实际情况调整。水位到达低报警水位, 说明主水源一级RO水供水出现故障, 报警时间达到一定时限(由自控系统确定, 现场可调), 开启备用水源及生产给水系统, 打开生产给水补水管上的控制阀进行补水。若水位继续下降至超低报警水位, 说明生产给水系统也出现了故障, 应及时整修。

以上事故发生后, 需通过重新补充一级RO水的方式, 让系统中水质重新达到低于 $35\text{ }\mu\text{S/cm}$ 的正常水准。

4.4.2 供电设计

本项目用电设备均设置末端双回路供电。为应对动力源无法供应的事故状态, 本项目单晶炉工艺冷却水系统同时配备柴油泵和柴油发电机, 在突发停电情况下, 系统自动启动, 任一系统均可满足单晶炉紧急降温需求。

工艺循环冷却水柴油泵设置2台, 均为备用, 每台参数: $Q=800\text{ m}^3/\text{h}$; $H=35\text{ m}$ 。柴油发电机配电系统设置冷却塔配电箱两台, 一台容量352 kW, 一台264 kW; 工艺冷却水泵配电箱2台, 每台160 kW。

5 结论

1. 本文通过对宁夏某20 GW拉晶项目一期工程2 GW中单晶炉工艺冷却水系统的设计进行技术总结, 详细阐述了单晶炉在单晶硅生长过程中对冷却水系统的需求和设计要点。在系统设计方面, 本文提出了基于冷却塔提供的冷却水作为冷源的方案, 无需额外的板式换热器, 以适应高温下的单晶炉冷却需求。同时, 考虑到宁夏银川地区的气候条件, 循环水箱被设计为混凝土水池形式, 以实现更好的保温和防冻效果。

2. 文章还详细讨论了工艺冷却水系统的补水水量、循环水池的设计参数以及应急措施, 包括水位监测报警、双回路供电、柴油泵和柴油发电机的设置, 以确保在任何突发情况下系统的稳定运行。

综上所述, 本文不仅为单晶炉工艺冷却水系统的设计提供了实用的技术参考, 还强调了在严格工艺要求下确保系统稳定和高效的重要性。通过合理设计和严格的应急措施, 可以有效控制炉体温度, 保证设备稳定运行, 并提高单晶硅的品质。这些设计经验和优化方案对于半导体和光伏产业中的单晶硅生产具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 王正省, 任永生, 马文会, 等. 直拉法单晶硅生长原理、工艺及展望[J]. 材料导报, 2024, 38(09): 5-17.
- [2] 谷子良. 大尺寸单晶硅硬轴直拉生长炉结构设计及单晶硅生长实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [3] 同[2].
- [4] 李燕. 单晶炉功率柜水冷电缆节能改造技术研究[J]. 科技尚品, 2017(02): 96.
- [5] 王建. 单晶炉冷却系统的设计与实现[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [6] 石卓立, 祁永胜, 王晓禹, 等. 单晶炉冷却水状态的监测报警系统设计[J]. 设备管理与维修, 2022(03): 97-99.