

智能移动保温罩可控气氛热处理生产线 研制及应用

吕辉, 李磊, 陈卫东

西安航天发动机有限公司 陕西西安 710100

摘要: 传统的井式炉温度波动大, 容易造成局部过热或软点, 在淬火转移过程中产品表面易产生氧化和脱碳。此外, 作业人员受到的热辐射影响较大, 淬火时产生的大量油烟造成环境污染较为严重等。大型移动保温罩可控气氛井式炉可替代传统的井式淬火炉, 在提高生产效率和产品质量一致性、减少环境污染的同时, 大幅减轻了作业人员劳动强度, 促进了热处理车间绿色化和智能化发展。

关键词: 井式炉; 渗碳; 可控气氛; 工艺; 热处理;

Development of digital mobile insulation cover controlled atmosphere well furnace

LÜ Hui, LI Lei, CHEN Weidong

Xi'an Aerospace Engine Co., Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China

Absrtact: The traditional well-type carburizing furnace has a great fluctuation in temperature and carburizing atmosphere, which is easy to cause the depth of carburizing hardening layer and the ultra-difference of metallographic structure, and easy to produce oxidation and decarburization on the surface of products during the process of quenching and transferring after carburizing. In addition, the workers are greatly affected by the heat radiation, and the environmental pollution caused by the large amount of oil fume during quenching is more serious. RBJ series moving heat preservation cover controlled atmosphere well furnace can replace the traditional well carburizing furnace, which can improve carburizing speed, shorten process time and reduce environmental pollution, greatly reduce the labor intensity of workers, and promote the digital, green and intelligent development of heat treatment workshop.

Keywords: well-type furnace; carburizing; controlled atmosphere; process; heat treatment

1 序言

目前, 热处理行业内对于设备的节能环保要求、智能化要求愈发凸显, 而在我国热处理企业中, 井式炉是大型工件热处理中使用最多的炉型, 同时也是实现智能化、数字化和网络化控制最难的炉型, 至今仍没有较好的替代炉型。当下在井式炉中继续推广自动控制技术仍是热处理设备的发展趋

势^[1], 传统大型井式炉到达热稳定态需十几乃至几十小时, 且炉温偏差大^[2], 面临淬火过程中变形量大、淬火硬度均匀性差、热处理生产效率低、环境污染严重等诸多问题^[3]。

在此背景之下, 我公司顺应先进发展方向提出了“智能移动保温罩可控气氛井式炉生产线”的构想并逐步实施。特别针对移动保温罩料车装置、激

光定位装置、淬火油烟收集处理装置、热处理工艺自动排产和工艺数据自动采集系统等进行了大量研究并取得突出成果。

该生产线整体采用了智能化井式炉淬火装备，将智能控制与满足淬火要求的功能装备组合为一体。该系列设备可快速达到热稳态，炉温均匀性为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，达到了我国军标Ⅱ类炉要求，在满足产品质量的同时，极好地解决了传统井式炉上述诸多问题。生产线还配套有管材自动传输、机器人自动抓取、硬度检测面自动磨平、硬度自动检测及自动校直系统。在全自动模式下，可实现从装炉到出炉淬火动作的自动执行，可大幅降低人工成本和作业人员的劳动强度。此外，淬火油烟收集和处理装置可确保烟气达标排放，双重以上的安全连锁报警控制也可确保设备的平稳运行。整体设备的研发和应用符合现代化工业高效、自动化、多样化的生产需求^[4]，该生产线现已成功应用于航天领域零部件（如长薄壁机架杆件、管材等）的生产，并产生了较好的经济效益和社会效益。机架热处理生产线如图1所示，管材自动打磨、硬度检测及校直系统如图2所示。



图1 机架热处理生产线



图2 管材自动打磨、硬度检测及校直系统

2 设备研发难点

传统井式炉面临空炉损失大、设备运行稳定性差、工件渗碳后出炉前的冷却时间长、炉内结构件热强度低、热应力释放难度大、炉温控制困难，以及淬火油烟排放难以符合环保标准等诸多问题。此外，传统生产线数字化、智能化、自动化程度较低，难以满足现代热处理行业高速发展的需求。另外，安全连锁保护尚未得到足够重视，热处理过程的动态在线控制问题、信息数据的记录和查阅追溯，以及制造及安装调试等方面仍有很大进步空间。

因此，针对以上问题我公司进行了重点研究和突破，研制了智能移动保温罩可控气氛热处理生产线，大幅降低了作业人员的劳动强度和运行成本，为应用企业带来直接经济效益，真正意义上实现了数字化、智能化、绿色化的生产要求，使生产模式得以创新，生产能力得以提升，在解决了行业关键技术问题的同时，打破了国外技术垄断，填补了国内数字化移动保温罩井式炉的空白。

3 设计思路、技术特点及生产应用

3.1 设计思路

（1）炉体结构 采用全纤维炉衬，以减小空炉损失；合适配置加热功率，使加热装机容量在满足工艺要求的前提下尽可能减小；采用规格参数一致的加热原件，在满足互换性的同时，使备件量大幅减小；采用先进材料优化加热元件的热交换条件，增加设备运行的稳定性；优化排风装置，减少工件渗碳后的炉冷时间，显著改善工件的金相组织状态。

（2）炉内耐热钢结构件的高温变形和热应力控制 采用等强度设计，在保证热强度的同时减重降耗；马弗和导风筒壁设计为波纹状，可增加强度并释放热应力。

（3）炉温控制 重点优化加热功率的布置；同时采用马弗内主控+马弗外联控+监控的温度控制系统，确保各区温度控制的均匀性；炉体设置热电偶，准确控制各加热区的加热温度；主控和联控采用并行控制模式，同时联控热电偶并设，实现马弗内和各加热区的超温连锁保护。

（4）一体化集成智能控制系统 一体化集成

智能控制系统可实现产品在气氛保护下实现精确淬火, 同时也可实现对渗碳工艺过程的动态控制。该系统作为这条气氛保护淬火、渗碳淬火等多用途生产线的控制中枢, 其中, 测量控制仪表采用集成程序控制器, 控制器具备以下功能: ①设备的操作。②运行工况的显示。③主控联控的温度和碳势显示、控制及曲线记录。④渗碳工艺程序的编制、各运行参数的设定。⑤工艺程序运行过程的信息显示等。上述功能均由该控制器完成。

(5) 计算机系统 计算机系统可实现集成程序控制器的控制和指令发布、工艺程序的编制和运行参数的设定、工艺程序运行过程与报警信息的储存, 以及历史工艺程序和报警信息的查阅和打印等。

(6) 淬火油烟收集处理和安全连锁保护 淬火油烟收集和处理装置可确保满足相关标准并环保排放; 安全连锁保护可保障设备平稳安全运行, 具体包括: 传感器、仪表、温度、碳势、气氛、冷却水、压力、机械动作的连锁控制及报警等。

(7) 制造、安装、调试 大型炉内耐热钢马弗、导风筒等成形制造难度大且要求高, 针对此问题相应制造了专用设备, 编制了相关工艺并制定了相应的检测方法。各部件制作均编制作业指导书及检验规程, 同时对设备的调试过程依据“调试验收规程”进行全面调试和逐项检测。

(8) 管材硬度检测和校直 管材硬度检测和校直过程通过机械臂自动抓取上料、铣削平面、按预定参数检测硬度、校直并进行合格分拣。

3.2 技术特点

智能移动保温罩可控气氛热处理生产线具有如下主要技术特点。

1) 有效加热区直径: 800~4000mm; 有效加热区深度: 1500~8000mm。

2) 移动保温罩激光定位精度: $\pm 1\text{mm}$; 转移过程定位精度高, 工件淬火转移时间 $\leq 15\text{s}$, 减小工件表面氧化和淬火硬度的偏差; 作业人员劳动强度大大降低。

3) 升温采用斜率与PID相结合的控制方式, 在提高升温速度的同时, 也可保证保温阶段温度均匀性; 通过MES、ERP、计算机集成控制管理系统, 可实现自动装卸料、热处理。

4) 淬火过程中产生的烟气由保温罩收集和油烟净化装置处理, 对周边环境影响小, 收集排放处理符合环保标准要求。

具体可分为以下9个方面。

1) 马弗、导风筒采用抗变形波纹结构, 可增加罐体强度, 改善气氛循环均匀性; 马弗、导风筒不等厚设计, 既保证罐体强度, 又节省耐热钢材料, 延长使用寿命; 炉盖采用网孔耐变形绝热包及加强式导风上罩, 解决了炉内耐热钢结构件高温下的热应力变形、开裂及气氛不均匀等问题。

2) 采用全纤维炉衬, 减少设备蓄热量, 缩短加热、降温时间, 节约能源, 提高设备的热效率。

3) 由移动式可控气氛井式炉或移动保温罩料车将工件移送至淬火槽处进行淬火工序, 工件在移送过程中完成淬火前的保温, 有效控制工件在移送过程中温降过大, 缩短淬火时间, 提高产品品质并节省能源^[5]。

4) 在淬火过程中, 由淬火槽处油烟密封装置与移动式可控气氛井式炉或移动保温罩料车对接, 同时充入氮气保护气体, 形成密闭的淬火条件, 产生的油烟通过排烟管道收集到油烟净化装置进行净化处理; 在清洗时, 清洗液直接进入清洗室, 经处理再生后可循环使用, 无污水排放, 绿色环保。

5) 通过PLC的集成化控制, 热处理过程实现自动化, 可解决工人劳动强度大和安全系数低的问题。

6) 在淬火过程中, 工件装在加热罩或保温罩内, 不会因高温暴露而发生火灾或人员安全事故, 安全性高。

7) 移动保温罩激光定位: $\pm 1\text{mm}$; 转移过程定位精度高, 工件从加热炉转移至淬火槽转移时间 $\leq 15\text{s}$, 便于实现自动化操作, 减小工件淬火硬度的离散性; 移动式可控气氛井式炉或移动保温罩料车通入保护气氛, 减少移动淬火过程的热量损失和表面氧化。

8) 升温速度采用斜率与PID相结合的控制方式。升温阶段斜率控制, 提高了PV与SV的跟随性; 自动识别保温阶段, 采用PID控制模式, 既提高了升温速度, 又保证了保温阶段的均匀性。该控制系统软件已获著作权。

9) 通过MES、ERP、计算机集成控制管理系统

可实现自动装卸料、热处理工艺参数自动执行，热处理后表面硬度自动检测，轴类工件自动校直和在线监测、实时智能调控和远程监控，并可智能化安排热处理炉批次生产，所有过程数据可联网上传，进行智能化动态控制、检测，满足热处理车间智能化、绿色化的需要。

3.3 生产应用

(1) 淬火自动化热处理生产线 薄壁长杆件精准淬火自动化热处理生产线结构（见图3）与具体应用如下。

1) 在淬火设备之间设置轨道，设置行走式加热炉装置将工件从存料工位移送至淬火装置处进行淬火工序，工件在移送过程中完成淬火前的加热，可缩短淬火时间，也可降低加热时间，节省能源；相比传统的井式生产线，工件通过行车吊装从加热炉转移至淬火装置中，整个吊装过程存在暴露于空气中，表面脱碳氧化情况，影响淬火质量。而在进行二次加热的高温淬火时，由于吊装移送，工件表面会发生温降，这样在二次加热时，会导致加热时间和加热能源消耗的增加。

2) 在淬火装置上设置密封对接设备和连接管，实现加热炉和淬火装置密封对接后，充入保护气体，形成相对真空，密闭的淬火条件，在淬火时，产生的油烟通过连接管由油烟净化装置（见图4）抽走进行收集处理；在清洗时，清洗液直接进入储液罐，经处理再生后可循环使用，无污水排放，绿色环保。

3) 设有控制装置，通过PLC的集成化控制，热处理过程实现自动化，可解决工人劳动强度大和

安全系数低的问题；另外，由于采用的行走式加热炉装置，因此对于操作员的技术能力要求有所降低，而传统淬火工艺，需要技术能力高的操作人员，容易受人员技术能力的个体差异影响，从而导致工件淬火质量和能源消耗不稳定；而通过设置控制装置，操作人员只需对生产线设备运行过程进行监测，生产线进行自动化生产，工件热处理质量高，能源消耗稳定。

4) 设置移动式加热炉装置和物料转移装置进行工件的移送，在整个淬火热处理过程中，工件均装载在生产线的内部，可有效控制工件在移送过程中温降过大的情况；同时工件不会暴露在外界，可保证生产线运行过程中，不会因高温暴露而发生火灾或人员安全事故，安全性高。

(2) 淬火机构 该机构包括加热炉和淬火油槽，加热炉的顶部设有提升机构；加热炉包括主体、机架、轨道、减速电动机、轮轴和滑轮，轨道包括2个，均横向设置并前后对称平行分布，机架的下端4个转角处均设有一个横向且可转动的轮轴，每个轮轴上均套设固定有1个滑轮，2个减速电动机均固定在机架右侧并前后对称设置，主体设于机架的上方；该机构实现了工件加热后的自动转移，进而简化了操作，降低了劳动强度，提高了安全系数；同时借助充满氮气的密封筒防止工件在进入淬火油槽前与空气接触，从而避免工件表面发生氧化，以保证工件硬度均匀，进而降低了加工不良率；此外，淬火产生的油烟借助排烟管集中向外排出，以防止油烟四处扩散而污染作业区域出料小车。

(3) 进出料小车 进出料小车设计结构如图5

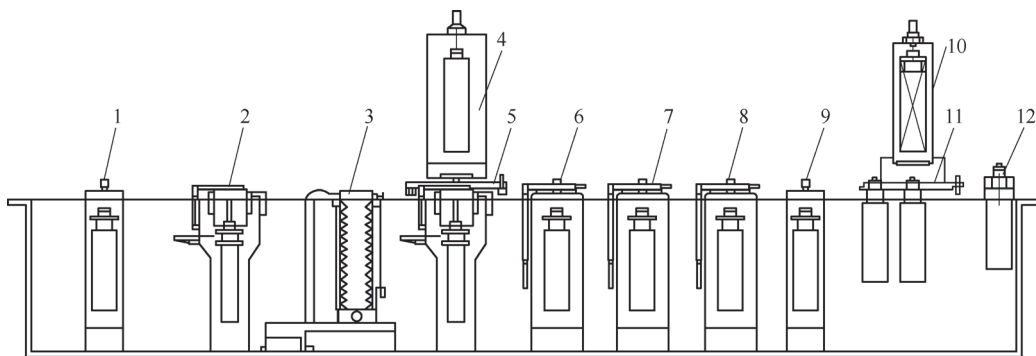


图3 生产线结构示意图

1—快冷井 2—淬火水槽 3—清洗机 4—物料转移装置 5—淬火油槽 6、7—回火炉
8、9—加热炉 10—移动式加热炉 11—装料位 12—备料位

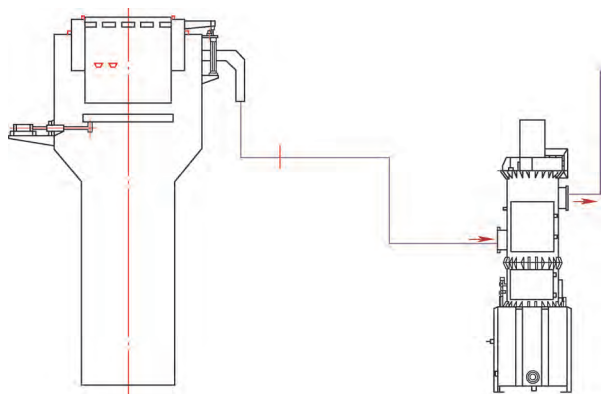


图4 油烟净化装置示意

所示，具体应用如下。

该机构包括主体和设于主体上的双向伸缩料叉，主体包括平台、轮轴、滑轮、轨道和升降组件，2个轮轴分别横向且可转动地设于平台的前后两端下方并相互平行；每个轮轴的两端均套设固定有1个滑轮，2个轨道平行设于平台的下方并左右对称分布；该机构实现了工件的自动进出料，进而大幅提高了自动化程度，简化了操作，从而大幅缩短了搬运转移所需的时间，提高了工作效率，且操作人员无需近距离接触加热炉和淬火槽，既降低了劳动强度，又消除了安全隐患。

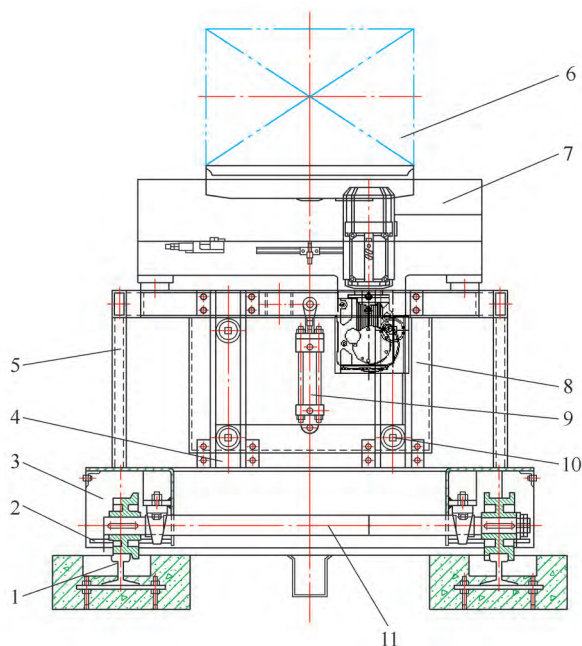


图5 进出料小车设计结构示意图

- 1—下导轨 2—辊轮 3—车架 4—上导轨 5—机架
6—工件 7—双向伸缩料叉 8—升降导轨机架
9—升降液压缸 8—复合轴承 11—驱动轴

(4) 自动化底装料式热处理装置 该装置包括主体框架、传送带、加热炉和热加工舱。主体框架内部底端的一侧固定连接传送带，主体框架内部底端的另一侧固定连接升降机构。输水管的顶端固定连接喷头，主体框架顶端的一侧设置有加热炉，且加热炉的内部设置有热加工舱。该装置通过设置散热机构，实现了对主体框架内部的散热，启动抽风机使热空气大部分通过抽风机进入降温箱的内部，此时启动水泵使其抽取降温箱内部清水，通过输水管输送至喷头进行喷洒，进入降温箱内部的热空气经喷头喷洒，使温度快速降低并形成相对湿度较低的水蒸汽，从而防止在取出金属材料时误伤操作者。

(5) 上位机监控系统 该系统是一款监控配套热处理设备实时运行的平台，可实时采集相应的温度、碳势、电磁阀等状态参数并存储，同时也可对生产数据进行记录，后续可根据客户要求生成对应的报表，便于生产数据的整理和分析。

4 设备研制开发的经济效益和社会效益

4.1 经济效益

移动保温罩可控气氛井式炉，根据不同用户提出的工件形状、一次最大装炉量和允许装机容量等要求配置不同的加热功率，因此以炉壁温升和积蓄热损失来界定热耗性能比较准确。

按炉壁表面温升由 50°C 降至 40°C 、热损失以 $0.156\text{kW}/\text{m}^2$ 计算， $\phi 3.2\text{m} \times 2.0\text{m}$ 移动保温罩可控气氛井式炉炉壁表面积约 110m^2 ，设备年运行时间以 7200h 计，仅此一项一年可减少炉壁热损失电耗约 $12.4\text{万kW}\cdot\text{h}$ 。

除去移动保温罩可控气氛井式炉的炉底因承重需求而采用耐火保温砖砌筑之外，其炉墙均由传统耐火保温砖砌筑结构改为全纤维砌筑结构。 $\phi 3.2\text{m} \times 2.0\text{m}$ 移动保温罩可控气氛井式炉的炉墙若采用耐火保温砖砌筑，炉墙积蓄热为 2016kW ，改为全纤维砌筑后，炉墙积蓄热仅 506kW 。按设备年运行时间 300 天，每 4 天 1 炉次计，只此一项每年便可减少积蓄热损失电耗约 $11.3\text{万kW}\cdot\text{h}$ 。

上述两项加上全纤维的炉盖结构、马弗等强度设计结构、加热元件安装结构以及各热短路处的合理设计，针对 $\phi 3.2\text{m} \times 2.0\text{m}$ 的移动保温罩可控气氛

井式炉，每年可减少电耗约35万kW·h。

“智能移动保温罩可控气氛井式炉生产线”经西安航天发动机有限公司应用后评价：通过对“高温深井式电炉”“物料输送系统”“移动式中温井式电炉”的各项技术和配置进行检测后认为，该设备的各项功能和指标等均符合技术协议要求。经统计，该生产线较原先的传统井式炉生产线，每炉最大装炉量增加了3倍（原传统井式炉每炉8件，该生产线每炉达到32件），现生产线进行连续式作业每天可生产5炉次，是原日产2炉次的2.5倍，每月可完成交付零件量增长近10倍，每年可为企业创造直接经济效益1200万元以上。

4.2 社会效益

1) 该项目的顺利实施，有利于加快构建完整的传统热处理装备技术产业链生态系统，有效解决传统热处理设备综合能耗高、环境污染严重、作业人员劳动强度大、控制精度低，以及工艺再现性差等问题，可推动传统热处理装备产业在我国健康发展。

2) 该项目的顺利实施，有利于推进我国传统产业结构调整和产业升级，有利于带动一批与新型热处理装备产业密切关联的配套产业的快速发展（如：金属材料、筑炉材料、精密机械、控制仪器、激光加工、模具及工业设计软件等行业），形成以新型热处理装备产业为核心的产业集群，为调整和振兴我国新型热处理装备产业做出了贡献。

3) 有利于为国家培养新型热处理装备产业技术的专门人才，既可以培养一批专门从事新型热处理装备技术研发的专业人才，又可以培养一批专门从事新型热处理装备制造技术的技能人才，改变我国热处理行业人才短缺的局面。

4) 随着国家“双碳”政策的实施，传统的井式炉将会逐步淘汰。因此，“智能移动保温罩可控气氛井式炉生产线”是一种理想的替代产品，真正实现了智能化、绿色化的生产要求，真正为热处理行业实现了生产模式创新和生产能力提升。与此同时，该产品在为应用企业带来直接经济效益的同时，攻克了制造技术瓶颈，解决了行业共性关键技术问题，打破了国外技术垄断，填补了国内智能移动保温罩井式炉的空白，社会生态效益非常显著。

5 结束语

“智能移动保温罩可控气氛井式炉生产线”作为一种替代传统井式炉的理想产品，实现了长薄壁机架杆件的自动热处理生产。整体热处理生产过程达到了对装炉方式、淬火入油及转移时间的严格控制，最大限度地减小了长杆零件的热处理变形。结合管材自动打磨、硬度检测及校直系统，实现了对零件的自动转运、定位、打磨、硬度与成分检测及分拣下料的自动化操控，系统所配备的计算机可自动记录硬度、检测数据，并进行统计、分析和判定，大幅降低管材类零件打磨、转运、硬度检测、管材校直等过程对人工的依赖程度，排除人为因素对硬度检测结果、校直结果、产品质量一致性评判的影响。

“智能移动保温罩可控气氛井式炉生产线”的研发，为新技术成果向工程应用转化、工艺装备产业化奠定了基础，对提高我国军工、工程机械、矿山、石化、电力、轨道交通及汽车等行业关键基础件产品的质量、降低整体的生产成本具有重大意义，满足了航天领域关键零部件的热处理需求。

参考文献：

- [1] 樊东黎. 热处理设备的更新改造势在必行[J]. 金属热处理, 1996 (1) : 6-7.
- [2] 何鹤林. 井式气体渗碳炉工装改进[J]. 金属热处理, 2022 (2) : 40-41.
- [3] 杨福海, 姚恒学, 杜仲彦, 等. RJJ型井式气体渗碳炉的改造[J]. 金属热处理, 1994 (2) : 32-35.
- [4] 赵振杰, 张勇, 刘筱冬, 等. 用计算机与PLC实现热处理车间的自动化[J]. 热处理技术与装备, 2008 (4) : 57-72.
- [5] 严超峰, 包耀宗, 王欢锐, 等. 模具钢的渗碳-碳氮共渗改性热处理[J]. 金属加工 (热加工), 2018 (3) : 53-55.

MW 20240428