

# 纯镍材有色金属反应器设备研制

孟 军

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710061)

**摘 要:** 纯镍材有色金属反应器是特殊用途的三类压力容器, 技术要求高、成本昂贵、制造难度大、技术含量高。为了确保一次研制成功, 进行了技术攻关, 通过工艺试验和技术分析, 确定了关键的技术参数和工艺方法。最终研制出高质量的产品。本文对研制经验进行了总结: 主要介绍了生产加工工艺, 并对焊接和焊后热处理的质量控制等关键技术进行了深入细致的分析和阐述。

**关键词:** 纯镍材有色金属; 反应器设备; 制造技术

中图分类号: V252.2

文献标识码: B

文章编号: (2006)04-0043-05

## Development of a reactor with pure nickel non-ferrous metal

Meng Jun

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** A pure nickel non-ferrous metal pressure vessel used as a reactor was developed. During the development, a lot of research and test works were done, in order to determine the best manufacture method. The difficult problems occurred in the technique were solved successfully. The key technology for the manufacturing process was obtained. All of this made the reactor development successful and improved the manufacture technology. In this paper, the development experience is summarized. At first, the main difficult problems of the development are discussed and the key technologies are analyzed. Then, the manufacturing process, method and the key technologies used during the manufacture of the reactor, especially the equipment welding, post-welding heat treatment process and welding quality control, are introduced.

**Key words:** pure nickel non-ferrous metal; reactor unit; pressure vessel; manufacture technology

---

收稿日期: 2005-11-07; 修回日期: 2005-12-31。

作者简介: 孟军 (1962—), 男, 工程师, 研究领域为发动机工艺装备。

## 1 引言

纯镍材是极具耐蚀性的有色金属材料, 由于其材料非常昂贵, 因此用纯镍材制造的设备一般仅用于为数不多的军工、化工及一些特殊行业的使用条件较苛刻的少数设备中。

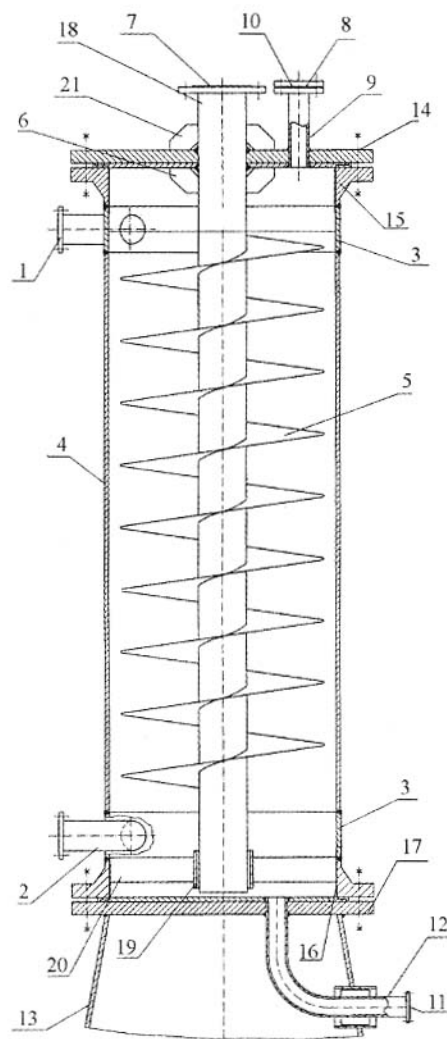
2005 年 4 月~9 月我厂承制了一台纯镍材有色金属反应器设备, 设备的受压元件(与设备工作介质相接触的材料)均为纯镍材料, 设备名称为“反应器”, 设备内主要工作介质为燃料推进剂, 属易燃易爆、高度危害的有色金属三类压力容器设备。该设备由西北某有色金属研究院负责设计。由于是首次进行纯镍材有色金属压力容器设备的研制生产, 有许多问题尚待解决, 其中最主要的问题是保证纯镍材及其与 15CrMo 的焊接质量和设备焊后热处理的质量控制等问题。最终在设计单位的配合下, 经过不懈努力在短短 5 个月内有效地解决了设备研制中存在的诸多难题, 完成了技术交流、焊接试验、焊接工艺评定、焊工考核、工艺施工及设备制造等多项复杂而艰巨的工作, 满足了设计要求, 并通过了国家劳动部门的监检。成功研制出了首台纯镍材有色金属压力容器设备, 保质按时为用户提供了合格产品。该设备经过用户一年多的使用无任何质量问题。

本文针对我厂首台纯镍材有色金属反应器设备在研制过程中存在的诸多问题, 对所采取行之有效的解决措施进行了深入细致的分析和阐述。

## 2 设备的研制

### 2.1 设备结构和材质特性

本台设备的主体材料为纯镍材, 材料牌号为 N6, 设备结构简图见图 1 所示, 设备的筒体、接管、法兰、螺旋板等凡是与燃料反应器工作介质相接触的部位其材料均为 N6, 其中设备主法兰 15<sup>#</sup> 件材料为 15CrMo-III, 内衬 3mm 的 N6 衬环。设备的上、下平盖为爆炸复合板, 基层材料为 15CrMo-III, 复层材料为 N6。



1—法兰; 2—接管; 3—筒节; 4—筒体; 5—螺旋板;  
6—筋板; 7—法兰; 8—法兰; 9—接管;  
10—法兰盖; 11—法兰; 12—接管; 13—裙座;  
14—上平盖; 15—法兰; 16—衬环; 17—下平盖;  
18—接管; 19—套管; 20—筋板; 21—筋板

图 1 反应器结构简图

Fig.1 Reactor structure diagram

纯镍材材质较软, 比重为 8.90, 熔点 1455℃,  $\sigma_b=392\text{MPa}$  (退火状态), 具有良好的耐蚀性, 较高的固溶性, 材料熔化状态下的流动性较差。板材市场价为每公斤 300 多元, 较昂贵。其焊接材料更加昂贵, 焊丝为每公斤 400 多元。由于目前我国还没有正规的纯镍材压力容器生产规范, 该

设备已超出 GB150-98 的适用范围 (GB150-98 适用于钢制压力容器), 而《压力容器安全技术监察规程》中的第 112 条对镍及镍合金压力容器的制造仅给出了相应规定。经仔细查阅一些相关标准<sup>[1-3]</sup>, 根据现有的工艺水平和工艺条件认真考虑施工方案, 同时针对有关技术难题进行了认真细致的调研, 努力寻求解决问题的有效方法。由于是首次接触纯镍材设备, 对 N6 的焊接性能不了解, 如何保证设备的焊接质量就成了设备研制的首要问题。因此就需要进行大量的焊接试验, 并根据设备的实际情况做许多必要的焊接工艺评定。

## 2.2 设备研制焊接质量的保证

纯镍材的焊接是该设备研制生产的最重要的环节之一。该设备的主要材料 N6 是由西北某有色金属研究院提供, 宝鸡某有色金属加工厂生产, 该设备总长 13m, 筒体长 10m, 筒体板料 N6 的供料宽度仅为 1m (原材料生产厂生产设备所限), 因此筒体需 11 个筒节进行组对, 且设备筒体直径只有  $\phi 500\text{mm}$ , 筒体厚度  $\delta=10\text{mm}$ , 直线度要求  $\leq 10\text{mm}$ , 再加上各接管等需要进行 100%射线探伤的 A、B 类焊缝就有 31 条之多, 总长约 40m。该设备全部焊缝均需手工钨极氩弧焊完成。由于原料生产厂供应的 N6 材料品种规格有限, 2#接管 ( $\phi 159 \times 10$ ) 无此规格成品管, 需用板材卷焊成型, 无形中又增加了探伤焊缝。在设备投产前为保证焊接质量进行了多次 N6 材料的焊接试验, 从中总结出了一些合适的焊接参数, 起初试验时考虑到 N6 材质焊材熔化的流动性差, 因此焊件的单面焊接坡口开为  $80^\circ$  (钢制压力容器单面焊接坡口一般为  $60^\circ$ ), 钝边 1mm, 对接间隙  $2 \pm 0.5\text{mm}$ , 采用手工钨极氩弧焊焊接, 焊丝直径  $\phi 2.4$ 。焊后发现背面未焊透, 焊首层时焊缝呈浅黄色, 焊到表层时焊缝为黑色, 分析是由于氩气保护不到位所致, 未焊透是由于焊丝熔化的流动性差导致, 因此, 针对问题将焊接坡口的钝边调整为  $0 \sim 0.5\text{mm}$ , 焊接过程中的氩气保护问题需要做专用工装来解决 (见后述)。在经过了认真细致的分析之后, 采取了以下提高焊接质量的有效措施:

(1) 用机械方法 (电铣刀) 清理坡口及两侧 25mm 范围内氧化膜 (禁止用砂轮打磨坡口, 以避

免砂粒镶嵌入母材影响焊接质量);

(2) 焊前彻底清除坡口及两侧 25mm 范围内油污和一切含硫杂质, 用丙酮清洗后及时施焊 (试验证明, 用汽油作清洗剂不能彻底清除干净, 仍有可能产生焊接缺陷), 并及时清除中间焊道表面氧化物, 直至露出金属光泽;

(3) 焊接时严格控制焊接线能量和层间温度, 层间温度不应高于  $150^\circ\text{C}$ ;

(4) 要求全焊透, 焊缝表面不准有咬边、气孔、弧坑和裂纹等缺陷, 焊缝及热影响区表面应呈银白或浅黄色。

通过采取这些有效的措施后, 焊接质量明显改善。在进行了有效的焊接质量工艺评定后, 总结出了设备筒体 A、B 类焊缝焊接的主要参数为:

焊接方法: 手工钨极氩弧焊;

焊丝牌号: ERNi-1;

焊丝直径:  $\phi 2.4$ ;

焊接电流:  $220 \sim 260\text{A}$ ;

电压:  $18 \sim 21\text{V}$ 。

为了有效地提高焊接质量, 针对设备的具体情况设计制造了焊接专用的氩气保护工装。对于环缝焊接氩气保护工装 (见图 2 所示), 氩气从 10#件通入, 在 5#管子氩气出口端均布了许多  $\phi 2$  的出气孔, 为避免氩气对环缝产生不均匀的冲击作用, 采用了 6#件 (50 目的不锈钢丝网) 对氩气进行稳流, 两端用 8#夹板夹住 1#石棉橡胶板形成对氩气的封闭腔, 对环缝焊接提供充足的氩气保护。

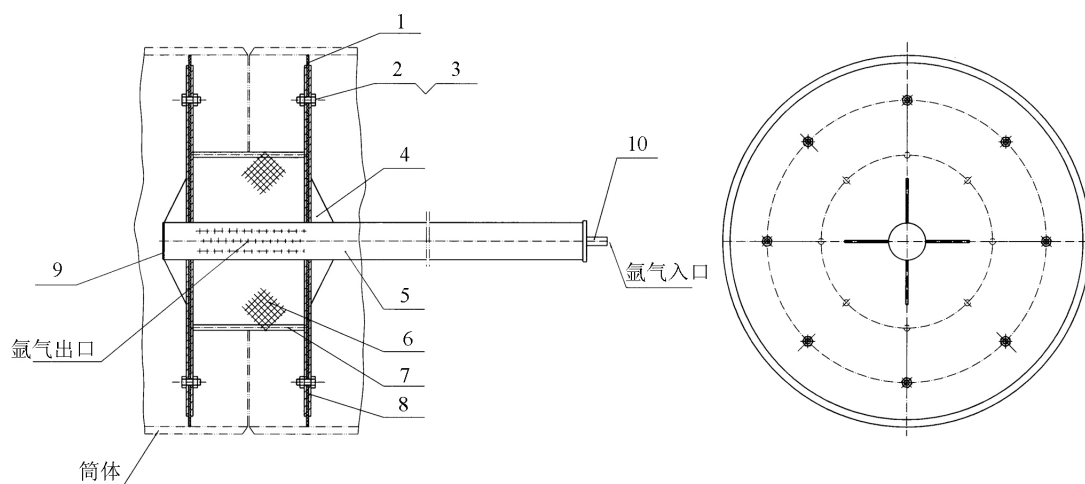
对于纵缝焊接氩气保护工装 (见图 3 所示), 氩气从入口用氩气软管通入氩气保护槽中, 槽体固定在筒节上。通过采取有效的氩气保护措施及对焊接区的彻底清理, 产品的焊接质量明显提高, 焊缝呈银白色 (如同电子元件锡焊点一样呈银白色), 表面质量非常好, 尽管设备焊接中曾出现了几处焊接缺陷, 但返修合格, 并且比以往的钢制压力容器的焊接质量要好的多, 因此一次性通过了设备液压试验和气密性试验。

## 2.3 设备焊后热处理的质量控制

由于设备的主法兰 15#件主体采用了低合金钢 15CrMo-III+N6 衬环, 上、下平盖 (14#、17#) 采用了以 15CrMo-III 为基材的复合材料。按照设计图样中技术要求的规定 (GB150-98 中 10.4.1.1

条也明确规定), 凡与 15CrMo 施焊的受压元件均应进行焊后消应力热处理, 而 N6 焊后不需要热处理。起初设计图样要求设备整体热处理, 但考虑

到如果热处理后变形较大, 势必造成设备整体报废, 在与设计部门协商后同意将 15#法兰组件、上、下平盖组件焊后分别进行消应力热处理。



1—石棉橡胶板; 2—螺母; 3—螺栓; 4—筋板; 5—钢管; 6—不锈钢丝网; 7—支杆; 8—夹板; 9—堵板; 10—接咀

图 2 环缝焊接氩气保护工装简图

Fig.2 Tool set-up diagram of circumferential weld welding with argon gas protection

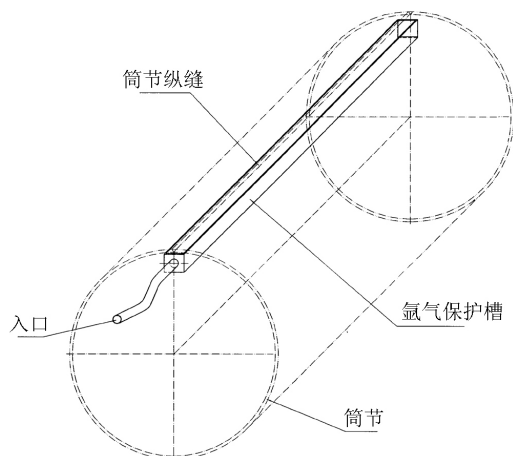


图 3 纵缝焊接氩气保护工装简图

Fig.3 Tool set-up diagram of longitudinal weld welding with argon gas protection

为了更有效地进行上、下平盖的焊后热处理, 避免不需热处理的部件产生变形, 采取了 17#(下平盖)与 13#裙座、12#接管组对后进行热处理,

并将 12#接管从出口端截为两段, 避免 11#活套法兰(N6)热处理。14#(上平盖)与螺旋板组件和 9#接管焊后热处理, 其中螺旋板组件中的 18#接管在靠近 6#筋板处截断, 避免螺旋板组件热处理, 这样虽然增加了两条 B 类焊缝, 但可以有效地避免不需焊后热处理的部件产生变形。

对于螺旋板组件的加工, 采取的方法是根据 18#接管外径尺寸和筒体内径尺寸, 精确地计算出所需螺旋板的扇形料尺寸及数量(根据螺距和螺旋板组件长度计算), 然后将各件螺旋板扇形料首尾相接焊后拉伸并套入 18#中心管定位成型。

### 3 结束语

在有关人员的共同努力下, 首台纯镍材有色金属三类压力容器设备研制成功, 通过研制掌握了纯镍材有色金属压力容器设备生产的关键技术, 积累了生产经验, 填补了我厂纯镍材有色金属压力容器设备生产上的空白, 为用户提供了合格产品, 创造了显著的经济效益和社会效益。

## 参考文献:

- [1] GB2054-80 镍及镍合金板[S].
- [2] GB2882-81 镍及镍铜合金管[S].
- [3] GB/T15620-95 镍及镍合金焊丝[S].
- [4] 邹增大. 焊接材料工艺及设备手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [5] 张耀宸. 机械加工工艺设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社出版, 1987.
- [6] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [7] 压力容器用材料及热处理[M]. 兰州石油机械研究所编, 北京: 化学工业出版社, 2005.

(编辑: 马 杰)

\*\*\*\*\*

(上接第 42 页)

(2) 多孔层板冷却是一种新型冷却方式, 国内在这方面的研究只是在初步阶段。在理论和实验研究的同时, 还要注重实用性研究。在这方面可以参考国外的研究经验和成果。

(3) 国内外一直都在进行新型耐热材料的研究, 并且取得了一定的成绩, 发展形成了好几代复合材料。陶瓷基复合材料和碳—碳复合材料是新一代正在研制的复合材料, 它的缺点是价格比较昂贵, 但其“无可比拟”的耐热性能一直吸引着工程设计人员的目光。

## 参考资料:

- [1] 刘桐林. 世界导弹精粹[M]. 北京: 军事科学出版社, 1999.
- [2] 刘兴洲. 飞航导弹动力装置[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [3] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1985.
- [4] 葛绍岩, 刘登瀛, 徐靖中, 等. 气膜冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [5] 张炜, 朱慧, 方丁酉, 等. 冲压发动机发展现状及关键技术[J]. 固体火箭技术, 1998, (3).
- [6] 胡昌宇. 冲压发动机研制分析及国内外研制装备情况[C]. 中国宇航学会固体火箭推进专业委员会论文集, 航天科技集团公司 4 院 41 所, 2001.
- [7] 孙冰, 刘小勇, 林小树, 等. 冲压发动机燃烧室热防护层烧蚀计算[C]. 中国宇航学会固体火箭推进专业委员会论文集, 北京航空航天大学宇航学院, 2001.
- [8] 史振翔, 王春华, 邢养民, 等. 冲压发动机燃烧室热防护[C]. 玻璃钢学会第十五届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集, 2003.
- [9] 周军. 亚燃/超燃冲压发动机研制动向[J]. 飞航导弹, 1997, (3).
- [10] D K 休泽尔. 液体火箭发动机现代工程设计[M]. 朱宁昌, 等译. 北京: 宇航出版社, 2004.
- [11] 郁新华, 全栋梁, 刘松龄, 等. 层板结构冷却有效性的研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18 (5).
- [12] 全栋梁, 郁新华, 刘松龄, 等. 层板冷却结构流阻特性的实验与数值模拟[J]. 推进技术, 2003 年, 24 (5).
- [13] 全栋梁, 刘松龄, 李江海, 等. 多孔层板冷却有效性的研究[J]. 推进技术, 2004, 19 (4).
- [14] 侯晓春, 季鹤鸣, 刘庆国, 等. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 2002.
- [15] 张小英, 王先炜. 比较研究多种气膜冷却模型的冷却效果[J]. 航空动力学报, 2002, (10).
- [16] 陈建华, 杨宝庆, 周立新, 等. 人为粗糙度强化换热机理分析及效果评估[J]. 火箭推进, 2004, 30 (4).

(编辑: 马 杰)