

# 钼镧合金管焊接工艺研究

李格妮, 吴 辰, 杨 华, 王 丽, 田苗苗, 郝伟伟

西安西材三川智能制造有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年1月28日; 录用日期: 2025年2月21日; 发布日期: 2025年2月28日

## 摘 要

文章针对钼镧合金材料, 进行了焊接试验方案的设计, 详述了焊接试验过程, 采用手工氩弧焊对钼镧合金管进行焊接试验, 并对焊缝进行了渗透检测和氦检漏试验。通过试验, 得出了钼镧合金的焊接工艺参数, 实现了钼镧合金管道焊接成型, 对于钼镧合金材料的焊接成型具有一定的借鉴意义。

## 关键词

钼镧合金, TZM合金, 氩弧焊接

# Study on Welding Technology of Molybdenum-Lanthanum Alloy Tubes

Geni Li, Chen Wu, Hua Yang, Li Wang, Miaomiao Tian, Weiwei Hao

Xi'an Xicai Sanchuan Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Jan. 28<sup>th</sup>, 2025; accepted: Feb. 21<sup>st</sup>, 2025; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This paper presents the design of a welding test plan for molybdenum-lanthanum alloy materials, detailing the welding test process. Manual tungsten inert gas welding was used to weld molybdenum-lanthanum alloy tubes, and the welds were inspected using dye penetrant testing and helium leak testing. Through the tests, the welding process parameters for molybdenum-lanthanum alloys were obtained, achieving the welding and forming of molybdenum-lanthanum alloy pipes, which has certain reference significance for the welding and forming of molybdenum-lanthanum alloy materials.

## Keywords

Molybdenum-Lanthanum Alloy, TZM Alloy, Tungsten Inert Gas Welding



## 1. 引言

钼及钼合金具有高熔点、膨胀系数小、良好的导热及导电性能、优良的抗高温强度、抗蠕变性能和耐腐蚀性能等优点,使其在航空航天、化工、冶金、农业、电气和环保等领域被广泛应用。目前国内外学者对钼钨合金的焊接进行了大量的研究,Yutaka Hiraoka等通过对电子束焊接钼及钼合金中各种合金元素所受到的作用进行研究,结果得出在焊接过程中,适量的碳成分添加能够在一定程度上提升焊接接头的韧性及断裂强度;Tabernig等主要开展了焊后拉伸试验,深入对比了工业纯钼、Mo41Re合金(Mo, 41% Re)及TZM合金(Mo, 0.5% Ti, 0.08% Zr, 0.01%~0.04% C)的电子束焊性能;潘际銮等主要研究了电子束焊焊接钼的过程中,焊接接头性能受到各种工艺参数及合金元素的影响,并利用热力学相关理论研究了焊接时发生的冶金反应,由此对接头脆化的影响因素进行了深入分析以提升焊接接头的韧性及断裂强度;李鑫等从焊接质量入手,主要探讨了电子束焊接钼时的关键影响因素。郑卫胜等通过对电子束焊工艺下,焊缝成形受到纯钼焊接工艺参数的影响进行研究。由于钼及钼合金材料属于硬脆材料,其焊接性通常较差,因此在实际应用中如何减少焊缝气孔、焊缝脆性、焊接裂纹等技术难题还有待进一步研究。本文将通过研究钨极氩弧焊和电子束的焊接方法及热处理工艺,来改善钼钨合金管的焊接性能,获得符合技术指标要求的焊接接头。[1]-[5]

## 2. 钼钨合金焊接难点分析

钼及钼合金焊接常出现焊缝热影响区脆化、气孔和焊接裂纹等缺陷。

### 2.1. 焊缝热影响区脆化

钼及钼合金焊缝热影响区脆化主要是由气体杂质的污染和焊接热循环造成的晶粒粗大、沉淀硬化及固溶硬化等,引起钼合金脆化的主要原因与氧含量有关,它通过在晶界的富集使晶界变脆。当杂质含量一定时,氧在晶界富集的程度与晶粒大小和晶界面积有关。晶粒越小氧在晶界富集程度越低。因此,应采用特殊工艺尽量降低钼及钼合金中氧、氮元素和低熔点杂质的含量。

### 2.2. 气孔缺陷

由于粉末冶金工艺可得到无择优取向的细晶粒组织,难熔金属常用粉末冶金方法制备,导致材料含有微孔隙和杂质元素、致密度无法与熔炼冶金制备的材料相比,因此钼及钼合金熔焊通常会遇到气孔缺陷率较高的问题,尤其是残留在微孔隙内处于高压状态的气体危害最为显著,焊接过程中这些高压气体被释放到高温熔池中后会在熔池中急剧膨胀,从而使钼及钼合金焊接接头质量严重恶化。

### 2.3. 裂纹缺陷

钼及钼合金中氧、氮等杂质含量较高,接头约束度大,低熔点共晶化合物相对集中时容易产生裂纹,因此在焊接钼及钼合金前应对结合部位进行预热,焊后缓慢冷却,以降低焊接应力,减少裂纹的产生。

## 3. 焊接试验过程

### 3.1. 试验材料

本文所用的试验材料为直径 25 mm、壁厚 3 mm 的钼钨(MoLa)合金管,材料为烧结状态的钼合金,

氩弧焊填充物选用钛锆钼合金(TZM)焊丝。钼钽合金管的化学成分如表 1 所示。

**Table 1.** Chemical composition (mass fraction) of MoLa alloy

**表 1.** MoLa 合金的化学成分(质量分数)

| Mo | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C     | N      | Fe     | Si     | Ni     |
|----|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 其余 | 0.4~1.8                        | ≤0.02 | ≤0.005 | ≤0.006 | ≤0.003 | ≤0.003 |

### 3.2. 焊接工艺流程

本文进行钼钽合金管焊接时, 主要工艺过程包括焊前焊件表面处理、热处理、焊前预热、手工氩弧焊、焊后保温缓冷、焊缝无损检测、去应力退火、焊缝真空氦质谱检测等工序。

在焊接前对钼钽管和焊丝的表面进行清洗, 处理流程如下: 先用无水乙醇清洗钼钽管和焊丝, 去除油污; 在室温下将清洗后的钼钽管和焊丝浸入酸洗溶液中浸泡 3 min~5 min, 并采用自来水冲洗, 试验所用的酸洗溶液由质量浓度 95%~97%的硫酸溶液、质量浓度 36%~38%的盐酸溶液和水按照 15:15:70 的体积比组成; 采用蒸馏水漂洗, 再用热风枪吹干。

焊接采用手工钨极氩弧焊, 高纯氩气气体保护, 直流正接, 多层多道焊, 焊接坡口为 35°V 型坡口, 钝边 0.5 mm。焊接前将钼钽合金管焊接坡口两侧各 10 mm 范围内表面上的水、锈和油污等有害物质清理干净, 打磨至呈现金属光泽; 焊丝表面应清除油锈。焊接时电流太小, 则熔深较浅; 电流太大, 高温停留时间长, 则焊缝晶粒粗大, 热影响区保护变差。由于焊接时既要考虑管材背面的保护效果, 还要填充焊丝, 因此焊速不能太快。

向待焊接件的内部和外部均通入高纯氩气以控制氧气含量在 50 ppm 内, 对接头进行两层氩弧焊焊接, 第一层自熔打底焊接, 使得焊缝材料与母材保持一致, 减少管道介质对焊缝的腐蚀; 第二层采用填充丝焊, 采用钛锆钼合金(TZM)焊丝, 经过多次焊接试验, 最终确定了钼钽合金管焊接工艺规范参数, 如表 2 所示, 焊接后采用保温棉对焊缝进行保温使其缓慢冷却至室温, 减少裂纹的产生。

**Table 2.** Butt welding process parameters for  $\Phi 25 \times 3$  mm MoLa alloy tube

**表 2.**  $\Phi 25 \times 3$  mm MoLa 管对接焊接工艺参数

| 焊道/焊层 | 焊接方法 | 填充材料 | 焊接电源 |         | 电弧电压(V) | 焊接速度(cm/min) |
|-------|------|------|------|---------|---------|--------------|
|       |      |      | 极性   | 电流(A)   |         |              |
| 1/1   | GTAW | 自熔   | DCEN | 160~180 | 11~12   | 20~22        |
| 1/2   | GTAW | TZM  | DCEN | 240~260 | 12~15   | 24~26        |

## 4. 焊接试验结果分析

### 4.1. 焊缝无损检测

按照 NB/T47013.5-2015《承压设备无损检测第 5 部分: 渗透检测》要求, 对焊缝进行渗透检测, 焊缝无损检测结果如图 1 所示, 根据检测结果可知焊缝无裂纹、气孔等缺陷产生, 焊缝质量符合 NB/T47013.5-2015 I 级要求。

对上述试验结果进行分析, 焊缝未产生裂纹、气孔等缺陷, 主要是因为以下原因:

1) 由于钼具有较高的熔点及硬度, 且有低温脆性、高温强还原性的特点, 对气体杂质氧、氮等十分敏感, 其中氧的影响最大, 本文在焊接前首先对母材及焊材表面采用无水乙醇、硫酸、盐酸等溶液进行清洗, 降低了管材和焊丝表面存在的氧化物及杂质影响。

2) 由于钼的起始再结晶温度不超过  $1000^{\circ}\text{C}$ ，而钼的熔点大约  $2620^{\circ}\text{C}$ ，熔焊时焊点附近远高于  $1000^{\circ}\text{C}$ ，在此条件下钼晶粒进行再结晶长大，另外焊接时焊缝区域因高温作用而产生热应力，形成显微缺陷或者使原始微缺陷在热应力作用进一步扩展。因此，本文在焊接前对焊件进行  $850^{\circ}\text{C}$  真空热处理，使得材料中附着的有害气体(氧、氮等)排出，提高材料纯度，减少焊接气孔、裂纹等缺陷的产生。

3) 如果钼钽合金焊接不预热，过快的冷却速度很容易产生淬硬组织，从熔合线处开裂，在焊前先将焊接区域两侧  $100\sim 150\text{mm}$  范围内预热至  $200^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，预热时间控制在  $10\text{ min}$  以内，以减小焊接时的热冲击及应力，从而避免焊接裂纹的产生；此外焊前预热使得待焊接件中附着的有害气体(如氧气、氮气等)充分排出，提高了待焊接件的纯度，减少了焊接气孔产生。



Figure 1. Non-destructive testing image of weld seam  
图 1. 焊缝无损检测效果图

#### 4.2. 焊缝漏率检测

根据钼钽合金管结构特点设计氦检漏工装，将试验管两端用堵头进行密封，工装与氦质谱检漏仪接口相连，对钼钽合金管内部充入氦气升压至  $0.6\text{ MPa}$ ，保压  $10\text{ min}$ ，吸枪法检测焊缝漏率，所用设备为 ZQJ-230D，钼钽合金管焊缝实测漏率值  $2.3 \times 10^{-9} \sim 4.0 \times 10^{-9}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，符合技术指标漏率值不大于  $1.0 \times 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$  的要求。

#### 5. 结论

1) 设置的焊前预热处理制度，通过合理的预热温度和预热时间改善了 MoLa 合金焊接热影响区内的应力，防止出现裂纹和气孔缺陷等问题。

2) 氩弧焊层间温度为  $200^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$  时，有利于待焊接件中附着的有害气体(如氧气、氮气等)充分排出，从而提高待焊接件的纯度，减少焊接气孔、冷裂纹等缺陷的产生。

3) 第一层为自熔打底焊接，使得焊缝材料与母材保持一致，减少管道介质对焊缝的腐蚀；第二层焊接采用 TZM 焊丝，焊缝无裂纹，气孔等缺陷产生。

4) 本研究获得的钼钽合金管道焊接件的韧性良好，焊后热影响区无裂纹生成，适用于壁厚  $3\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$ 、直径  $25\text{ mm}\sim 30\text{ mm}$  的钼钽合金管焊接。

---

## 基金项目

陕西省稀有金属装备制造共性技术研发平台(2024ZG-GXPT-02); 秦创原建设两链融合项目(23LLRH0038)。

## 参考文献

- [1] 朱琦, 安耿, 孙院军, 等. 钼及钼合金焊接技术研究现状及进展[J]. 中国钼业, 2017, 41(5): 53-57.
- [2] 谭栓斌, 梁清华, 梁静, 等. 钼钨合金和 TZM 合金的高温性能[J]. 稀有金属, 2006, 30(z1): 33-38.
- [3] 杨秦莉, 王林, 朱琦, 等. 钼及钼合金焊接技术研究现状[J]. 热加工工艺, 2012, 41(19): 163-166.
- [4] 曹志宇. 钼合金 TIG 焊接工艺及其焊接接头研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学北京, 2017.
- [5] 刘宏亮, 李晶, 杨政伟, 等. 钨含量对钼钨合金厚板的高温力学性能的影响[J]. 中国钨业, 2015, 30(4): 64-67.