

大型紫铜管道系统的气体火焰钎焊

中国科学院力学研究所 麻润海

本文介绍了卫星模拟试验用大型容器内壁紫铜管道系统的钎焊工艺, 主要包括铜板预热及拼接, 贴焊铜管及管接头焊接。

人造地球卫星发射之前, 要在一个模拟宇宙空间冷、黑、真空环境的大型容器内进行试验。该容器本体是一个直径7 m、高12 m的不锈钢大罐, 其内部沿容器四壁装有在紫铜板上贴焊的管道系统, 管内流通液氮和氦气, 致使容器内降温至 -253°C , 这一装置称为“热沉”。为加工装配方便, 热沉分为五个部分。每部分又由若干小块拼焊而成。全系统焊接接头约2000多个。容器试验时抽真空, 要求真空度达 $1.33 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{L/S}$ 。因此要求所有接头都必须可靠不漏, 管子与板贴焊处焊缝致密, 不能有孔隙; 管子不能过烧而开裂; 内壁不能有黑色氧化皮脱落, 否则将影响液氮和氦气流程, 降低容器的真空度, 使卫星试验无法进行。整个热沉由T2紫铜管和紫铜板组成。底部结构是在一个直径5 m、厚8 mm的铜板底面上贴焊34根 $\phi 22 \times 2 \text{ mm}$ 的管子, 这些管子的两端再与一直径6 m的圆环状汇总管($\phi 62 \times 2 \text{ mm}$ 管围成)连通。

本文主要介绍热沉底部焊接过程中解决的三个主要问题, 即: 铜板的预热; 保证管接头的气密性; 防止管内壁的氧化问题。

铜板预热及焊接

1. 热沉底部结构

为加工、焊接、装配方便, 将底板顺直径方向分为六大条, 每条又由若干小块拼接而成。其中第1、2条最长, 是由14小块拼接而成(坡口及贴焊管子的圆弧槽由刨床加工)。

底块分块示意图及第1、2条底板结构见图1、图2所示。第1~4条底板上贴焊6根管子, 第5、6条底板上贴焊5根管子。

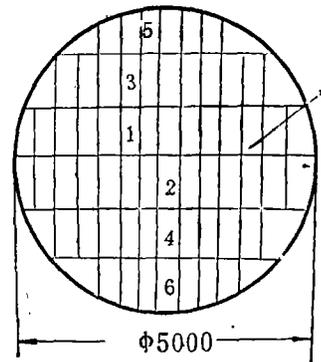


图1 底板分块示意图

* 每块由十四小块拼接而成

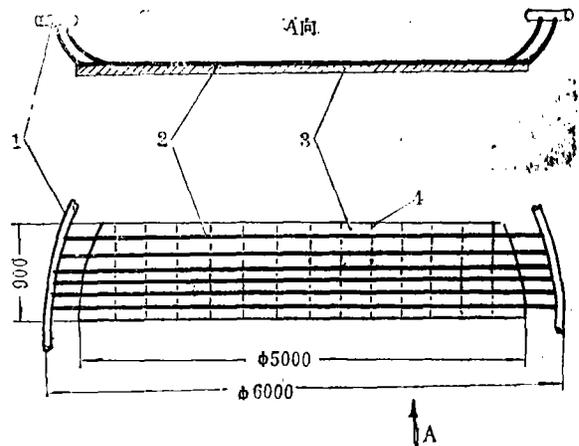


图2 第1、2条底板结构示意图

1. 汇总管 $\phi 62 \times 2 \text{ mm}$ (紫铜)
2. 贴焊管 $\phi 22 \times 2 \text{ mm}$ (紫铜6根)
3. 紫铜底板 $\delta = 8 \text{ mm}$ (由14小块拼接)
4. 拼板焊缝(共13条)

2. 预热工作台

拼焊板块和贴焊管子均在预热工作台上进行,工作台面是15mm厚的低碳钢板,面积

1×5m。按贴焊6根管子的位置开20mm宽的间断槽孔,以利热辐射。电炉架在钢板下50mm处,见图3所示。

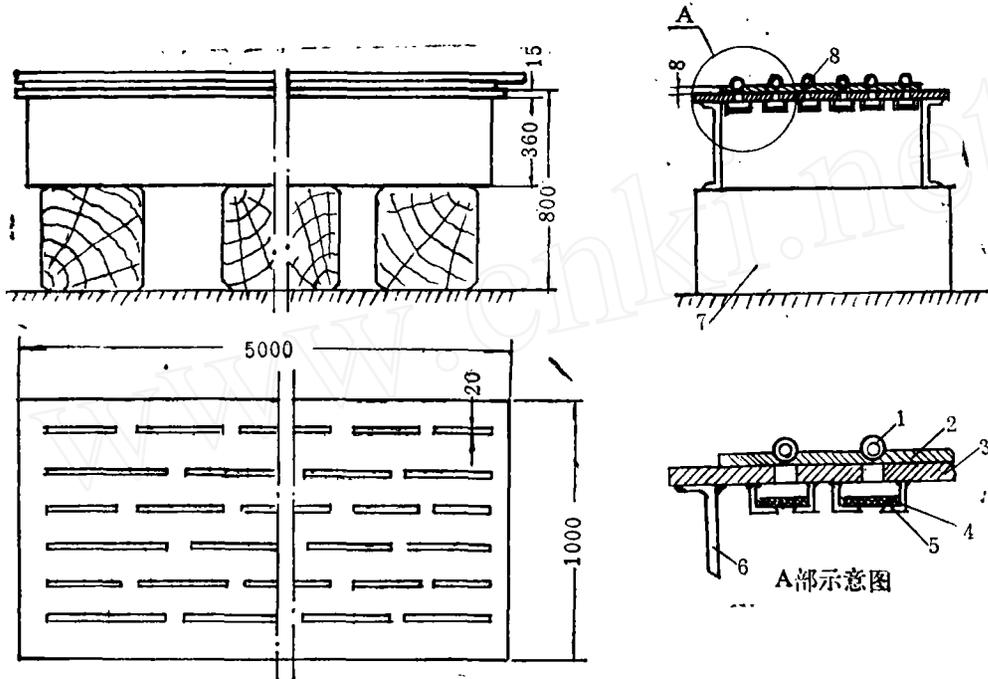


图3 工作台及预热电炉安装示意图

1. 紫铜管 2. 紫铜板 3. 工作台面 4. 电炉
5. 电炉座 6. 槽钢 7. 方木支撑 8. $\phi 22 \times 2$ mm紫铜管(6根)

3. 预热功率估算

① 预热紫铜板所需功率

按下式计算:

$$Q = Cm(t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中 Q ——所需热量

C ——紫铜比热389.37J/kg·°C

t_2 ——预热温度400°C

t_1 ——环境温度25°C

m ——紫铜板重量320.4kg

代入(1)式,得:

$$Q = 389.37 \times 320.4 \times 375 = 46783 \text{ kJ}$$

再按下式换算成热功率:

$$P = \frac{W}{t} \text{ QJ/t} \quad (2)$$

式中 P ——热功率

W ——产生 Q 热量所需的功

J ——热功当量1.001

t ——预热时间定为1800s

代入上式得所需热功率 $P = 26 \text{ kW}$

② 工作台消耗热量

也按 $Q = Cm(t_2 - t_1)$ 公式计算,

式中 C ——钢的比热取460.5J/kg·°C

m ——只计算工作台面15mm厚钢板的质量, $m = 1 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 0.015 \text{ m} \times 7800 \text{ kg/m}^3 = 585 \text{ kg}$

t_2 ——预热温度400°C

t_1 ——环境温度25°C

代入上式,得:

$$Q = 460.5 \times 585 \times 375 = 101022 \text{ kJ}$$

换算为热功率:

$$P = 101022 \text{ kJ} / 1800 \text{ s} = 56 \text{ kW}$$

③ 辐射损失热量

按下式计算:

$$Q = \varepsilon C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

式中 Q ——辐射损失热量

ε ——铜加热到200~400℃时的黑度, 取0.7

C_0 ——辐射系数5.77W/m²·K⁴

F_1 ——换热面积

$$5000\text{mm} \times 1000\text{mm} = 5 \text{ m}^2$$

T_1 ——高温时温度,

$$T_1 = (t_1 + 273)\text{K}, \text{ 取 } t_1 = 200^\circ\text{C}$$

T_2 ——环境温度,

$$T_2 = (t_2 + 273)\text{K}, \text{ 取 } t_2 = 25^\circ\text{C}$$

代入(3)式, 得:

$$Q = 0.7 \times 5.77 \times 5 \left[\left(\frac{473}{100} \right)^4 - \left(\frac{298}{100} \right)^4 \right] \text{W}$$

$$= 8.5 \text{ kW}$$

以上三项共需热功率 90.4kW (工作台支架和夹具吸热未计算)。实际施焊时, 工作台下了72台2kW的电炉, 分四排排列, 每组18台。各组分别由一个功率调节器控制, 以随时调节电炉的温升。

4. 拼板焊接

工作台经半小时加热后, 用点温计测得铜板温度为 250℃, 若上面盖以石棉布, 铜板温度可升得更高。铜板表面呈现黑色, 说明预热

措施可行。随后用四把大号焊炬, 由四名焊工同时施焊, 先将14块板拼成整体, 工作台两边各站2个焊工从中间向两边逐块拼焊, 最中间一条焊缝最后再焊, 以便调整板块直线尺寸的平直。

焊丝采用 $\phi 3$ 或 $\phi 4\text{mm}$ 的丝 221 或丝224, 熔剂为气剂 301。四把焊炬各用一瓶氧气和一台 Q-3 型乙炔发生器。

贴焊紫铜管

为避免间断加热和重复加热, 当拼板焊接之后, 立即由钳工用钢丝刷清理贴焊管子的圆弧槽, 此时电炉温控降低, 随即装配贴焊管, 用夹具轻轻压住(以便于加热时能自由伸长, 减少应力), 装配夹具见图4所示。然后四名焊工同时由中间向两边施焊, 采用间断焊(图5)。钎缝长约 150mm, 间距 30~50mm。钎焊材料采用 $\phi 3$ 或 $\phi 4\text{mm}$ 的料 303 银钎料和钎剂101。

施焊中严格遵守钎焊工艺, 用外焰施焊, 不能用焰心对着管子, 否则易使管子过热或烧裂。银钎料应均匀地熔化填满钎缝, 不允许有气孔或断续未钎透。

管子局部受热会向上拱起, 钎焊时采用局部加压的办法, 由两人用杠杆压头压住被焊部位(图4)。

为防止管内壁受热氧化, 采用通氮气保护

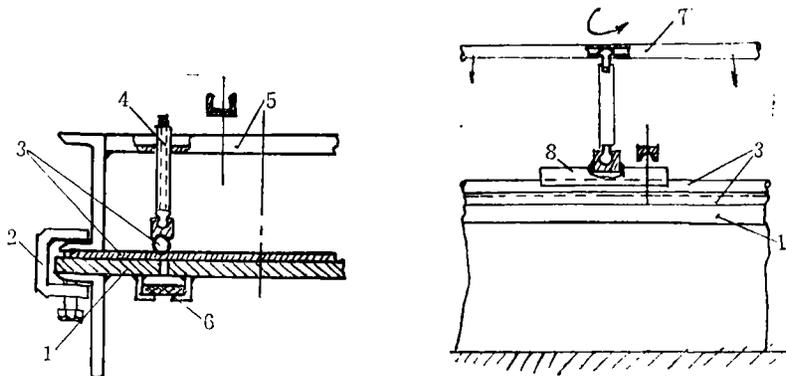


图4 装配焊接夹具示意图

a) 夹具结构 b) 杠杆压头结构

- | | | | |
|--------|-------|--------------|-------------|
| 1. 工作台 | 2. 夹子 | 3. 被焊铜管板 | 4. 丝杠压头(6个) |
| 5. 槽钢架 | 6. 电炉 | 7. 加压杠杆(可转动) | 8. 压头 |

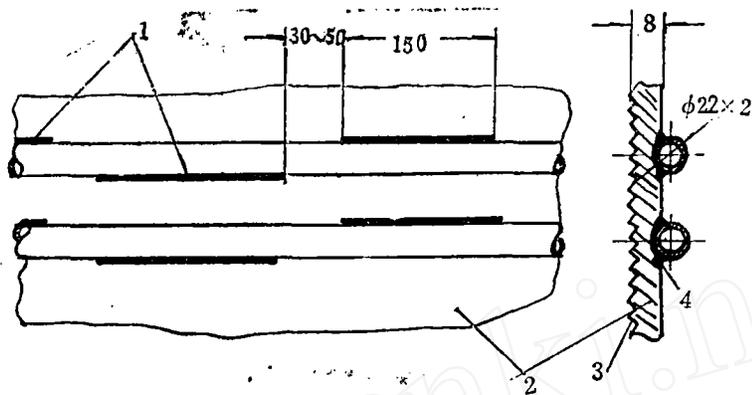


图5 贴焊管钎缝布置

1. 银钎料 2. 热沉底板 3. 牙槽 4. 银钎料填满所钎处

的办法。钎焊时，将管子首尾连通，一头接氮气瓶，另一头通大气，给一定气压即可。实践证明，此法非常有效。焊后解剖，发现管内壁形成一层致密的氧化膜（氮气中有极少量的氧），这对提高紫铜管的耐腐蚀性是有利的。

汇总管和各支管接头的钎焊

为确保每个接头的气密性，由熟练焊工经现场试验考核，试件真空检漏合格后，担任接头焊接任务。

1. 考核试件的模拟接头形式见图6所示。焊缝1、3用堵头堵塞后钎焊，2、4大管收口插入小管钎焊，5、6、7、8为四个大管拔口插入小管钎焊。焊缝1~4是水平固定管（全位置），钎缝5~8是水平位置钎缝。

每个焊工焊两件，一件全用料303银钎料，钎剂101；另一件用丝221或丝224，气剂301。焊后全部焊缝先由氮质谱仪检漏合格后，做冷热冲击试验（即通以液氮后再恢复常温），然后再

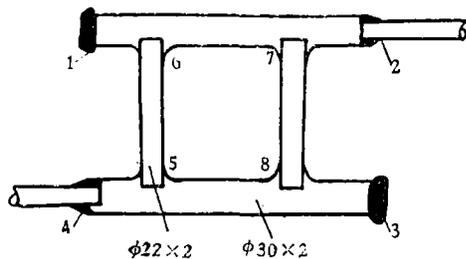


图6 考核试件示意图

进行真空检漏均合格，真空度达 $133.3(10^{-9} \sim 10^{11}) \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

有一试件拔口处有裂纹（5~8钎缝），2、4钎缝是大管未收口，直接插入小管钎接的，第一次检漏有渗漏，冷热冲击后漏量更大，说明装配间隙过大或拔口有裂纹后，银钎焊不能保证气密性。

2. 2000多个接头中有大部分是粗管上开孔插入小管的接头，若每个开口都用机械方法拔口，工作量太大，且一旦有裂纹就不能保证气密性。故又试验不拔口，打孔后直接插入小管的钎缝，如图7所示。用丝224钎接，经检漏也很成功，于是接头制备中均采用此种形式，大大减少了工作量。粗管接口孔径比插入管直径大0.5mm即可。钎接时，第一遍先用钎料薄薄地溜缝，第二遍加厚。检漏时曾发现个别钎缝有泄漏，需补焊，先用焊炬加热将钎料扒掉，发现第一层溜缝时未溜严，有间断孔隙，说明漏孔由此产生。

3. 相同管径的对接接头采用一端扩口，一端插入的形式。如图8所示。为保证气密性均采用银钎焊。

4. 本系统主要要求真空气密性，对强度的要求不高。但为取得数据，对试件做了拉力试验。如图9所示。试件取自考核试件，从断裂情况看，所有铜钎焊接头断口离钎缝较近，而

（下转第31页）

于3 mm。施焊过程中如发现缺陷,应立即铲除后重焊。

焊后检验

1. 进行宏观及电磁探伤检查,不允许存在咬边、裂纹、夹渣、气孔等缺陷。

2. 缸孔、主轴孔尺寸精度及缸孔垂直度,主轴孔同心度检测(3008号焊修机体),见下表:

缸孔、主轴孔尺寸精度允差及焊后变形量(mm)

项 目	允 差	变 形 量
缸孔尺寸精度	+0.1	0~0.12
缸孔垂直度	0.35	0.003~0.11
主轴孔尺寸精度	+0.06 -0.02	0.05~0.34
主轴孔同心度	0.01	0.02~0.05

主轴孔变形是在焊修主轴承座与隔板连接的角焊缝时产生的,超过允差要求时采用氧乙炔火焰喷涂方法对主轴孔内侧半圆柱面进行喷涂恢复尺寸。

氧乙炔火焰喷涂工艺

1. 喷涂前准备

【上接第4页】

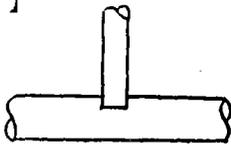


图7 粗管上打孔直插小管的接头

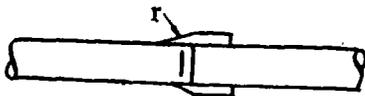


图8 相同管径的对接接头

银钎焊接头断口离钎缝较远。且银钎焊接头的断裂负荷均大于铜钎焊接头,铜钎焊接头强度

①为便于喷涂操作,把机体纵向直立,使被喷涂面处于垂直位置。

②清除喷涂部位的污垢,采用氧乙炔焰预热至150℃左右。

③预热后用砂轮打磨喷涂表面,见金属光泽并具有一定粗糙度,以保证涂层的良好结合。喷涂面的边缘打磨成R2~4 mm的圆弧。打磨后的部位预热温度应在80~100℃范围内。

④为提高涂层的结合强度,可把半圆柱面分成左右两部分,喷完一侧再喷另一侧。

2. 喷涂工艺参数

粉末材料为Ni-Al复合粉。采用中性焰。乙炔压力0.05~0.08 MPa、氧气压力0.5 MPa、喷嘴与工件距离180~200 mm、喷枪的横向摆动速度,以每摆动一次涂层厚度增加0.01~0.05 mm为准。涂层加工余量0.3~0.5 mm。喷涂后工件局部温度不大于250℃为宜。

修复效果

从1979~1985年共焊修了28台机体,经过一个厂修期的运行(机车运行60~90×10⁴ Km)证明焊修质量良好,为国家节约资金70万元。为今后焊修大马力柴油机机体总结了经验。冲破了国外不能在热处理后的机体上焊修的论点。

平均为200 MPa,银钎焊接头强度均大于21⁰ MPa。这因为铜钎焊温度比银钎焊温度高,热影响区退火比银钎焊要强,晶粒也较粗大,故强度下降较多。

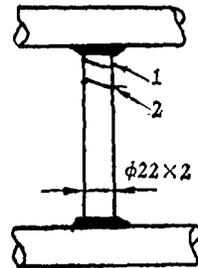


图9 接头拉力试件