

钯合金阵列管束气密性焊接工艺方法研究

贾志华, 郑晶, 操齐高, 姜婷, 孟晗琪

西北有色金属研究院 陕西西安 710016

摘要: 采用预先高频钎焊钯合金管过渡接头, 再使用脉冲激光焊的方法, 对钯合金扩散室密排列钯合金管束与不锈钢法兰进行了密封焊接工艺研究, 通过对激光焊接接头的观察和气密性检测分析, 确定了激光焊接功率、离焦量、脉冲频率、脉冲宽度及焊接速度等主要焊接参数。正式样件经气密性检测和氮质谱检漏达到了氢纯化分离用钯扩散装置的使用要求, 从而确定激光焊技术可推广应用于钯合金扩散室密集阵列管束批量焊接生产。

关键词: 钯合金管; 激光焊接; 扩散室; 工艺参数

Research on gas tightness welding process method for palladium alloy tube array bundles

JIA Zhihua, ZHENG Jing, CAO Qigao, JIANG Ting, MENG Hanqi

Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, Shaanxi, China

Abstract: A study on the sealing welding process between palladium alloy tube bundles and stainless steel flanges in a densely arranged palladium alloy diffusion chamber was conducted using pre-brazed palladium alloy tube transition joints and pulsed laser welding method. Through the observation of the welded joint and the gas tightness test analysis, the main welding process parameters such as laser welding power, defocusing amount, pulse frequency, pulse width, welding speed, etc. were determined. The formal sample has met the requirements for the use of a palladium diffusion device for hydrogen purification and separation through gas tightness testing and helium mass spectrometry leak detection. It is confirmed that laser beam welding technology can be popularized and applied to batch welding production of dense array tube bundles in palladium alloy diffusion chamber.

Keywords: palladium alloy tube; laser welding; diffusion chamber; process parameters

1 序言

由于钯合金膜材料对氢的选择透过特性, 钯膜净化的理论纯度可达100%, 是中小规模获取高纯氢气较好的一种方法^[1, 2]。工业上钯合金材料通常被用来加工薄壁毛细管, 并与不锈钢壳体构建成氢扩散室。采用薄壁毛细管制备的钯合金扩散室具有结构紧凑, 单位体积膜面积大, 以及抗气体冲击、抗振动性优良等优点, 是目前工业钯膜纯化装置中应用最为广泛的一种结构类型^[3]。

近些年, 随着燃料电池工业的快速发展, 对高纯氢的需求量越来越大, 相应的钯合金扩散室集成的膜管数量也越来越多, 通常需要将直径 $\leq 3\text{mm}$ 、壁厚 $\leq 0.1\text{mm}$ 的数百根钯合金管焊接在金属法兰上, 形成密排阵列管束。由于钯膜管厚度在微米量级, 与法兰的厚度相差大, 两种材料的性质也不同, 焊接时易造成钯管壁损伤, 且焊接作业空间极小, 因此不能采用传统的熔焊和压焊技术来实现钯膜管氢气净化系统的密封性问题^[4]。文献报道了采

用电容储能缝焊,或真空扩散焊对膜片式结构钯合金扩散装置的焊接方法,而膜盒式结构的钯合金膜片之间采用微束等离子氩弧焊进行封接^[5-7]。对于管式钯合金膜的焊接工艺方法,国内某单位采用高频钎焊技术实现了50根壁厚为0.1mm的薄壁钯银金镍管与不锈钢底座的密封焊接^[8]。该方法需钎焊3次完成整个管束组件的焊接,操作过程较为复杂,每一次焊接过程都必须严控工艺,否则,在多次钎焊加热过程中,会破坏最初的钎焊接头气密性,从而导致整个钯管组件发生泄漏。因此,对于密排列(数百个管)管束的密封焊接,上述方法存在一定的局限性,并且很难保证所有焊接管接头质量一致。

激光焊属于近年来广泛应用的一种特种精密焊接技术,相比传统熔焊工艺,具有焊接速度快、热输入小、热影响区窄、焊接变形小及焊缝深宽比大,以及可以通过数字化实现精确控制等一系列优点,特别适用于精密、薄小零件的焊接^[9]。为了解决密集整列管束焊接的可靠性问题,本试验通过采用预先钎焊钯管过渡接头,再与不锈钢法兰进行激光密封焊接的方法,重点研究了激光焊工艺参数对焊缝质量的影响规律,为密排列钯合金扩散室组件的激光焊接应用提供实践依据。

2 试验材料、设备与试验方法

2.1 试验材料

试验用的钯合金管组件由316奥氏体不锈钢法兰和Pd-8%Y合金管焊接而成。不锈钢法兰实物如图1所示,其上开有100个通孔。Pd-8%Y合金管规格尺寸为 $\phi 2\text{mm} \times 0.08\text{mm} \times 400\text{mm}$,为了提高钯管与法兰焊接可靠性和一致性,预先加工了钯合金管过渡接头,接头的材质与不锈钢法兰一致,管接头的结构如图2所示。



图1 不锈钢法兰实物



图2 管接头结构

2.2 试验设备与方法

试验采用陕西雷奇华能科技有限公司生产的Nd:YAG脉冲激光器,焊机的主要技术指标见表1。该设备配备了运动平台,能够实现x、y、z、R四维调控,同时焊接设备自带可视系统,能够实现对焊缝100%~300%的缩放。

表1 Nd:YAG激光焊设备的主要技术参数

激光波长/nm	最大平均输出功率/W	最大单脉冲能量/J	脉冲重复频率/Hz	脉冲宽度/ms	能量稳定性(%)
1064	150	60	1~200	0.1~15	±3

Pd-8%Y合金管使用前,一端用镍堵头钎焊密封,另一端采用高频加热的方法与过渡接头钎焊连接。焊接时,先将铜银焊料放置于接头处,在Ar氛围保护下,用高频感应线圈加热被焊接组件到800~820℃,使钎料熔化,实现钯管与不锈钢管接头的连接。为了改善不锈钢的焊接性能,不锈钢接头焊前表面镀有一层镍。高频钎焊如图3所示。对钎焊后的单根钯合金管件需逐根进行打压和氦质谱检漏,确保在进行激光焊接前,每根钯合金管及焊接接头气密性优良。接着将钯合金管件逐一插入到不锈钢法兰孔中,使钯合金管的管接头与法兰孔之间形成环

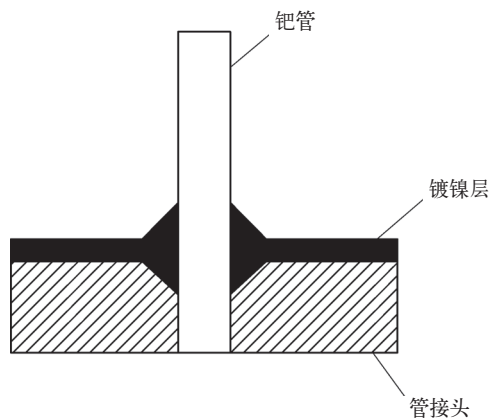


图3 钯管与管接头的高频加热焊接

形搭接接头,组合接头形式如图4所示。最后将组装好的样件固定在激光焊设备操作台上,设定好焊接参数和步进程序,逐一进行阵列管束的焊接。焊接完成后,对整个焊接件进行打压和气密性检测,并用显微镜对焊缝的形貌进行观察。

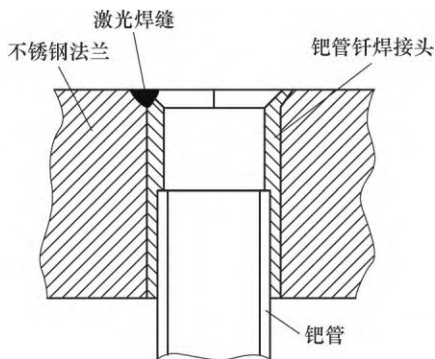


图4 激光焊管阵列组合接头形式

3 试验结果及分析

3.1 激光焊接工艺设定

本试验先采用陪样开展预焊接试验,在设定激光射入方向与工作台转轴夹角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,99.999%高纯氩气作为保护气体不变的条件下,通过观察搭接接头熔化情况,不断调整优化激光焊接功率、离焦量、脉冲频率、脉冲宽度及焊接速度等主要焊接参数。并对焊后样件的气密性能进行测试分析,最终获得了钎管与法兰焊接质量较为稳定的焊接工艺。

首先是焊接功率的设定,由于壁钎合金管接头和不锈钢法兰的厚度相差较大,因此需要保证激光束能量能将管接头和不锈钢法兰焊缝均匀地熔化在一起,但也不可设定过高,否则焊点处金属会过量蒸发,产生飞溅,形成凹坑,从而影响接头的强度和气密性能。在焊接过程中,焊点的表面形态和质量受离焦量影响很大,由于钎管钎焊接头的厚度仅为0.5mm,因此离焦量的位置会对形成的熔池深度产生影响,若控制不好,则钎管接头将会烧穿,从而影响接头强度。另外,钎管过渡接头与不锈钢法兰之间存在着一定的装配间隙,需要保证熔化后的金属填补间隙。通过调整激光的脉冲宽度,能增加焊点的熔深和直径,一定程度上能改善金属的填隙能力,增加焊接接头强度。但脉宽也不可过大,否则将造成焊缝中心区域的金属飞溅,反而降低焊接

强度。此外,钎合金管接头的直径较小,在焊接过程中需要保证脉冲频率、光斑尺寸和焊接速度相互匹配,才能获得均匀且光滑的焊缝。一般来说,重叠率越大,焊缝越光滑,但重叠率过大,超过材料的焊接极限,容易焊穿或出现焊缝局部温度过高,使先前钎焊的钎管过渡接头处的钎料整体熔化,从而破坏原有钎缝的真空密封性能。因此,在进行激光脉冲频率设定时,需要将焊接频率尽量减小,此时焊接速度也需要相应降低,二者相互配合才能确保钎管组件焊缝的整个圆周焊点连续且均匀。

3.2 焊接结果分析

采用上述焊接参数,完成了正式样件的焊接,焊接接头宏观形貌如图5所示。由图5可看出,钎管钎焊接头与不锈钢法兰焊缝接头处熔化均匀,焊缝宽度一致,表面成形美观,未见有烧穿和变形等缺陷,连接处圆滑过渡。在高倍金相显微镜下观察焊接接头横截面的显微组织,如图6所示。由图6可看出,焊缝与母材之间熔合良好,已完全熔透,焊缝表面基本与母材保持平齐。同时,可以看到焊接的热影响区非常窄,交界处几乎看不到热影响区,这是因为激光焊接能量密度高,焊接加热过程只发生在局部区域,所以母材受到的热作用较小,而且冷



a) 焊接接头的整体形貌 b) 单个焊接接头形貌

图5 焊接接头宏观形貌

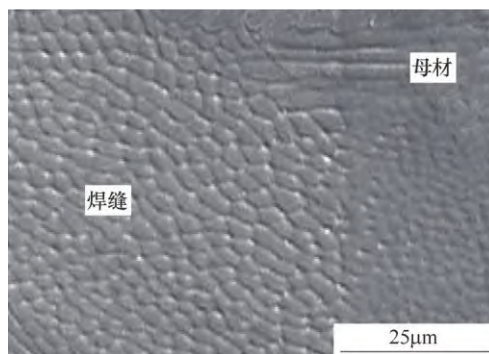


图6 焊接接头显微组织

却迅速。焊缝中心处为细小均匀的等轴晶组织，而在焊缝的边缘，由于受到母材的冷却作用，因此有利于生成柱状晶。

焊接后的集束钯合金管组件经检测，在压力1.0MPa、保压60s的条件下，焊缝无漏气，氦质谱检测得到的漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，可以满足氢纯化分离用钯扩散装置的使用要求。

4 结束语

1) 通过预先钎焊钯合金管过渡接头，再使用脉冲激光焊的方法，可以实现钯合金扩散室中密集阵列管束的焊接区的精准焊接。

2) 采用150W的Nd:YAG脉冲激光器可准确地控制钯合金薄壁细管与不锈钢法兰焊接接头的熔化深度与焊缝宽度，通过精确控制激光功率、离焦量、脉冲频率、脉冲宽度及焊接速度等主要焊接参数，得到了焊缝宽度一致、表面成形美观、气密性优良的焊接接头。

3) 激光脉冲焊接时能量密度高，热输入较小，热影响区范围很窄。焊缝中心处为细小均匀的等轴晶组织，而在焊缝的边缘，因受到母材的冷却作用而有利于生成柱状晶。

参考文献:

[1] 孙强, 贺玉刚, 严大洲, 等. 高纯氢制备工艺研究

进展[J]. 精细石油化工进展, 2020 (3): 42-44, 57.

[2] GALLUCCI F, FERNANDEZ E, CORENGIA P, et al. Recent advances on membranes and membrane reactors for hydrogen production[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 92: 40-66.

[3] 吴彦敏. 气体的纯化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.

[4] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[5] OH D K, LEE K Y, PARK J S. Hydrogen purification from compact palladium membrane module using a low temperature diffusion bonding technology[J]. Membranes, 2020, 10 (11): 338.

[6] LYUSHINSKIY A V, FEDOROVA E S, ROSHAN N P. Contact welding of palladium foil with stainless steel[J]. Welding International, 2021, 35 (1-3): 81-84.

[7] 邹家寿. 膜盒波纹管的微束等离子焊接[J]. 航空制造技术, 1978 (7): 20-23.

[8] 王多明, 马翔, 苏勇, 等. 钯管净化器钎焊技术[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (4): 51-58.

[9] 喻立川. 脉冲激光在多层超薄材料密封焊接中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020 (12): 85-88.

MW 20240424

(上接第33页)

4 结束语

通过软件残余应力模拟过程应力演变的情况，结合小孔法试验实测残余应力的结果与软件模拟数据进行分析，可得出如下结论。

1) 在超高强度钢的焊接过程中，残余应力主要集中在焊缝根部。

2) 焊接温度场结果表明，离焊缝热源近，温度升高；远离热源，温度下降，焊接结束，焊件冷却至室温；多道焊时的焊缝往往会经历多次焊接热循环。

3) 超高强度钢的焊接过程，每道的焊缝中心受热源影响较大，部分位置残余应力达到960MPa；远离焊缝处受热源影响较小，温度冷却较慢，残余应力相对较小。

参考文献:

[1] 汪贺模, 罗登, 高擎, 等. 1100MPa级别超高强度工程机械用钢的开发[J]. 南方金属, 2019 (6): 1-4.

[2] 苗玉刚, 王林, 王子然, 等. DH36高强度船板钢对接焊残余应力与变形数值模拟与试验分析[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45 (10): 104-111.

[3] 马雪鹤. 基于残余应力控制的Q370qE桥梁钢焊接工艺优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.

[4] 骆文泽, 成慧梅, 刘红艳, 等. 超高强钢Q960E对接接头残余应力与焊接变形的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2023, 34 (17): 2095-2105.

[5] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

MW 20240505