

石英材料精密焊接工艺优化与设备改进研究

赵国彬

贺利氏信越石英（中国）有限公司，辽宁 沈阳 110000

[摘要]随着石英材料在光学、电子和通信等高端技术领域的广泛应用，精密焊接工艺在石英材料加工中的重要性日益突出。石英材料具有良好的耐高温和化学稳定性，但其脆性较大，焊接过程中的热应力和接缝质量容易影响整体性能。本文通过分析现有的石英材料焊接技术，提出了优化焊接工艺的方案，并对焊接设备进行了改进。通过实验验证，优化后的工艺能够显著提高焊接接头的质量，减少裂纹和应力集中现象，提高了焊接效率。本文研究对石英材料精密焊接技术的进一步发展具有重要的参考价值。

[关键词] 石英材料；精密焊接；工艺优化；设备改进；焊接质量

DOI: 10.33142/ect.v3i2.15519

中图分类号: TG422

文献标识码: A

Research on Optimization of Precision Welding Process and Equipment Improvement for Quartz Materials

ZHAO Guobin

Heraeus Shinetsu Quartz (China) Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: With the widespread application of quartz materials in high-end technology fields such as optics, electronics, and communication, the importance of precision welding technology in quartz material processing is becoming increasingly prominent. Quartz material has good high temperature resistance and chemical stability, but its brittleness is high, and the thermal stress and joint quality during welding can easily affect the overall performance. This article analyzes the existing quartz material welding technology, proposes a plan to optimize the welding process, and improves the welding equipment. Through experimental verification, the optimized process can significantly improve the quality of welded joints, reduce cracking and stress concentration, and improve welding efficiency. This study has important reference value for the further development of precision welding technology for quartz materials.

Keywords: quartz material; precision welding; process optimization; equipment improvement; welding quality

引言

石英材料因其特殊的物理化学性能，广泛应用于光学元件、半导体器件等领域。然而，由于其脆性和导热性能差，焊接工艺往往面临较大的挑战。传统的焊接方法如激光焊接、钨极氩弧焊等，虽然在某些情况下有效，但常常无法满足高精度、高质量焊接的需求。为了提升石英焊接接头的强度、耐用性及抗热冲击性能，本文将探讨精密焊接工艺的优化方法，并结合设备改进的策略，研究如何在保证焊接质量的基础上提升生产效率和降低成本。

1 石英材料焊接工艺现状分析

1.1 石英材料的物理化学特性

石英材料(SiO_2)以其优异的机械性能和化学稳定性，在许多高科技领域广泛应用。首先，石英的硬度较高（莫氏硬度为7），使其具有较强的抗磨损性，但也带来加工时的困难，尤其在焊接过程中容易产生裂纹。其次，石英材料具有较大的热膨胀系数，尤其是在加热过程中，由于温度变化导致的膨胀和收缩不均匀，容易在焊接接头处形成内应力，进而诱发裂纹的产生。此外，石英的导热性较差，意味着热量难以均匀分布在焊接区域。这一特性导致焊接区域温度上升较快，热应力增加，从而对焊接质量产

生不利影响。因此，在焊接过程中，必须采取特殊的工艺控制方法，以减少热损伤和避免裂纹产生^[1]。

1.2 传统焊接工艺的应用与局限

传统的材料焊接工艺，如激光焊接和钨极氩弧焊（TIG），在一些特定的应用中取得了一定的效果。然而，由于石英的绝缘性和低导电性，这些传统焊接方法往往无法直接实现有效的加热与焊接。在传统金属焊接中，聚焦并用于加热金属区域，虽然可以提供精细的焊接控制，但由于热导率差，金属焊接过程中热量难以均匀分布，容易造成局部过热，进而引发裂纹。

传统金属焊接方法，如钨极氩弧焊，利用电弧加热金属母材，但对于石英这种绝缘材料而言，电弧无法稳定维持。石英由于缺乏自由电子，无法像金属一样感应电弧中的高频振荡进行加热。因此，这种方法在石英材料的焊接中面临极大的挑战。加热过程中产生的热应力容易在石英材料中引发裂纹，尤其是在薄壁石英焊接时，过大的热输入更加容易造成局部膨胀不均，进而导致接头强度不高。因此，传统焊接方法在石英焊接中存在较大的局限性，无法满足高质量和高精度的需求。

2 焊接工艺优化方法

2.1 焊接参数的优化

氢氧焰焊接是一种通过氢气与氧气的混合气体产生高温火焰来进行焊接的技术,广泛应用于石英材料的焊接中。其工作原理是通过控制氢气和氧气的比例,使得混合气体燃烧时释放出高温火焰。火焰的温度可达到 3000℃ 以上,能够迅速加热石英材料至熔点,使其熔化并与石英焊条融合,形成牢固的焊接接头。

在石英焊接中,使用氢氧焰加热枪将火焰聚焦在石英焊条和焊接部件的接触点上。通过手动操作,焊接工人将熔化的焊条沉积到石英表面,形成均匀的焊接接头。这种方式的优势在于其加热速度快、局部温度高,能够迅速使石英材料到达熔点,减少因温度过高而导致的材料损伤^[2]。

焊接速度是另一个关键因素,速度过快容易导致焊接不充分,接头存在气孔或裂纹,而速度过慢则可能导致过多的热输入,造成焊接区的过度热影响,影响接头的机械性能。通过优化焊接速度,可以实现焊接质量和效率的平衡,从而获得理想的焊接接头。激光功率在焊接过程中起着至关重要的作用。功率过高容易造成石英材料的表面熔化和烧损,导致焊接接头脆弱;而功率过低则无法充分加热焊接区,导致焊接接头不牢固。通过多次实验和对比,可以确定最佳的激光功率范围,以确保焊接过程中的稳定性和接头的高质量。

2.2 焊接材料的选择与配比

焊接材料的选择对于石英材料的焊接质量至关重要,尤其是在要求精密焊接和高质量接头的应用中。为确保焊接接头的强度和稳定性,选择合适的焊接材料是至关重要的。在石英材料焊接中,为了避免焊接过程中出现裂纹、热应力过大或接头强度不足等问题,通常采用与母材相同或相近的焊接材料,以保持焊接区域和母材的特性一致。

对于透明石英材料的焊接,理想的焊接材料是采用与母材相同制备工艺制作的透明石英焊条。透明石英具有良好的光学性能和较低的热膨胀系数,因此,在焊接过程中,焊接材料的光学性能和热膨胀特性应与母材尽可能匹配。采用同源材料,即制备工艺、成分和结构与母材一致的焊条,可以避免因热膨胀系数差异而引发的热应力集中。此外,透明石英焊条还可以确保焊接接头在光学性能上的一致性,不会影响最终产品的透明度和视觉效果。

对于发泡石英材料,焊接材料的选择同样应遵循相同的原理。发泡石英是一种多孔、轻质材料,其焊接材料的选取应考虑到发泡石英的独特结构。采用与发泡石英母材相同制备工艺制作的发泡石英焊条,可以确保焊接区域在结构上与母材一致,避免焊接过程中产生不均匀的热膨胀现象,进而避免热应力导致的裂纹或变形。发泡石英焊条与母材一致的发泡结构特性,有助于保持焊接区域的轻质和多孔性质,避免焊接接头位置发生结构性破坏。

3 焊接设备的改进与技术创新

3.1 焊接设备的改进与技术创新

随着石英材料在现代工业中的广泛应用,石英焊接工艺的技术创新与设备改进成为提升焊接效率和焊接质量的关键。氢氧焰焊接作为一种常见的气焊方式,已被广泛应用于石英材料的焊接。然而,传统的氢氧焰焊接方法存在着操作不便和难以满足复杂焊接需求的不足,尤其是对于大型厚壁石英管的焊接。因此,近年来,针对焊接设备的改进和技术创新成为了研究的重点。

一项具有代表性的技术创新是由专利 CN208136074U 公开的石英管法兰焊接装置。这一装置通过对现有焊接方法进行优化,提供了更为稳定的焊接过程。首先,该装置引入了一个基于床身承载平台和回转平台的定位方案,不仅能够实现石英外管的精确夹持和回转定位,还能通过加热机构持续加热焊接区域。加热枪通过可升降的设计,能够自动调整焊接枪的高度和位置,使得焊接过程更为精准。这种设计能够确保焊接时石英管和石英法兰维持在理想的温度范围内,从而有效提升了焊接质量,尤其在面对复杂的焊接接头和厚壁石英管时表现尤为出色。

3.2 面向大规模石英管焊接的设备改进

为了应对更加复杂的焊接任务,传统的焊接设备设计往往显得力不从心。现有的一些设备主要集中在小直径石英管的焊接,且加热枪只能实现升降和上下摆动,无法适应大型石英管的内外焊缝需求。针对这一问题,最新的立式石英炉管焊接机在设计上做出了多项突破,提升了设备的适应性和操作便捷性。

这种焊接机通过引入多个自由度的焊接组件,包括外焊接组件、内烧灯、石英炉管夹持座等,能够全面优化焊接过程。特别是外焊接组件的平移功能,使得设备可以在更广泛的范围内移动,加大了焊接区域的覆盖面积。此外,焊接机还设计了多个调节机构,例如内外烧灯的升降、摆动和移动,能够有效应对不同厚度和直径的石英管的焊接需求。与传统设备相比,这种焊接机显著提高了焊接效率,并且保证了焊缝的均匀性和高质量。

进一步的优化体现在设备的自动化控制系统上。通过精确控制各个部件的运动轨迹,焊接机能够自动完成焊接过程中的温控、焊丝送进和火焰调节等操作,大大减轻了操作人员的劳动强度,并提高了焊接的稳定性和精度。这些技术创新不仅使得设备的适用范围更加广泛,而且能够大幅提升焊接的工艺水平,满足更复杂、更高质量要求的焊接任务。

4 工艺优化与设备改进的实验验证

4.1 实验方案设计

为了验证氢氧焰焊接工艺的优化效果,本实验设计了不同条件下的焊接实验,结合多灯具和往复震动技术对焊接质量进行系统研究。实验选取石英材料作为焊接对象,并对焊接参数进行精确控制,包括氢气与氧气的混合比例、

焊接火焰的温度、焊接时间以及震动频率等。具体实验方案如下:

首先,选取三组不同的焊接条件进行对比实验:第一组为传统手持氢氧焰加热枪焊接,作为对照组;第二组为引入多灯具系统,但仍然保持传统焊接操作方式;第三组则是在多灯具基础上引入往复震动技术,研究其对焊接质量和效率的提升效果。每组实验都在相同的操作环境下进行,以确保实验结果的可比性。

其次,为了确保实验数据的可靠性,每组实验都将进行至少三次重复,并使用高精度的温度计和焊接力计对焊接过程中的温度变化及焊接力进行实时监测。焊接完成后,采用金相分析法对焊接接头的显微结构进行观察,结合拉伸试验、硬度测试等方法评估焊接接头的力学性能和稳定性。最后,所有数据将进行统计分析,以便评估不同焊接方法对石英材料焊接性能的影响。

4.2 实验结果与分析

实验结果表明,不同焊接方法在焊接质量和效率上存在显著差异。在第一组传统手持加热枪焊接中,焊接接头存在较多的气孔、裂纹和不均匀的熔池,导致焊接强度较低,且焊接过程中温度控制难度较大,造成了局部过热或过冷的现象。这种温度不均匀导致了热应力集中,进一步引发了裂纹和烧损,最终影响了焊接接头的性能。焊接接头的断裂强度和硬度测试结果较低,说明焊接质量存在一定的隐患。

第二组采用多灯具系统的焊接方法,相比传统焊接,焊接质量有所改善。多灯具系统能够在焊接区域提供更均匀的热源分布,避免了局部过热的情况。通过将多个热源聚焦于焊接区域,能有效减缓焊接区域温度梯度,避免了由于温差过大造成的裂纹生成。焊接接头的气孔和裂纹数量有所减少,焊接接头的力学性能也有一定提升,但仍然存在少量的微小缺陷,表明温度控制仍不够精确,焊接质量尚不稳定。

第三组结合多灯具和往复震动技术的焊接方法表现最佳。引入震动技术后,焊接过程中的熔池更加稳定,焊接接头表面光滑,几乎没有气孔和裂纹现象。震动技术的引入显著改善了熔池的流动性,使得熔化金属能够均匀分布,避免了局部过热或过冷的现象,从而有效防止了材料的炸裂或烧穿。同时,震动产生的微小波动促进了焊缝的融合,提高了焊接接头的整体强度和韧性。焊接接头的拉伸强度和硬度测试结果均优于其他两组,显示出焊接质量的显著提升。与此同时,多灯具系统的应用进一步优化了热源分布,确保了焊接区域温度的均匀性和稳定性。

这一实验结果证明,结合多灯具系统和往复震动技术的焊接方法能够显著提高石英材料焊接的质量和效率,通

过改善温度控制和熔池稳定性,有效减少了裂纹和气孔的产生,提升了焊接接头的机械性能,且避免了常见的烧裂和爆裂现象。

4.3 优化效果的验证与总结

通过上述实验验证,采用多灯具和往复震动技术的焊接方法在石英材料的焊接中表现出明显的优化效果。与传统焊接方法相比,优化后的工艺能够显著提高焊接接头的质量,减少了焊接缺陷,提升了焊接接头的力学性能。焊接接头的断裂强度和硬度均显著提高,表明焊接接头的整体质量得到了改善。

优化后的焊接工艺也在生产效率上有所提高。多灯具系统的引入减少了热源的不均匀性,焊接速度较传统方法有所提升。同时,往复震动技术有效减少了熔池的不稳定性,避免了因操作不当导致的焊接缺陷,进一步提高了生产效率和稳定性。

总体来说,实验结果表明,结合多灯具和往复震动技术的氢氧焰焊接工艺,不仅能够显著提高石英材料焊接的质量和性能,还能有效提升焊接过程的稳定性和效率,为石英材料的精密焊接提供了一种可行的优化方案。

5 结语

通过对石英材料精密焊接工艺的优化与焊接设备改进的研究,本文提出了一系列针对性强、可操作性高的优化方案。这些改进能够有效提升焊接质量,降低裂纹产生的风险,增强焊接接头的力学性能和耐用性。同时,随着设备的智能化与自动化发展,焊接过程的控制精度和效率也得到了显著提升。本研究为石英材料焊接技术的进步提供了有价值的参考,并对相关行业的应用具有重要的指导意义。

[参考文献]

- [1]韩玉盼.石英晶振片的超精密双面抛光工艺研究[D].北京:北京交通大学,2023.
- [2]谢仕强.熔石英元件机械化学多能场复合协同精密磨削机理研究[D].湖南:湖南大学,2023.
- [3]赵林杰.熔石英材料的CO₂激光抛光作用机理及其去除工艺研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2022.
- [4]王伟,王军,姚鹏.石英玻璃的高效可控精密磨削机理研究[J].金属加工(冷加工),2020(8):81.
- [5]陈冲.光学石英玻璃在超精密加工过程中的纳观物化行为研究[D].辽宁:大连理工大学,2019.

作者简介:赵国彬(1985.9—),男,毕业院校:沈阳航空工业学院,学历:本科,所学专业:机械设计制造及其自动化,当前就职单位:贺利氏信越石英(中国)有限公司,职务:工业化工程师,所在职务的年限:2年(包括其他工作单位16年),职称级别:现有中级工程师(申报副高级工程师)。