

引用格式:杜俊平,路向飞,杨永刚.多晶硅生产中活塞压缩机的故障分析及优化策略研究[J].有色设备,2025,39(1):74-78.

DU Junping, LU Xiangfei, YANG Yonggang. Failure analysis and optimization measures of piston compressors in polysilicon production[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(1): 74-78.

# 多晶硅生产中活塞压缩机的故障分析及优化策略研究

杜俊平,路向飞,杨永刚

(洛阳中硅高科技,河南 洛阳 471023)

[摘要] 在多晶硅生产过程中,氢气、氯硅烷等关键工艺气体的加压环节主要依赖于活塞压缩机。本文系统阐述了活塞压缩机的结构特性,并针对某多晶硅生产企业所使用的活塞压缩机在生产中常见 3 类故障的原因进行了统计和分析,提出了降低压缩介质粉尘量、提高填料密封效率、强化操作管理能力以及优化设备合理选型 4 个方面的优化措施。实施结果表明,这些措施有效降低了活塞压缩机的故障率,降幅达到 83.33%,显著提升了多晶硅生产系统的安全性与稳定性,为企业带来了显著的安全效益和经济效益。

[关键词] 多晶硅; 活塞压缩机; 氯硅烷; 故障分析; 优化措施; 安全效益; 经济效益

[中图分类号] TH457 [文献标志码] A [文章编号] 1003-8884(2025)01-0074-05

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.01.010

## 0 前言

多晶硅是制造集成电路、光伏太阳能等的关键材料,改良西门子法是目前使用最广泛的多晶硅生产工艺。该工艺通过将三氯氢硅与氢气按一定的摩尔比混合,在还原炉内的高温硅芯上发生化学气相沉积反应,从而生成硅棒。在此过程中,产生的副产物及未参与反应的气体成为还原尾气,需送至干法回收装置进行分离精制,以实现原料的循环利用<sup>[1]</sup>。在此工艺中,多个单元操作中的工艺介质如氢气、氯硅烷混合气体、尾气、氮气、压缩空气等,均需要使用压缩机对其进行加压,为整个系统的运行提供动力。因此,压缩机的使用情况对整个多晶硅生产系统的稳定至关重要。

## 1 压缩机分类

按压缩气体的原理不同,可以将压缩机分为 2 大类:动力式压缩机和容积式压缩机<sup>[2]</sup>。

动力式压缩机是通过提高气体运动速度,将其动能转化为压力能来提高气体压力的压缩机,此类

压缩机可根据结构和工作方式进一步细分为透平压缩机(包含轴流压缩机、离心压缩机等)和引射器;而容积式压缩机是通过改变工作腔容积的大小,来提高气体压力的压缩机,可分为往复式压缩机和回转式压缩机,其典型代表主要有活塞压缩机、隔膜压缩机和螺杆压缩机等。

活塞压缩机适用于氢气、氯硅烷混合气等复杂工艺介质的低、中、高压系统;隔膜压缩机适用于高纯、有毒、易燃等零泄漏介质的系统,实现了介质的完全密封,避免了泄漏风险,同时保证了介质的高纯度;螺杆压缩机适用于压缩空气、氟利昂等洁净介质的系统,利用其压缩过程平稳、噪声低、排气温度低等特点,确保了系统的高效稳定运行。

在多晶硅生产过程中,由于压缩机数量大、主工艺介质成分复杂以及工况相对恶劣,对压缩机的电耗及安全稳定性要求极为严格。某多晶硅企业压缩机的使用情况,如表 1 所示。

活塞压缩机因其构造简单、操作方便、安全稳定、维护成本低以及相对经济的价格等显著优势,在多晶硅生产系统中得到了广泛应用。从表 1 可以看

[收稿日期] 2024-09-20

[第一作者] 杜俊平(1979—),男,山西晋中人,高级工程师,硕士,主要从事多晶硅及硅基电子气体的研究、设计和生产管理等工作。

表 1 某多晶硅生产企业压缩机使用情况统计

Table 1 Statistical table of compressor usage in a polysilicon production enterprise

压缩机类型	压缩空气/台	压缩氟利昂/台	压缩氢气、氯硅烷/台	合计/台	使用占比/%
活塞压缩机	0	0	74	74	58.27
螺杆压缩机	6	34	5	45	35.43
隔膜压缩机	0	0	5	5	3.94
离心压缩机	3	0	0	3	2.36

出,活塞压缩机使用占比接近 60%,尤其在氢气、氯硅烷系统中,其应用比例更大。然而,由于对介质洁净度、工况稳定性的严格要求以及电耗因素考虑,螺杆压缩机、隔膜压缩机和离心压缩机在多晶硅主工艺系统中应用相对较少,这体现了不同压缩机类型在适应特定工艺需求方面的差异化特点<sup>[12-14]</sup>。

## 2 活塞压缩机结构

活塞压缩机主要由机体、曲轴、轴瓦、连杆、十字

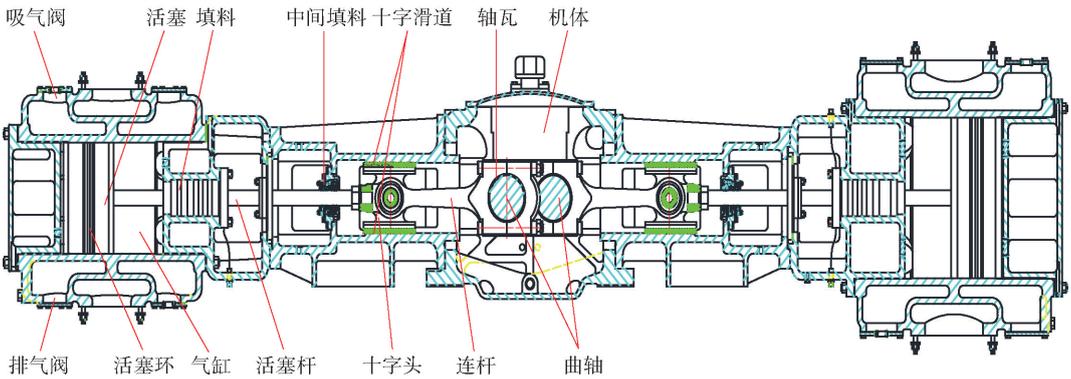


图 1 活塞压缩机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of piston compressor structure

要用来压缩高纯氢气、氯硅烷、氢气和氯硅烷的混合气体,用于干法回收系统、氯化系统、氢气纯化系统、氢气回收系统、尾气回收系统等生产系统<sup>[4]</sup>。

### 3.1 主要故障

基于活塞压缩机的结构原理及生产操作经验,在多晶硅生产系统中,活塞压缩机在运行过程中主要可能出现以下几种故障。

1) 压缩机运转部件如活塞环、活塞杆、气阀、填料及轴瓦等易发生磨损,影响压缩机的正常运转效率。

2) 润滑系统故障可能导致压缩机润滑不足,进而引发设备损坏。

3) 工艺参数的波动可能引起压缩机故障,需严

格监控并调整工艺参数,以确保压缩机的稳定运行。

头、活塞杆、活塞、填料、气缸、气阀、主电机等部分组成<sup>[3]</sup>,如图 1 所示。主电机带动曲轴转动,曲轴通过连杆将圆周运动转换为往复直线运动,连杆通过十字头和活塞杆连接,活塞杆拉动活塞在气缸内做往复运动,气缸容积周期性变化,通过单向流通的气阀控制气缸进气和排气,从而实现气体的压缩。

## 3 活塞压缩机故障分析及优化措施

在多晶硅生产的主工艺系统中,活塞压缩机主

格监控并调整工艺参数,以确保压缩机的稳定运行。

### 3.2 原因分析

为探究多晶硅生产中活塞压缩机的故障特性,本研究对某多晶硅生产企业于 2021—2023 年期间 74 台活塞压缩机所发生的故障进行了系统统计,见表 2。该统计结果为进一步分析故障成因、优化设备维护策略及提升生产稳定性提供了数据支撑。

#### 3.2.1 运转部件磨损成因分析

运转部件的磨损主要由压缩介质中含有的粉尘所致,其具体为以下几方面:①当含粉尘介质通过气缸时,粉尘会造成活塞环、支撑环磨损,若未能及时检测并处理,磨损将进一步扩展至活塞和气缸套,当粉尘在气缸集聚严重时甚至可能导致撞缸事故;

表 2 某多晶硅生产企业 74 台活塞压缩机故障统计表  
Table 2 Fault statistics table of 74 piston compressors of a polysilicon production enterprise

年份	运转部件 磨损/次	润滑系统 故障/次	工艺参数 变化/次	年故障/ 次
2021	17	13	6	36
2022	6	4	1	11
2023	3	2	1	6
合计	26	19	8	53
占比/%	49.06	35.85	15.09	100

②粉尘进入气阀通道,会导致气阀阀片磨损和泄漏,同时,粉尘在气阀内部的集聚将减小阀片升程,进而降低气体处理量;③粉尘进入填料后,会在填料间隙中集聚,导致填料环间隙减小、卡阻以及温度升高<sup>[5]</sup>,这些因素将进一步导致填料环和活塞杆抱死,进而引发填料和活塞杆磨损;④氯硅烷从磨损的填料处进入润滑油系统,导致润滑油变质并腐蚀轴瓦,进而引起轴瓦磨损;⑤在环境温度变化、系统开停等情况下,管道内的压缩介质会出现液化现象,液体进入压缩机发生液击,压缩机运转部件磨损加剧,严重液击时,可能导致气缸发生破裂泄漏或者运转部件过负荷损坏。以上分析表明,压缩介质中的粉尘含量对活塞压缩机的运转部件磨损具有显著影响。

### 3.2.2 润滑系统故障的成因

润滑系统故障的主要成因为润滑油的污染变质。具体而言,当填料磨损导致泄漏或填料尾气管道排气不畅时,压缩介质渗入润滑油系统,其中氯硅烷与润滑油发生化学反应,导致润滑油变质并呈现强酸性,同时生成油泥。这一过程对润滑系统造成多方面影响:①酸性润滑油腐蚀轴瓦,导致轴瓦间隙增大、油压下降;②油泥堵塞油过滤器和油路管道,并在轴瓦间隙集聚,造成轴瓦润滑不良,进而引发轴瓦温度升高、轴瓦磨损、曲轴磨损以及油封磨损;③氯硅烷在润滑油系统的油呼吸口形成水解物堵塞呼吸口,导致氢气在油箱内集聚,形成安全隐患;④润滑油泵选型不合理及油路管道设计缺陷,导致油泵和管道振动过大,进而引发油泵联轴器磨损、油泵损坏以及油路管道泄漏事故。

### 3.2.3 工艺参数变化对压缩机故障影响的分析

多晶硅生产工艺工况复杂,导致压缩机运行受

环境、设备、人员操作等多重因素影响,进而引发故障。①夏季环境温度的升高和太阳暴晒使压缩机进口管道温度持续上升,导致压缩机负荷增大,出口温度随之升高,甚至触发压缩机的联锁保护程序引起压缩机跳车;②冬季环境温度低,导致工艺介质在压缩机进口管道内部分液化,液体进入压缩机气缸导致压缩机发生液击现象<sup>[6]</sup>;③上下游工艺操作异常可导致压缩机进口压力高、排气压力高,引起压缩机超负荷或者联锁跳车;④压缩机运行过程中因设备振动,引起仪表电气接线松动、磨损等,导致压缩机运行数据误报联锁停车。

从表 2 可以看出,运转部件磨损和润滑系统故障在活塞压缩机故障中占比达到 85%。因此,采取措施控制以上故障的发生频率,将能有效降低活塞压缩机的整体故障率。

### 3.3 优化措施

活塞压缩机在多晶硅生产中具有广泛的应用场景,针对不同工艺系统实施有针对性的优化措施至关重要。

1)降低压缩介质粉尘含量。优化工艺流程,在工艺系统中设置淋洗(湿法除尘工艺)、过滤(设置过滤器)及静电吸附等工艺的装置,以尽量避免粉尘进入压缩机。同时,确保压缩介质成分、温度和压力的稳定,避免工况变化产生粉尘。

2)提高填料密封效率。通过优化改造压缩机填料密封结构和密封气管路系统,可有效避免含氯硅烷介质进入润滑油系统。具体措施包括取消填料水夹套冷却功能、加大填料密封气流量通道、增加填料内部密封环组数<sup>[7]</sup>,并将平面密封填料环更换为凹凸面密封填料环<sup>[8]</sup>,采用耐磨损材料。此外,根据密封气功能不同,将填料密封气管路分开设置,实现压力、流量的独立控制,并确保密封尾气管道管径足够、放空管道独立配置且处于微正压状态,同时设置密封尾气流量检测设施,以监控泄漏量并及时更换填料<sup>[9-11]</sup>。

3)提升操作管理能力。建立科学的设备管理制度,能够有效降低活塞压缩机的故障率、减轻人员劳动强度并维持生产系统稳定。具体措施包括:明确包机人员、检修监护人员、巡检人员等各级管理人员职责;制订设备巡检管理规定,规范巡检方法、巡检内容,并制订对应的考核办法,以期及时发现设备异常并立即采取措施;制订设备润滑管理规定,明确

工作内容和方法,保障设备润滑到位使设备稳定运行;制订设备定期切换规定、盘车管理规定、定期维护规定、检修管理规定,保证备用设备正常备用,有计划进行检查、检修,并把电气、仪表定期排查纳入定期检修计划,避免事故发生。同时,对易磨损、易泄漏位置采取生命周期管理,建立相应台账,以摸索设备、管道、备件的使用周期,并在安全周期内提前

进行停车更换。

4)压缩机选型合理。为深入分析不同类型活塞压缩机在多晶硅生产中的故障特性,对某多晶硅企业在2021—2023年使用较多的D型活塞压缩机(气缸对称平衡,相对两列气缸中心线夹角 $180^\circ$ )和L型活塞压缩机(角度式压缩机,相对两列气缸中心线呈L型)故障发生次数进行统计,如表3所示。

表3 2021—2023年不同类型活塞压缩机故障统计  
Table 3 Failure statistics of different types of piston compressors from 2021 to 2023

类型	系统	主电机直连数/ 台	故障数/次	主电机皮带 连接数/台	故障数/次	年故障率/%
D型活塞压缩机	干法回收	16	3	—	—	62
	氢化	28	7	—	—	
	氢气回收	4	7	—	—	
	尾气回收	5	16	—	—	
	合计	53	33	—	—	
L型活塞压缩机	干法回收	—	—	3	4	129
	氢化	—	—	11	14	
	氢气回收	2	2	5	7	
	合计	2	2	19	25	
总计		55	35	19	25	
年故障率/%			64		132	

从表3可以看出,D型活塞压缩机故障率明显低于L型活塞压缩机,其主要原因在于D型活塞压缩机相对L型活塞压缩机振动小、运行稳定。在空间允许的情况下,应优先选用D型活塞压缩机。对比主电机与压缩机连接方式,直连方式故障率明显低于皮带连接,其主要原因是皮带连接稳定性差、故障点多、占用空间大,应尽量避免使用皮带连接。

根据压缩机工作压力,选择适当的压缩级数,控制压缩比在合理范围(根据生产运行经验,建议每级压缩机压缩比 $\leq 2.8$ ),并选用与需求气量接近的机型,以避免能源浪费。选用能有效避免工艺介质泄漏的填料,配备完善的密封气系统,以避免填料环磨损时工艺介质泄漏进入润滑油系统<sup>[9]</sup>。在选择气阀时,洁净的压缩介质可以选择效率较高的网状阀片气阀,而对于含粉尘较多的压缩介质,则建议选用蘑菇气阀<sup>[10-12]</sup>。

通过实施上述4点优化措施,某企业在2021—

2023年间的74台活塞压缩机年故障次数从36次降低至6次,故障率下降83.33%,优化效果显著,验证了所采取策略的有效性。

## 4 结语

1)本研究深入探讨了活塞压缩机在多晶硅生产工艺中的关键应用及其故障影响。结果表明,作为对主工艺介质氯硅烷和氢气加压的核心设备,活塞压缩机的运行故障不仅会导致生产系统波动和成本上升,且因氯硅烷、氢气等介质的易燃易爆特性,显著增加了企业的安全运行风险和人员劳动强度。

2)通过统计分析,明确了压缩介质含粉尘、润滑油污染变质以及工艺参数受多因素影响变化为故障主因。基于此,提出了针对性的优化改进策略,包括降低压缩介质粉尘含量、提升填料密封效率、加强操作管理能力及优化设备选型等。实施这些策略可有效降低故障频率,保障压缩机长期稳定运行,进而

避免安全和环保事故。

本研究为多晶硅生产中活塞压缩机的优化应用提供了理论依据和实践指导,为企业带来显著的经济效益。

#### [参考文献]

- [1] 王晓英,王宇光,谷新春,等.多晶硅制备工艺及发展趋势[J].化工进展,2013,32(6):1336-1340.
- [2] 中国机械工业联合会.压缩机分类:GB/T 4976—2017[S].
- [3] 王迪生.活塞式压缩机结构[M].北京:机械工业出版社,1990.
- [4] 张志国,陈虎,陈杰.氢气压缩机对多晶硅质量影响及改进方法[J].中国石油和化工标准与质量,2011,31(9):65,67.
- [5] 王麦见,吴非,鲁来勇.往复式氢气压缩机故障分析及解决措施[J].广东化工,2012,39(12):217.
- [6] 渠柏松.氢气压缩机故障诊断探究[J].设备维修与管理,2016(2):71-73.
- [7] 鞠德胜.含氯硅烷气体类氢压缩机的改造思路[J].广东

科技,2011(4):46-47.

- [8] 蒋国瑜,章莉.多晶硅工厂常用活塞压缩机运行故障分析[J].化工管理,2019(10):164-165.
- [9] 王亚珍,车福乾.循环氢压缩机填料密封装置的改进[J].现代制造工程,2005(11):122-124.
- [10] 马文礼.加氢装置往复压缩机气阀的优化设计及改造[J].压缩机技术,2022(5):62-64.
- [11] 杨永亮,石何武,张升学,等.多晶硅清洗装备及技术发展展望[J].有色设备,2020,34(6):1-4.
- [12] 曾晓国,张伟,张晓伟.多晶硅行业直接式电加热器常见故障分析及优化[J].有色冶金节能,2020,36(4):47-49,57.
- [13] 张宏涛,王红雪,董宪姝,等.退役晶硅光伏太阳能电池中有价组分的回收工艺研究[J].湿法冶金,2024,43(5):583-591.
- [14] 石蕾,张玉杰,王姣,等.硅冶炼烟气脱硫脱硝副产物结晶研究[J].硫酸工业,2021(9):15-19.

## Failure analysis and optimization measures of piston compressors in polysilicon production

DU Junping, LU Xiangfei, YANG Yonggang

(Luoyang China Silicon Corporation Ltd, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** In the polysilicon production process, the pressurization of key process gases such as hydrogen and chlorosilanes primarily relies on piston compressors. This paper systematically elaborates on the structural characteristics of piston compressors and conducts a statistical and analytical examination of the causes of three common types of failures observed in the piston compressors used by a certain polysilicon production enterprise. Four optimization measures are proposed, including reducing the dust content in the compressed medium, enhancing the efficiency of packing seals, strengthening operational management capabilities, and optimizing the rational selection of equipment. The implementation results demonstrate that these measures have effectively reduced the failure rate of plunger compressors by 83.33%, significantly enhancing the safety and stability of the polysilicon production system, thereby bringing substantial safety and economic benefits to the production enterprise.

**Keywords:** polysilicon; piston compressors; chlorosilane; fault analysis; optimization measures; safety benefits; economic benefits

