

# 屏蔽泵在多晶硅生产中的故障分析及改进措施

曾晓国<sup>1</sup>, 张晓伟<sup>2</sup>, 万 焯<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 洛阳中硅高科技有限公司, 河南 洛阳 471023)

[摘 要] 多晶硅生产过程中的氯硅烷属于危险化学品, 为保证物料输送过程中不出现任何泄漏, 一般选用屏蔽泵。本文介绍了屏蔽泵的结构, 简述了屏蔽泵在多晶硅行业的使用情况, 分析了屏蔽泵的常见故障, 对故障的表现形式和原因进行了统计和分析, 指出了屏蔽泵故障与物料及生产操作的关系, 最后提出了在设备布置、设计选型和生产使用等方面的一些改进措施, 以保证屏蔽泵的安全稳定运行。

[关键词] 多晶硅; 氯硅烷; 屏蔽泵; 故障分析; 改进措施

[中图分类号] TF843.5; TN304.1+2 [文献标志码] B [文章编号] 1672-6103(2021)02-0064-04

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.02.012

多晶硅是信息产业和太阳能光伏发电产业的关键原材料, 全球多晶硅产业化生产工艺有三氯氢硅氢还原法(又称改良西门子法)和硅烷流化床法两种工艺, 前者占世界总产能的95%, 是多晶硅生产的主流工艺<sup>[1-2]</sup>。多晶硅生产属于典型的化工过程, 生产过程的物料涉及四氯化硅、三氯氢硅、二氯二氢硅等氯硅烷工艺介质和导热油、氟利昂等公用工程介质, 大部分属于易燃、易爆、有毒、有害介质, 故在此类物料的输送过程中一般选用屏蔽泵, 以保证物料的零泄漏, 避免造成生产事故及环保问题<sup>[3-5]</sup>。

## 1 屏蔽泵的结构

屏蔽泵主要由泵体、叶轮、轴承、轴套、推力盘、定子、转子和屏蔽套等组成(图1)。普通离心泵的驱动是通过联轴器将泵的叶轮轴与电动轴相连接, 使叶轮与电动机一起旋转而工作。而屏蔽泵是一种无密封泵, 泵和驱动电机都被密封在一个被泵送介质充满的压力容器内, 此压力容器只有静密封, 由一个电线组来提供旋转磁场并驱动转子。这种结构取消了传统离心泵具有的旋转轴密封装置, 故能做到完全无泄漏<sup>[6]</sup>。

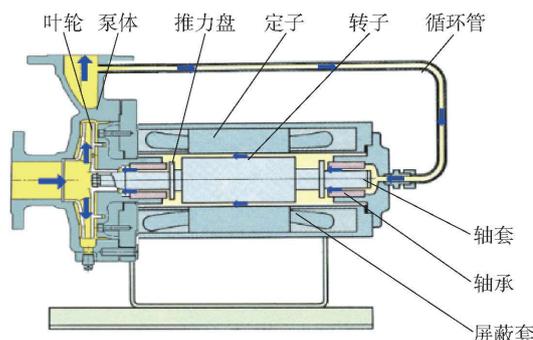


图1 屏蔽泵结构简图

## 2 屏蔽泵常见故障及分析

在多晶硅生产中, 屏蔽泵输送的物料主要为氯硅烷、导热油和氟利昂等。在国内某大型多晶硅企业的生产过程中, 屏蔽泵共计使用两百多台, 其中66%用于氯硅烷输送, 22%用于导热油输送, 12%用于氟利昂输送。

### 2.1 故障原因

在屏蔽电机工作时, 一小部分输送液体进入定子、转子屏蔽套之间的间隙和轴承, 形成冷却液的循环。定子绕组的电流损失、铁心能量损失以及屏蔽套的涡流损失等产生的热量都将由循环冷却液带走, 以保证定子绕组的温度低于绝缘等级要求, 同时提供轴承、轴套、推力盘的润滑液膜并带走摩擦热量<sup>[7]</sup>。若冷却液夹带杂质或冷却液流量不足, 会出现轴承与轴套、轴承与止推盘之间的流动

[作者简介] 曾晓国(1982—), 男, 湖南邵东人, 硕士, 高级工程师, 主要从事多晶硅研究及设计工作。

[收稿日期] 2020-08-20

液膜遭破坏,无法带走摩擦热<sup>[8]</sup>。如果没有及时处理,热量将在定子和转子聚集积聚,局部表面达到介质汽化温度后,形成腔内汽阻,该点冷却液断流,使得轴承与轴套或推力盘接触干磨,加速故障的发生。

## 2.2 故障统计及分析

由于导热油和氟利昂物料比较干净,屏蔽泵发生故障情况非常少,故本文研究的故障统计及分析主要以氯硅烷屏蔽泵为主要对象,实际运行中,屏蔽泵的故障表现形式见表1,故障原因分析见表2。

表1 屏蔽泵故障表现形式情况表

分析项	故障表现形式								年故障/次	年故障频率/次·台 <sup>-1</sup>
	A	B	C	D	J	K	N	Q		
0~8 000 h(第一年)	26	16	19		3	4	4	6	78	0.91
8 000~16 000 h(第二年)	5	8	17	6	9	1	1	3	50	0.60
16 000 h至今(第三年)	1	1	11	1	2	2		1	19	0.44
单项故障总计/次	32	25	47	7	14	7	5	10	147	
故障占比/%	21.8	17.0	32.0	4.75	9.5	4.75	3.4	6.8	100.0	

注:A表示泵体过热,尾管温度高;B表示运行声音异常,震动大;C表示TRG黄区或红区;D表示电机绝缘低;J表示泵出口掉压;K表示突然跳停;N表示无法启动,开启无压力、叶轮不转;Q表示其他故障。

表2 屏蔽泵故障原因情况表

分析项	故障原因						年故障/次	年故障频率/次·台 <sup>-1</sup>
	T	W	X	Y	Z	V		
0~8 000 h	2	2	56	5	6	7	78	0.91
8 000~16 000 h	3	2	31	1	7	6	50	0.60
16 000 h至今	3	1	11		2	2	19	0.44
单项故障总计/次	8	5	98	6	15	15	147	
故障占比/%	5.4	3.4	66.7	4.1	10.2	10.2	100.0	

注:T表示转子屏蔽套损坏;W表示定子绕组损坏;X表示石墨或碳化硅轴承、轴套和推力盘等磨损;Y表示定子屏蔽套损坏;Z表示叶轮磨损(一般发生于多级泵);V表示其他故障原因。

从表1和表2可以看出,屏蔽泵出现故障的表现形式主要集中在A(泵体过热,尾管温度高)21.8%、B(运行声音异常,震动大)17%和C(TRG黄区或红区)32%。轴承、轴套和推力盘等磨损是屏蔽泵发生故障的最主要原因,占66.7%,加上定子和转子屏蔽套磨损及叶轮磨损时一并发生的轴承、轴套和推力盘等磨损,共占86.4%。诱发轴承、轴套和推力盘等磨损一般都是因为气蚀导致润滑液短缺,使得润滑液吸收电动机的热量和轴承摩擦热量在转子腔汽化,造成滑动轴承的干摩擦破坏<sup>[9]</sup>。

氯硅烷屏蔽泵平均故障率呈下降趋势,从第一年的0.91次/台至运行第三年时的0.44次/台,主要原因分析如下:一是屏蔽泵在投产初期由于管道较脏,而屏蔽泵是依靠所输送的液体来润滑和冷却的,一旦固体颗粒进入冷却系统,容易导致堵塞,而

使轴承和轴套发生干磨而损坏;二是投产初期管道内铁锈、焊渣等杂质易堵塞滤网,从而导致泵抽空、泵剧烈震荡,送不上液体,使轴承和轴套发生干磨而损坏;三是运行一段时间后,系统稳定,物料相对比较干净,泵运行也就较为稳定,故障率就相应降低。定子和转子屏蔽套故障和电机烧毁等故障也较多,主要集中在SiCl<sub>4</sub>多级泵,主要是因为SiCl<sub>4</sub>物料比较脏,固体颗粒含量较多,容易造成泵前过滤器堵塞或泵轴冷却循环系统堵塞,从而导致泵气蚀。加之多级泵叶轮多,一旦发生气蚀震动极大,易造成轴承破碎,碎片进入定子和转子屏蔽套间隙后,会导致屏蔽套磨损,从而使得介质侵蚀电机绕组使绕组损坏。

## 2.3 屏蔽泵故障与物料的关系

屏蔽泵发生故障跟物料的干净程度关系非常大,SiCl<sub>4</sub>输送泵和残液输送泵极易发生故障,原因

如下:一是因为四氯化硅物料比较脏,固体颗粒,如硅粉等较多,容易导致泵内循环冷却系统堵塞,而使轴承和轴套发生干磨损坏;二是四氯化硅物料内的颗粒物,易堵塞过滤器,发生气蚀,使得泵剧烈震荡,送不上液体,导致轴承和轴套损坏,也易导致叶轮损坏;三是过滤网损坏后脏物进入泵体,导致泵轴承损坏,进而屏蔽套损坏。

屏蔽泵发生故障跟物料的沸点关系较大,二氯二氢硅沸点低,易汽化,输送时易导致气蚀。还原尾气分离回收的氯硅烷屏蔽泵出现故障较少,主要是由于物料温度很低,难汽化。导热油屏蔽泵发生故障非常少,主要是由于导热油比较干净,成分稳定且不易气蚀。氟利昂屏蔽泵发生故障也非常少,主要是由于氟利昂十分干净,温度低且不易气蚀。

#### 2.4 屏蔽泵故障与生产操作的关系

屏蔽泵故障与生产操作的关系比普通的离心泵要大得多,正确合理的操作可以大大减少故障的发生。屏蔽泵故障大部分原因都是由气蚀引起的,可能引起气蚀的原因一是过滤器堵塞,压力降大,二是储罐备压低,或液位低,而巡检时未及时发现压力表变化,或DCS上未及时发现流量降低,从而导致部分氯硅烷液体汽化或液体量不足,不能对轴承、定子屏蔽套等起到较好的冷却作用。屏蔽泵发生故障一般会引起声音异常、泵体震动、表面温度高、压力波动或TRG表异常等,这都需要现场巡检人员细心、认真负责。现场巡检人员一旦大意,未能及时发现初始症状,就会导致屏蔽泵故障发生。因为屏蔽泵一旦发生气蚀,能在极短时间,有时可能2~3 min就能使完好的轴承损坏。因此,屏蔽泵故障与生产操作的关系也是非常大的,要求日常巡检或操作要认真,应能够及时发现泵运行中的不正常现象,如泵体及轴承温度异常、声音异常、压力流量异常、电流异常等,并正确处理。

### 3 讨论与建议

#### 3.1 屏蔽泵的选型

对于输送物料比较脏的屏蔽泵,如 $\text{SiCl}_4$ 输送泵、残液泵和粗馏塔底泵等,可选用泥浆型屏蔽泵。泥浆型屏蔽泵通过某些方式持续输出清洁介质给转子腔补液,一是可以避免主泵内含有颗粒的介质进入主泵的转子腔损坏滑动轴承,二是即使过滤器堵塞,发生气蚀,也只会对叶轮产生损坏,而不会导致

轴承轴套缺液干磨而损坏。

对于易出现故障的屏蔽泵,可以增加空转(缺液)保护装置或电路保护器,一旦流量大幅度下降,如过滤器堵塞或气蚀,可自动切断电流,使电机停止运转,防止事故发生。此外还可以在转子腔内,增加温度监测装置。

#### 3.2 屏蔽泵的布置

由于屏蔽泵发生故障大部分都是由气蚀引起的,为减少屏蔽泵发生气蚀,可以采取以下两类手段:一是尽量选用气蚀余量较低的泵,这是由泵结构决定的,如增加诱导轮,加大叶轮进口处直径等<sup>[10]</sup>;二是尽量提高屏蔽泵的有效汽蚀余量,需要优化设备及管道布置。具体措施如下所述。

1)降低泵的安装高度。采取措施:一是尽可能降低泵的基础高度;二是提高储罐基础高度(如提高整个罐区的基础高度),如将提纯塔的回流罐放置在建筑结构的二层,而泵放置在一层。

2)降低泵送液体温度。采取措施:在易发生气蚀的屏蔽泵前管道加夹套冷却。

3)保证密封储罐的备压,因为随着密封储罐液位降低,储罐上方的气体压力也会降低。

4)提高泵的吸入性能,减少吸入管道阻力。采取措施:加大吸入管道直径、减少管道长度和弯头数量,并采用大曲率半径的弯头。

5)对于经常发生过滤器堵塞的屏蔽泵,如 $\text{SiCl}_4$ 输送泵,可将Y型过滤器改为提篮式过滤器,因为提篮式过滤器滤筒过滤面积大(可容杂质的体积比Y型过滤器大70倍以上),堵塞频率小,且清洁方便。

6)对于经常发生过滤器堵塞的屏蔽泵,如 $\text{SiCl}_4$ 输送泵,可以考虑在过滤器前后设置差压检测装置,一旦过滤器出现堵塞,可以第一时间发现故障。

#### 3.3 屏蔽泵的使用

屏蔽泵故障率与生产使用关系较大,合理的使用和维护能大大减少故障的发生。

1)对于经常堵塞的泵前过滤器,建立定期清理过滤器机制<sup>[11]</sup>。投产初期或停工大修后初期,由于管道较脏,铁锈、焊渣等杂质易堵塞滤网,需要缩短定期清理过滤网的周期。

2)屏蔽泵启动稳定运行15 min内不离场,新修泵运行初期每半小时检查不少于1次,确保能够及时发现泵运行中的不正常现象,并正确处理。

3) 必须在允许的流量范围内操作,不能在极限范围以外进行操作。泵处于小流量运行时,部分叶轮加压的输送介质没有排出,温度逐渐升高,使得部分介质汽化,造成滑动轴承组件表面温度急剧上升,部件磨损,最终导致破碎<sup>[12]</sup>。

4) 尽量减少启、停操作次数,避免频繁切换机泵。在启停设备瞬间,设备内的各零部件受力不均,摩擦严重,易造成零部件疲劳运转。

5) 建立完善的屏蔽泵故障记录机制,操作人员记录故障发生时的详细表现现象,维修人员记录泵拆卸后的内部损坏详情,及时分析每一台屏蔽泵发生故障的可能原因,以避免同样故障再次发生。

## 4 结语

屏蔽泵在多晶硅生产中主要用于易燃、易爆、有毒、有害介质的输送,具有完全无泄漏的结构特点,可避免物料输送中发生跑、冒、滴、漏问题,是多晶硅生产中极为重要的设备。针对多晶硅生产过程中氯硅烷介质的特点,在屏蔽泵的设备选型、设计布置和生产使用等方面进行优化改进,才能保证其长期稳定运行,避免安全和环保事故的发生。

## [参考文献]

- [1] 严大洲,杨永亮,张升学,等.多晶硅耗能分析与节能实践[J].电子科学技术,2014,2(1):224-230.
- [2] 王勃华,王世江,王亮.2019—2020年中国光伏产业年度报告[R].中国光伏行业协会秘书处,2020.
- [3] 邓丰,唐正林.多晶硅生产技术[M].北京:化学工业出版社,2010:7-8.
- [4] 李俊杰,秦琴,曾晓国.多晶硅生产过程危险因素分析及防控措施[J].有色冶金节能,2019,35(6):15-18.
- [5] 李俊杰,秦琴,曾晓国.多晶硅生产过程中的环保管控[J].有色冶金节能,2020,36(1):54-58.
- [6] 陈世亮,董为勇.屏蔽泵的结构特点及关键技术[J].通用机械,2005(7):22-24.
- [7] 郭松.屏蔽泵在多晶硅装置中的应用[J].石油和化工设备,2018(3):32-37.
- [8] 李志刚.论屏蔽泵在多晶硅生产中的维护使用[J].内蒙古科技与经济,2012(12):100-104.
- [9] 杨贵花,文庚,冶红,等.屏蔽泵异常振动原因分析与解决措施[J].化工机械,2019(46):582-584.
- [10] 张胜国,吴金亮,何万宏,等.屏蔽泵叶轮异常磨损分析及稳定运行预防维护措施[J].合成技术及应用,2018,33(33):7-41.
- [11] 仲重州,冯永江,丁生华.屏蔽泵轴承失效原因分析及预防措施[J].化工机械,2018,45(5):608-610.
- [12] 李伟明,李宁,段志宏.屏蔽泵的振动原因分析及解决对策[J].机电工程技术,2020,49(7):214-216.

## Fault analysis and improvement measures of shield pump in polysilicon production

ZENG Xiao-guo, ZHANG Xiao-wei, WAN Ye

**Abstract:** Chlorosilane in polysilicon production process belongs to hazardous chemicals. In order to ensure that there is no leakage in the material transportation process, shield pump is generally selected. This paper introduces the structure of the shield pump, briefly describes the use of the shield pump in the polysilicon industry, analyzes the common faults of the shield pump, makes statistics and Analysis on the forms and causes of the faults, points out the relationship between the faults of the shield pump and the materials and production operation, and finally puts forward some improvement measures in the aspects of equipment layout, design and selection, production and use, so as to ensure that Safe and stable operation of canned motor pump.

**Key words:** polysilicon; Chlorosilane; shield pump; fault analysis; improvement measures