

Research Article

Application of Oil-free Screw Compressor in Hydrogen Chloride Mixed Gas Compression

Wang You-cai* , Xu Chun-cheng , Cui Zhou-bo , Zhu Yi-shi , Wu Lin-rui ,
Wang Yao-de , Wang Yan , Gao Wei-kang 

Technical Department, Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai, China

Abstract

Aiming at the difficult to recover hydrogen chloride mixed tail gas generated during the production of lithium bis(fluorosulfonyl)imide (LiFSI), the PRO II process simulation software was adopted to optimize the parameters of the compression condensation recovery process in this paper. Considering equipment investment, operating energy consumption and anti corrosion risks comprehensively, the optimal process parameters were determined, with the final compressor pressure of 2.0MPaG and condensation recovery temperature of 0°C. By comparing the advantages and disadvantages of reciprocating compressors and oil injected screw compressors, a two stage series oil free screw compressor was selected as the pressurization equipment. High temperature corrosion caused by acidic gas was inhibited by upgrading the compressor casing and rotor to 2205 duplex steel material and using thionyl chloride as the special internal liquid spraying medium. A three stage composite sealing structure consisting of front labyrinth, double end dry gas and isolation comb tooth seals was designed to achieve zero leakage of process gas. The industrial operation results of the LG58/0.0 2.0 unit show that under working conditions with wide fluctuations of inlet pressure (0–0.01MPaG) and inlet temperature (–10–10°C), the discharge pressure of the unit remains stable, the outlet temperature can be steadily controlled within 70–75°C, no medium leakage or oil contamination occurs, and the purity of recovered hydrogen chloride products meets process requirements. This complete oil free screw compression solution can provide engineering references for pressurization recovery and equipment selection of strongly corrosive mixed gas in the lithium battery and fluorine chemical industries.

Keywords

Oil-free Screw Compressor, Hydrogen Chloride Mixed Gas, Gas Compression, Condensation Recovery

无油螺杆压缩机在氯化氢混合气体压缩中的应用

王有才*, 徐春成, 崔周波, 朱夷诗, 巫林芮, 王耀德, 王炎, 高伟康

中船船舶集团有限公司第七一一研究所技术部, 上海, 中国

*Correspondence: Wang You-cai (compfly@126.com)

Received: 15 July 2026; Accepted: 31 August 2026; Published: 14 September 2026



Copyright: © The Author(s), 2026. Published by Science Publishing Group. This is an **Open Access** article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

摘要

针对双氟磺酰亚胺锂（LiFSI）生产过程产生的氯化氢混合尾气回收难题，本文利用 PROII 流程模拟软件对压缩-冷凝回收工艺开展参数优化。综合设备投资、运行能耗与防腐风险，确定最优工艺参数，压缩机最终压力 2.0MPaG、冷凝回收温度 0℃。通过对比往复压缩机与喷油螺杆压缩机的优缺点，选用两级串联无油螺杆压缩机作为增压设备。通过将压缩机壳体与转子升级为 2205 双相钢材质，并采用氯化亚砷作为专用内部喷液介质，抑制酸性气体高温腐蚀。设计前置迷宫-双端面干气-隔离梳齿三级复合密封结构，实现介质气体零泄露。LG58/0.0-2.0 型机组工业化运行结果表明：在入口压力 0-0.01MPaG、入口温度-10-10℃ 大幅波动工况下，机组排气压力保持稳定，出口温度可稳定控制在 70-75℃，无介质泄漏与油品污染问题，氯化氢回收产物纯度满足工艺要求。该成套无油螺杆压缩方案可为锂电、氟化工行业强腐蚀性混合气体的增压回收及设备选型提供工程参考。

关键词

无油螺杆压缩机，氯化氢混合气体，气体压缩，冷凝回收

1. 引言

氯化氢混合气体广泛应用于氟化工、精细化工、多晶硅制备、锂电锂盐合成等工业领域。该混合气体具有强腐蚀性、易水解、忌油污、组分复杂的特性，其压缩技术是化工生产中的核心难点。传统活塞式、喷油螺杆式压缩机存在油品污染介质、密封易失效、设备腐蚀快、故障率高等问题，难以适配氯化氢混合气体的严苛压缩工况。无油工艺螺杆压缩机同时具备容积式和速度式压缩机的特点[1]，具备气流脉动小、运行可靠、耐脏、适应性强、易损件少和维修操作简单等特点[2]，适合中等压力、中大流量、带液、带尘、介质气易聚合的复杂工艺流程[3]。无油螺杆压缩机在炼油和化工领域工艺气工况下得到了广泛的应用[4]。本文以双氟磺酰亚胺锂（LiFSI）合成工艺副产氯化氢尾气为研究对象，借助 PROII 流程模拟开展压缩 - 冷凝工艺参数优化，选用两级无油螺杆压缩机将尾气增压至 2.0 MPaG，完成工业长周期运行验证，为同类腐蚀性特种气体压缩工程提供设计依据。

2. 工艺流程模拟

目前六氟磷酸锂（LiPF₆）是商用最成功的电解质锂盐，但其热稳定性和化学稳定性较差，阻碍了其在高动力和高储能电池上的应用[5]。双氟磺酰亚胺锂（LiFSI）具有远好于六氟磷酸锂的物化性能，更好的热稳定性、更好的电导率以及更优的热稳定性，使其成为改善六氟磷酸锂的最佳替代品[6]。双氟磺酰亚胺锂作为充电电池的电解液时，能有效降低在电极板表面上的SEI层在低温下的电阻，降低锂电池在放置过程中的容量损失，从而提高电池容量和电池的化学性能。双氯磺酰亚胺（HCLSI）作为合成LiFSI的核心中间体，最为成熟的工艺是利用磺酰胺与二氯亚砷、氯磺酸反应得到[7]，该路线操作简单、收率高、纯度好，是目前国内主流的工艺路线。该工艺路线会产生氯化氢、二氧化硫、氯化亚砷等尾气需要进行回收处理，本文选用工业尾气体工艺参数如下表1所示：

表 1 尾气组成及参数。

序号	名称	单位	数据
1	温度	℃	0
2	压力	MPaG	0
3	组分	Mol%	HCl (60%), SO ₂ (35%), SOCl ₂ (5%)

备注：现场大气压 101KPaA。

混合气体压缩冷凝回收的收率与压缩压力、冷凝温度相关，压力越高，饱和蒸气压对应的液化难度越低，越容易冷凝。冷凝温度越低，饱和蒸气压越低，冷凝回收率越高。高压回收压缩机会增加压缩功耗、增加设备投资，降低设备的稳定性。低温回收需要低温冷冻机组或液氮会增加

加低温制冷功耗及设备投资，同时低温还会造成结霜及冻堵风险。实际应用通常采用中压+冷水冷凝方式，因此需要通过模拟确定压缩压力及冷凝温度。通过PRO II 物流模拟分别考察压缩压力和冷凝温度对回收率的影响，如下表2所示：

表 2 冷凝压力与功耗对照表。

序号	冷凝压力/MPaG	冷凝温度/℃	压缩电耗/kWh	循环水/t/h	制冷电耗/kWh	回收率/%
1	0.5	-40	300	32	594	100
2	1.0	-20	400	51	356	100
3	1.5	-10	470	75	206	100
4	2.0	0	521	95	109	100
5	2.5	5	563	112	66	100

由上表2可以看出，压缩压力较低时压缩电耗较小，但是由于尾气液化回收所需冷凝温度较低，制冷剂低温制冷的制冷系数较低，因此制冷耗电量较高，综合运行成本偏高。随着压缩压力提供，压缩机功耗上升，但由于尾气液化所需温度提高，制冷机所需制冷功耗明显降低，整体综合能耗持续降低。当机组的压缩压力升高到2.0 MPaG后，继续升压至2.5MPaG，压缩机增量功耗与制冷电耗减量功耗差值大幅缩小，但高压下设备投资和腐蚀风险同步上升。设备投资、运行能耗、机组防腐难度，采用压缩排气压缩2.0MPaG作为工艺终压。

3. 压缩机系统设计

3.1. 压缩机结构

无油工艺螺杆压缩机属于容积式压缩机[8]，通过转子与转子之间、转子与壳体之间啮合的过程中容积变化实现气体压缩。压缩机阴、阳转子之间不接触，存在微小间隙，其传动靠后端的同步齿轮实现[9]。无油螺杆压缩机在同步齿轮的带动下，相互啮合做高速转动，连续地“吸入-压缩-排出”气体[10]。无油螺杆压缩机通常采用滚动轴承或滑动轴承，轴承采用润滑油强制润滑，压缩机的工作腔与轴承座由密封装置隔开[11]，用于隔离介质气与润滑油系统，一方面防止介质气漏入润滑油系统破坏润滑油品质，另一方面防止润滑油漏入介质气污染介质气[12]。针对HCl、SO₂混合强腐蚀工况，压缩机壳体及转子材质升级至2205双相钢，大幅降低高温酸性气体的均匀腐蚀与点蚀速率。无油螺杆压缩机结构如下图1所示：

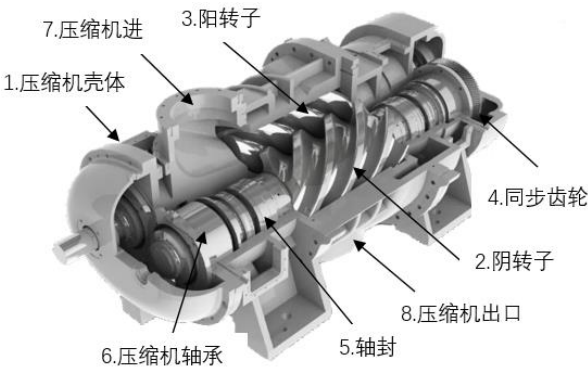


图 1 无油螺杆压缩机结构图。

3.2. 压缩工艺流程

无油螺杆压缩机单级压比一般在4~8之间[13]，由于本项目要压缩到2.0MPaG，因此采用两级串联无油螺杆压缩机。两级串联无油螺杆压缩机由一台主电机通过五轴齿轮箱分别拖动一级压缩机和二级压缩机。需要压缩的介质气首先进入一级压缩机压缩，压缩机后的气体经冷却器冷却，再经过分离器分液后进入二级压缩机压缩，二级压缩机出口同样设置冷却器和分离器，用来冷气体却和分离气体中凝液。螺杆压缩机内部喷入液态氯化亚砷完成近似等温压缩，严格控制压缩机出口温度≤85℃，抑制氯化氢高温腐蚀，机组设计参数如下表3所示：

表 3 无油螺杆压缩机选型参数。

序号	级数	1 级	2 级
1	压缩机入口压力(MPaG)	0	-
2	压缩机入口温度(°C)	0	40
3	压缩机出口压力(MPaG)	0.93	2.03
4	压缩机出口温度(°C)	85	85
5	冷却器后压力(MPaG)	0.9	2.0
6	冷却器后温度(°C)	40	40

备注：压缩机内部喷氯化亚砷液体。

无油螺杆压缩机压缩工艺流程如下图2所示：

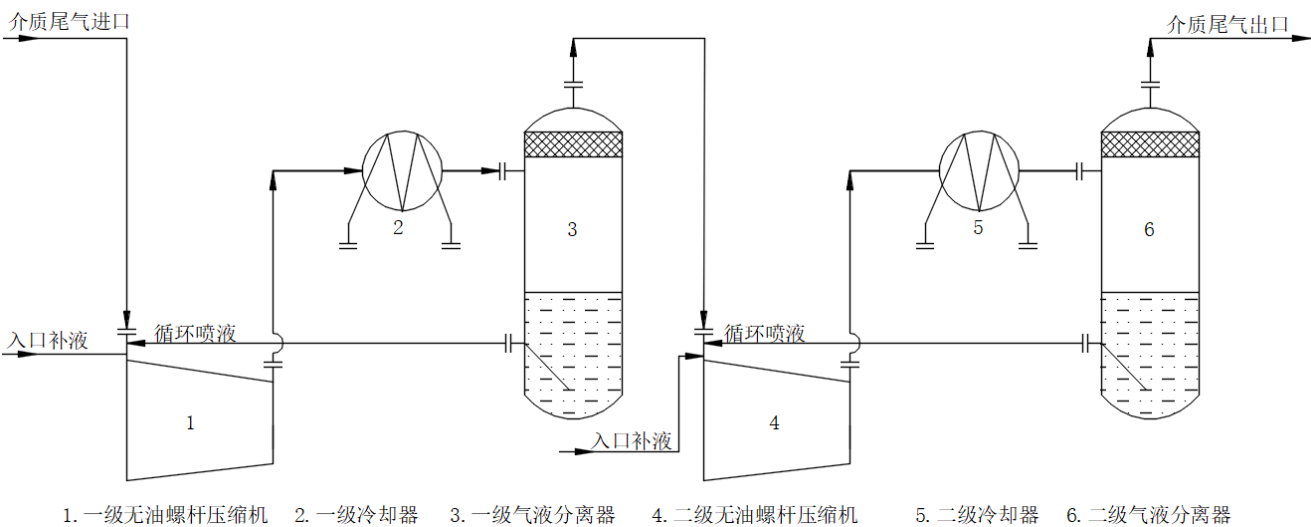


图 2 压缩系统工艺流程。

3.3. 压缩机密封设计

针对腐蚀性气体，单一密封结构容易出现酸洗介质渗透、密封端面容易腐蚀失效的难题。本项目采用前置迷宫密封+双端面干气密封+隔离梳齿密封的三级复合密封结构，前置密封气采用氯化氢气体，可以阻挡机壳内脏的气

体窜到干气密封区域，避免污染密封，主密封气采用氮气可以阻挡机壳内脏的气体窜到干气密封区域，隔离气采用氮气主要作用是防止润滑油污染密封端面[14]。干气密封是将开槽密封技术用于气体密封的一种新型轴端密，适用于工艺气不能被污染的场所，可确保压缩过程中工艺气体的绝对纯净[15]。封密封结构示如下图3所示。

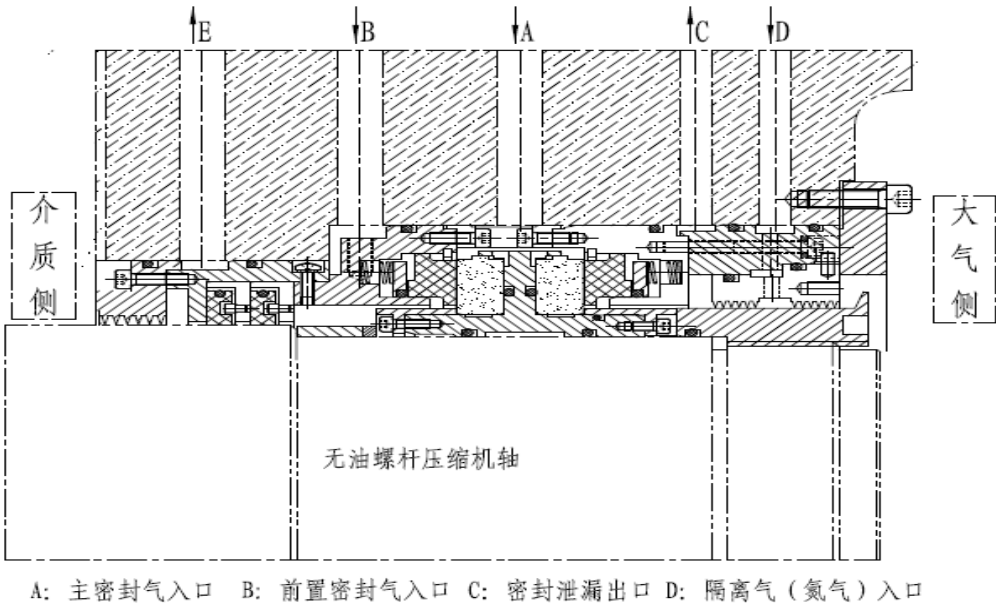


图 3 密封系统示意图。

4. 现场应用分析

本研究选用LG58/0.0-2.0型两级无油螺杆压缩机，先后完成了空气空载试车、工艺气负荷试车，2023年投入工业化连续运行，目前已累计运行2年。压缩机实际运行参数和设计参数如下表4所示。

表 4 设计工况与运行工况对比。

序号	项目	设计工况	运行工况
1	一级入口压力(MPaG)	0	0~0.01
2	一级入口温度(℃)	0	-10~10
3	一级出口压力(MPaG)	0.93	0.92
4	一级出口温度(℃)	85	70~75
5	一级冷却器后压力(MPaG)	0.93	0.9
6	一级冷却器后温度(℃)	40	40
7	一级喷液量(t/h)	3.3	4.5~5.6
8	二级出口压力(MPaG)	2.03	2.03
9	二级出口温度(℃)	85	70~75
10	二级冷却器压力(MPaG)	2.0	2.0
11	冷却器后温度(℃)	40	40
12	二级喷液量(t/h)	1.7	2.2~3.0

由上表4可以看出,压缩机实际入口压力和温度存在大幅波动,但由于无油螺杆压缩属于旋转式容积压缩对工况扰动适应性强,现场排气压力稳定、运行平稳,无机组振动。现场通过提高氯化亚砷喷液流量,将排气温度由设计 85℃降至 70~75℃,显著降低高温酸性气体对转子、壳体的腐蚀速率,延长设备检修周期。复合密封无介质外漏及润滑油污染,氯化氢回收产品纯度稳定达标,设计完全满足使用需求。

5. 结论与展望

本文对氯化氢混合气体压缩回收流程进行了探究、通过 PRO II 流程模拟,设备投资、运行能耗、机组防腐难度,采用压缩排气压缩2.0MPaG作为工艺终压。通过升级压缩机材质,优化复合干气密封系统,匹配氯化亚砷专用喷液介质,解决传统压缩设备腐蚀、故障率高等难点。工业长周期运行验证表明机组工况适应性强,温度、压力波动下运行稳定,低温喷液工艺可有效缓解高温酸性介质腐蚀。随着,国内新能源行业快速发展,锂电池、多晶硅、氟化工、半导体等新型行业对强腐蚀特种气体压缩需求日益增加。本研究无油螺杆压缩成套方案可为同类腐蚀性尾气增压回收工艺改造、新装置设备选型提供成熟工程参考。

参考文献

- [1] 刘剑锋,干式螺杆压缩机在芳烃干气压缩中的应用[J]. 2014, (04): 22-25.
<https://doi.org/10.16051/j.cnki.ysjjs.2014.04.007>
- [2] 马文静,徐延学,周全,崔周波. 无油螺杆压缩机在煤制乙二醇低压排放气回收的研究与应用 [J]. 石油化工设备技术, 2021, 42(4): 40.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8805.2021. 04.010>
- [3] 肖芳,马文静,李敏. 喷油工艺螺杆压缩机的特点及应用分析. 现代化工 [J]. 2012, 32(10): 87.
<https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2012.10.013>
- [4] 舒丹丹,许子通,徐春成,李敏. 入口节流在螺杆压缩机启动过程中的应用研究 [J]. 2026, (02): 7-10.
<https://doi.org/10.16051/j.cnki.ysjjs.2026.02.002>
- [5] 张照坡,张梦蕾,李亚楠. 双氟磺酰亚胺锂的合成 [J]. 2024, 41(08): 18-20.
<https://doi.org/10.14173/j.cnki.hnhg.2024.08.018>
- [6] 刘宇宁,马德龙,马松,王德楼,董玉灿,王才朋,冉升亮 [J]. 2023, 52(1): 77-79.
<https://doi.org/10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2023.01.001>
- [7] 李倩慧,张亚,郑丹丹,李亚楠,孙永明,李富斌,薛峰峰. 双氟磺酰亚胺锂的性能及其在锂离子电池中的应用[J]. 2020, 37: 10. <https://doi.org/10.14173/j.cnki.hnhg.2020.11.003>
- [8] 邢子文. 螺杆压缩机—理论、设计及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [9] 陈彪,王辰. C4 热泵精馏压缩机选型. 石油化工设备技术 [J], 2020, 41(6).
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8805.2020.06.007>
- [10] 丁兆亮,沈冬明,金轩轻,无油螺杆压缩机干气系统的应用 [J]. 2023, (06): 35-38.
<https://doi.org/10.16051/j.cnki.ysjjs.2023.06.009>
- [11] 袁浩,唐昊,何志龙,邢子文. 喷液冷却的两级无油螺杆氨气压缩机性能研究. 设计研究 [J]. 2014, 05.
<https://doi.org/10.16051/j.cnki.ysjjs. 2014.05.002>
- [12] 蔡宏,范年宝. 工艺用无油螺杆压缩机的结构与设计. 流体机械 [J]. 2011, 39(10): 50.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0329. 2011.10.012>
- [13] 马林,胡涛,连小松,蔡宏. 无油螺杆压缩机在液氨精制回收中研究与应用. 应用与测试 [J]. 2013, (01): 53-56.
<https://doi.org/10.16051/j.cnki.ysjjs.2013.01.014>
- [14] 魏希超,压缩机干气密封泄漏分析与处理经验[J]. 2024, 53(01): 75-79.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2024.01.013>
- [15] 刘剑锋,干式螺杆压缩机在芳烃干气压缩中的应用[J]. 2014, (04): 22-25.
<https://doi.org/10.16051/j.cnki.ysjjs. 2014.04.007>