

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-756-05

# 制冷涡旋式压缩机焊点可靠性分析及结构优化

李俊超 殷岳云 徐艳芬 李小丹 许晓飞 朱熠  
(珠海凌达压缩机有限公司 珠海 519100)

**【摘要】** 为了解决制冷涡旋式压缩机在可靠性试验中的焊点泄漏问题, 针对公司某型号涡旋式压缩机进行分析论证。按照可靠性分析模型、可靠性分析试验步骤, 分别从工艺上、设计上两大方面, 进行分析、优化试验、方案验证。试验结果表明, 增加固定焊点数量, 能够有效抵抗压缩机运行过程的应力, 改善压缩机产品整体品质。

**【关键词】** 制冷涡旋式压缩机; 可靠性; 焊点焊接; 应力分析  
中图分类号 TH45 文献标识码 A

## Reliability Analysis and Structure Optimization of the Solder Joint of Refrigeration Scroll Compressor

Li Junchao Yin Yueyun Xu Yanfen Li Xiaodan Xu Xiaofei Zhu Yi  
(Zhuhai Landa Compressor Co., Ltd, Zhuhai, 519100)

**【Abstract】** In order to solve the problem of solder joint leakage in reliability test of refrigeration scroll compressor, this paper analyzes and demonstrates a certain type of scroll compressor in our company. According to the reliability analysis model and test procedure for reliability analysis, from the craft and the design separately two big aspects, carry out analysis, optimization test and scheme verification. The test results show that increasing the number of fixed solder joints can effectively resist the stress during the operation of the compressor, and improve the quality of the compressor.

**【Keywords】** refrigeration scroll compressor; reliability; spot welding; stress Analysis

## 0 引言

近年来, 随着国内压缩机研究技术提升, 开始由家用转子式压缩机朝向商用涡旋式压缩机技术延伸。在产品探索阶段, 我司自主研发的制冷涡旋式压缩机产品, 从手工样机切换成设备生产线生产过程中, 压缩机可靠性测试出现上支架焊点批量泄漏, 泄漏率较高, 严重影响产品的开发推广。产品可靠性异常对涡旋式压缩机开发计划产生的影响:

(1) 切换计划受影响; (2) 大巴空调项目推迟; (3) 严重影响设备验收进度; (4) 新设备未能投入生产, 设备折旧呆滞并且无经济收益。因此, 需要结合可靠性研究工程, 对产品的工艺、结构进行优化探索, 验证出符合标准的可靠性寿命。

## 1 产品分析

### 1.1 涡旋压缩机运行原理介绍

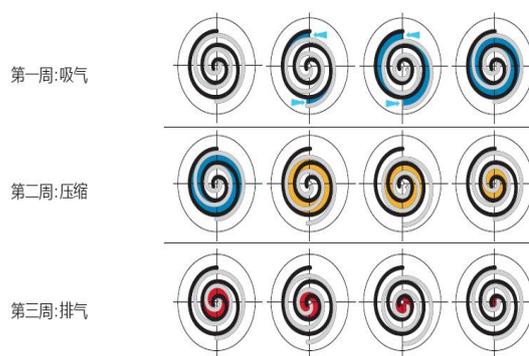


图1 涡旋式压缩机运行原理

Fig.1 Operation Principle of scroll compressor

动涡旋盘(灰色)绕静涡旋盘做圆周运动。动涡盘三个圆周运动后完成一个完整的压缩过程。压缩的过程是连续的:吸气、压缩、排气同时进行,会产生振动或共振。在可靠性试验过程中,压缩机运转时就会将产品中存在的缺陷激发出来,然后进行分析判断,采取相应的措施予以排除解决。

### 1.2 焊点应力分析

产品结构如图 2 所示,承载压缩机动静涡盘的支撑零件(即上支架),需要通过焊接将其固定在压缩机壳体上,焊接后会对产品产生静态应力,并且集中在四个固定的焊点上。与此同时,压缩机泵体实际动态运转过程中,也会产生应力负荷,作用在上支架焊点上。

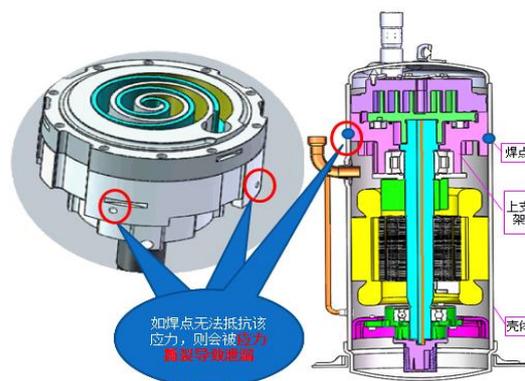


图 2 压缩机焊点结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of compressor solder joint structure

表 1 可靠性试验数据

Table 1 Reliability test data

压缩机序号	试验项目	试验台	可靠性试验情况	
			试验时间 (H)	试验情况
1604030008	长期组合	KC-081	129	上支架 4#焊点泄漏
1604030004	高压比断续	海普台-1#	208	上支架 3#焊点泄漏
1604190002	低频高压差	KC-127	384	上支架 1#焊点泄漏
1604190003	缺油试验	KC-081	133	上支架 2#焊点泄漏
1604190004	缺油试验	KC-077	107	上支架 2#焊点泄漏
1605120001	长期组合	KC-081	37	上支架 2#焊点泄漏

通过对泄漏焊点的金相分析,结合拉伸机试验合格的结构,确认焊点焊接强度无异常。但是,焊点内部出现较为一致性的裂痕,初步评估为压缩机运转时产生的振动应力导致撕裂,针对焊接撕裂问题进行如下的讨论分析,得出 4 条末端优化方向:

(1) 焊接参数异常;(2) 焊点强度不足;(3) 上支架与壳体间隙过大;(4) 上支架焊点不合理。

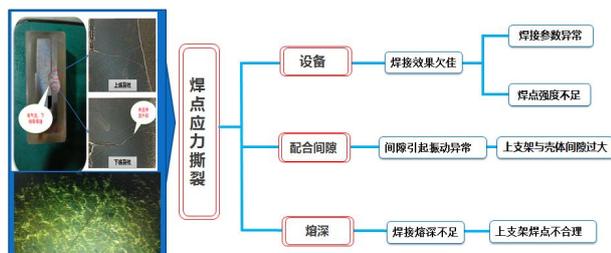


图 3 焊点应力撕裂要因分析

Fig.3 Cause analysis of stress tear in solder joint

## 2 可靠性改善方案验证

### 2.1 焊点焊接质量优化

通过对焊点焊接设备进行参数优化,理论上可以加强支撑结构的牢固度,提高产品可靠性。通过线切割技术割开焊点,分别用金相显微镜、万能显微镜对焊点焊接质量进行确认,确保熔深无异常、焊点无气孔及裂纹情况的前提下,进行可靠性试验验证。与此同时,查看转子式压缩机的焊点强度质量标准,利用万能试验机(拉伸机)设备确认涡旋压缩机上支架焊点强度已超过 50kN,远远满足相关标准。但是,焊接最优方案压缩机焊点 294 小时仍被撕裂,未能有效抵抗应力。因此,评估单单从焊接工艺上并不能解决可靠性异常的问题。

表2 焊接工艺参数优化表

Table 2 Optimization table of welding process parameters

焊枪	下段（调整前）					下段（调整后）			
	焊枪 1	焊枪 2	焊枪 1	焊枪 3	焊枪 4	焊枪 1	焊枪 2	焊枪 3	焊枪 4
1 焊接电压 (V)	29	28	29	29	29	26	26	26	26
四点 1 焊接电流 (A)	230	260	230	230	230	250	250	250	250
焊工 1 焊接时间 (s)	1.5	0.9	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2	1.2
序 待命时间 (s)	1	0.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
2 焊接电压 (V)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
2 焊接电流 (A)	150	220	150	150	150	250	250	250	250
2 焊接时间 (s)	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	1.2	1.2	1.2	1.2

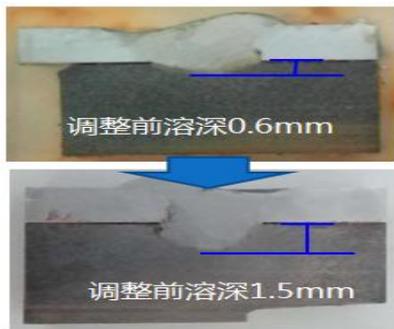


图4 熔深实测

Fig.4 Weld depth test



图5 万能显微镜实测

Fig.5 Universal microscope test



图6 金相显微镜实测

Fig.6 Metalloscope test

万能试验机试验记录表

试验项目	委托单位	数量
厂家及供货批号	委托人	
<input type="checkbox"/> 曲轴、气缸毛坯(金属型)抗拉强度>207Mpa <input type="checkbox"/> 曲轴毛坯(砂型)抗拉强度>295Mpa <input type="checkbox"/> C55 气缸毛坯(金属型)抗拉强度>230Mpa <input type="checkbox"/> 砂型气缸抗拉强度>230Mpa <input type="checkbox"/> 球墨曲轴抗拉强度>550Mpa <input checked="" type="checkbox"/> 压缩机气缸、法兰三点焊牢固度>15 KN <input type="checkbox"/> 钢板抗拉强度>270Mpa <input checked="" type="checkbox"/> Q7000 球墨曲轴抗拉强度>600Mpa <input type="checkbox"/> 砂型法兰抗拉强度>245Mpa		

图7 万能试验机测试

Fig.7 Universal testing machine test

2.2 产品工艺优化

根据焊点焊接质量，静态的各项试验分析，得出：焊点是由于压缩机动态运行过程中，应力应变较大导致上支架焊点撕裂泄漏。因此，在产品工艺

上，对比转子式压缩机类似排量机型的配合间隙，评估涡旋产品设计间隙较大，结合产品本身振动比转子振动较大，间隙 0.36~0.54mm 设计不合理；经过核查确认将配合间隙缩小至 0.06~0.34mm。

表3 产品配合间隙表

Table 3 Product fit clearance table

型号	零件名称	配合尺寸	产品配合间隙表			
			最大值	最小值	配合尺寸下差	配合尺寸上差
518	壳体	φ138.87 (+0.1/-0.1)	138.89	138.77		
	法兰	φ138.83 (0/-0.1)	138.83	138.73	-0.06	0.16
C63	壳体	φ160.8 (+0.05/-0.02)	160.85	160.78		
	法兰	φ160.6 (-0.02/-0.1)	160.58	160.5	0.2	0.35

续表 3 产品配合间隙表

产品配合间隙表						
型号	零件名称	配合尺寸	最大值	最小值	配合尺寸下差	配合尺寸上差
H072z	壳体	$\phi 160.8 (+0.04/-0.04)$	160.84	160.76	0.36	0.54
更改前	上支架	$\phi 160.4 (0/-0.1)$	160.4	160.3		
H072z	壳体	$\phi 160.8 (+0.04/-0.04)$	160.84	160.76	0.06	0.34
更改后	上支架	$\phi 160.6 (0/-0.1)$	160.7	160.5		

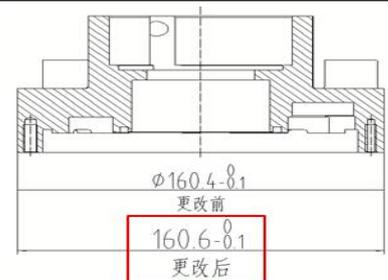


图 8 上支架优化

Fig.8 Optimization of Upper support

理论分析: 上支架与壳体间隙缩小可有效减小泵体摆动幅度, 减少内部焊流提高焊接质量; 可靠性试验情况: 优化间隙方案压缩机可靠性运行 384 小时焊点被撕裂, 虽叠加焊接质量措施有改善, 但仍无法满足 1000 小时要求。因此, 综合考虑产品 4 个焊点的设计结构无法满足可靠性试验下的动态应力要求。

2.3 产品设计结构优化

通过产品有限元分析, 以及结构设计模拟分析, 对支撑结构增加强肋可以减少焊接波动对产品的影响, 因此评估 8 个焊点的焊接应力可增大至原

方案的 1.1 倍。项目成员提出三个方案, 结合现有的设备及加工工艺, 论证评估后确认采用方案三进行可靠性试验。

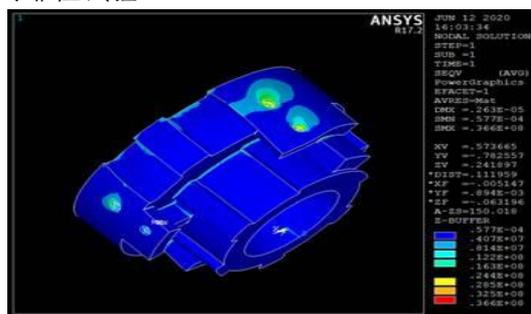


图 9 可靠性建模有限元分析

Fig.9 Finite element analysis of reliability modeling

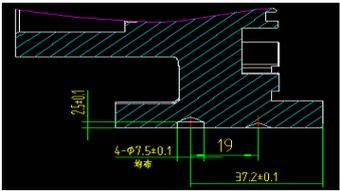
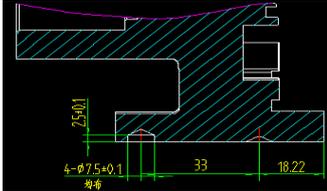
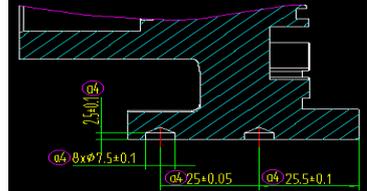


图 10 可靠性建模结构分析

Fig.10 Structural analysis of reliability modeling

表 4 方案论证表

Table 4 Proof of plan form

方案名称	方案一	方案二	方案三
方案思路	在原有基础往上增加一排焊点	焊点距离最大化其余不变	毛坯及压板槽根据焊孔位置更改
上支架焊点数	8	8	8
焊点距离及尺寸要求			
详细说明	(1) 焊点错开压板槽 (2) 焊点距离 19mm (3) 密封面距离 16mm	(1) 焊点错开压板槽 (2) 焊点距离 19mm (3) 密封面距离 18.2mm	(1) 更改压板槽位置 (2) 焊点距离 25mm (3) 密封面距离 25mm, 毛坯支脚加长 3mm 以上
需要更改内容	上支架加工设备与焊接设备程序更改, 其余无需改动	上支架加工设备与焊接设备程序更改, 其余无需改动	上支架加工设备与焊接设备程序更改, 毛坯支脚加长, 其余无需改动

结合焊接参数优化、产品工艺配合间隙优化、以及增加焊点的方式,可靠性各项试验满足 1000 小时,经评估方案三为优化方案,焊点与上支架密封面安全距离达到 21.77mm,焊孔与螺栓孔的安全余量达到 2mm,确认为最终方案。



图 11 零部件变更优化

Fig.11 Part change optimization

### 3 实施说明

#### 3.1 可靠性工作的实施过程

项目成员秉承可靠性工作流程为主旨,首先内部通过 FMEA 工具,识别出可靠性焊点泄漏的严重度高、频度高,风险系数 RPN 值超标必须进行改善。同时,结合运用 QC 改善工具,从产品设计、焊接工艺角度进行细化分析研究,对焊接的质量进行线切割分析(金相分析、熔深分析),对产品的焊点结构进行可靠性建模,通过有限元分析工具模拟产品动态运行过程。提出涉及可靠性降额设计的方法,增加焊点数量的试验方案,接着根据压缩机产品可靠性验收试验及寿命试验项目(高压比连续、长期组合、高压比断续、低频高压差、缺油试验等)进行验证。最终,通过优化焊接工艺参数提高焊接强度,产品设计变更优化(由 4 个焊点改为 8 个焊点)减少可靠性运行中的应力,以及壳体与上支架配合间隙优化措施,测试可靠性各项目验证合格。

#### 3.2 结论与成果

项目实施后观察 1 年有效,结论:产品可靠性满足质量标准,项目可结项闭环。成果:该项目获

得了珠海凌达压缩机有限公司创新科技进步奖,促使产品快速导入量产,打破国外涡旋压缩机的持续垄断的现状。

### 4 结束语

#### (1) 产品质量品质

累计 47 台压缩机进行可靠性试验,试验 1000 小时后均未出现焊点泄漏。可靠性 1000 小时为压缩机十年的保障,改善后压缩机 4032 小时未出现焊点泄漏,改善后焊点强度最少可以提升二十年的寿命保障。为我司产品推广延迟奠定了研究基准。

(2) 在产品可靠性研究探索过程中,需要结合可靠性工程师手册,通过理论的分析思路以及实际的验证结构,不断修正优化可靠性试验方案,这样才能使得产品精益求精。

#### 参考文献:

- [1] 王大号,朱红伟,刘靖.旋转式压缩机可靠性试验方法[J].家电科技,2015,(2):48-50.
- [2] 吴业正,李红旗,张华,等.制冷压缩机[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [3] 李良巧.注册可靠性工程师手册(第二版)[M].北京:中国人民大学出版社,2017.
- [4] 周德馨,陶分兴.研发过程空调压缩机可靠性的评价与验证试验[J].家电科技,2005,(3):49-50.
- [5] 周德馨.提高旋转式压缩机可靠性的技术[J].家电科技,2003,(12):64-68.
- [6] 肖彪,何林,卢浩贤,等.基于综合应力的压缩机可靠性增长摸底试验研究[J].流体机械,2017,(5):11-15.
- [7] 朱丽红,曹君.往复压缩机焊接活塞失效分析[J].压缩机技术,2014,(5):30-32.
- [8] GB 4706.17-2010,家用和类似用途电器的安全电动机-压缩机的特殊要求[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [9] GB/T 15765-2014,房间空气调节器用全封闭型电动机-压缩机[S].北京:中国标准出版社,2014.