

DWT-70A 型高原机车用无油压缩机的研制^{*}

刘 岑, 张成彦, 钱则刚, 王树胜

(合肥通用机械研究院 压缩机技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要:为了解决我国西部高原地区电气化铁路开通相关设备配套的需要,进行了 DWT-70A 型高原铁路电力机车升弓系统用全无油润滑空气压缩机的研制。结合我国西部西藏、青海等省区海拔高度较高的环境工况特点,开展了压缩机热力计算、电机、活塞环、导向环、润滑等相关研究及设计,并进行了振动、冲击、高海拔环境工况模拟考核试验。试验结果表明,该压缩机性能稳定,完全适应高原地区环境工况要求。

关键词:高原;机车;全无油润滑压缩机

中图分类号:TH122;TH457;U48

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)06-0675-04

Development for DWT-70A oil-free compressor used in plateaus electric locomotive system

LIU Cen, ZHANG Cheng-yan, QIAN Ze-gang, WANG Shu-sheng

(State Key Laboratory of Compressor Technology, Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to address the supporting equipment demands for constructing electrified railroads in the western plateau regions of China, oil-free air compressor for pantograph system of type DWT-70A plateau railway electric locomotives was developed. According to the high altitude working conditions in Tibet, Qinghai and other provinces, research and design were carried out on thermal calculation of compressor, motors, piston rings, guide rings, lubrication, etc. and simulation tests for vibration, shock, high altitude working conditions. The results show that the compressor has stable performances, which fully meets the requirements of working conditions of plateau regions.

Key words: plateaus; locomotive; oil-free compressor

0 引 言

铁路是中国国民经济和社会发展的主动脉,在中国五大交通运输方式中一直处于首要地位。按“十二·五”规划,要加快发展铁路运输,到 2015 年,我国铁路营业里程将达到 15 万公里,其中西部铁路 5 万公里以上,电气化率将达到 60%。为了进一步加快我国西部高原地区的经济发展,西藏、青海等省区电气化铁路的开通势在必行。

2007 年,我院成功研发了应用于铁路电力机车升弓系统的 DWT-70 型机车用无油压缩机^[1],研制产品已在我国某机车车辆厂“和谐”系列电力机车安装上

批量使用,运行稳定。DWT-70A 型高原机车用无油压缩机是在现有成熟产品 DWT-70 型机车用无油压缩机的外形尺寸、额定排气压力、排气量(同一工况下)、输入电源等技术参数要求不变的前提下进行研发,主要应用于我国高原地区交流传动电力机车升弓系统,该压缩机在环境使用工况上有着更为严格的要求:工作温度: -40℃ ~ +70℃;最高工作海拔:4 000 m。我国目前生产的通用型压缩机无法满足以上环境工况的使用要求^[1-2],根据我国铁路跨越式的发展以及西部高海拔地区经济发展的需要,高原电力机车升弓系统用压缩机的研制工作显得尤为重要。

本研究的目的是:研发性能稳定、可靠性高、环境

适应性强的铁路电力机车升弓系统用全无油润滑空气压缩机,从而为我国西部西藏、青海等省高原地区的气化铁路的开通提供技术支持与保障。

1 主要技术参数

DWT-70A 型高原机车用无油压缩机为两缸、单级、风冷、直联活塞式压缩机,其主要技术参数如下:

- (1) 型式:全无油润滑,对称平衡式;
- (2) 输入电源:110 VDC;
- (3) 排气量: $\geq 0.07\text{ m}^3/\text{min}$ (环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,一个标准大气压,排气压力 0.5 MPa 时);
- (4) 额定排气压力: 0.7 MPa ;
- (5) 工作环境温度: $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (6) 工作海拔: $\leq 4\,000\text{ m}$;
- (7) 振动、冲击:满足 TB/T3058-2002《铁路应用机车车辆设备 冲击和振动试验》要求。

2 关键技术研究

与同类型 DWT-70 型机车用无油压缩机相比,DWT-70A 型高原机车用无油压缩机对环境使用工况要求更为严格:可在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度范围内正常工作,最高工作海拔达到 $4\,000\text{ m}$ 。

大气压力与海拔高度密切相关,不同海拔高度的大气压按下式计算^[3]:

$$P=p_0\left(1-\frac{H}{44\,300}\right)^{5.256}$$
 (单位:mmHg)

式中: p_0 —温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和海拔高度等于 0 时的大气压力,即 760 mmHg ; H —海拔高度, m 。

由上式可以算出,在海拔高度为 $4\,000\text{ m}$ 的地区,其大气压力为 0.061 MPa (绝压)。

2.1 电机

电机在高海拔工况下工作,最低环境温度通常较低;由于空气较为稀薄,电机散热(高温工作时)、绝缘强度等均会产生一定的影响^[4-6]:

- (1) 工作环境温度:高海拔地区最低环境温度通常较低,最低可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (2) 电机散热(高温工作时):通用电机工作海拔一般为 $1\,000\text{ m}$ 以下。海拔越高,空气越为稀薄,电机散热条件越差,当海拔超过 $1\,000\text{ m}$ 时,每上升 $1\,000\text{ m}$,电机温升限值下降 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (3) 电机绝缘:在高海拔工况下,电机的绝缘强度将会显著降低。

综合考虑以上影响因素,为保证电机的使用性能,在原有 DWT-70 型机车用无油压缩机使用的电机长度不增加、外形尺寸不改变的前提下,采用以下措施保证电机的可靠运行:

- (1) 提高电机的输出功率/体积比,即提高电机磁场强度和导线负荷;
- (2) 提高电机的耐温指数范围,即将电机的关键零部件及绝缘系统的耐温、耐压指标提高,以抗温度和耐压冲击。

为此,本研究具体结合以上技术更改方案,在电机选材(诸如稀土磁钢、硅钢片、电磁线、绝缘材料、绝缘漆、刷架、电刷、轴承)等方面作出相应改进(如表 1 所示),以满足电机高海拔工况使用要求。

表 1 电机关键零部件改型方案

零件名	原型号及指标	改进型号及指标	改进目的
稀土磁钢	NFB-35UH	NFB-38EH	输出功率提高 8% 提高耐温等级
	最大磁能积 35Moe 最高工作温度 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$	最大磁能积 38Moe 最高工作温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$	
硅钢片	50W470	50W360	输出功率提高 2%~3%
	单位铁损 4.7 W/kg	单位铁损 3.6 W/kg	
电磁线	QZY-1	Q(ZY/XY)BP-2	满足高低温使用要求
	耐温 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$	具有耐冷冻性能及 耐溶剂性能,耐温 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$	
绝缘材料	FDMD	NHN	提高耐温及耐压指标
	F 级绝缘, 击穿电压 $\geq 8\text{ kV}$	H 级绝缘, 击穿电压 $\geq 11\text{ kV}$	
绝缘漆	JF-9601	JF-1059	提高耐温指标
	F 级绝缘	H 级绝缘	
刷架	DMC-1	DMC-2	提高耐温指标
	耐温 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$	耐温 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$	
电刷	374	351A(东洋碳素)	降低电刷磨损量,提高电刷电流密度,延长使用寿命
	50 小时磨损量 0.25 mm 电流密度 10 A/cm^2	50 小时磨损量 0.15 mm 电流密度 12 A/cm^2	
轴 承	$-40 \sim +180\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-55 \sim +200\text{ }^{\circ}\text{C}$	提高耐温指标

2.2 压缩机热力计算

(1) 在海拔高度高达 4 000 m 的环境地区,其空气密度较为稀薄,大气绝对压力(即压缩机的吸气压力)约为 0.061 MPa(标准工况下的大气绝对压力为 0.1 MPa),而压缩机的排气压力 0.7 MPa 没有改变,这就使得压缩机的压比显著增大至 12.7(在平原地区工作时的压比为 8);

(2) 在压缩机压比增大的情况下,压缩机气缸内外压差增大,活塞环的密封效果将显著降低,其泄漏量加大,即压缩机的泄漏系数增大,容积系数减小。

压缩机的气缸缸径、行程、排气压力没有改变时,由于压缩机吸气压力、容积系数参数的改变,压缩机的功率将会产生一定的变化。压缩机的指示功率(单位: kW)计算公式如下^[3]:

$$N_{id} = 1.634 p_s V_i \lambda_v \frac{k_T}{k_T - 1} \left[\left(\frac{p'_d}{p'_s} \right)^{\frac{k_T - 1}{k_T}} - 1 \right] \frac{\xi_s + \xi_d}{2 \xi_d} \quad (1)$$

式中: p_s —公称吸气压力, kg/cm²; V_i —气缸的行程容积, m³/min; λ_v —容积系数; p'_d, p'_s —气缸的实际排气压力和吸气压力, kg/cm²; k_T —实际气体的温度绝热指数; ξ_s, ξ_d —公称排气和吸气状态下的压缩性系数。

由上式可以得出,压缩机的功率与吸气压力成正比、与容积系数成正比、与压比的 0.29 次方成正比,虽然在高海拔工况下压缩机的吸气压力与容积系数均减小了,压比增大了,但吸气压力与压缩机的容积系数的减小对压缩机功率影响的因素大于压缩机的压比增大的因素,故压缩机在高原地区正常工作时的功率与在平原地区正常工作时的功率相比将会减小。

考虑到压缩机在 -40 ℃ 环境温度下开机启动时,电机、连杆小头、连杆大头内的轴承由于其润滑脂的粘度会降低,启动负载将加大,故压缩机的电机功率不改变,与 DWT-70 型机车用无油压缩机的电机功率一致。

2.3 轴承润滑

DWT-70 型高原机车用无油压缩机为对称平衡式结构,活塞连杆组件由活塞、活塞环、弹力环、导向环、活塞销、连杆、偏心块等构件组成,连杆小头通过两只具有单侧油封结构的滚针轴承背对背组装与活塞销相连,活塞销与活塞连接;电机的电机轴上套装有两个偏心块,偏心块与电机轴通过一个具有密封结构的深沟球轴承与连杆大头连接^[1],结构如图 1 所示。

在轴承润滑脂的选择上,既要保证润滑脂的低温启动性能,又要保证在高温条件下压缩机运转排气温度高达 +150 ℃ 左右时润滑脂仍然具有较好的粘度特性,经过不断筛选,最终采用酯类油基油、锂基皂基增

稠剂、工作温度范围可达 -40 ℃ ~ +180 ℃ 的润滑脂,很好地解决了这一问题。

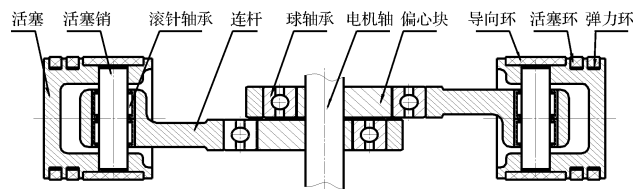


图1 连杆、活塞部件图

2.4 活塞环、导向环研究

实现活塞式无油润滑压缩机的前提是具有自润滑性能材料制造的活塞环、导向环元件的应用,该机活塞环、导向环选用的材料均为填充聚四氟乙烯,其间加入一定比例的石墨、铜粉、玻璃纤维等成分^[7]。

活塞环的主要作用是密封气缸镜面与活塞环之间的间隙,防止气体从压缩机容积的一侧漏向另一侧。导向环的主要作用是承受压缩机的侧向力,保证活塞运动的直线性,改善密封效果^[7-8]。活塞环的尺寸较小,导向环的尺寸相对较大。

该机环境工作温度范围为 -40 ℃ ~ +70 ℃,上、下温差高达 110 ℃,为了满足压缩机在 -40 ℃ 低温工作时不致由于活塞环与气缸、活塞间隙过大而产生气量不足现象,又满足压缩机在 +70 ℃ 高温工作时不致由于其间隙过小而产生抱缸现象,这就要求活塞环、导向环在满足其正常功能的前提下必须具有较高的温度稳定性,即较小的线性膨胀系数。

根据活塞环、导向环与气缸、活塞之间的配合间隙以及各自尺寸、功能的不同,本研究分别调整了活塞环与导向环的组份配方^[7-9]:加大了活塞环中石墨组份的比例,提高其耐磨性和耐冷流性;加大了导向环中铜粉组份的比例,增强其导热性以及抗拉强度;加大了活塞环、导向环中玻璃纤维组份的比例,减小其线性膨胀系数。

随着导向环中铜粉组份比例的加大,导向环的硬度也提高了,与导向环配合的气缸内表面的硬度值也必须相应加大,因此,本研究对气缸内表面作了表面阳极氧化处理,以提高其表面硬度,增强其耐磨性。

3 性能试验及环境适应性试验

本研究按照 GB/T3853《容积式压缩机验收试验》对 DWT-70A 型高原机车用无油压缩机进行了性能试验,并根据相关技术条件要求及 TB/T3058-2002《铁路应用 机车车辆设备 冲击和振动试验》进行了高温、低温、低气压等环境适应性考核试验^[10],压缩机各项指标均达到或优于设计要求,环境适应性试验结果如表 2 所示。

表 2 环境适应性试验结果

序号	试验项目	试验要求	试验结果
1	耐电压、绝缘试验	输出电压 50 Hz、2 200 V， 试验时间 1 min，绝缘电阻应≥10 MΩ	≥50 MΩ
2	低温试验	环境温度 -40 ℃ ±3 ℃，保温 2 h， 额定排气压力下持续工作 20 min 应无异常	无异常
3	高温试验	环境温度 70 ℃ ±2 ℃，保温 2 h，额定 排气压力下持续工作 20 min 应无异常	无异常
4	低气压 型式试验	环境压力 0.061 MPa(绝压)、额定 排气压力下延续工作 500 h 应无异常	无异常
5	长寿命 振动	垂向 ASD 量级:1.034 ((m/s ²)/Hz)， 加速度 r. m. s. :5.90 m/s ² ，持续时间:5 h	结构未变形， 机械无损坏
		横向 ASD 量级:0.250 ((m/s ²)/Hz)， 加速度 r. m. s. :2.90 m/s ² ，持续时间:5 h	结构未变形， 机械无损坏
		纵向 ASD 量级:0.452 ((m/s ²)/Hz)， 加速度 r. m. s. :3.90 m/s ² ，持续时间:5 h	结构未变形， 机械无损坏
		垂向 ASD 量级:0.0164 (m/s ²)/Hz)， 加速度 r. m. s. :0.75 m/s ² ，持续时间:10 min；	结构未变形， 机械无损坏
6	随机振动	横向 ASD 量级:0.004 1 ((m/s ²)/Hz)， 加速度 r. m. s. :0.37 m/s ² ，持续时间:10 min；	结构未变形， 机械无损坏
		纵向 ASD 量级:0.007 3 ((m/s ²)/Hz)， 加速度 r. m. s. :0.50 m/s ² ，持续时间:10 min；	结构未变形， 机械无损坏
		垂向 峰值加速度:30 m/s ² 标称持续时间:30 ms 正向和反向:各 3 次	结构未变形， 机械无损坏
		横向 峰值加速度:30 m/s ² 标称持续时间:30 ms 正向和反向:各 3 次	结构未变形， 机械无损坏
7	冲击试验	纵向 峰值加速度:50 m/s ² 标称持续时间:30 ms 正向和反向:各 3 次	结构未变形， 机械无损坏

4 结束语

DWT-70A 型高原机车用无油压缩机在 DWT-70 型机车用无油压缩机成熟产品的基础上成功改型,经性能试验及环境适应性试验考核显示,产品性能稳定,可靠性高,填补了国内高原地区铁路电力机车升弓系统用全无油润滑空气压缩机的空白,为我国西部高原地区的电气化铁路的开通提供了有力的技术支撑。

参考文献(References):

[1] 合肥通用机械研究院. 机车用无油压缩机:中国,ZL 2009 2 0186504.1[P]. 2010-04-14.

[2] HARTL M, MEYER F, SCHNEIDER S. Oil-free low-vibration piston compressor in railway applications[J]. **Compressors and Their Systems**,2001(7):177-188.

[3] 编写组. 活塞式压缩机设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1974.

[4] 陈开运. 高海拔电气设备工作特点及设计要求[J]. 机车

电传动,2005(2):19-22.

[5] 吴 冰,王建良. 电力机车在高海拔条件下运行初探[J]. 电力环境保护,2006,22(2):61-62.

[6] 严云升,范祚成. 高原环境对机车车辆电工电子产品性能的影响[J]. 铁道技术监督, 2010,38(11):1-5.

[7] 朱圣东,邓 健,吴家声. 无油润滑压缩机[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[8] HIRAI T, KODA T. Study on oil free dual resonant piston compressor[J]. **Proceedings of the 1990 International Compressor Engineering Conference-at Purdue**,1990(1-2):264-272.

[9] PENG Pei-ying, PENG Bao-cheng, YU Xin-qi, et al. Experimental research on the oilless lubrication compressor[J]. **Hebei Journal of Industrial Science & Technology**, 2007,24(6):332-335.

[10] 株洲电力机车研究所. TB/T3058-2002 铁路应用 机车车辆设备 冲击和振动试验[S]. 北京:中国铁道出版社, 2002.