

风机轴承用夹布油封的研制

骆瑞静

(广州机械科学研究院 密封研究所, 广东 广州 510700)

摘要:研究风机轴承用夹布油封原材料的选择以及在线安装夹布油封的结构设计方法。结果表明:密封材料在热带可选氟橡胶,在寒带宜选耐低温的丁腈橡胶(NBR),海上则选用氢化丁腈橡胶较为适宜;NBR夹布橡胶硫化前吸水率可达4%,硫化后吸水率仍在0.5%~1%之间;NBR夹棉布橡胶的线膨胀系数在 $5 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 之间。

关键词:风机轴承;夹布油封;丁腈橡胶;氢化丁腈橡胶;氟橡胶

中图分类号:TQ336.4⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2012)09-0559-05

传统能源不仅仅价格高企,而且存在着越用越少的劣势,新能源产业方兴未艾,风电就是典型的新兴能源之一。在风力发电机的结构中有不同类型的轴承,典型的包括主轴轴承、塔架和机舱(吊舱)之间的轴承、轮毂和3个叶片之间的轴承等,这类轴承与起重机通常使用的类型相似,并且用油脂润滑。针对这些轴承的密封产品通常为可切开安装使用的织物加强型径向油封,简称夹布油封。

随着风机的发展,叶片的长度在最近30年来从10 m延长至61.5 m(5 MW机组)。叶片端部的速度高达 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。以5 MW机组为例,塔高约120 m,质量约100 t。与传统密封不同,夹布油封都安装在高塔之上,产品尺寸也与传统工业中有很大不同,根据机组大小和结构形式,夹布油封外径一般在1 200~2 000 mm。这种大型密封必须在线安装,如果将涡轮机轮毂拆下在地面上更换油封,则费用极其高昂^[1],因此要求其切口处密封性能与整圈模压密封件性能一致,这也是此类密封产品的制造难点之一。

本研究从材料耐低温、耐候性、在线安装、大规格制造角度讨论了风机轴承用夹布油封的制造问题。

作者简介:骆瑞静(1980—),女(蒙古族),内蒙古开鲁人,广州机械科学研究院工程师,学士,主要从事大型密封制品的开发工作。

1 材料性能要求

1.1 唇口橡胶材料

美国 Timken 轴承公司提出了密封件设计满足20年使用寿命的需求^[2],提出这个需求的目的是避免像传统环状密封那样在使用一段时间后需要更换密封件。解决了在线安装问题之后,选用高质量丁腈橡胶(NBR)满足7~10年的预期寿命是一个比较现实的选择方案,在海上及苛刻情况下,选用氢化丁腈橡胶(HNBR)也是可行的。对于热带地区或者冬季气温在0℃以上的海上风场,选用普通氟橡胶(FKM)可以满足20年使用寿命的要求。一般欧洲国家风电机组供应厂商提供的产品都是按IEC标准、Ⅱ级风况、-20~+40℃温度范围设计。我国风力资源蕴藏比较丰富的甘肃河西走廊及新疆地带冬季最低温度达到-45℃,而普通FKM耐低温性能有限,如果要求使用寿命达到20年,就必须选择耐低温的密封材料。根据具体工况的不同,开发了NBR, HNBR和FKM三种油封唇口胶,其性能及指标如表1所示。

1.2 夹布材料

采用织物增强橡胶替代传统的金属骨架,有利于实现切口在线安装。在夹布设计上,要充分考虑到棉坯布的特点,根据棉帆布工业的实际情况选择合理的原材料,并根据所选棉坯布的技术指标,确定挂胶后的强力性能。设计指标通常包括硫化后硬度、夹布半成品厚度、强度、耐介质性

表 1 NBR,HNBR 和 FKM 三种油封唇口胶的性能及指标

项 目	NBR(GY-N902) ¹⁾		HNBR(GY-N701) ²⁾		FKM(GY-F503) ³⁾	
	典型值	指标 ⁴⁾	典型值	指标 ⁴⁾	典型值	指标 ⁴⁾
邵尔 A 型硬度/度	71	70±5	78	78±3	73	72±3
拉伸强度/MPa	17.5	≥14	18.4	≥16	11.3	≥10
拉断伸长率/%	390	≥250	350	≥250	320	≥250
压缩永久变形 ⁵⁾ /%	22	≤35	33	≤40	35	≤45
耐臭氧老化性能 ⁶⁾	无龟裂	无龟裂	无龟裂	无龟裂	无龟裂	无龟裂
脆性温度/℃	-57	≤-45	-46	≤-40	-33	≤-30
热空气老化后 ⁷⁾						
邵尔 A 型硬度变化/度	+3	0~5	+4	0~10	+2	0~10
拉伸强度变化率/%	+4	-10~+10	+6	-10~+10	-4	-10~+10
拉断伸长率变化率/%	-15	-20~0	-5	-20~0	-15	-20~0
耐 1# 标准油性能 ⁷⁾						
邵尔 A 型硬度变化/度	-2	-3~+3	+2	0~10	+1	-5~+5
拉伸强度变化率/%	+7	-10~+10	+6	-10~+10	+2	-10~+10
拉断伸长率变化率/%	-11	-15~0	-5	-20~0	-12	-20~0
体积变化率/%	+1	-5~+5	-1	-5~+5	+0.3	-3~+3
质量变化率/%	+1	-5~+5	-1	-5~+5	+0.1	-3~+3
Taber 磨耗量 ⁸⁾ /(mg·r ⁻¹)	0.25	≤0.30	0.09	≤0.15	0.23	≤0.25

注:1)配方为 NBR1846(德国朗盛公司) 100,炭黑 N550 55,炭黑 N330 10,氧化锌 5,硬脂酸 2,防老剂 RD 2,防老剂 MB 1,黑色磨料 10,减磨剂 5,增塑剂 10,硫黄 0.3,促进剂 TMTD 1.5,促进剂 TETD 1.2,促进剂 DM 2.5;2)配方为 HNBR Therban C3446(德国朗盛公司) 100,炭黑 N550 60,轻质氧化镁 10,氧化锌 5,硬脂酸 0.5,防老剂 Nauguard 445 1.1,防老剂 MB 0.4,减磨剂 5,聚四氟乙烯微粉 12,增塑剂 5,硫化剂 HVA-2 3,硫化剂 DCP 5;3)配方为 FKM DAI-EL G-752(日本大金公司) 100,氢氧化钙 6,高活性氧化镁 3,硅酸钙 20,棕榈蜡 1,氧化铁 10;4)由广州机械科学研究院密封研究所与客户协商确定;5)NBR,HNBR 和 FKM 的试验条件分别为 100℃×70 h,150℃×70 h 和 200℃×70 h,均为 B 型试样;6)臭氧体积分数 5×10⁻⁷,静态伸长率 20%,40℃×7 d;7)NBR,HNBR 和 FKM 的试验条件分别为 100℃×70 h,150℃×70 h 和 200℃×70 h;8)砂轮型号 H22,负荷 1 kg。数据源自广州机械科学研究院密封研究所内部资料。

能等方面。不同用途及工况下使用的夹布橡胶的性能要求也有所不同。为了与 NBR,HNBR 和 FKM 三种唇口胶相匹配,开发了相应的 NBR/棉帆布、HNBR/棉帆布和 FKM/芳纶浆粕 3 种织物(纤维)增强橡胶,其性能及指标如表 2 所示。

夹布橡胶硫化后的硬度是一项重要指标,其大小主要取决于夹布橡胶中织物和橡胶的比例(即含胶率)。随着含胶率的提高,硫化后夹布橡胶的硬度下降。含胶率的高低取决于浸涂过程中胶浆的浓度和织物自身的疏密程度。一般而言,较为稀疏的织物挂胶量较高。随着胶浆浓度的提高,挂胶量也提高,但胶浆对织物的润湿性能下降,硫化后产品断面会泛白。此外,含胶率也是影响夹布层间粘合强度的重要因素。经向强度、纬向强度和拉伸强度等指标主要由选用的坯布决定。

对于以 FKM/芳纶浆粕夹布橡胶为外壳的风机主轴油封,以 FKM 为连续相、芳纶浆粕为分散

相,采用粉末成型的方式制造整体外壳形式,因此不涉及经纬拉伸强度和层间粘合强度问题。

2 结构设计

为方便在线安装和在线维修更换,风机轴承夹布油封必须设计成可切口形式供应。为确保切口端的密封性能与整圈密封性能一致,需在切口端面上硫化一块全部为橡胶材料的连接块(见图 1),以确保橡胶表面与密封轴之间的完全接触,从而实现最佳密封性能。

全橡胶连接的设计方式便于保证切割的精度和尺寸稳定性,也便于采用胶水(环氧树脂胶或氰基丙烯酸酯)在野外现场进行粘结操作。

以 NBR(GY-N902)胶料为例阐述结构设计。对于大多数橡胶,材料常数 C₁₀ 和 C₀₁ 的 Mooney 模型[式(1)]在应变为 150% 以内可得到合理的近似^[3]。

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)$$

(1)

表 2 NBR/棉帆布、HNBR/棉帆布和 FKM/芳纶浆粕夹布橡胶的性能及指标

项 目	NBR/棉帆布(GY-B401) ¹⁾		HNBR/棉帆布(GY-B402) ²⁾		FKM/芳纶浆粕(GY-B702) ³⁾	
	典型值	指标 ⁴⁾	典型值	指标 ⁴⁾	典型值	指标 ⁴⁾
邵尔 D 型硬度/度	60	62±2	60	62±2	85	85±3
单位面积质量/(g·m ⁻²)	490	480±20	500	500±20	900	900±50
经向强度/(N·cm ⁻¹)	275	≥220	275	≥220	—	—
纬向强度/(N·cm ⁻¹)	195	≥150	195	≥150	—	—
拉伸强度/(N·mm ⁻²)	54	≥40	54	≥40	—	—
拉断伸长率/%	20	≥10	20	≥10	—	—
热空气老化后 ⁵⁾						
邵尔 D 型硬度变化/度	+4	-10~+10	+1	-10~+10	+3	-5~+5
拉伸强度变化率/%	+7	-15~+15	+3	-15~+15	—	—
拉断伸长率变化率/%	0	-3~+3	0	-3~+3	—	—
耐 ASTM 1# 标准油性能 ⁶⁾						
邵尔 D 型硬度变化/度	0	-5~0	0	-5~0	-2	-5~0
质量变化率/%	+8	≤+10	+6	≤+10	+8	≤+10
耐 ASTM 3# 标准油性能 ⁶⁾						
邵尔 D 型硬度变化/度	-2	-5~0	-3	-5~0	-2	-5~0
质量变化率/%	+12	≤+15	+10	≤+15	+5	≤+10
夹布层间剥离强度/(kN·m ⁻¹)						
初始	6	≥5	6	≥5	—	—
热空气老化后 ⁷⁾	5.4	≥4.5	5.8	≥4.5	—	—
1# 标准油浸泡后 ⁷⁾	4.6	≥4	4.8	≥4	—	—
3# 标准油浸泡后 ⁷⁾	4.6	≥4	4.8	≥4	—	—

注:1)浸涂胶配方同表 1 注 1);2)浸涂胶配方同表 1 注 2);3)浸涂胶配方为 FKM 2604(中昊晨光化工研究院) 100,氧化镁 10,碳酸钙 20,棕榈蜡 1,氧化铁 10,碱催化剂 2,双酚 AF 2,促进剂 BPP 0.5,防焦剂 0.5;4)相应国家标准指标;5)NBR/棉帆布和 HNBR/棉帆布夹布橡胶试验条件为 120℃×72 h,FKM/芳纶浆粕夹布橡胶试验条件为 200℃×70 h;6)NBR/棉帆布和 HNBR/棉帆布夹布橡胶试验条件为 120℃×70 h,FKM/芳纶浆粕夹布橡胶试验条件为 150℃×70 h;7)试验条件为 100℃×7 d。

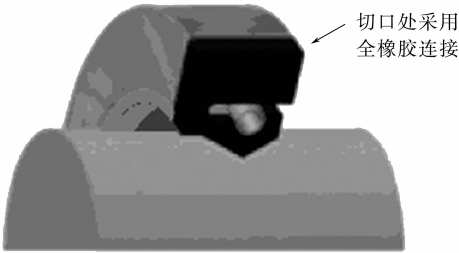


图 1 橡胶连接块示意

式中, W 为应变能; I_1 和 I_2 为应变常数。

橡胶材料的 Mooney 常数可由单轴拉伸试验测定。将试验点测得的单轴拉伸方向的伸长率(λ)逐点代入式(2),求得材料常数 C_{10} 和 C_{01} 。

$$t_{11}=C_{10}(2\lambda-2/\lambda^2)+C_{01}(2-2/\lambda^3) \tag{2}$$

式中, t_{11} 为工程应力。

根据 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定》,制作了 5 个 GY-N902 胶料试样,进行应力-应变测试,将试验数据带入公式(2),求得 C_{10} 为 0.6, C_{01} 为 0.2。

以 GY-N902 为橡胶模型,对 1.5 MW 风机

主轴的夹布油封进行仿真,根据油封结构轴对称的特点,采用二维简化的分析方法,大大缩减了分析时间及所需的硬件资源,对唇口过盈量(单边过盈 0.6/0.9/1.1/1.5/1.7/2.0/2.5)、R 值(0.7/0.8/0.9/1.0/1.1/1.2/1.3)、唇口前角(38°/40°/42°/44°/46°/48°/50°)、唇口后角(20°/22°/24°/26°/28°/30°/32°)进行仿真,通过仿真结果确立最佳参数。

通过参数的具体优化设计,配合台架试验结果,即可完成夹布油封的结构设计。

3 工艺性能

3.1 棉夹布橡胶硫化前后吸湿特性

棉纤维 90%~94% 的组成为纤维素,其余是水分、脂肪、蜡及灰分。制造橡胶/棉帆布夹布橡胶后,需对其加热减量和停放增量进行分析,以便于掌握材料特性,为确定半成品质量、稳定产品尺寸和批量生产的稳定性创造条件。在广州 5—6 月份期间对硫化前后 NBR 夹布橡胶(GY-B401)

和 HNBR 夹布橡胶(GY-B402)进行加热减量和停放增量测试,结果如图 2 和 3 所示。

3.2 夹布油封硫化后外径膨胀现象

橡胶线膨胀系数一般为 $(100 \sim 200) \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; 钢材线膨胀系数一般为 $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 这也是模压硫化橡胶制品需要考虑收缩率的主要原因之一。风机用夹布油封属于大型模压橡胶制品, 其单幅模具投入都在 10 万元以上, 因此准确把握夹布橡胶的线膨胀系数, 无论对制造尺寸精密的大型夹布油封还是对评估产品在使用过程中的装配过盈量变化而言都是极其重要的。本研究采用试片法测定夹布橡胶的线膨胀系数(β), 采用影像仪测定试样尺寸。

$$\beta=(A_1-A_0)/\Delta TA_0.$$

(3)

式中, A_1 为试样在硫化温度下的尺寸; A_0 为试样在室温下的尺寸; ΔT 为硫化温度与室温的差值。

试片法测量的夹布橡胶线膨胀系数见表 3。

图 2 硫化前夹布橡胶 70℃×4 h 加热减量及停放增量

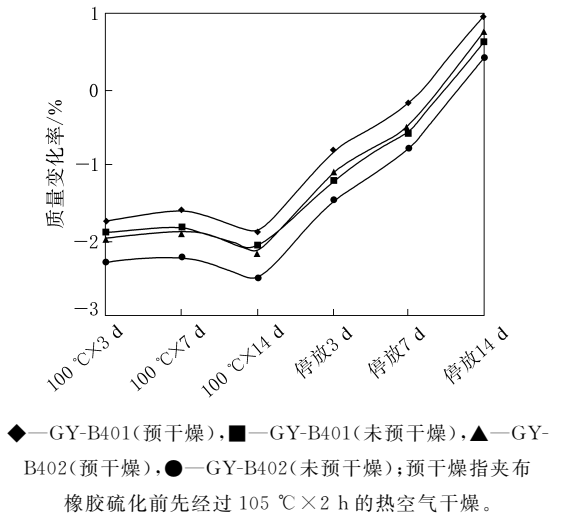


表 3 试片法测量的夹布橡胶线膨胀系数		
项 目	GY-B401	GY-B402
室温×2 h		
长度/mm	199.892	199.720
极差/mm	0.018	0.007
160℃×2 h		
长度/mm	200.107	199.863
极差/mm	0.008	0.024
线膨胀系数×10 ⁶ /℃ ⁻¹	8.27	5.51

采用同样方法测出芳纶浆粕增强的夹布橡胶(GY-B702)的线膨胀系数为 $17 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

以中模模具尺寸为 1 820 mm 的产品模具生产 3 种夹布油封各 3 件, 产品室温下外径尺寸如表 4 所示。

图 3 硫化后夹布橡胶的加热减量及停放增量

从图 2 和 3 可以看出,硫化前后夹布橡胶均表现出含水量与环境自然平衡的特性,这就决定了在不同的湿度气候下,同质量的夹布投入同规格夹布油封生产时,实际投放质量差异为 5%~10%。为了消除对硫化后产品外缘尺寸的影响以及产品使用过程中水分因温度较高而挥发造成的产品变形及尺寸减小,需要稳定投产前夹布的含水量。工艺上采取逐级梯度防御的方式来解决。

- (1)夹布贮存环境要求空调恒湿;
- (2)夹布预成型操作环境要恒湿;
- (3)夹布橡胶先使用热空气干燥箱干燥后再称质量、成型。

表 4 夹布油封室温下外径尺寸		mm		
项 目	GY-B401	GY-B402	GY-B702	
第 1 件	1 821.6	1 821.3	1 818.8	
第 2 件	1 822.0	1 821.8	1 819.0	
第 3 件	1 821.9	1 821.5	1 819.8	
平均值	1 821.83	1 821.53	1 819.90	

结合表 3 和 4 数据来看,棉夹布油封硫化后尺寸大于模具尺寸,不是棉夹布膨胀了,而是夹布线膨胀系数小于金属线膨胀系数造成的。由于橡胶的线膨胀系数比模具大一个数量级,随着夹布含胶率的提高,夹布线膨胀系数随之增大,因此含胶率越高的夹布,硫化后产品外径越小。

由于棉夹布线膨胀系数<钢材线膨胀系数<芳纶浆粕/橡胶复合材料线膨胀系数<<橡胶线膨胀系数,因此油封在使用过程中,随着温度的升高,夹布油封在沟槽中外径过盈量会变小,芳纶油封外径过盈量会略有增大。

4 结论

- (1)风机主轴密封材料在热带可选 FKM,以实现与主机同寿命的目标;在寒带宜选可在线安装的耐低温 NBR;海上风机则选用 HNBR 较为适宜。
- (2)NBR 夹布橡胶硫化前吸水率可达 4%,

硫化后吸水率仍为 0.5%~1%。
(3)NBR 夹棉布橡胶的线膨胀系数为 $5 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,因此夹布油封硫化后外径尺寸会比模具型腔尺寸大。

参考文献:

[1] Bob Flitney. Wind Power Presents Sealing Challenges[J]. Sealing Technology,2009(2):7-10.
[2] Adms D J,Fox G P,Borowski R. Bearingseal[P]. WO 2004/015288,2004-02-19.
[3] 王伟,邓涛,赵树高. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品,2004,25(4):8-10.

收稿日期:2012-03-28

Development of Fabric-Rubber Oil Seals for Wind Turbine Bearings

LUO Rui-jing

(Guangzhou Mechanical Engineering Research Institute,Guangzhou 510700,China)

Abstract: The raw material selection of fabric-rubber oil seal for wind turbine bearings and structure design method of on-line installation of fabric-rubber oil seal were studied. The results showed that,FKM was suitable as sealing material in torrid zone,cold-resistant NBR in frigid zone,and HNBR on the sea. The water absorption of fabric-NBR was 4% before curing,and in the range from 0.5% to 1% after curing. The linear expansion coefficient of cotton canvas-NBR composite was from $5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ to $8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Key words: wind turbine bearings;fabric-rubber oil seals;NBR;HNBR;FKM

朗盛中国机动化日在上海举行

中图分类号:F276.7 文献标志码:D

2012 年 9 月 6 日,朗盛中国机动化日在上海拉开序幕,活动的主题是“可持续科技引领中国未来”。

会议主要讨论如何帮助中国实现交通可持续发展的技术创新,300 多名来自行业、学术界的代表出席本次活动。与会代表一起探讨了绿色机动化领域的最新进展和发展趋势,并围绕绿色轮胎、轻型材料和电动汽车等主题开展了专题讨论。会议同期还举办了绿色机动化展览,重点展示最新的汽车技术、绿色轮胎以及高性能材料领域的发展。

朗盛有很多绿色机动化应用的产品,朗盛大中华区首席执行官柯茂庭表示,朗盛十大最畅销产品均应用于机动化相关产业。

随着中国居民可支配收入的不断增长以及日益壮大的中产阶级对机动化需求的增长,中国市场潜能巨大,而所面临的挑战是如何以一种可持续性的方式推动机动化。朗盛在整个价值链中积极参与推动绿色机动化——不仅在研发、原材料采购和生产方面,还包括提升整个社会的环保意识。

关注绿色机动化是朗盛致力于让世界变得更环保、更宜居的方式之一。朗盛现已推出绿色机动化官方网站,公众可以通过访问 [www. green-mobility. cn](http://www.green-mobility.cn),获悉相关绿色机动化的资讯。该网站主要介绍什么是绿色机动化、朗盛产品和技术如何应用于绿色机动化产业以及中国机动化日活动的最新进展。

朗盛中国机动化日得到了中国汽车技术研究中心和《21 世纪经济报道》的大力支持。

(本刊编辑部 黄丽萍)