IGBT密封结构中螺栓预紧力及分布间距对橡胶密封性能的影响

庄　龙,李正杰

(浙江零跑科技有限公司,浙江 杭州　310051)

摘要:对绝缘栅双极型晶体管(IGBT)密封结构中螺栓预紧力及分布间距对橡胶密封性能的影响进行有限元分析。结果表明:螺距对称中心截面接触应力最小,靠近螺栓位置接触应力较大,并出现峰值;在螺距一定的情况下,螺栓预紧力达到一定值后,接触应力趋于稳定;在同一预紧力下,螺栓数量增加,螺距减小,接触应力增大。工程中要合理设置IGBT密封结构的螺距来保证橡胶密封性能。

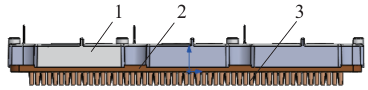
关键词:螺栓;预紧力;分布间距;橡胶密封圈;接触应力;密封性能;有限元分析

中图分类号:TQ336.4^{+}2;O241.82　　**文章编号**:1000-890X(2019)09-0679-05

文献标志码:A　　**DOI**:10.12136/j.issn.1000-890X.2019.09.0679

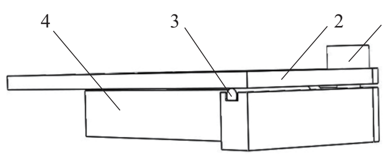
绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为电机控制器中电机驱动系统的核心部件,占整个电驱动系统的成本比例很大,其作为电器发热元件,对散热要求很高[1-2]。工程中为了保证IGBT能稳定可靠地工作,需要设计其散热结构,常规解决方案是设计经流IGBT基板圆柱凸台的水道,以进行水冷却,而IGBT基板与控制器壳体之间通过D形橡胶密封圈隔离密封,通过螺栓将IGBT基板紧固在控制器壳体上。

IGBT模型如图1所示,IGBT密封结构1/4对称模型如图2所示。



1—IGBT电子器件;2—IGBT基板;3—散热圆柱凸台。

图1　IGBT模型



1—螺栓;2—IGBT基板;3—D形密封橡胶圈;4—控制器基板。

图2　IGBT密封结构1/4对称模型

作者简介:庄龙(1985—),男,江西鹰潭人,浙江零跑科技有限公司工程师,硕士,主要从事电驱动系统结构强度仿真工作。

E-mail:zhuanglongww@sina.com

IGBT设计中需要确定装配时密封结构中螺栓的预紧力及分布间距。橡胶密封性能的评价指标包含接触应力、接触应力带宽和橡胶应力蠕变等,其中接触应力是评价橡胶密封性能的重要指标。本研究以接触应力(橡胶中心部位)为评价指标,采用通用非线性仿真软件Abaqus对IGBT密封结构中螺栓预紧力及分布间距对橡胶密封性能的影响进行仿真分析,从而为IGBT的工程设计提供依据。

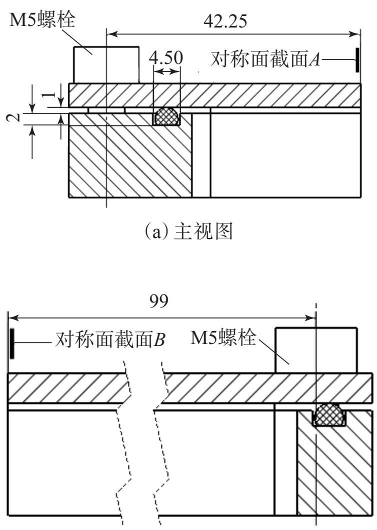
1　IGBT密封结构1/4对称模型尺寸

模型中螺栓材质为合金钢,IGBT基板材质为紫铜,D形密封圈材质为硅橡胶,控制器基板材质为ADC12铝合金。IGBT密封结构1/4对称模型设计尺寸如图3所示,其中M5螺栓到对称截面A的距离为42.25 mm(螺距84.5 mm),到对称截面B的距离为99 mm(螺距198 mm),密封槽深度为2 mm,槽宽为4.5 mm,压缩高度为1 mm,D形橡胶圈外径为3.8 mm。

2　Mooney-Rivlin橡胶本构模型

2.1　理论模型

橡胶属于超弹性材料,具有高度的几何非线性和材料非线性,采用常规材料本构模型很难模



(a) 主视图

(b) 右视图

图3 IGBT模型视图

拟，R. S. Rivlin[3]推导出基于橡胶应变能密度W的本构模型，将其表示成变形张量不变量I_1和I_2的级数形式：

$$W=\sum_{i+j=1}^{N}C_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j \quad (1)$$

式中，C_{ij}为Rivlin系数。

式(1)中，当$N=1$时即简化为Mooney-Rivlin模型：

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3) \quad (2)$$

对于变形量小于150%的中小变形，Mooney-Rivlin材料本构模型可以得到较合理的近似值。

2.2 C_{10}和C_{01}获取

C_{10}和C_{01}可根据材料拉伸试验数据进行拟合获取[4-5]，但在实际工程中可根据材料硬度进行快速近似估算。

橡胶硬度H_A与线弹性模量E经试验数据拟合有如下关系式[6-7]：

$$E=\frac{15.75+2.15H_A}{100-H_A} \quad (3)$$

对于橡胶材料，在小应变时，剪切模量G与C_{10}和C_{01}有如下关系[8]:

$$G=2(C_{10}+C_{01}) \quad (4)$$

E与G关系为

$$E=2G(1+\mu) \quad (5)$$

橡胶的泊松比$\mu\approx0.5$，所以有$E=3G$。

在小变形范围内，如已知E，可假定$C_{10}=4C_{01}$[9]。

代入式(3)，可得：

$$E=6(C_{10}+0.25C_{10})=7.5C_{10} \quad (6)$$

测得橡胶硬度后可根据公式(3)和(6)快速求出C_{10}和C_{01}近似值。本研究的橡胶参数$C_{10}=0.108$，$C_{01}=0.027$。

3 螺栓仿真参数设计

3.1 螺栓预紧力

工程中螺栓预紧力是控制螺栓拧紧扭矩或转角而间接实现的。螺栓预紧力与相应材料以及摩擦系数相关，摩擦系数一方面提供螺纹自锁，同时又消耗一部分拧紧扭矩。根据VDI 2230可比较准确地计算螺栓预紧力，本研究由下面公式简单估算螺栓拧紧扭矩T:

$$T\approx0.2F_Dd \quad (7)$$

式中，F_D为螺栓预紧力，d为螺栓公称直径。

本研究通过设计多组预紧力进行对比分析，设计的螺栓预紧力分别为：100，200，400，600，800，1 000，1 500，2 000，2 500，3 000，4 000，5 000，6 000，8 000，10 000 N。

3.2 螺距

螺距不仅影响螺栓装配数量，而且决定性影响橡胶密封性能。合理的螺距是在保证橡胶密封性能条件下尽量少用螺栓。本研究初始两方向螺距分别为84.5和198.0 mm，通过对不同螺距参数进行仿真，分析螺距对橡胶密封性能的影响。

4 有限元模型

取IGBT密封结构的1/4对称模型，在Abaqus软件中，设置正确材料属性，M5螺栓材质为合金钢，IGBT基板材质为紫铜，控制器基板材质为ADC12铝合金，D形密封圈材质为硅橡胶，有限元网格截面如图4所示，接触面网格节点尽量对齐。

在Abaqus软件中，D形橡胶密封圈要设置为杂交单元，将对称面截面设置为对称边界约束条件，各接触面设置正确的接触关系，设定正确的库伦摩擦系数，控制器底部为全约束。在模块中加载螺栓预紧力载荷，为了促进收敛性，可以建立两个分析步，第1步设置小的预紧力，使模型各部分建

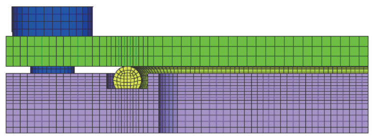


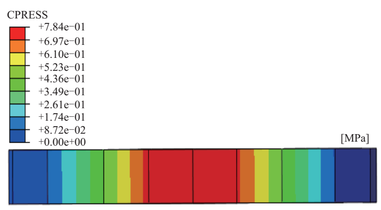
图4　1/4对称模型有限元网格截面

立稳定接触，第2步再设置载荷为目标预紧力。本模型忽略温度对橡胶参数的影响。

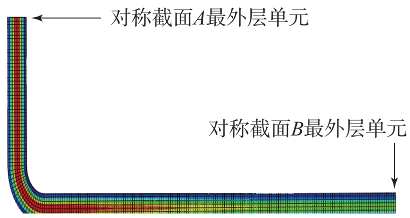
5　结果与讨论

5.1　预紧力对接触应力的影响

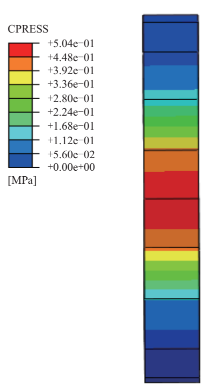
IGBT模型对称截面最外层单元位置及其接触应力见图5。



(a) 对称截面A接触应力



(b) 对称截面A和B最外层单元在1/4模型中的位置



(c) 对称截面B接触应力

图5　IGBT模型对称截面最外层单元位置及接触应力

从图5可以看出，接触应力云图颜色沿对称截面位置（螺距中部）对称分布，接触应力由对称截面向两端逐渐减小。取对称截面最外层单元中心节点接触应力进行统计分析，不同螺栓预紧力下对称截面A和B的接触应力见图6。

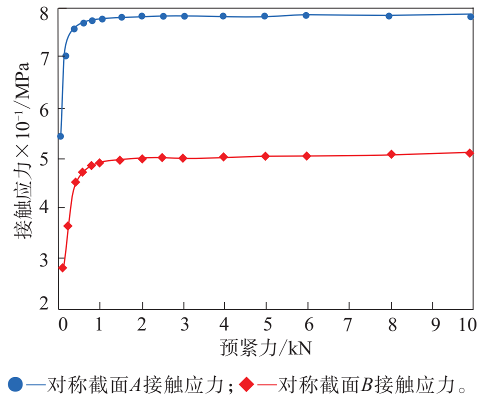


图6　不同预紧力下对称截面A和B的接触应力

由图6可以得出以下结论。

（1）接触应力在前期迅速增大，而当预紧力达到一定值（2 kN左右）后，接触应力呈稳定趋势；预紧力继续增大，接触应力变化很小。说明在螺距一定的情况下，螺栓预紧力达到某一较小值后，接触应力趋于稳定，继续增大螺栓预紧力并不能改善橡胶的密封性能。

（2）同一预紧力情况下，对称截面A的接触应力大于对称截面B的接触应力，说明螺距直接影响接触应力大小。同等情况下，螺距越大的位置处接触应力越小。

5.2　螺距对接触应力的影响

设定螺栓预紧力为5 kN，相同预紧力下的接触应力分布如图7所示。由图7可知，接触应力随橡胶与螺栓距离不同差异明显，靠近螺栓位置处接触应力较大，远离螺栓位置处接触应力较小。

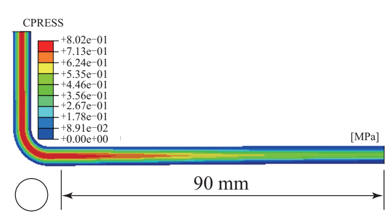
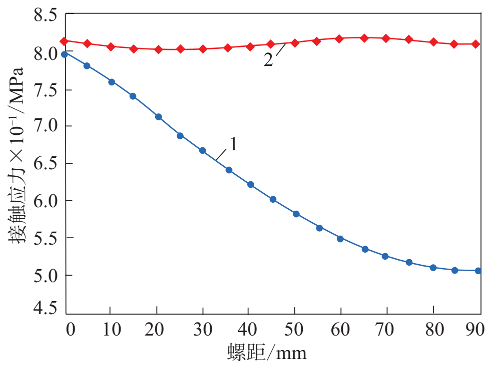


图7　5 kN预紧力下接触应力分布

图7所示90 mm长度段内密封橡胶接触应力（距螺栓的水平方向）变化情况如图8中曲线1所示。



1—1个螺栓；2—2个螺栓。

图8　5 kN预紧力下接触应力-螺距曲线

从图8可以看出，随着橡胶距螺栓距离的增大，接触应力减小，在螺距对称中心截面接触应力最小。

为了进一步分析螺距对接触应力的影响，密封结构增加1个螺栓，其分布结构如图9所示。

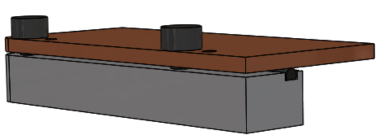


图9　增加1个螺栓的密封结构

增加1个螺栓后，接触应力如图10所示，由图10可知接触应力带宽比较均匀，说明密封橡胶整个接触面接触应力变化较小，相比图7，对称截面B接触应力明显变大。

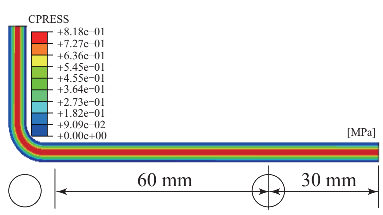


图10　增加1个螺栓后5 kN预紧力下接触应力分布

图10所示90 mm长度段内密封橡胶接触应力变化情况如图8中曲线2所示。

从图8可以看出，增加1个螺栓后接触应力明显增大且变化趋势平缓，说明橡胶密封稳定，对密封结构的密封性能有利。在螺距为60 mm处接触应力出现相对峰值，说明越靠近螺栓位置处接触应力越大。

分析结果说明，增加螺栓相当于减小螺距，相应的接触应力增大，对橡胶密封有益。当螺距过大导致螺距对称中心截面的接触应力小于橡胶密封要求时，可以适当增加螺栓，减小螺距，使接触应力满足要求。

6　结论

本研究对IGBT密封结构中螺栓预紧力及分布间距对橡胶密封性能的影响进行有限元分析，得出以下结论。

（1）在螺栓分布间距确定时，同一预紧力下从螺栓位置向螺距对称中心截面接触应力逐渐减小，即螺距对称中心截面接触应力最小，靠近螺栓位置接触应力较大，并出现峰值。

（2）在螺距一定的情况下，螺栓预紧力达到一定值后，接触应力趋于稳定，再增大预紧力，接触应力变化不大。

（3）在同一预紧力下，螺栓数量增加，螺距减小，接触应力增大。

（4）工程中要合理设置螺距来保证橡胶的密封性能，从而确保IGBT密封结构的密封性能。

参考文献：

[1] 郭淑英，王征宇，罗海辉，等. 电动汽车IGBT的研究与应用[J]. 大功率变流技术，2017（5）：29-35.

[2] 赵卫健. 纯电动汽车电机控制器的热仿真与热分析[D]. 合肥：合肥工业大学，2013.

[3] Rivlin R S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. I. Fundamental Concepts[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London，1948，240（822）：459-490.

[4] Rivin E I，Lee B S. Experimental Study of Load-deflection and Creep Characteristic of Compressed Rubber Components for Vibration Control Devices[J]. Journal of Mechanical Design，1994，116（6）：539-549.

[5] 韩斌慧. 基于Mooney-Rivlin模型的橡胶材料常数实测及应用研究[J]. 橡胶工业，2018，65（5）：499-503.

[6] 周志鸿，张康雷，李静，等. O形橡胶密封圈应力与接触压力的有限元分析[J]. 润滑与密封，2006（4）：86-89.

[7] 费雷克利 K，佩恩P K. 橡胶在工程中应用的理论与实践[M]. 杜承泽，唐宝华，罗东山，等译. 北京：化学工业出版社，1985.

[8] 詹特 A N. 橡胶工程：如何设计橡胶配件[M]. 北京：化学工业出版社，2002.

[9] 陈思，徐熹，杨怀刚，等. 基于Abaqus的橡胶密封垫对比分析[J]. 计算机辅助工程，2013，22（s2）：166-169.

收稿日期：2019-05-22

Effect of Preload and Distance Distribution of Bolts on Rubber Sealing Performance in IGBT Sealing Structure

ZHUANG Long，*LI Zhengjie*

（Zhejiang Lingpao Technology Co. ，Ltd，Hangzhou　310051，China）

Abstract：The influence of preload and distance distribution of the bolts on rubber sealing performance in insulated gate bipolar transistor（IGBT） sealing structure was analyzed by finite element method. The results showed that the contact stress of the symmetrical center section of the pitch was the smallest，and the contact stress near the bolt position was larger，and there was a peak value. When the pitch was fixed and the preload reached a certain value，the contact stress tended to be stable. Under the same preload，the number of the bolts increased，the pitch decreased and the contact stress increased. In order to ensure the sealing performance of rubber，the pitch of IGBT sealing structure should be set appropriately in engineering.

Key words：bolt；preload；distance distribution；rubber sealing ring；contact stress；sealing performance；finite element analysis

Uniroyal Tiger Paw产品线增加全天候旅游轮胎　美国《现代轮胎经销商》（www.moderntiredealer.com）2019年6月7日报道：

新Uniroyal Tiger Paw全天候旅游轮胎（见图1）是为轿车、小型厢式货车、CUV和SUV设计的。米其林北美公司Uniroyal品牌总裁Olivia Le Meur称，该产品现有114个规格，覆盖路上现有2.45亿辆车中的1.96亿辆车所用轮胎。

图1　Uniroyal Tiger Paw全天候旅游轮胎

在114个产品规格中，有50个是457 mm（18英寸）及其以上规格，可满足较大轮辋的适配要求。

该轮胎采用全天候胎面胶和高密度刀槽花纹以确保全天候性能；胎面花纹的啮合边缘适应雨天、小雪和泥泞条件；优化的接地印痕确保胎面均匀磨损。

米其林对Uniroyal Tiger Paw全天候旅游轮胎提供如下担保：

• 45天试驾；

• 对H速度级规格产品提供120 701 km（75 000英里）有限胎面磨耗里程担保；

• 对V速度级规格产品提供104 607 km（65 000英里）里程担保。

（吴秀兰摘译　赵　敏校）

一种橡胶破碎机　由南京汇龙橡胶制品有限公司申请的专利（公开号　CN 107552195A，公开日期　2018-01-09）“一种橡胶破碎机”，涉及的橡胶破碎机包括箱体、进料口和电动机等。箱体顶部设有进料口，箱体左右两侧壁分别设有第1电动机和第2电动机，两者均设于放置板顶部，放置板固定安装于箱体外壁。该橡胶破碎机通过螺旋刀片先将橡胶切成较小的胶粒，避免破碎时出现刀片卡住现象；通过过滤筛进行过滤，使不符合要求的胶粒无法掉落，避免多次重复粉碎；通过转轴带动过滤筛转动以及第1固定块与第2固定块之间的拨动作用使得过滤筛上下振荡，将筛内不符合要求胶粒的进行再次破碎，有效提高了粉碎效率。

（本刊编辑部　赵　敏）