

# 高压 IGBT 模块在湿度影响下的寿命预估模型研究

## 摘要

本文介绍了高压 IGBT 模块在湿度影响下的寿命预估模型。此模型涉及的湿度加速因子是从温湿偏置试验中提取的；高压 IGBT 的温湿偏置试验在不同的湿度和不同的电压下进行测试，目的是为了找出湿度和电压对高压 IGBT 寿命的影响。最终，我们把湿度和电压对高压 IGBT 寿命的影响以及温度因数都集成到寿命预估模型中。通过试验，我们同时发现湿度对高压 IGBT 模块的寿命有很大影响。

## 1、引言

在一些电力电子应用场合，不仅需要高压 IGBT 模块有优异的性能，还需要具有相当高的可靠性；为了满足实际需求，希望高压 IGBT 模块的寿命能达到 30 年，所以，高压 IGBT 模块的寿命预估非常重要。以前，尽管我们都知道湿度会对高压 IGBT 模块的寿命产生很大影响，但是没有一个准确的寿命预估模型把湿度因素考虑进来。三菱电机持续研究湿度对高压 IGBT 模块可靠性的影响，从而得到新的高压 IGBT 模块的寿命预估模型，通过这个模型来预估高压 IGBT 的寿命。同时，三菱电机通过采用 SCC(Surface Charge Control)技术开发了新一代高压 IGBT 模块，具有抵御高湿度的能力。

## 2、高湿引起高压 IGBT 模块失效机理

三菱电机对湿度引起的失效模式进行了研究。高湿引起高压 IGBT 模块的失效机理详见 PCIM 2015 论文[2]。

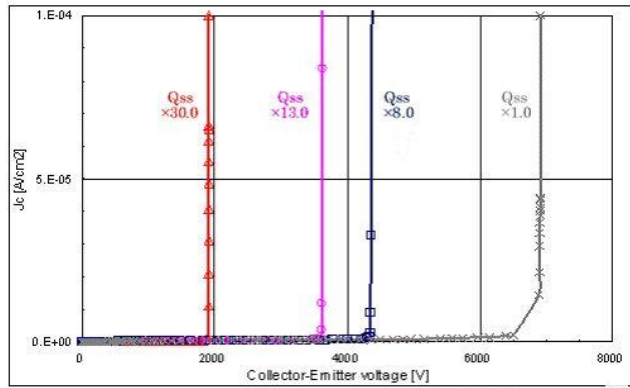


图1：6.5kV IGBT芯片在不同QSS下雪崩击穿电压仿真曲线图  
( $T_j=25^{\circ}\text{C}$ ，横轴为集电极-发射极电压，竖轴为电流密度)

三菱电机半导体

一般来说，击穿电压会随着 IGBT 芯片边缘电荷量  $Q_{SS}$  的增加而降低。图 1 为 6.5kV 高压 IGBT 芯片的击穿电压随着  $Q_{SS}$  变化的曲线图。高湿度工况下的失效机理如下所述。

当给集电极和发射极之间施加电压，高压 IGBT 内部的凝胶会被电极化，芯片的边缘会累积电荷  $Q_{SS}$ ，同时，凝胶中的湿气会加速电荷的集聚，此时，其击穿电压在高湿环境下会下降。所以湿度和电压会加速 IGBT 模块的退化，同时温度也会加速 IGBT 模块的退化。

三菱电机通过采用新的 IGBT 芯片边缘技术 SCC (Surface Charge Control) 提高了高压 IGBT 模块在抵御高湿度方面的鲁棒性。

为了抑制 IGBT 芯片边缘电荷集聚，SCC 技术采用了优化的半绝缘性材料替代传统的绝缘材料，这个半绝缘性层为集聚的载流子提供了通路，如图 3 所示，在高湿工况下，产生的载流子会通过半绝缘层传递出去，避免了电荷的大量集聚。

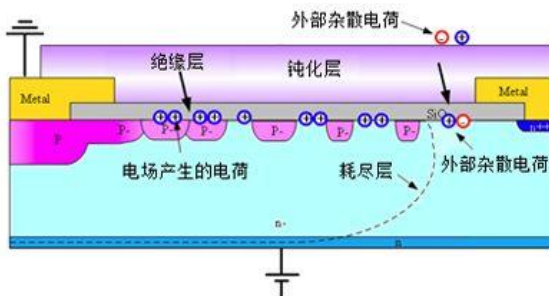


图2：传统IGBT芯片边缘结构

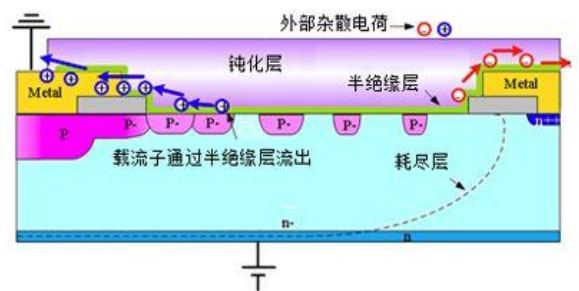


图3：采用SCC技术的IGBT芯片边缘结构

三菱电机半导体

### 3、湿度影响下的寿命预估模型

C. Zorn 介绍了考虑湿度、温度和电压的加速模型[1]。

$$\alpha_f(RH, T, V) = \left(\frac{RH_a}{RH_u}\right)^x \cdot \exp\left(\frac{E_A}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right]\right) \cdot \left(\frac{V_a}{V_u}\right)^y$$

公式中， $\alpha_f$  为测试的加速因子，也就是加速（后缀为 a）测试条件下 MTTF（Mean Time To Failures，平均无故障时间）与参考（后缀为 u）测试条件下 MTTF 之比。 $E_A$  是活化能，在 0.79eV 和 0.95eV 之间， $k$  为玻尔兹曼常数。指数  $x$  为相对湿度的影响，指数  $y$  为电压的影响，都是经验数据，但是必须通过实际评估来确认。我们把此加速模型扩展到寿命预估模型中。

湿度的寿命模型为：

$$LT = \frac{LT_b}{\pi_H \pi_T \pi_V}$$

湿度加速因子：

$$\pi_H = \left(\frac{RH}{RH_u}\right)^x$$

温度加速因子：

$$\pi_T = \exp\left(\frac{E_A}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u + 273K} - \frac{1}{T + 273K}\right]\right)$$

电压加速因子：

其中：LT<sub>b</sub>：在参考条件下的基本寿命；

RH[%]：用于寿命计算的外界环境相对湿度；

T[°C]：用于寿命计算的外界环境温度；

V[V]：用于寿命计算的电压；

参考条件下的相对湿度为：RH<sub>u</sub>=75%。

参考条件下的环境温度为：T<sub>u</sub>=25°C。

参考条件下的电压为：V<sub>u</sub>=1500V。

相对湿度的经验影响因子为  $x$ 。

电压的经验影响因子为  $y$ 。

活化能  $E_A=0.79\text{eV}$ 。

玻尔兹曼常数  $k=8.62 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ 。

LT 是考虑湿度、温度和电压的预估寿命，公式中的参数，LTb 是参考条件下的基本寿命，与每个高压 IGBT 模块的结构相关，湿度加速因子  $\pi_H$ ，温度加速因子  $\pi_T$ ，电压加速因子  $\pi_V$ ，其它的参数来自加速模型。在此寿命估算模型中，活化能 EA 定义为最小值 0.79eV。同时，参考条件，RHu=75%和 Tu=25°C是东京 8 月份的平均环境条件。除此之外，Vu=1500V 为直流网压。

## 4、加速因子的估算

### 4.1 温湿反偏试验测试结果

3.3kV 高压 IGBT 的温湿反偏试验是在以下三个条件下测试：测试条件 A (Ta=85°C，相对湿度=85%，VCE=2800V)，测试条件 B (Ta=85°C，相对湿度=95%，VCE=2800V)，测试条件 C (Ta=85°C，相对湿度=95%，VCE=2000V)，测试结果如图 4，图 5 和图 6 所示。

根据失效机理，湿度引起的失效应该在芯片的边缘区域。试验过程中发生的失效点，同样在芯片的边缘，如图 7 所示。

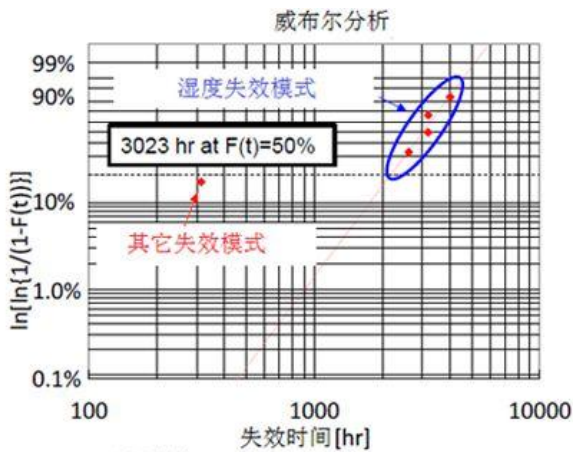


图4：测试条件A：Ta=85°C，RH=85%，VCE=2800V

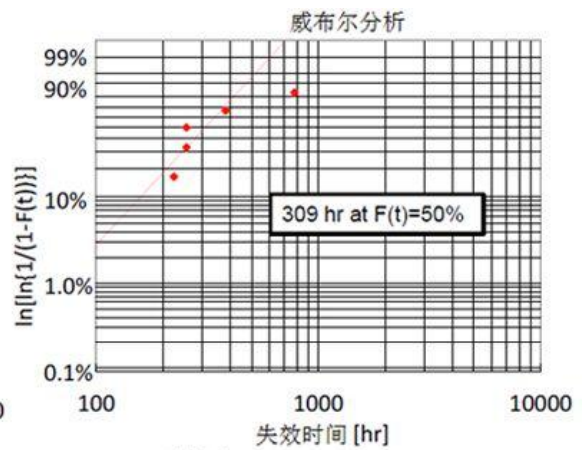


图5：测试条件B：Ta=85°C，RH=95%，VCE=2800V

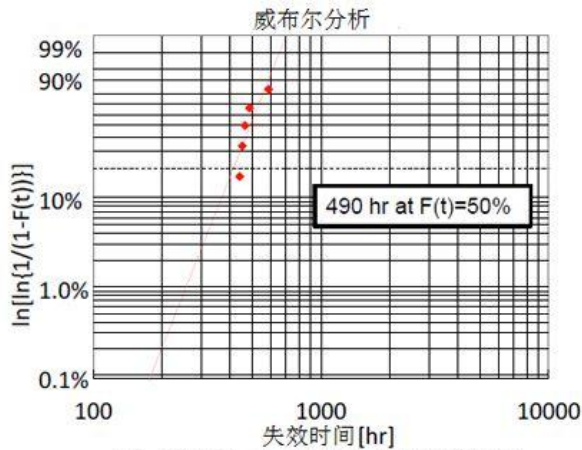


图6：测试条件A：Ta=85°C,RH=85%,VCE=2000V

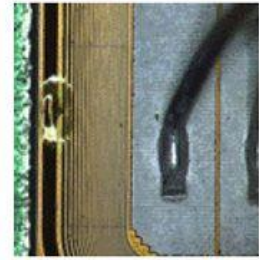


图7：温... 三菱电机半导体

#### 4.2 湿度加速因子

如图 4 所示，在测试条件 A 的平均寿命为 3023 个小时。同样，如图 5 所示，在测试条件 B 的平均寿命为 309 个小时。所以，从相对湿度 85%到相对湿度 95%，加速因子  $\alpha_{f\_A-B}$  通过计算为  $3023/309=9.78$ 。相对湿度的经验影响因子  $x$  通过下式计算：

$$x = \frac{\ln(\alpha_{f\_A-B})}{\ln\left(\frac{RH_{a\_testB}}{RH_{a\_testA}}\right)}$$

三菱电机半导体

这里  $RH_{a\_testB}=95\%$ ,  $RH_{a\_testA}=85\%$ , 所以上式的计算结果  $x=20.5$ 。

#### 4.3 电压加速因子

如图 5 所示，在测试条件 B 的平均寿命为 309 个小时。同样，如图 6 所示，在测试条件 C 的平均寿命为 490 个小时。所以，从电压 2000V 到电压 2800V，加速因子  $\alpha_{f\_C-B}$  通过计算为  $490/309=1.59$ 。电压的经验影响因子  $y$  通过下式计算：

$$y = \frac{\ln(\alpha_{f\_C-B})}{\ln\left(\frac{V_{a\_testB}}{V_{a\_testC}}\right)}$$

三菱电机半导体

这里  $V_{a\_testB}=2800V$ ,  $V_{a\_testC}=2000V$ , 所以上式的计算结果  $y=1.37$ 。

## 5. 3.3kV IGBT 寿命预估

### 5.1 基本寿命时间

这里，参考条件定义为  $RH_u=75\%$ ， $T_u=25^\circ\text{C}$  和  $V_u=1500\text{V}$ 。通过公式 (1)，可以得到测试条件 A 中的加速因子  $\alpha_{f\_A}$  为 5.31k，测试条件 B 中的加速因子  $\alpha_{f\_B}$  为 52.0k，测试条件 C 中的加速因子  $\alpha_{f\_B}$  为 32.8k。综合这些加速因子，温湿反偏试验测试 A、测试 B 和测试 C 转换为如表 1、表 2 和表 3 所示的参考条件。

表 1：测试条件 A 转换为参考条件

	失效时间
测试条件 A (85°C, 85%RH, 2800V)	315 小时
	2618 小时
	3196 小时
	3203 小时
	3995 小时
参考条件	191 年 1588 年 1938 年 1943 年 2423 年 (转换值)

表 2：测试条件 B 转换为参考条件

	失效时间
测试条件 B (85°C, 95%RH, 2800V)	224 小时
	255 小时
	255 小时
	382 小时
	780 小时
参考条件	1329 年 1513 年 1513 年 2266 年 4628 年 (转换值)

表 3：测试条件 C 转换为参考条件

	失效时间
测试条件 C (85°C, 95%RH, 2000V)	439 小时
	451 小时
	464 小时
	485 小时
	588 小时
参考条件	1643 年 1687 年 1736 年 1815 年 2200 年 (转换值)

以上失效点集成为图 8 所示的威布尔曲线图，从图中可以得到，在参考条件下  $F(t)=10\%$  的寿命为 1210 年。同时，在此威布尔分析中，排除了最大点和最小点。所以，在参考条件下，3.3kV IGBT 的寿命  $LT_b=1210$  年。



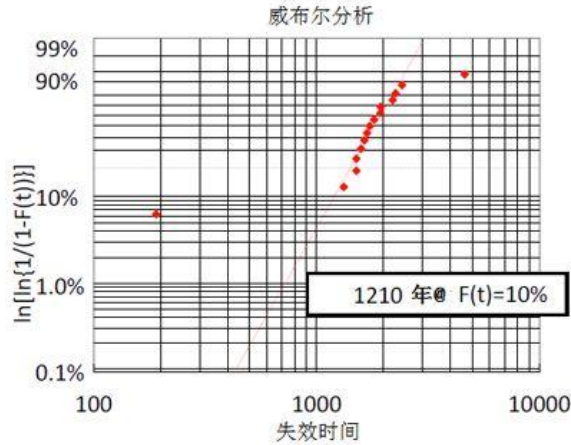


图8：温湿度反偏试验转换为参考条件 (RH=75%、Ta=25°C、VCE=1500V)

三菱电机半导体

### 5.2 寿命预估模型

所有参数通过温湿反偏试验 A、试验 B 和试验 C 得到确认。所以新的寿命预估模型如下：

湿度加速因子：

$$\pi_H = \left(\frac{RH}{RH_u}\right)^x$$

三菱电机半导体

温度加速因子：

$$\pi_T = \exp\left(\frac{E_A}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u + 273K} - \frac{1}{T + 273K}\right]\right)$$

三菱电机半导体

电压加速因子：

$$\pi_V = \left(\frac{V}{V_u}\right)^y$$

三菱电机半导体

$L_{T_b}=1210$  年,  $T_u=25^\circ\text{C}$ ,  $V_u=1500\text{V}$ ,  $x=20.5$ ,  $y=1.37$ ,  $E_A=0.79\text{eV}$ ,  $k=8.62 \times 10^{-5} \text{eV/K}$

新的寿命预估模型仅考虑了湿度引起的失效,但是在实际运行时必须考虑除了湿度以外其它因素引起的失效。

### 5.3 寿命预估结果

通过以上寿命预估模型,可以预估 3.3kV IGBT 在不同工况下的寿命。图 9 展示了寿命预估结果,包含了在直流 1500V 下 1 年、30 年和 1000 年的温度湿度矫正曲线。通过这些曲线,我们可以看到 3.3kV IGBT 有足够强的抵御湿度能力。

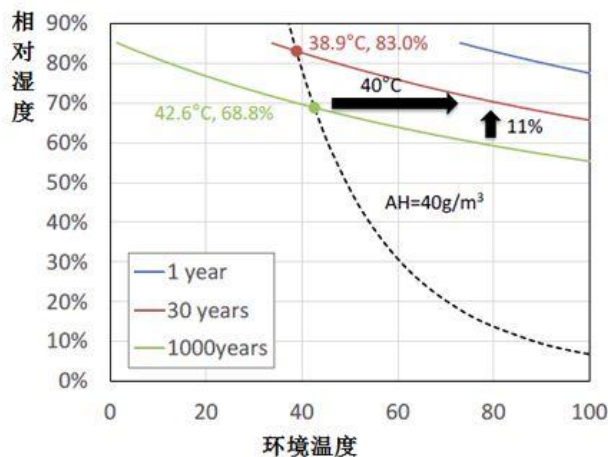


图9：在直流1500V下的寿命预估结果

从上图可以看出，相对湿度增加 11%或者温度增加 40℃，都会造成寿命从 1000 年减为 30 年，所以，相对来说，相对湿度的影响比温度影响更大。一般来说，当变流器内部升温时，绝对湿度会保持不变。如果环境条件从温度 38.9℃、相对湿度 83.0%变为温度 42.6℃、相对湿度 68.8%，但是绝对湿度值保持 40g/m<sup>3</sup>，寿命会从 30 年增加到 1000 年。所以，预加热是一种非常有效的抑制湿度失效的方法。

当然，1000 年的计算值仅仅是考虑湿度情况下的寿命，如果考虑上其它因素，比如温度循环寿命等，IGBT 模块实际寿命在实际中并没有这么长。

同时，以上寿命预估模型是基于温湿反偏试验，所以没有考虑温度快速变化的情况。特别当快速冷却会造成凝露，比高湿工况更加严酷。在实际工况中，这种温度快速变化的工况也应该考虑。为了防止凝露，同样的，预加热是一种有效的手段。

## 6. 结论

本文介绍了考虑湿度影响的寿命预估模型。通过这个模型，得到了 1500V 情况下的 1 年、30 年和 1000 年的温度湿度矫正曲线，并且确认了 3.3kV IGBT 模块具有足够的抑制湿度失效的能力。

同时，本文确定了高湿会对高压 IGBT 模块的寿命产生很大的影响，所以如果变流器在高湿工况下时，必须考虑湿度带来的影响。预加热是一种非常有效的抑制湿度失效的方法。



## 7. 参考文献

[1]Christian Zorn, Nando Kaminski, “Acceleration of Temperature Humidity Bias(THB) Testing on IGBT Modules by High Bias Levels,” 2015 IEEE

[2]N. Tanaka, et al., “Robust HVIGBT Modules Design against High Humidity,” PCIM Europe2015

[3]Shigeto Honda, Tatsuo Harada, Akito Nishii, Ze Chen, Kazuhiro Shimizu, “HighVoltage Device Edge Termination for Wide Temperature Range plus Humidity withSurface Charge Control (SCC) Technology,” ISPSD 2016.

(来源：三菱电机功率器件制作所；\*\*三菱电机（欧洲）有限公司)