

国产化 6 500 V/200 A 高压大功率 IGBT 的研制

陈宏¹, 杨春宇¹, 刘革莉¹, 武彩生¹, 曹琳¹, 孙军²

(1. 中车永济电机有限公司 技术中心, 陕西 西安 710016;
2. 上海北车永电电子科技有限公司, 上海 201203)

摘要: 研制的 IGBT 器件采用完全国产化芯片, 通过 ANSYS 仿真软件对电磁场、热、应力分布等特性进行仿真, 实现 IGBT 器件结构设计最优化; 研制的高压大功率 IGBT 通过了器件、功率模块、辅助变流柜和机车级的试验验证。试验结果满足设计要求, 并已形成了芯片—IGBT 器件—功率模块—变流器完整产业链, 成功批量应用在国内轨道交通领域, 具有重大的社会意义和市场前景。

关键词: IGBT; 功率模块; 封装; 双脉冲测试; 优化设计; 高压大功率; ANSYS 仿真

中图分类号: U264.3⁺7; TN303

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.01.001

Development of 6 500 V/200 A High-voltage and High-power Localization IGBT

CHEN Hong¹, YANG Chunyu¹, LIU Geli¹, WU Caisheng¹, CAO Lin¹, SUN Jun²

(1. Technology Center, CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China;
2. Shanghai CNR Yongdian Electronics Technology Inc., Shanghai 201203, China)

Abstract: It designed and packed localization IGBT and FRD chip of CRRC. Structural optimization of IGBT was designed through ANSYS simulations of electromagnetic field, heat, stress and so on. The developed IGBT had passed the test of component level, module level, convert level and locomotive class, and satisfy the design requirement. The chip, IGBT, power module to convert industry chain had been formed and successfully used in field of trail transport in China, which has great social signification and market prospect.

Keywords: IGBT; power module; package; test of double pulses; optimal design; high-voltage and high-power; ANSYS simulation

0 引言

IGBT 是世界公认电力电子第三次技术革命的代表性产品, 作为电机控制和功率变换的关键核心部件, 是必不可少的功率“核心”, 是实现能源转换的关键器件, 已广泛应用在轨道交通、航空航天、工业变频、工业控制、智能电网及新能源领域中。

我国铁路动车、机车技术实现了跨越式快速发展, 市场需求量迅速扩大, 作为牵引辅助系统功率变换的核心器件, IGBT 年需求量巨大。但是由于 IGBT 设计、制造及测试技术复杂, 我国自主研发、设计、生产的 IGBT 芯片, 以及采用国产芯片封装的高压大功率 IGBT 方面, 还处于起步阶段, 轨道交通领域用 IGBT 需求依赖进口。这种状况严重制约了中国轨道交通装备的自主创新和民族品牌创立, 降低了国内动车、机车装备的国际市场竞争力, 不利于中国高铁走出去的战略规划。

为促进国内 IGBT 产业的技术发展, 进一步提高铁

收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2016-11-21

基金项目: 国家 02 专项 04 课题: 高压大功率 IGBT 测试与应用项目 (02 专项即高压大功率 IGBT 在轨道交通中的技术开发与示范应用)

路动车、机车关键部件的国产化率，提高动车、机车在国际市场竞争力，进行完全国产化高压大功率 IGBT 模块的研制具有重要意义和市场前景。

保证设计的 IGBT 器件具备优良性能。

1 国产化 IGBT 器件封装与测试

1.1 国产化 IGBT 芯片和 FRD 芯片设计

国产化 6 500 V/25 A IGBT 芯片和 6 500 V/50 A FRD 芯片实现了中车自主化设计和本地化生产，其结构设计参见图 1。高压大功率的 6 500 V 国产化芯片实现了 IGBT 元胞结构及芯片布局的自主设计、终端结构自主设计和终端保护环工艺开发、正面和背面工艺流程自主设计和工艺开发。

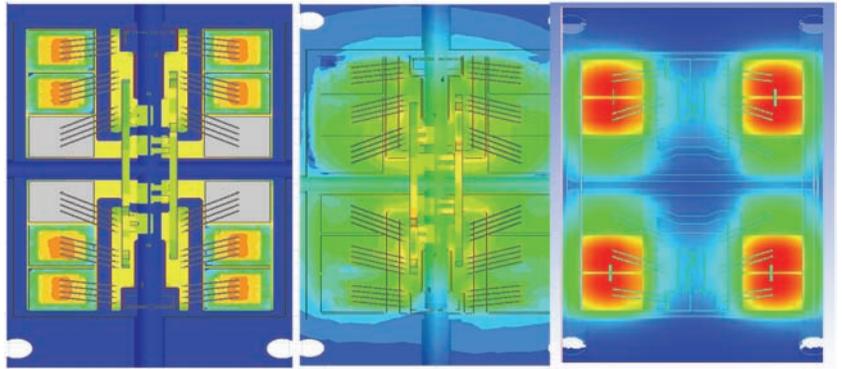


图 2 电流密度 - 电磁场分布 - 热分布仿真图

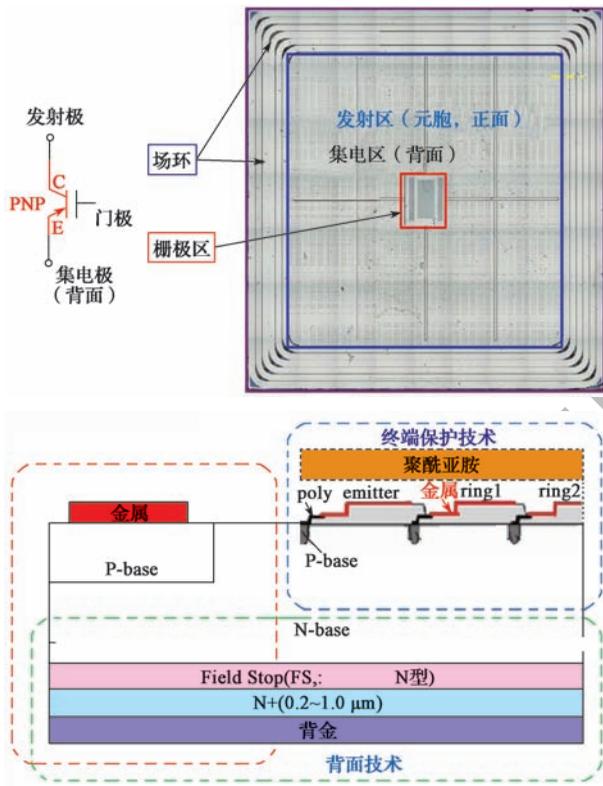


图 1 IGBT 芯片结构设计图

1.2 器件的封装

国产化 IGBT 器件的封装模式不同于以往采用进口 IGBT 子单元封装，本次的封装是从 IGBT 芯片筛选开始，整个过程涉及结构设计、工艺设计以及测试设计 3 个阶段。

1.2.1 IGBT 器件封装结构与 ANSYS 仿真

在 IGBT 器件结构设计中引入 ANSYS 软件仿真环节，利用三维电磁、温度场及应力场仿真软件、寄生参数提取软件和变流系统仿真软件，对 IGBT 器件设计中关注的电磁场、热及应力分布、均流、开关特性及引线寄生参数等影响器件电气特性的参数进行仿真(图 2, 图 3)，并模拟 IGBT 器件实际运行工况，依据仿真结果进行优化和改进，保证结构布局达到最合理，

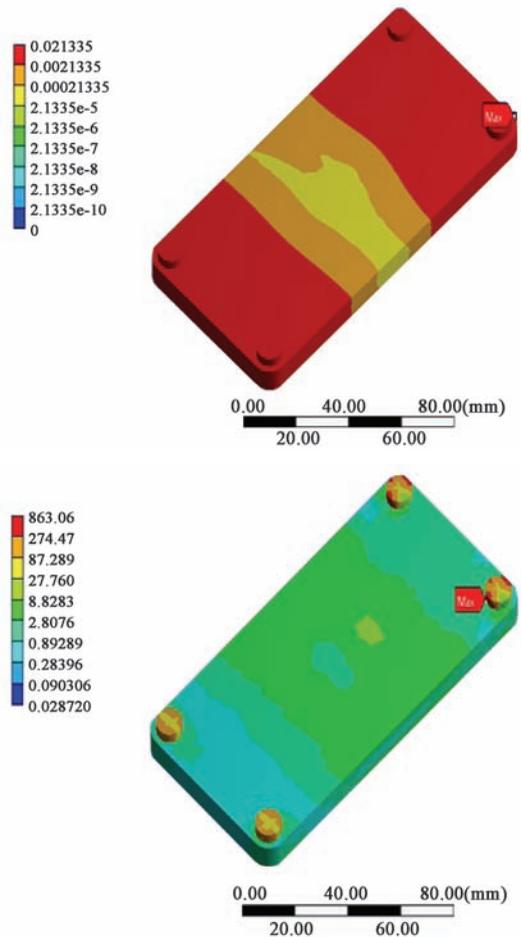


图 3 模块弧形底板应力及变形仿真

器件的整体外形尺寸设计完全与国外产品一致，满足互换。通过灌封硅凝胶实现模块内部芯片的绝缘隔离和保护；通过灌封环氧树脂实现器件内部与外部环境的隔离。外部的硬质塑料外壳为器件内部提供密闭保护空间，对器件外部连接提供机械支撑。进行外壳、顶盖设计时，采用特殊“裙边”结构设计，保证器件的绝缘能力。器件内部结构采用焊接形式，通过 2 个子单元与散热基板焊接，满足 IGBT 器件 200 A 的电流容量要求。通过外设的 3 个输出端子实现外部电路与器件内部电路的连接。C/E 主输出端子采用弹簧电极结构，在保证器件通流能力前提下，提高电极抗机械冲

击能力, 降低杂散电感。

1.2.2 IGBT 器件封装关键工艺控制

1) 芯片的选配

国产芯片规格为 IGBT 6 500 V/25 A, FRD 6 500 V/50 A, 因此封装 6 500 V/200 A IGBT 器件需要多个 IGBT、FRD 芯片进行并联使用。该 IGBT 器件采用 2 个子单元并联, 每个子单元由 8 个 IGBT 芯片和 4 个 FRD 芯片并联使用。芯片电特性的一致性直接影响着整个器件的电特性, 因此需要对芯片进行筛选, 保证器件内芯片的一致性。由于受半导体芯片生产流片工艺水平的限制, 生产的 IGBT 与 FRD 芯片特性均存在一定的离散性, 在性能上差异较大, 为了提高 IGBT 器件封装的良品率, 必须对芯片进行测试筛选。

芯片的筛选很关键, 不仅要保证器件内同类芯片性能参数的一致性, 同时还要保证 IGBT 与 FRD 芯片的电特性参数相匹配, 减小芯片间的耦合振荡作用, 以免造成 IGBT 或 FRD 芯片损坏。

电特性测试主要通过 IGBT 静态参数测试台进行。结合芯片的实际测试参数, 依据芯片的筛选方案: $V_{CE(sat)}$ 、 V_F 、 $V_{GE(th)}$ 、 $T_{d(off)}$ 、 $T_{d(on)}$ 特性参数一致或相近、静态参数偏差不超过 0.2 V, 对芯片进行筛选分组使用。对测试分组的 IGBT、FRD 芯片焊接在设计 DBC 基板上, 超声波键合连线, 进行通电测试, 确定筛选芯片的电特性在通电状态的均流性。

2) 标准的 2 次焊接

一次焊接主要完成 6 500 V IGBT、FRD 芯片与 DBC 基板的焊接, 采用专用的 6 500 V/200 A IGBT 器件芯片焊接工装, 实现芯片、DBC 基板与焊料的装配。采用真空焊接工艺, 严格控制焊接炉的炉温、焊接气体环境、焊接时间、升降温速度等工艺技术参数, 采用专用焊接工装完成焊接工艺, 实现芯片、DBC 基板的无空洞焊接。

通过工艺技术和试验验证, 采用真空焊接技术, 配合使用专用焊接工装, 精确控制焊接设备的焊接温度、真空度、气体浓度, 实现 IGBT 子单元与散热基板的低空洞率二次焊接, 满足 IGBT 器件超声波焊接检测标准, 从而保证子单元焊接质量和 IGBT 器件良好的散热性能, 提高了器件的应用可靠性。

子单元键合与超声波空洞率焊接检测结果分别见图 4, 图 5。

1.2.3 国产化封装器件的测试

通过超声波空洞率焊接检测后进行外壳涂胶及装配、栅极印刷电路板焊接、顶盖装配、硅凝胶灌封和固化、模块电极折弯及环氧树脂的灌封和固化等工艺后完成完全国产化 6 500 V/200 A IGBT 器件的封装。

对封装后的国产化 IGBT 器件进行了常温、高温条

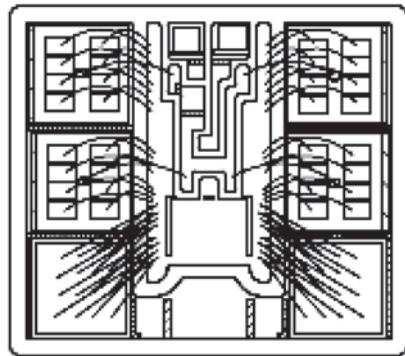


图 4 子单元键合图

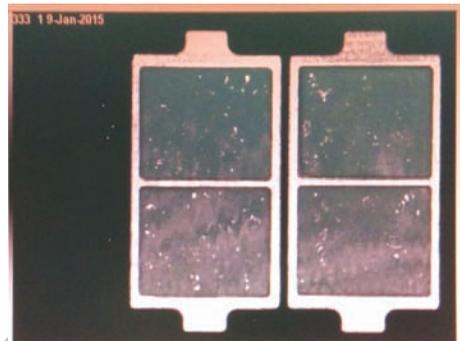


图 5 超声波空洞率焊接检测结果

件下的静态电学特性参数测试, 测试结果如表 1 所示。

表 1 国产化 IGBT 器件典型静态测试参数

温度/°C	I_{GES}/nA ($V_{CE}=0 V$, $V_{GE}=20 V$)	$V_{CE(sat)}/V$ ($I_C=200 A$, $V_{GE}=15 V$)	V_F/V ($I_F=200 A$)	I_{CES}/mA ($V_{CE}=6 500 V$, $V_{GE}=0 V$)
25	8	4.308	3.687	0.154
125	16	4.808	4.390	2.536

对国产化 IGBT 器件的动态测试采用双脉冲法进行测试, 通过双脉冲测试最有效地测试 IGBT 器件开关行为参数 E_{on} 、 E_{off} 、 I_{SC} 等, 以获得 IGBT 器件的动态特性, 验证 R_{gon} 和 R_{off} 参数是否合适, 是否满足器件的安全工作区, 测试结果如表 2 所示。

表 2 国产化 IGBT 器件动态测试参数

器件	$t_{d(off)}/\mu s$	$t_f/\mu s$	E_{off}/mJ	$V_{CE(pk)}/V$	$t_{d(on)}/\mu s$	$t_r/\mu s$	E_{on}/mJ	I_{RM}/A	$t_{rr}/\mu s$	$Q_{rr}/\mu C$	E_{rec}/mJ
#1	13.972	2.157 3	1 182	3 620	0.528 7	0.245 1	2 454	188	5.328 6	289	396
#2	14.069	2.178 5	1 170	3 620	0.539 3	0.239 5	2 464	188	5.396 1	297	404
#3	10.954	2.064 5	1 249	3 780	0.574 2	0.260 6	2 708	139	5.763 6	292	383
#4	10.817	1.896 6	1 211	3 750	0.558 2	0.252 1	2 665	139	6.133 1	298	386
平均值	12.453	2.074 0	1 203	3 693	0.550 1	0.249 3	2 573	163	5.655 1	294	392

测试条件: $V_{ce}=3 600 V$, $I_c=200 A$, $R_{gon}=13 \Omega$, $R_{goff}=90 \Omega$, $C_{gc}=22 nF$ 。

通过表 1、表 2 测试参数可以看出与其他厂家同等级的 IGBT 的参数相当, 满足设计要求。

2 装配功率模块的测试与应用

为了更好地对国产化 6 500 V/200 A IGBT 开关特性、串并联等特性进一步测试与国产化 IGBT 的应用, 功率模块级测试借助 HXD2B 机车辅助逆变功率模块, 完成包括双脉冲等模块例行、型式试验及装车运行考

核试验,完成辅助逆变功率模块用 IGBT 的国产化替代和小批量商业化应用。

HXD₂B 机车辅助逆变功率模块中,主要通过三相逆变桥将输入直流 3 775 V 变为 1 440 V 交流,再通过变压器为机车提供三相 400 V 交流电源,供固定频率负载和可变频率负载使用。每台辅助变流柜包含 2 个辅助逆变功率模块 SCV1 和 SCV2,分别输出固定频率电压和可变频率电压。2 个模块各配备 1 台 ACU。在正常运行情况下,2 个模块可以独立运行,当其中一个模块故障时,辅助变流柜将工作在救援模式,此时连接在故障模块的负载会自动转换到正常模块,并按固定频率工作。

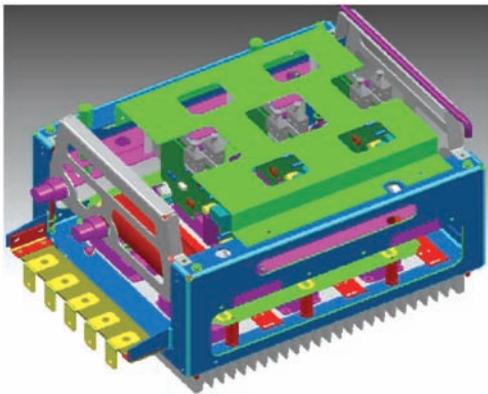


图 6 国产化 6 500 V/200 A IGBT 器件装配的功率模块

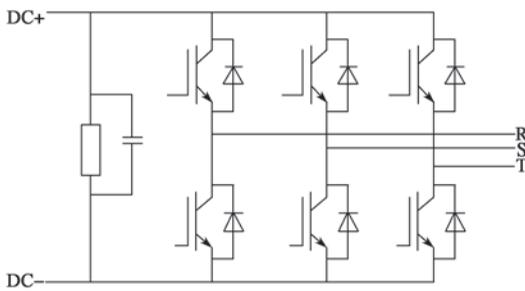


图 7 测试用功率模块主电路拓扑图

根据国产化 IGBT 的静、动态特性,对驱动板优化设计,对装配国产化 IGBT 器件的辅助逆变功率模块进行开关试验、2 倍电流试验、短路试验验证及温升试验。图 8~ 图 10 中,CH1 为门极驱动脉冲信号,CH2 为状态反馈信号,CH3 为 V_{CE} 电压,CH4 为电流。

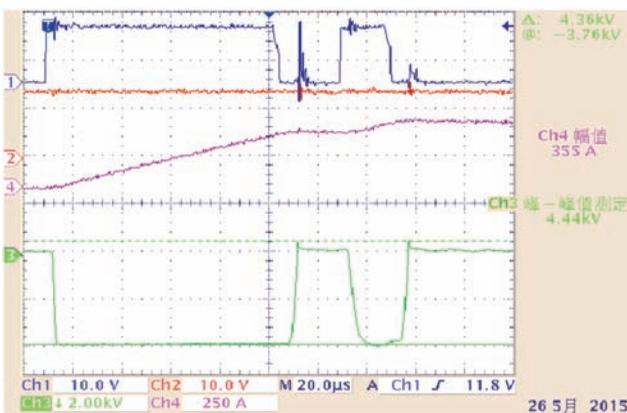


图 8 上管 2 倍电流试验 (4 000 V/355 A) 波形图

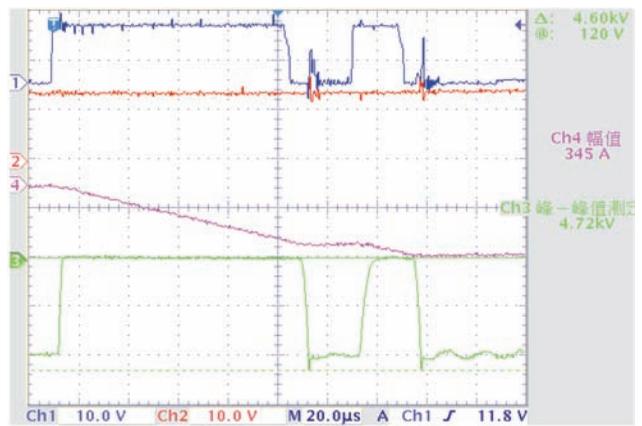


图 9 下管 2 倍电流试验 (4 000 V/355 A) 波形图

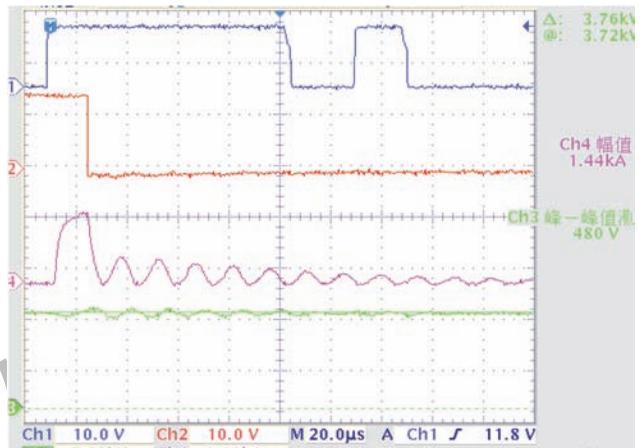


图 10 下管短路电流试验 (3 900 V/1 500 A) 波形图

通过单管和桥臂的开关测试、2 倍电流测试及短路测试后,将辅助逆变功率模块装入辅助变流柜完成了轻载功率试验,额定满载功率 110 kVA 试验、额定最大视在功率 150 kVA 试验、额定非持久 1 h 的应急视在功率 160 kVA 试验、额定满载 110 kVA 累计长达 50 h 运行考核试验。该功率模块自去年装车以来,已在线无故障运行超过 15 万 km。完全国产化 6 500 V/200 A IGBT 器件满足机车辅助系统要求,达到了功率模块用 IGBT 的国产化替代,为下一步大批量运用打下了坚实基础。

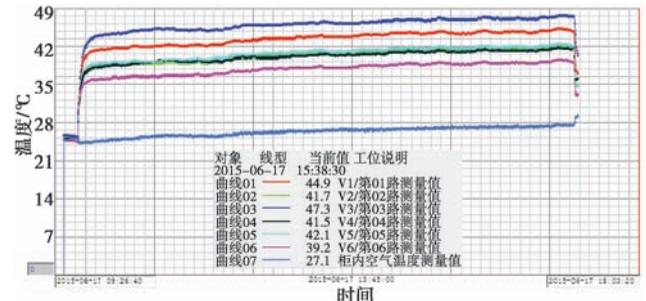


图 11 功率模块 110 kVA 满载运行 8 h 温升曲线图

3 结语

本文研制的国产化高压大功率 IGBT 器件,采用中车完全国产化的 6 500 V/25 A IGBT 芯片,6 500 V/50 A FRD 芯片,通过 ANSYS 软件对 IGBT 器件设计中关注的电磁场分布、热分布、应力分布、均流特性、开关特性、

(下转第 13 页)