

宽禁带半导体

DOI:10.12450/j.gtdzx.202401003

3 300 V 高性能混合 SiC 模块研制*

刘艳宏** 杨晓菲 王晓丽 荆海燕 刘 爽

(中车永济电机有限公司, 西安, 710016)

2023-08-04 收稿, 2023-11-24 收改稿

摘要:将 Si 基绝缘栅双极型晶体管 (Insulated gate bipolar transistor, IGBT) 芯片与 SiC 结型势垒肖特基二极管芯片按照双开关电路结构排布, 开发了一种 3 300 V 等级混合 SiC 模块, 对其设计方法、封装工艺、仿真、测试结果进行分析, 并对标相同规格 IGBT 模块。混合 SiC 模块低空洞率焊接满足牵引领域高温度循环周次的要求, 冗余式的连跳键合结构可以有效增强功率循环能力。采用双脉冲法测试动态性能, 测试结果表明该混合 SiC 模块反向恢复时间减小了 84%, 反向恢复电流减小了 89.5%, 反向恢复能量减小了 99%, 一次开关产生的总损耗降低了 43.3%。混合 SiC 模块消除了开关过程中电压和电流过冲现象, 在高电压、大电流和高频率的应用工况下具有明显的优势。

关键词:绝缘栅双极型晶体管; 结型势垒肖特基二极管; 混合 SiC 模块

中图分类号: TN389 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2024)01-0013-06

Development of 3 300 V High-performance Hybrid SiC Module

LIU Yanhong YANG Xiaofei WANG Xiaoli JING Haiyan LIU Shuang

(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an, 710016, CHN)

Abstract: A 3 300 V hybrid SiC module was developed based on the arrangement of Si insulated gate bipolar transistor chip and SiC junction barrier Schottky chip according to dual switch circuit structure. The design method, packaging process, simulation and test results were analyzed. The hybrid SiC module was compared to IGBT module of the same specification. The low soldering voids of the hybrid SiC module meet the requirements of high temperature cycling capacity in the traction field. The redundant skip bonding structure can effectively enhance the power cycling ability. The dynamic performance was tested by double pulse circuit. The test results show that the recovery time, the recovery current, the recovery energy and the power loss of one primary switch in hybrid SiC module were reduced by 84%, 89.5%, 99% and 43.3%, respectively. The voltage and current overshoots during switching operation are eliminated. It has obvious advantages under the application conditions of high voltage, high current and high frequency.

Key words: insulated gate bipolar transistor; junction barrier Schottky diode; hybrid SiC module

引 言

牵引级绝缘栅双极型晶体管 (Insulated gate bi-

polar transistor, IGBT) 模块广泛应用于高速动车组、干线铁路机车及城市轨道交通列车。与工业级 IGBT 模块相比, 牵引级 IGBT 模块需要应对更加复杂的工况和应用环境^[1], 需要承受剧烈的机械冲击

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1201802-3)

** 联系作者: E-mail: liuyan hong2004@126.com

和振动,频繁的负载变化,极端的严寒和高温气候。牵引级 IGBT 模块必须具备低功耗、宽安全工作区及高工作结温^[2]等特性,其温度循环能力和功率循环寿命一般是普通工业级 IGBT 的 10 倍^[3]。

碳化硅(SiC)材料具备禁带宽度大、击穿电场强度高和热导率高等优异性能,这使得 SiC 器件具有更好的高温特性、更高的阻断电压、更低的功耗以及更快的开关速度^[4-6],更适合牵引应用工况。

目前,Rohm、Cree、三菱公司都已经推出了商业化的全碳化硅功率模块,然而其制作工艺相当复杂,且价格相对较高。从综合性能与成本角度考虑,SiC 混合功率模块具有一定的优势^[7]。富士电机、三菱、英飞凌等公司已实现应用于不同领域的 SiC 混合功率模块的量产(电压多为中低压),并开展了应用于牵引系统的高压大功率混合功率模块的研究^[8-9],然而在牵引领域的应用只有少量报道。

出于碳化硅材料的优异性能及成本考虑,本文开发了一种基于 SiC 结型势垒二极管(Junction barrier Schottky diode, JBS)的 3 300 V/500 A 混合 SiC 功率模块,并将该混合模块与 3 300 V/500 A IGBT 模块进行对比,证明了混合 SiC 模块在高电压、大电流和高频率的应用工况下具有明显的优势,满足牵引领域应用需求。

1 模块结构与封装

1.1 模块结构

采用 ABB 公司的 Si 基 IGBT 芯片(型号为 5SMY12M3300, 3 300 V/62.5 A)和南京电子器件研究所自主研发的 SiC 基 JBS 芯片(3 300 V/30 A)进行 3 300 V/500 A 混合 SiC 模块的研制,并将模块中的 IGBT 芯片终端材料结构进行升级,提升抗潮和耐压性能。该模块的尺寸为 130 mm×160 mm×38 mm,外形接口如图 1 所示,内部焊接结构如图 2 所示。

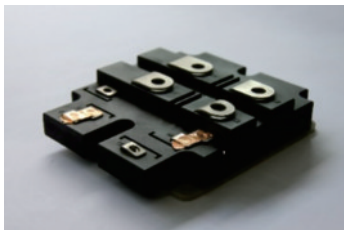


图 1 混合 SiC 模块外形接口

Fig.1 The interface of hybrid SiC module

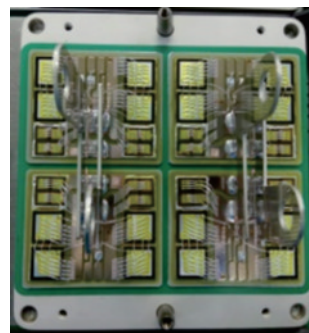


图 2 混合 SiC 模块内部结构图

Fig.2 The internal soldering structure of hybrid SiC module

混合 SiC 模块采用双开关电路结构,电气原理如图 3 所示,两个桥臂单独控制,每个桥臂的额定电流均为 500 A。

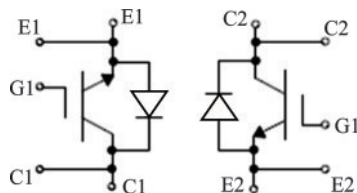


图 3 混合 SiC 模块电气原理图

Fig.3 The electric schematic of hybrid SiC module

混合 SiC 模块包括氮化铝(AlN)陶瓷覆铜基板、电极、底板、外壳、顶盖、电路板等几大部件,如图 4 所示。

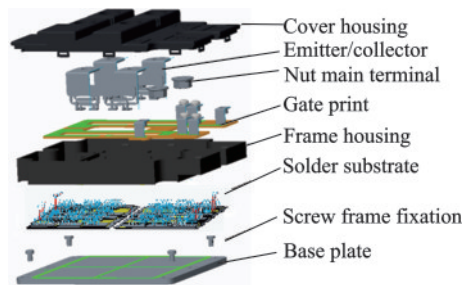


图 4 混合 SiC 模块各层结构示意图

Fig.4 The layer structure of hybrid SiC module

AlN 陶瓷覆铜基板具有高热导率、高载流能力以及低热膨胀系数等优点,能有效降低模块热阻,提高可靠性。AlN 陶瓷覆铜基板与芯片的对称布局可以确保芯片间的寄生电阻一致。

电极采用弹簧结构,释放外部对陶瓷基板造成的应力。电极表面镀镍,起到抗腐蚀的作用。

底板采用 AlSiC 材料,具有低密度、高强度、热膨胀系数接近芯片材料的优点,牵引级 IGBT 模块中 AlSiC 底板是首要选择。底板采用单面弧度设计,与散热器安装后,底板可与散热性紧密接触,利于散热。

顶盖和外壳采用 PA-GF30 材质,耐温大于 150℃,具有良好的机械可靠性和柔韧性,在潮湿环境中该材料的相对漏电起痕指数(Comparative tracking index, CTI)为 600 V,电子迁移率较低,适合牵引级模块使用。顶盖和外壳采用卡扣式连接,可承受外部冲击振动引起的机械应力。

电路板材质选用 FR5,具有良好的耐热性、阻燃性和绝缘性。电路板表面覆铜,焊接区域铜层表面镀镍,其余区域表面覆阻焊层,用于防止运输和使用过程中表面氧化。

1.2 模块封装工艺

模块采用两次焊接工艺封装,优化了芯片焊接与引线键合工序,与传统 IGBT 模块的兼容。模块封装的主要工艺流程如图 5 所示。

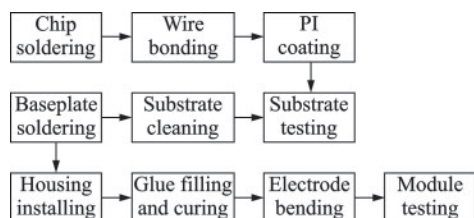


图 5 工艺流程

Fig.5 Process flow

芯片焊接:SiC JBS 芯片面积为 36 mm²,且每个焊接区域有 4 颗芯片,在真空回流焊过程中,需同时控制芯片的漂移和空洞率。用 X 射线检测仪对焊层空洞进行检测,总空洞≤1%,低空洞率焊接满足牵引级模块高温循环周次的要求,焊层空洞如图 6 所示。

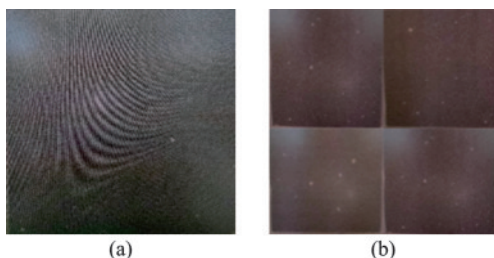


图 6 (a) IGBT 芯片焊层总空洞率:0.1%;(b) JBS 芯片焊层总空洞率:0.1%、0.2%、0.1%、0.2%

Fig.6 (a) The total soldering voids under IGBT chip:0.1%; (b) The total soldering voids under JBS chips:0.1%, 0.2%, 0.1%, 0.2%

引线键合:JBS 芯片表面金属不同,极易导致芯片损伤或者键合不牢,为此对键合工艺进行优化。IGBT 芯片表面冗余式的连跳键合结构可以有效增

强功率循环能力;芯片上连接点分散,电流密度分布更均匀。

依据 IEC60747-9 测试标准对混合 SiC 模块进行功率循环试验,结温变化 70℃、最高结温 125℃,电流 500 A,通过分钟级 2 万次功率循环试验。

聚酰亚胺涂覆:使用喷胶机对芯片键合点和陶瓷覆铜基板(Directed bonding copper, DBC)铜层的绝缘间隙进行喷胶涂覆并固化,增强芯片键合点的附着力,提高模块功率循环能力。封装后混合 SiC 模块满足 3 300 V 电压等级 IGBT 模块绝缘局部放电要求。

子单元测试:子单元制作完成后进行静态和动态测试,选择测试合格且参数相近的子单元进行下一步封装。

子单元清洗:采用化学气相清洗,清除芯片和 DBC 表面的尘埃粒子、金属粒子、油渍、氧化物等有害物质和污染物,保证子单元的清洁度,提高焊接质量。

底板焊接:采用真空回流焊,控制焊接温度、焊接时间、气体浓度等各项参数,保证焊层总空洞≤3%,低空洞率焊接可以有效提高模块温度循环周次,满足机车牵引应用高可靠性要求,焊层空洞如图 7 所示。

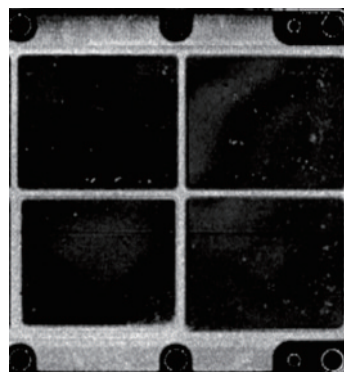


图 7 子单元焊层总空洞:0.5%、0.8%、0.2%、0.9%

Fig.7 The soldering voids under substrate: 0.5%, 0.8%, 0.2%, 0.9%

依据 IEC60068-2-14 测试标准对混合 SiC 模块进行温度循环试验,试验条件:温度变化范围-40~125℃,到温保持时间 10 min,循环周期 4 h,循环次数 250 次。混合 SiC 模块通过了温度循环试验。

壳体安装:安装外壳、电路板及顶盖,并进行固化,为模块内部结构提供一个密闭的空间,同时也为模块的安装使用提供机械支撑。

灌胶固化:硅凝胶灌封固化后要求胶体内无气泡、分层或断裂纹。

电极折弯:在电极折痕处折弯,要求电极表面平整,无划痕、压痕和漏铜等机械损伤。

模块测试:模块封装完成后进行高温阻断、高温静态、常温静态、高温动态、平面度及绝缘局放测试。

1.3 模块仿真

1.3.1 热特性仿真

通过有限元分析法,模拟了模块的热分布。该模块通过强制水冷技术进行降温,IGBT 芯片与 SiC JBS 芯片的能量消耗分别是 69 W 与 7 W,热传递系数为 2 000 W/(m·K)。根据实际状况来确定模型材质特征的数值,详见表 1。

表 1 混合 SiC 模块材料的热导率和电导率

Tab.1 The thermal conductivity and electrical conductivity of materials in hybrid SiC module			
Name	Material	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Electrical conductivity/(S·m ⁻¹)
IGBT chip	Si	151.0	37.67
JBS chip	SiC	180.0	132.58
DBC conducting layer	Cu	398.0	5.5×10 ⁷
DBC insulating layer	AlN	170.0	—
Base-plate	AlSiC	180.0	—
Bonding wire	Al	217.7	3.8×10 ⁷

混合 SiC 模块的热分布如图 8 所示。模拟结果揭示:(1) IGBT 芯片的温度超过其他部件,最高温度达到 79.91℃,且热量集中在中间热源,散热速度较慢;(2) JBS 芯片的功耗相对较低,其温度也相对较低;(3)由于芯片的热传导作用,底板的温度分布呈现出相似性,中部的温度较高,而边缘的温度最低,其最低温度为 40.03℃。由于模型的最高温度明显低于芯片的结温 150℃,因此混合 SiC 模块的热量分布合理,能够满足散热需求。

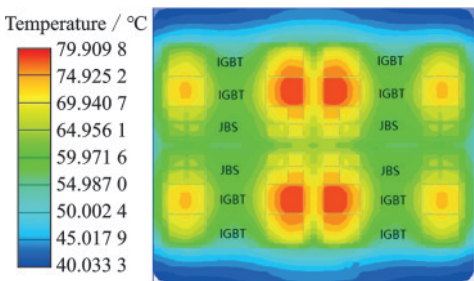


图 8 混合 SiC 模块仿真热分布

Fig.8 The thermal distributions in hybrid SiC module

1.3.2 均流特性仿真

利用有限元分析法对模块的均流特性进行仿真。在不影响均流特性和计算精度的前提下,对模型进行规则化处理。

芯片的电导率计算公式为:

$$\lambda = 1/\rho$$
 (1)

$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{S}{L}$$
 (2)

其中, λ 为电导率, ρ 为电阻率, U 为芯片的导通压降, S 为芯片面积, I 为芯片电流值, L 为芯片边长。通过公式(1)和(2)计算出 IGBT 芯片和 SiC JBS 芯片的电导率。对于模型其他材料的赋值均按真实属性给予设定,各材料电导率见表 1。

通过仿真得到 IGBT 芯片和 SiC JBS 芯片电流分布结果分别如图 9 和 10 所示,可知芯片呈现均流分布。

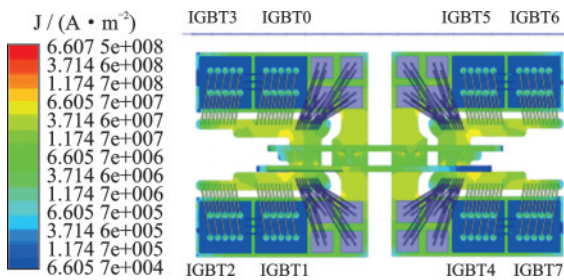


图 9 IGBT 芯片电流分布

Fig.9 The current distributions of IGBT chip

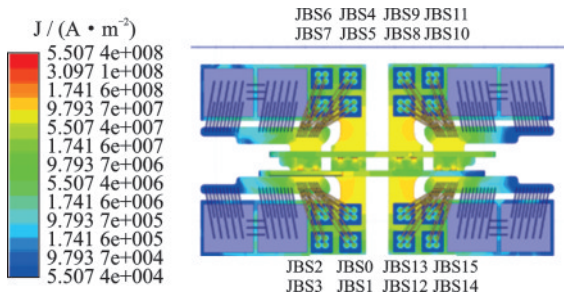


图 10 SiC JBS 芯片电流分布

Fig.10 The current distributions of SiC JBS chip

2 模块测试分析

行静态、动态测试,并与 Si 基 IGBT 模块^[10]进行比较,测试条件和结果见表 2 和 3,其中 T_{vj} 为模块的结温。

采用高压大电流测试设备对混合 SiC 模块进

表 2 混合 SiC 模块和 Si 基 IGBT 模块静态测试结果

Tab.2 Static test results of hybrid SiC module and IGBT module

Parameter	Testing conduction		Hybrid SiC	IGBT
Collector-emitter voltage V_{CES}/V	$T_{vj}=25^{\circ}C$		3 330	3 330
Gate leakage current I_{GES}/nA	$V_{GE}=\pm 20 V$	$T_{vj}=25^{\circ}C$	12	11
		$T_{vj}=125^{\circ}C$	96	94
Collector-emitter saturation voltage V_{CESat}/V	$I_C=500 A$ $V_{GE}=15 V$	$T_{vj}=25^{\circ}C$	2.557	2.507
		$T_{vj}=125^{\circ}C$	3.117	3.093
Collector cut-off current I_{CES}/mA	$V_{CE}=3\ 300 V$	$T_{vj}=25^{\circ}C$	0.022	0.022
		$T_{vj}=125^{\circ}C$	1.910	1.710
Forward voltage V_F/V	$I_F=500 A$	$T_{vj}=25^{\circ}C$	2.389	1.257
		$T_{vj}=125^{\circ}C$	3.991	2.359

表 3 混合 SiC 模块和 Si 基 IGBT 模块动态测试结果

Tab.3 Dynamic test results of hybrid SiC module and IGBT module

Parameter	Testing conduction		Hybrid SiC	IGBT
Turn-on delay time $t_{d(on)}/\mu s$			0.38	0.77
Rise time $t_r/\mu s$			0.52	0.63
Turn-off delay time $t_{d(off)}/\mu s$	$V_{CC}=1\ 800 V$		1.45	1.43
Fall time $t_f/\mu s$	$I_C=500 A$		1.71	1.73
Turn-on switching energy E_{on}/mJ	$R_{gon}=5\ \Omega$		442	473
Turn-off switching energy E_{off}/mJ	$R_{goff}=5\ \Omega$		881.94	1034
Reverse recovery time $t_{rr}/\mu s$	$V_{GE}=\pm 15 V$		0.16	1
Reverse recovery current I_{rr}/A	$L=280\ nH$		99	940
Recovered charge $Q_{rr}/\mu C$	$T_{vj}=125^{\circ}C$		9.19	520
Reverse recovery energy E_{rec}/mJ			0.38	830

图 11(a)为两种模块的反向恢复曲线,其中 V_r 为反向电压, I_r 为反向电流。由图可见混合 SiC 模块反向恢复电流非常小,电压稍有震荡,因此反向恢复能量几乎可以忽略不计。

图 11(b)为两种模块的开通曲线,其中 V_{CE} 为集电极-发射极电压, I_C 为集电极电流。IGBT 模块开通过程中,快速恢复二极管(Fast recovery diode, FRD)芯片反向恢复电流会叠加在 IGBT 开通的瞬间,导致 IGBT 开通时产生电流过冲。而混合 SiC 模块反向恢复电流非常小,没有明显的过冲电流,安全工作区更大。开通过冲电流的减小会降低混合 SiC 模块的开通能量。与 Si 基 IGBT 模块相比,混合 SiC 模块开通损耗(E_{on})减小了 6.6%。

混合 SiC 模块的关断能量损耗(E_{off})相比 Si 基 IGBT 模块的减小了 14.7%。这是因为当 Si 基 IG-

BT 模块中二极管芯片关断时,模块内部寄生电感与反向恢复电流相互作用,产生的过电压累积在 IGBT 芯片上,可能导致 IGBT 芯片超过额定电压,而混合 SiC 模块过电压较低,使得关断能量损耗减小,这有助于提高模块可靠性。

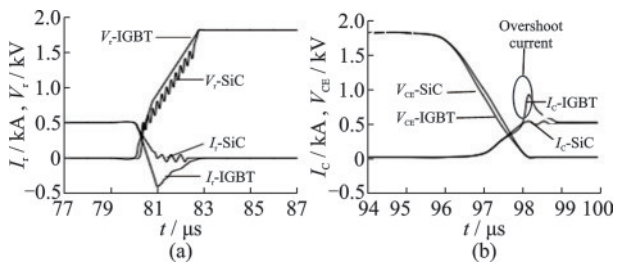


图 11 混合 SiC 模块和 IGBT 模块波形对比: (a) 反向恢复波形; (b) 开通波形

Fig.11 Comparisons of hybrid SiC module and IGBT module: (a) Reverse recovery curves; (b) Turn on curves

Si基IGBT模块和混合SiC模块的一次开关所产生的总损耗分别是2 337 mJ和1 324.32 mJ,后者相比前者能量消耗减少了43.3%。较小的功耗在节能的同时还会使模块的工作温度降低,从而提高了模块的可靠性。混合SiC模块的低功耗使其比IGBT模块更适合轨道交通牵引应用领域。

同时,与Si基IGBT模块相比,混合SiC模块 t_{rr} 减小了84%, Q_{rr} 减小了98%,在相同散热条件下,开关频率可以显著提高。混合SiC模块能够降低对反向恢复电流裕量的要求,相同规格的模块,混合SiC模块可以运行在更高的电流工况下。

3 结 论

为满足机车用模块标准,本文研制了3 300 V/500 A混合SiC模块(Si基IGBT芯片和SiC基JBS芯片),进行了结构设计、工艺设计及仿真分析及可靠性试验等一系列研究工作,并与Si基IGBT模块进行了性能比对。

研究结果发现,混合SiC模块消除了开关过程中电压和电流过冲现象,安全工作区更大,使其在高电压、大电流和高频率的应用工况下具有明显的优势。混合SiC模块的低功耗、宽安全工作区使其完全满足轨道交通牵引应用需求。

参 考 文 献

- [1] 陈明翊,孙辉波,金肩舸,等.新一代牵引级IGBT模块技术研究与应用[J].机车电传动,2021(5):77-86.
- [2] 刘国友,覃荣震,Lan Deviny,等.牵引用3 300 V IGBT/FRD芯片组设计与开发[J].机车电传动,2013(2):5-8,30.
- [3] 王立乔,黄玉水,刘兆焱,等.多电平变流器多载波PWM技术的研究[J].浙江大学学报(工学版),2005,7(39):1025-1030.

- [4] Mirzaee H, Bhattacharya S, Ryu S H, et al. Design comparison of 6.5 kV Si-IGBT, 6.5 kV SiC JBS diode, and 10 kV SiC MOSFETs in megawatt converters for shipboard power system[C]. 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Alexandria, VA, USA: IEEE, 2011: 248-253.
- [5] Wesley T C, Dimeji I, Damian U, et al. Development of a 15 kV bridge rectifier module using 4H-SiC junction-barrier Schottky diodes[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(4): 1137-1142.
- [6] Michael J P, Wayne J R, Autry T, et al. Silicon carbide power modules for high-temperature applications[J]. IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2012, 2(2): 208-216.
- [7] Ali F A, Avenas Y, Lefranc P, et al. Design of an integrated power module for silicon carbide MOSFET with self-compensation of the magnetic field[J]. Materials Science Forum, 2022, 1062(10): 637-641.
- [8] 何骏伟,陈思哲,任娜,等.4 500 V碳化硅SBD和JFET功率模块的制备与测试[J].电工技术学报,2015,30(17):63-69.
- [9] 杨晓菲,于凯,董妮,等.3 300 V混合SiC IGBT模块研制与性能分析[J].电子与封装,2021(11):62-67.
- [10] 西安中车永电电气有限公司.产品中心[EB/OL]. [2023-10-25]. <http://www.xayonge.com.cn/product.asp?cid=119>.



刘艳宏(LIU Yanhong) 女,1983年生,硕士,高级工程师,主要从事电力电子器件设计工作。

启 事

本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、美国《化学文摘》、荷兰Scopus数据库、《万方数据知识服务平台》、维普网等。凡在本刊发表的文章,将统一由编辑部全文入编上述刊、网,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入上述数据库,请在来稿时声明,本刊将作适当处理。