DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.007　　文章编号：1000-128X(2023)05-0071-07

6英寸IGCT器件紧固力的适应性研究

曹　强，陈芳林，陈勇民，刘雅岚，孙永伟
（株洲中车时代半导体有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：IGCT作为一种高功率等级的全控型压接器件，随着器件直径扩大及应用串压级数增加，紧固力的设计至关重要。文章以6英寸6 000 A/4 500 V逆阻型IGCT器件为例，分析紧固力不均造成的器件性能影响，并优化IGCT阴极梳条局部跨距和采用边缘门极结构设计。试验结果表明，优化设计的器件在额定紧固力范围内不再出现门阴极性能异常，且紧固力适应性提升20%以上。

关键词：IGCT；紧固力；阴极梳条；中间门极；边缘门极
中图分类号：TN34；TN305　　**文献标识码：**A

Research on adaptability of fastening force for 6-inch IGCTs

CAO Qiang, CHEN Fanglin, CHEN Yongmin, LIU Yalan, SUN Yongwei

(Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: As a high-power fully controlled press-pack device, IGCT's design of fastening force is crucial for its characteristics with the expansion of device diameter and the increase of cascade devices. Taking the 6-inch 6 000 A/4 500 V reverse blocking IGCT as an example, the influence of the fastening force on the device performance was analyzed, the design of local space between IGCT cathode comb bar was optimized and the edge gate design for IGCT chips was adopted. The experiment results show that the optimized device no longer has abnormal gate cathode performance within the rated fastening force range, and the adaptability of the fastening force is improved by more than 20%.

Keywords: IGCT; fastening force; cathode finger; middle gate, edge gate

0　引言

集成门极换流晶闸管（Integrated Gate Commutated Thyristor，IGCT）是一种电流控制型大功率半导体全控器件，具有阻断电压高、关断电流大、浪涌特性强、失效短路模式牢靠等优势，可广泛应用于柔性直流输电、海上风电、工业变频等重要领域[1-5]。IGCT器件应用常采用多只器件串压形成IGCT组件，其中IGCT器件作为一种压接型器件，各封装配件需要依靠机械压装力形成良好的接触保证其器件特性，随着IGCT器件尺寸扩大和组件串压级数增加，紧固力对IGCT器件的应用至关重要[6]。本文以探索6英寸（对应150 mm规格）6 000 A/4 500 V逆阻型IGCT器件为例，为保证其工作性能及长期稳定性，研究紧固力对IGCT器件的热阻、通态电压、通态电流以及浪涌等特性的影响，确定IGCT器件紧固力下限值的设计准则，优化芯片结构，避免GCT芯片与钼片形变产生负面影响，提高封装部件力、电、热耦合作用对额定紧固力的适应性。

1　IGCT介绍

1.1　IGCT器件结构

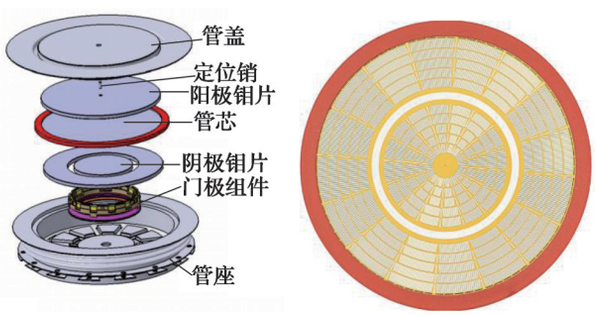
IGCT由GCT元件和门极单元两个部分组成，如图1(a)所示。GCT元件采用全压接封装技术，如图1(b)所示，该封装结构从上到下依次包括管盖、阳极钼片、

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFB2401604）
通信作者：曹　强（1997—），男，硕士，主要从事IGCT器件与工艺设计研究；E-mail: caoqiang@csrzic.com
引用格式：曹强, 陈芳林, 陈勇民, 等. 6英寸IGCT器件紧固力的适应性研究[J]. 机车电传动, 2023(5): 71-77.
Citation: CAO Qiang, CHEN Fanglin, CHEN Yongmin, et al. Research on adaptability of fastening force for 6-inch IGCTs[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 71-77.

芯片、阴极钼片、门极组件以及管座等[7]。GCT 元件的封装配件必须通过施加额定紧固力形成良好的接触，以实现电和热的可靠传导。另外，GCT 芯片的阴极和门极同侧，阴极由数千根呈凸起的梳条并联组成，如图 1(c)所示，门极比阴极梳条略低，与阴极间常采用有机膜隔离保护。随着 IGCT 器件功率等级的提升及其他功率器件的发展，IGCT 产品尺寸拓展至 6 英寸。因此，IGCT 器件的压装紧固力也逐渐提升，紧固力的均匀性对 GCT 芯片门极和阴极的性能影响也逐渐凸显。



（a）IGCT 器件外观图



（b）GCT 元件封装示意图　　（c）GCT 芯片示意图

图 1　IGCT 结构

Fig. 1　Structure of IGCT

1.2　IGCT 组件结构

基于应用需求、结构体积和电路拓扑考虑，常采用多只 IGCT 器件串压的组件结构模式。典型的 IGCT 串压结构如图 2 所示，将若干 IGCT 器件、散热器、绝缘块等，沿同一轴线压装紧固在一起，构成一组紧凑式结构。串压组件的结构是将压装力施加在承压垫块中心位置，通过垫块传力后施加到散热器和 IGCT 器件上。为保证电、热的可靠接触，需要对器件表面平面度、接触面粗糙度以及散热器等相关部件进行合理设计，确保紧固力满足 IGCT 器件特性要求。

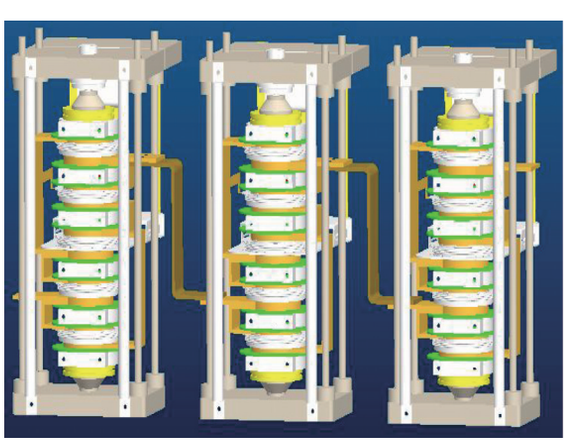


图 2　典型的 IGCT 串压组件结构示意图

Fig. 2　Typical structure of IGCT cascade modules

2　紧固力对 IGCT 器件性能的影响

IGCT 器件封装结构及组件结构均依赖良好的紧固力实现各部件的电热连接，只有紧固力达标、分布均匀才能保证器件的性能稳定。

2.1　紧固力对器件结壳热阻的影响

结壳热阻是表征 IGCT 器件工作时芯片通过管壳向外界散发热量的能力，是限定模块承受功率能力的重要参数之一[9]。在热平衡条件下，结壳热阻 R_{jc} 为芯片结到管壳基准点温度差与产生这两点温度差的耗散功率之比：

$$R_{jc}=\frac{T_1-T_2}{P} \tag{1}$$

式中：T_1 为管壳基准点温度；T_2 为芯片结温；R_{jc} 为结壳热阻，℃/W[10]。

为了研究分析 6 英寸 IGCT 器件紧固力对其结壳热阻的影响，假定 GCT 双面热阻相同，在晶闸管热阻试验台上测试 6 英寸 6 000 A/4 500 V 逆阻型 IGCT 器件单侧的结壳热阻，并核算 IGCT 的结壳热阻与紧固力的关系曲线，如图 3 所示。当紧固力较小时，芯片与钼片、管壳等封装配件未形成良好的接触，有效接触面积较小，热传导效果差，IGCT 的结壳热阻较大，通常会引起器件的热效应失效。随着紧固力增大，结壳热阻逐渐减小。当压力大于等于 100 kN 时，IGCT 器件的各封装配件已经形成良好的接触，结壳热阻基本维持稳定。

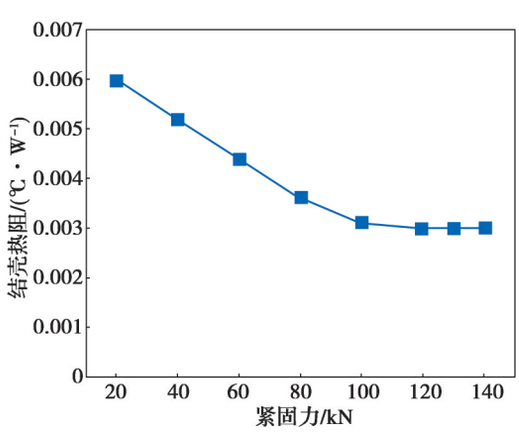


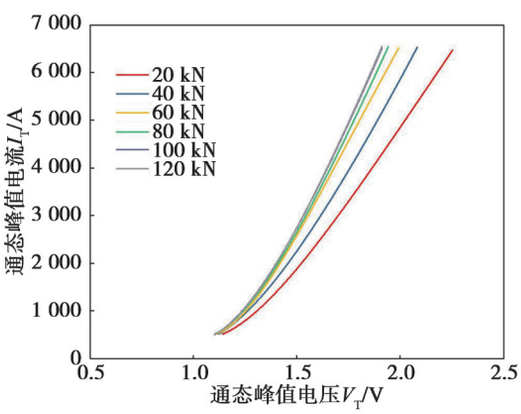
图 3　结壳热阻与紧固力的关系曲线

Fig. 3　Relationship curve between thermal resistances and fastening forces

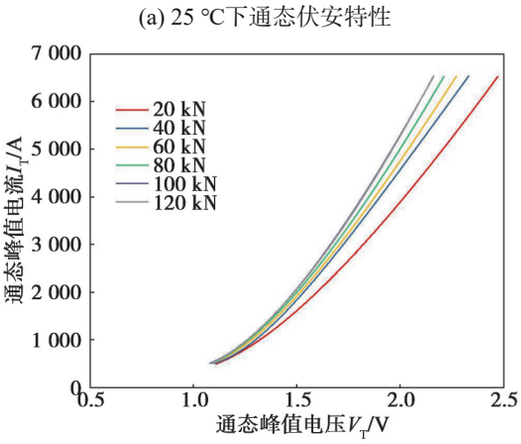
2.2　紧固力对器件通态电压的影响

通态电压是 IGCT 器件核心参数之一，是表征器件性能和功耗的重要参数。由于紧固力影响芯片、钼片和管壳之间的接触面积导致接触电阻不同，从而影响

器件的通态压降。接触面间的电阻通常由接触面导电斑点平均半径、材料电阻率、材料表面微硬度及接触压力共同决定。不同紧固力条件下6 000 A/4 500 V逆阻IGCT器件在常温25 ℃和高温90 ℃条件下的通态电压特性如图4所示。由图4可知，当通态电流较大时紧固力对IGCT器件通态伏安特性的影响显著。IGCT通态电压由管壳铜块压降、封装钼片与管壳/芯片间的接触压降、芯片通态压降组成。当紧固力较小时，IGCT封装部件间的接触电阻较大，导致IGCT器件通态压降增大；当紧固力达到100 kN及以上时，器件的通态伏安特性曲线不再变化，此时GCT元件封装部件间的接触效果较好。当通态电流较小时，封装部件间的接触面积有足够的电子在接触界面间自由流动形成良好的导电特性，此时紧固力对器件通态电压影响几乎可忽略不计。对比常温和高温条件下的IGCT通态压降，高温下IGCT器件的通态压降受紧固力影响更明显。



(a) 25 ℃下通态伏安特性



(b) 90 ℃下通态伏安特性

图4　25 ℃和90 ℃不同紧固力下器件的通态伏安特性曲线

Fig. 4　On-state volt-ampere characteristic curves of devices under different fastening forces at 25 ℃ and 90 ℃

2.3　紧固力对器件通态平均电流的影响

通态平均电流$I_{T(AV)}$指稳定结温不超过额定结温时，所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值，是标称器件电流能力的参数。

首先通过结壳热阻数据计算得出器件通态平均功率$P_{(AV)M}$为

$$P_{(AV)M}=\frac{T_{vj\,max}-T_c}{R_{th(jc)}} \tag{2}$$

式中：$T_{vj\,max}$为芯片的最高工作结温；T_c为壳温；$R_{th(jc)}$为结壳热阻。

再结合通态伏安特性曲线数据即可得到通态平均电流$I_{T(AV)}$为

$$I_{T(AV)M}=2\frac{\sqrt{V_{(T0)}^2+r_T\cdot\pi^2\cdot P_{(AV)M}}-V_{(T0)}}{r_T\cdot\pi^2} \tag{3}$$

式中：$V_{(T0)}$和r_T分别为门槛电压和斜率电阻，由伏安特性曲线求得。

根据6英寸IGCT器件在不同紧固力下的通态伏安特性和结壳热阻数据，计算得到通态平均电流与紧固力的关系曲线，如图5所示。由图5可知，IGCT器件的通态平均电流受紧固力影响较明显，当紧固力为100 kN以上时，6 000 A/4 500 V逆阻IGCT器件的$I_{T(AV)}$可达到4 500 A。

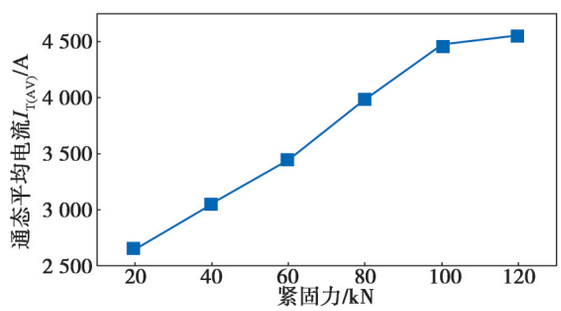


图5　通态平均电流与紧固力对应关系图

Fig. 5　Relationship curve between on-state average current and fastening forces

2.4　紧固力对器件浪涌特性的影响

浪涌电流I_{TSM}指器件在规定的极短时间内所允许通过的冲击性电流值。通过测试6英寸6 000 A/4 500 V逆阻IGCT器件得到不同紧固力下对应的浪涌压降值变化，如图6所示。在45 kA浪涌电流（电流脉冲底宽10 ms，高温125 °C）下，当紧固力低于80 kN时，器件伏安曲线呈现负温度特性，此时由于紧固力不足，界面间的接触热阻对IGCT器件的通态电压影响较大，而高温会使器件界面材料热膨胀，导致接触压降较低，因此IGCT在高温下的通态电压要低于常温值。当紧固

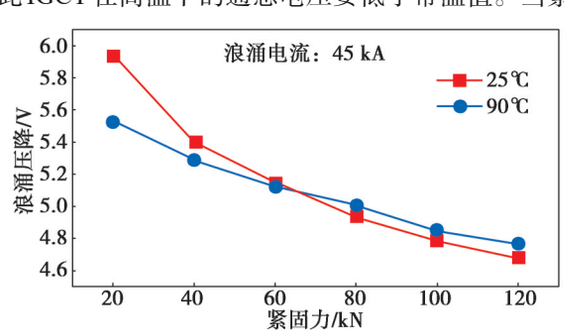


图6　浪涌特性与紧固力对应关系图

Fig. 6　Relationship curve between surge characteristic and fastening force

力增大至 80 kN 及以上时，器件伏安曲线回归正常的正温度特性，此时 GCT 芯片通态压降占主导地位，在电流密度较高时 IGCT 器件的高温通态压降高于常温值。

2.5 紧固力均匀性对 IGCT 器件特性的影响

IGCT 器件串压应用时，压装设计对紧固力的均匀性尤为重要。IGCT 功率模块各级结构件都存在加工尺寸公差及其结构特性差异（内部和外部的孔道、沟槽等），这使紧固力在各级结构件间的传递路径变得不规则。串压器件数量越多，压装结构件越多，则紧固力传递路径越复杂，更容易出现器件台面紧固力的分布不均匀，100 kN 下 5 只器件串压的紧固力效果如图 7 所示。由于模块两端的施力结构固定，紧固力分布不均匀的现象最易出现在距离两端较远的中间位置。若紧固力分布不均，则会导致器件台面部分区域压强太小，使该区域芯片与其他结构件之间接触不良，增大了接触热阻，降低了器件承受浪涌电流的能力；同时器件台面部分区域压强过大，使器件芯片的微细结构发生形变，导致器件的负载循环能力下降，严重时会造成芯片破裂。紧固力均匀分布可通过对模块压装结构进行优化设计来提升，但同时也需要改善器件对紧固力均匀性的适应能力。

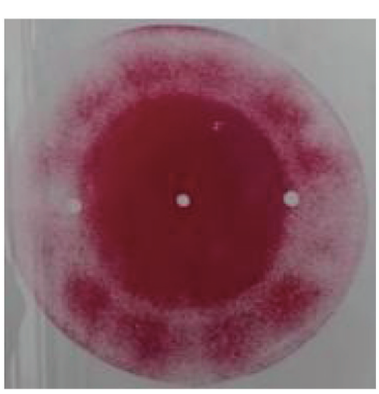


图 7 紧固力不均匀情况

Fig. 7 Uneven fastening force

3 IGCT 器件对紧固力适应性的提升设计

3.1 器件的紧固力边界条件

考虑紧固力对器件结壳热阻、伏安特性、通态电流等特性影响，当 6 000 A/4 500 V 逆阻 IGCT 器件所受紧固力达到 100 kN 及以上时，IGCT 器件呈现出稳定良好的性能。在 IGCT 器件封装及芯片结构中，GCT 芯片阴极面梳条为受力区域，约占芯片面积的 40%，且由试验可知当 6 英寸芯片阴极面梳条承受的压强达到 20 MPa 时，才能保证器件具有良好的电热特性。依据 GCT 芯片阴极梳条面积承受的最小压强，针对现有不同规格的 GCT 芯片，分别计算直径为 91 mm、94 mm、142 mm 和 148 mm 的 GCT 所需紧固力的下限值，并基于不同规格器件的紧固力公差，由紧固力下限值推算出额定紧固力，结果如图 8 所示。由图 8 可知，现有 IGCT 产品的额定紧固力均大于等于紧固力下限值，且与标定额定值基本相符。因此，本文提出的 GCT 芯片阴极面积最小承压为 20 MPa，可作为 IGCT 器件紧固力下限值的设计准则，为新 IGCT 的压装设定提供了试验依据。但当器件紧固力超过一定范围时，芯片 PN 结的漏电增大并降低器件热疲劳寿命 [11-12]，且压装紧固力不均匀易导致器件局部承受压力过大，影响 GCT 芯片门阴极电阻 R_{GK} 特性，因此 GCT 芯片及其封装设计必须考虑其压装适应性。

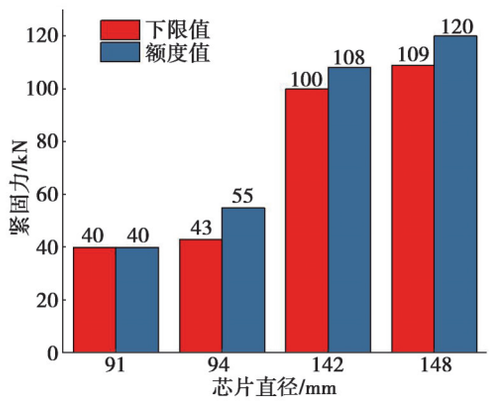


图 8 不同尺寸 GCT 所需紧固力

Fig. 8 Fastening forces for different size GCTs

3.2 中心门极搭扣尺寸设计

在现有 IGCT 组件压装结构中，紧固力由中心轴向四周传递，因此压装过程中容易在 GCT 芯片中心处的门极和阴极发生短路，从而对 IGCT 器件造成不可逆的损失。为保证门极和阴极之间可靠隔离，提升芯片中心区域对紧固力的适应性是 GCT 芯片结构设计的关键。图 9 为 GCT 芯片设计中主要的 4 个门阴极隔离设计点：①梳条结构以及门阴极铝层设计，使门阴极之间形成高度差隔离；②门阴极之间设计氧化层隔离；③使用有机材料绝缘；④GCT 中心处阴极梳条的跨距。前 3 项由平台工艺决定芯片设计，第 4 项的跨距优化设计则对 GCT 芯片门阴极电阻 R_{GK} 特性影响显著。

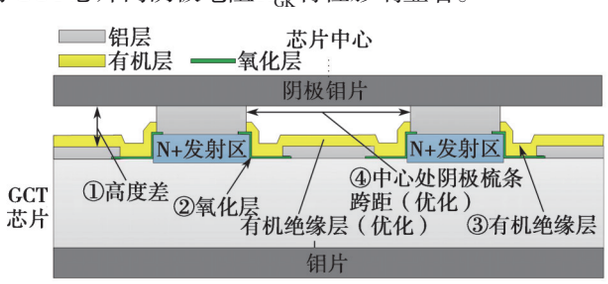


图 9 GCT 芯片门阴极隔离设计示意图

Fig. 9 Design diagram of gate and cathode isolation for GCT chip

图 10 为 GCT 芯片中心处跨距的优化设计示意图。试验结果表明，当芯片中心区域梳条间跨距最大达到 10 mm 以上时，门极区域悬空的钼片受压过大产生凹

型形变，阴极梳条上的铝层也出现形变将会变薄，当钼片与铝层的形变叠加超过门极与阴极的高度差时，发生形变的阴极钼片将会直接接触到中心铝层导致门阴极短路。为降低GCT芯片中心区域的短路风险，提高GCT对紧固力的适应性，提出了中心门极搭扣设计准则：①在GCT芯片中心处设计同心阴极梳条跨距不大于3 mm；②芯片中心搭扣处采用有机膜绝缘层对门阴极隔离设计。

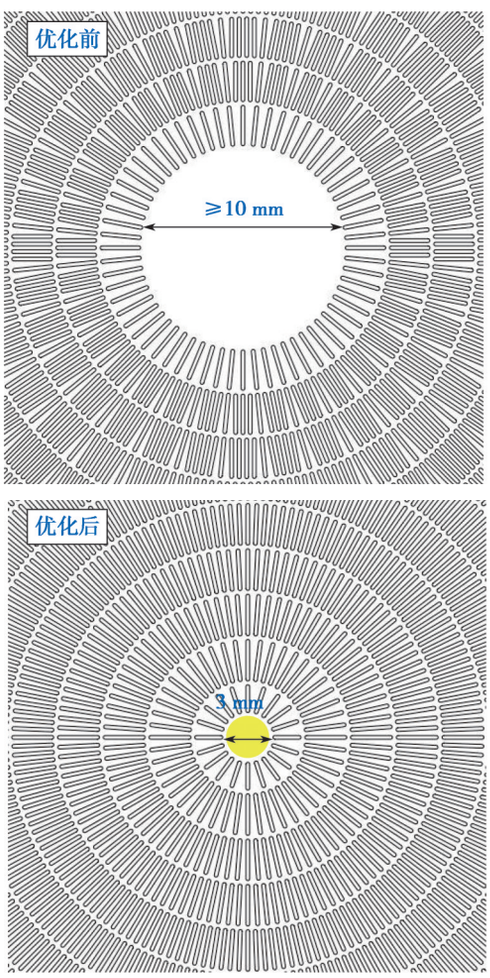


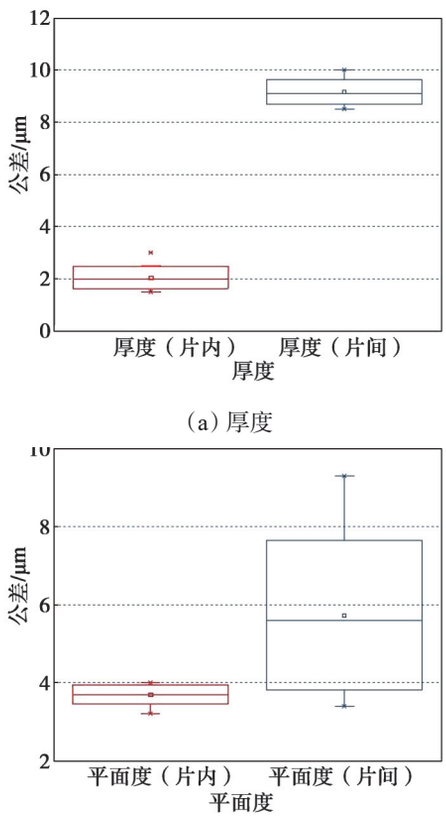
图10　芯片优化前后中心位置梳条版图

Fig. 10　Layout of cathode comb bar at center position before and after chip optimization

3.3　GCT边缘门极结构设计

随着IGCT功率等级提升，GCT芯片直径扩大，其封装结构的设计对其压装力的均匀性影响更加显著。在GCT元件封装部件中，钼片厚度及平面度加工偏差是影响压装力均匀性的主要因素。通常GCT芯片采用中间门极设计，GCT阴极钼片被门极拆分成内钼片与外钼片2个部分。6英寸GCT钼片加工偏差统计如图11所示。由图11可知，片间的钼片厚度及平面度的公差明显高于片内公差，因此，阴极钼片被分隔成内外2部分的设计必然会导致压力更加不均。

为改善IGCT封装结构对紧固力的适应性，GCT芯片采用边缘门极结构设计，如图12所示。门极位置移动至芯片边缘，则封装时阴极钼片无须被拆分，可设计成单片。由图11可知，对于6英寸IGCT，阴极钼片的厚度公差降低至2 μm，平面度公差降低至4 μm，有效提升了IGCT压装力的均匀性。该设计不仅降低阴极钼片加工难度，而且减少了IGCT门阴极间短路风险，进一步提高了IGCT器件对其紧固力的适应性。



（a）厚度

（b）平面度

图11　6英寸GCT钼片加工偏差统计结果

Fig. 11　Statistical results of processing deviation for 6-inch GCT molybdenum sheet

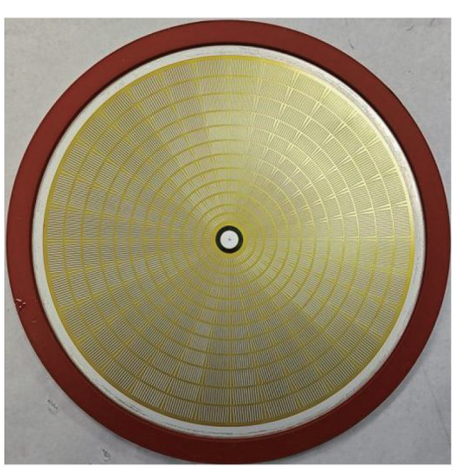


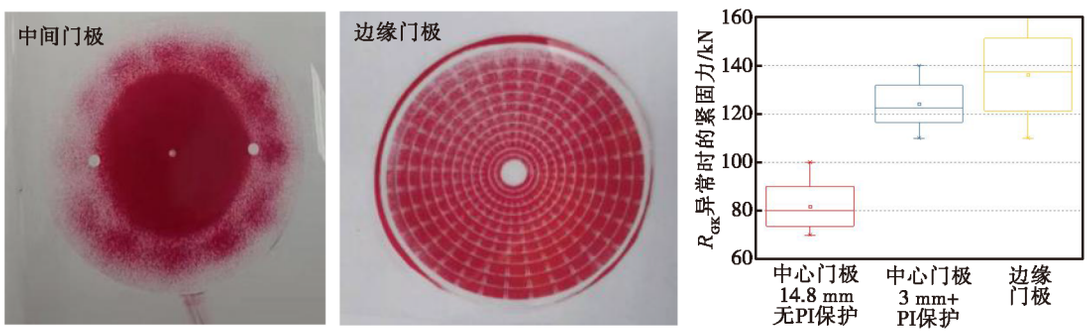
图12　边缘门极GCT芯片示意图

Fig. 12　Edge gate structure of GCT chip

3.4　优化验证

为验证芯片结构优化设计的适用性，采用压机检测优化前后的6 000 A/4 500 V逆阻GCT芯片的门阴极电

阻R_{GK}变化情况，结果如图13所示。紧固力不均情况如图13(a)所示，在紧固力约80 kN时R_{GK}出现了异常现象；采用图10(b)优化后的芯片在120 kN压测并反复验证，阴极电阻R_{GK}检测正常，如图13(c)所示，这表明优化芯片中心位置梳条跨距和采用有机材料屏蔽隔离可提高芯片对紧固力不均匀的适应性，相比于100 kN紧固力的基准要求，提升了约20%。另外对多片6英寸边缘门极芯片进行压测，R_{GK}在140 kN压力下同样均未出现异常现象，表明边缘门极方案具有更佳的压装适应性。由于优化设计以及边缘门极结构芯片对紧固力适应性更强，将IGCT器件串压数量由5只提高至7只，R_{GK}在紧固力大于等于100 kN条件时压测也未出现异常，且图13(b)为边缘门极的GCT芯片，其阴极轮廓清晰，颜色比较均匀，与图13(a)对比受压均匀性显著提升。



(a)中间门极版图紧固力效果图　(b)边缘门极版图紧固力效果图　(c)不同设计对紧固力适应性

图13　6英寸GCT芯片不同优化设计对紧固力适应性影响

Fig. 13　Effect of different optimization on the adaptability of fastening force for 6-inch GCTs chip

4　结束语

本文以6英寸6 000 A/4 500 V逆阻型IGCT器件为研究对象，通过分析紧固力对其器件的性能影响和对比紧固力适应性提升优化方案，可得出以下结论：

①基于不同紧固力下IGCT器件的结壳热阻、通态电流及浪涌特性的测试分析，确定6 000 A/4 500 V逆阻IGCT器件紧固力达到100 kN时可维持良好的电热特性。

②在紧固力均匀分布时，根据紧固力压强换算，GCT芯片阴极面梳条受压约20 MPa，可作为不同尺寸GCT芯片紧固力下限值的设计准则。

③GCT芯片中心区域阴极梳条跨距优化设计降至3 mm后，紧固力提高至120 kN以上，芯片门阴极不会产生短路故障。

④IGCT器件引入边缘门极结构后，进一步提高了6英寸IGCT器件的压装均匀性与适应性。未来随着IGCT器件朝大尺寸发展，紧固力的压装均匀性逐渐成为应用难点，GCT边缘门极结构设计将成为发展趋势。

参考文献：

[1] 张明, 陈芳林, 李继鲁, 等. 国内IGCT器件的新进展[J]. 大功率变流技术, 2008(6): 1-5.
ZHANG Ming, CHEN Fanglin, LI Jilu, et al. Recent progress of domestic IGCT device[J]. High power converter technology, 2008(6): 1-5.

[2] 陈政宇, 余占清, 吕纲, 等. 基于IGCT串联的10 kV直流混合断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 317-326.
CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, LYU Gang, et al. Researches on 10 kV DC hybrid circuit breaker based on IGCT series[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 317-326.

[3] STEIMER P K, GRUNING H E, WERNINGER J, et al. IGCT–a new emerging technology for high power, low cost inverters[J]. IEEE industry applications magazine, 1999, 5 (4): 12-18.

[4] STIASNY T, KAPPATOS V, SETZ T, 等. IGCT——更高功率处理能力的正确选择[J]. 大功率变流技术, 2015(6): 1-7.
STIASNY T, KAPPATOS V, SETZ T, et al. Where higher power handling capability is required-IGCT is the right choice[J]. High power converter technology, 2015(6): 1-7.

[5] 张明. 目前我国兆瓦级新型电力半导体器件[J]. 大功率变流技术, 2012(1): 1-8.
ZHANG Ming. Current novel power semiconductor devices with megawatts level of China[J]. High power converter technology, 2012(1): 1-8.

[6] 蔡维, 王诗祺, 李雪飞, 等. 集成门极换流晶体管 (IGCT) 机械压装研究[J]. 电工文摘, 2014(6): 18-20.
CAI Wei, WANG Shiqi, LI Xuefei, et al. Research on press for IGCT[J]. Electrician abstracts, 2014(6): 18-20.

[7] 曾文彬, 颜骥, 任亚东, 等. IGCT晶片的封装结构设计[J]. 大功率变流技术, 2015(6): 20-24.
ZENG Wenbin, YAN Ji, REN Yadong, et al. Package structure design of IGCT wafer[J]. High power converter technology, 2015(6): 20-24.

[8] 孙保涛, 李彦涌. 一种新型的平板型功率半导体器件压装技术[J]. 大功率变流技术, 2013(4): 1-3.

SUN Baotao, LI Yanyong. A new method of press mounting for press-pack power semiconductor[J]. High power converter technology, 2013(4): 1-3.

[9] 高原, 陈洁莲, 王才孝, 等. 大功率半导体组件压装技术研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(1): 55-59.
GAO Yuan, CHEN Jielian, WANG Caixiao, et al. Research on the press technology for high power semiconductor assembles[J]. Technology innovation and application, 2023, 13 (1): 55-59.

[10] 秦贤满. 热阻的概念和测试方法[J]. 半导体技术, 1996(3): 32-36.
QIN Xianman. The concept and testing method of thermal resistance[J]. Semiconductor technology, 1996(3): 32-36.

[11] DENG Erping, ZHANG Jingwei, ZHAO Zhibin, et al. Influence of the clamping force on the power cycling lifetime reliability of press pack IGBT sub-module[J]. The journal of engineering, 2019, 2019(16): 2435-2439.

[12] KIRIHATA H, TAKAHASHI Y, WAKIMOTO H, et al. Investigation of flat-pack IGBT reliability[C]//IEEE. Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference and the Thirty-Third IAS Annual Meeting. St. Louis: IEEE, 1998: 1016-1021.

收稿日期：2023-08-02
修回日期：2023-08-20