

逆变弧焊电源IGBT模块的 设计和选型

杨学武, 毕晓峰

(唐山松下产业机器有限公司, 河北 唐山 063020)

摘要:影响逆变弧焊机可靠性的因素很多,开关元器件(如IGBT)的选型设计是其中的关键。根据实践经验,通过分析IGBT的结构特点、参数选择、缓冲电路、保护方法、散热设计、工作环境和保管运输等方面,阐述了IGBT在实际使用过程中可能造成损坏的原因;详细介绍了逆变弧焊机IGBT模块的选型设计原则和注意事项;重点给出了IGBT模块安全工作区和温升的设计原则及测试方法。实际应用结果表明,这些方法和途径十分有效,提高了逆变弧焊机的可靠性。

关键词:逆变弧焊电源;IGBT;安全工作区;缓冲回路

中图分类号:TG434.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2303(2008)12-0050-12

Dimensioning and selection of IGBT modules in arc welding inverter power

YANG

Xue-wu, BI

Xiao-feng

(Panasonic Welding Systems(Tangshan) Co., Ltd., Tangshan 063020, China)

Abstract: There are many factors influencing the reliability of arc welding inverter power, the selective use of power switch components is the key of the product design. In this paper, the reasons of IGBT damage during the using process are explained by analyzing IGBT structure characteristic, parameter choosing, snubber circuit, protection technique, heat radiation design, the operating environment, the transportation, the storage and so on, and introduced the principles for selecting IGBT. Also dimensioning and selection of IGBT modules in arc welding power inverter are introduced, the detail designing principled and method about Safe Operation Area and Temperature-Rise of IGBT modules are given. The practical results show that these ways and methods are very effective, and greatly improve the reliability of arc welding inverter power.

Key words: arc welding inverter power; IGBT; safe operation area; snubber circuit

0 前言

IGBT(Isolated Gate Bipolar Transistor)作为第三代功率模块,综合了MOSFET和GTR的优点,采用电压型控制,输入阻抗大,驱动功率小,控制电路简单,开关损耗小,通断速度快,工作频率高,耐压高,容量大,热稳定性好,适合用于逆变焊机的逆变器部分使用,因此在国际电焊机领域得到了大量应用。目前国内电焊机企业设计生产的逆变焊机中IGBT也是应用最为广泛的。IGBT的正确选择和使用是逆变焊机能否可靠工作的基础和关键,在此从实践工程角度探讨了IGBT选择和使用中的注意事项。

收稿日期:2007-08-22;修回日期:2008-10-22

作者简介:杨学武(1974—),男,河北唐山人,工程师,学士,主要从事逆变焊接电源的研究工作。

1 IGBT的构造和特性

IGBT是用双极型晶体管GTR与MOSFET组成的达林顿结构,相当于一个由MOSFET驱动的厚基区晶体管。以GTR划分IGBT的种类,如GTR为PNP型则IGBT称为N-IGBT,即N沟道增强型IGBT,N-IGBT是在电焊机领域应用最多的类型。

功率MOSFET由于源极和漏极是以沟道为媒介进行导通的,所以MOSFET的漏极-源极之间形成了单一的半导体。它的电特性也就成了单纯的电阻,该电阻越低,通态电压也就越低,但是,在MOSFET进行耐高压化的同时,漏、源极所在区的区层需要加厚,区层越厚,元件的耐压性能越高,漏极和源极之间的电阻也就增加。正因为如此,高耐压的功率MOSFET的通态电阻变大,无法使大量的电流通过,

一般取+20%。SCSOA 应在苛刻条件下进行测试,如表 1 所示。

表 1 SCSOA 苛刻测试条件

项目	SCSOA 测试条件	备注
电网电压	+20%	焊机外接调压器
焊接电压	最大	—
焊接电流	最大	—
推力电流	最大	手工焊
脉冲 有/无	有	MIG ^①
交流输出/直流输出	交流	TIG ^②

注:①通过试验来确认,因为 MIG 脉冲电流峰值最大值要大于焊机额定值,IGBT 的损耗有可能更大一些;②对于逆变 TIG 焊机,交流输出都是在变压器二次侧通过 GTR 或 IGBT 进行二次逆变得到的,一次 IGBT 的功率损耗也更大些。

SCSOA 分为两种情况:**a.** 焊机输出先短路,然后开通 IGBT;**b.** IGBT 先开通(即焊机空载),然后将焊机输出短路。

(1)第一种情况。

随着 IGBT 的开通,电流 I_c 的初始上升速度取决于驱动参数(驱动电压、栅极电阻)和线路寄生电感。当电感充电时, U_{CE} 下降至电源电压 U_{CC} 以下的某个值,但很快 U_{CE} 就恢复到接近 U_{CC} ,此期间电压变化 du/dt 会通过栅极-集电极电容产生位移电流,并造成栅极电压瞬时升高。这一外加的栅极电压使 IGBT 结构中的电子和空穴等离子迅速增加,几微秒内集电极峰值电流增大,如图 3 所示。

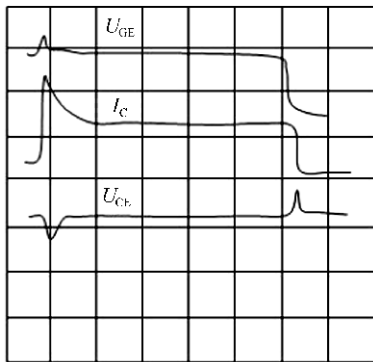


图 3 第一种短路情况特性

(2)第二种情况。

焊机处于空载状态,此时 IGBT 已经导通,但 I_c 很小,如果此时将焊机输出短路,则增加的短路电流将使 IGBT 的集电极-发射极电压迅速从 $U_{CE(sat)}$ 增加到总电压 U_{CC} ,力图使 IGBT 退出饱和区实现关断。此期间的电压变化 du/dt 会比第一种情况下高很多,又因 U_{CE} 越低,栅极-集电极电容量越大,产

生的位移电流越大,造成栅极电压升得更高。第二种情况下的短路电流比第一种情况要高得多,如图 4 所示。

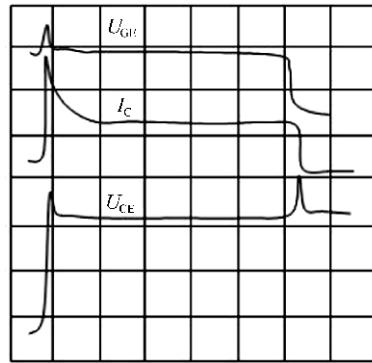


图 4 第二种短路情况特性

当 IGBT 关断时,由于线路电感、变压器漏感的存在,集电极短路电流的陡降,都会引起 U_{CE} 的急剧增加,产生电压尖峰,即关断浪涌电压 Ldi/dt 。与 IGBT 并联的续流二极管在反向恢复时也会产生浪涌电压 Ldi/dt 。两者均有可能超过规格值,造成 IGBT 损坏。

在第二种情况下(空载-短路),集电极短路电流较大, di/dt 也较高,引起的关断浪涌电压尖峰也较大,因此主要在这种情况下确定 IGBT 的 SCSOA。

IGBT 的 SCSOA 具有脆弱性,且不可逆,要求实际使用时的允许值必须较规定值有一定安全裕量,以 100 A 的 IGBT 为例,如表 2 所示。

表 2 IGBT 安全工作区允许值

项目	规定值	实际允许值	备注	测试设备
U_{CES}	1 200 V	1 000 V	或 960 V(80%)	示波器
	300 A	240 A(80%)	冷态,壳温 25 °C, 1 ms	示波器
I_{CRM}	200 A	160 A	热态,壳温 80 °C, 1 ms	示波器

2.1.2 确保短路安全工作区的对策

(1)过电压对策。

U_{CE} 超出 IGBT 的集电极-发射极间耐压允许值,就可能损坏 IGBT。解决的办法主要有:

a. 选取 IGBT 时应设计裕量,对于电网电压 AC 380 V,考虑成本因素一般选取 1 200 V,建议不要轻易选取更高耐压值的 IGBT。

b. 增大 IGBT 驱动电阻 R_c ,可以减小开通(FWD 反向恢复时)和关断时的浪涌电压,但会增加 IGBT 开关损耗。

c. 改变栅极驱动电压 $U_{GE}(+U_{GE}、-U_{GE})$ 。

$+U_{GE}$ 越低,开通时对应支路的 IGBT 产生的浪涌电压越小。 $-U_{GE}$ 越低,IGBT 关断时的浪涌电压越小。 $+U_{GE}$ 推荐值为 $15\text{ V}\pm 10\%$,能够使 IGBT 完全饱和导通,通态损耗也小。 $-U_{GE}$ 推荐值为 $-5\text{ V}\sim -15\text{ V}$,为避免误触发应在 -5 V 以上,尤其是栅极驱动线较长时,更应注意。

d. 关断浪涌电压(Ldi/dt)和线路电感关系密切,IGBT 附近连线应尽量短、粗,多用铜排连接,以减小寄生电感。

e. 改进变压器生产工艺,尽量减小变压器一次侧漏感;如果变压器一次侧电感量过大,也会产生

较高的浪涌电压。

f. 在变压器一次侧上套装吸收铁氧体磁环(锰锌或镍锌)也能有效抑制电压尖峰(尤其是对环形非晶态磁心的变压器)。如果材料选择不适当,则非常容易造成磁环温度超标。

g. 改善电压缓冲保护电路。

(2)过电压保护缓冲电路。

过电压缓冲保护电路对 IGBT 的安全工作起着很重要的作用,同时通过改善缓冲保护电路来解决过电压问题。

IGBT 过电压缓冲保护电路如图 5 所示。

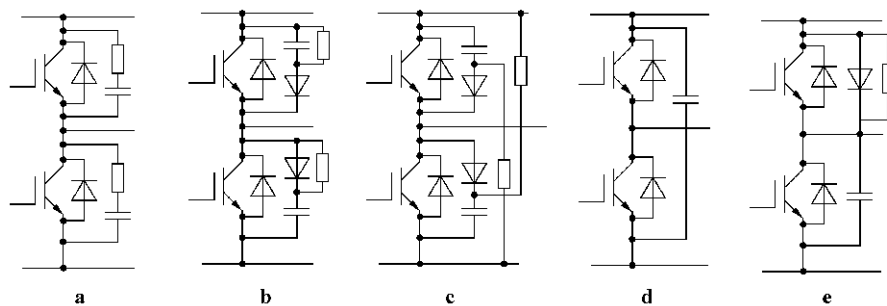


图 5 IGBT 过电压保护缓冲回路类型

过电压保护缓冲电路分两种:一种是和 IGBT 一一对应的个别缓冲电路;另一种是针对每个模块(包含两个 IGBT)的集中式缓冲电路。

a. 个别缓冲电路。

①RC 缓冲电路。

使用大容量 IGBT 时,应增大缓冲电阻。否则开通时集电极电流过大,增加 IGBT 负担。RC 吸收电路因电容 C 的充电电流在电阻 R 上产生压降,还会造成过冲电压。

RC 缓冲电路的损耗较大,电阻功率一般达几十 W,因此高频场合应用时需注意。

②充放电型 RCD 缓冲电路。

与 RC 缓冲电路相比其特点是:IGBT 关断时电流通过快速二极管给电容充电,开通时通过电阻放电,这样缓冲电阻可以取较大值,减小了开通时 IGBT 的负担。RCD 电路因用二极管旁路了电阻上的充电电流,从而克服了过冲电压。

RCD 缓冲电路发生的损耗(主要是电阻损耗)较大,高频时需考虑。

③放电阻止型 RCD 缓冲电路。

与充放电型 RCD 缓冲电路相比,产生的损耗较小,更适合于高频。放电阻止型缓冲电路中吸收电容

的放电电压为直流电源电压,每次关断前,电容仅将上次关断电压的过冲部分能量通过电阻回馈到直流电源,减小了吸收电路的损耗。

由于电容电压在 IGBT 关断时从电源电压开始上升,它的过电压吸收能力不如充放电型 RCD 缓冲电路。

b. 集中式缓冲电路。

①集中电容式缓冲电路采用高频薄膜电容,靠近 IGBT 安装,电容容量较大。特点是电路简单;缺点是电路中无阻尼元件,线路寄生电感及缓冲电容构成 LC 谐振电路,易产生电压振荡,选择无感电容,IGBT 开通时集电极电流较大。

②集中型 RCD 缓冲电路属于放电阻止型缓冲电路,承担着上下两个 IGBT 的缓冲任务,对二极管的要求较高,但电阻不能太大。

使用电压保护缓冲电路的注意事项:

根据实际选择适当的缓冲保护电路,抑制关断浪涌电压。

吸收电容应采用无感电容,引线尽量短,直接接在 IGBT 端子上;吸收二极管应选用快开通和快软恢复二极管,以免产生开通过电压和反向恢复引起较大的振荡过电压。装配时尽量降低主电路和缓冲

电路的寄生电感,配线应短而粗。

焊机工作环境恶劣,粉尘、盐雾比较严重,多数是缓冲回路先损坏,继而 IGBT 损坏。为降低缓冲回路故障率,减少故障点数,方便生产和维修,减小寄生电感,缓冲电路应尽量简单、紧凑。

根据实际经验,不推荐将缓冲器件安装在线路板上,因为主电路中电路板容易积尘短路,印刷板条易腐蚀。

(3)过电流对策。

如果 I_c 超过了允许值,也可能造成 IGBT 的损坏,解决办法为:

a. 选择大额定容量 IGBT,如 75 A 更换为 100 A,成本增加,应尽量通过其他方法来解决。

b. 选择饱和压降大的产品,但损耗会增加。

IGBT 能承受很短的短路过电流,承受时间与 IGBT 的导通饱和压降有关,随着饱和导通压降的增加而延长。如饱和压降小于 2 V 的 IGBT 允许承受的短路时间小于 5 μ s, 3 V 时可达 15 μ s, 4~5 V 时可达 30 μ s 以上。

c. 减小 $+U_{CE}$,增大 R_G 。

d. 增加过电流保护电路。

(4)过电流保护电路。

IGBT 的过电流保护电路主要有以下类型:

a. 电阻或电流互感器检测过电流进行保护。

电阻或电流互感器与 IGBT 串联,检测流过 IGBT 集电极的电流。当有过电流发生时,控制电路断开 IGBT 的栅极输入,达到保护 IGBT 的目的。

b. 通过 IGBT 的 $U_{CE(sat)}$ 检测过电流进行保护。

因 $U_{CE(sat)}=I_c R_{CE(sat)}$,当 I_c 增大时, $U_{CE(sat)}$ 也随之增大,控制电路通过检测 $U_{CE(sat)}$ 来保护 IGBT。

c. 通过检测输出电流过电流进行保护。

此方法与 a. 检测方法基本相同,a. 属直接法,此属间接法。通过检测焊机二次输出电流来达到保护一次侧 IGBT 的目的。

d. 栅极关断保护方式。

过电流保护电路对栅极的关断主要有直接关断和降低栅极电压两种方式。直接关断指在过电流或短路时,直接关断 IGBT 栅极输入,其抗干扰能力差,一旦检测到过电流信号就关断,容易发生误动作。为提高电路的抗干扰能力,可增加延时电路,但短路电流会在这个延期内迅速上升,IGBT 剧烈发热,往往是保护电路动作了,IGBT 仍然损坏。

降低栅极电压的方式是在检测到 IGBT 过电

流时,迅速降低栅极电压,IGBT 仍导通。降压后设有延时,限制短路电流在较小值,延长 IGBT 抗短路时间。若延时后短路依然存在,则彻底关断器件,若短路消失,驱动电路则自动恢复到正常的工作状态。

(5)PWM 控制芯片与过电流保护。

因为电压型 PWM 控制器(如 TL494、SG3525)的过电流采样点一般取自焊机的输出端,所以不可避免地存在延迟,过电流保护动作时间延长,不能及时对 IGBT 进行过电流保护,容易误动作。实际情况是,采用电压型 PWM 的焊机通常不设计 IGBT 过电流保护电路,而是通过加大安全裕量来保护 IGBT。

采用电流型 PWM 控制器(如 UC3824/5)的焊机,过电流信号通常由高频变压器一次侧通过电流互感器获取。由于电流信号取自变压器一次侧,反应速度快,一旦发生过电流,PWM 立即关断输出脉冲,及时保护 IGBT。电流型 PWM 控制器固有的逐个脉冲检测瞬时电流值的控制方式对输入电压和负载变化响应快,系统稳定性好。

在电流型 PWM 控制器控制下,全桥和推挽拓扑电路的偏磁现象不复存在,主变连接时无需隔直电容。而电压型 PWM 控制器则必须使用防偏磁隔直电容。

2.2 IGBT 的温升设计

正确选用 IGBT 有两个关键因素:一是电压、电流安全工作区;二是 IGBT 的工作结温 T_{jmax} 。无论在稳态或瞬态都不允许超过 IGBT 的最高允许结温,否则将引起器件内部电或热不稳定而导致器件失效。IGBT 的温升设计是影响其可靠工作的决定性因素。

IGBT 模块由 IGBT 和 FWD 构成,它们各自发生的损耗合计为 IGBT 整体的损耗,IGBT 模块损耗构成如图 6 所示。

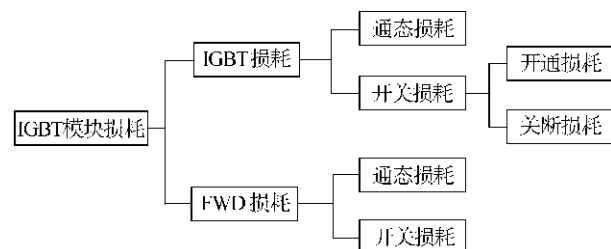


图 6 IGBT 模块损耗构成

2.2.1 损耗的估算

温升设计时为准确保证安全裕量,应使用参数最恶劣的 IGBT 样品进行试验、计算,如饱和压降最大,开关时间最长。

(1)通态损耗。

逆变焊机中可以将 IGBT 集电极流过的电流波形近似认为是矩形波,从而可以简单地通态损耗的计算。

IGBT 通态损耗=饱和压降×通态电流。

此处的饱和压降不是额定饱和压降,而是实际

饱和压降(通常小于额定饱和压降),如果使用额定饱和压降计算 IGBT 的通态损耗,可能造成误导,增加成本。实际的饱和压降通过查阅厂家提供的 $I_C=f(U_{CE})$ 关系图(见图 7)可以得到。例如 $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$, $U_{CE}=15\text{ V}$, $I_C=40\text{ A}$ 时, $U_{CE(SAT)}\approx 3\text{ V}$, 考虑到离散性, $U_{CE(SAT)}=3\text{ V}+(\text{额定 } U_{CE(SAT)\text{max}}-\text{额定 } U_{CE(SAT)\text{min}})$ 。

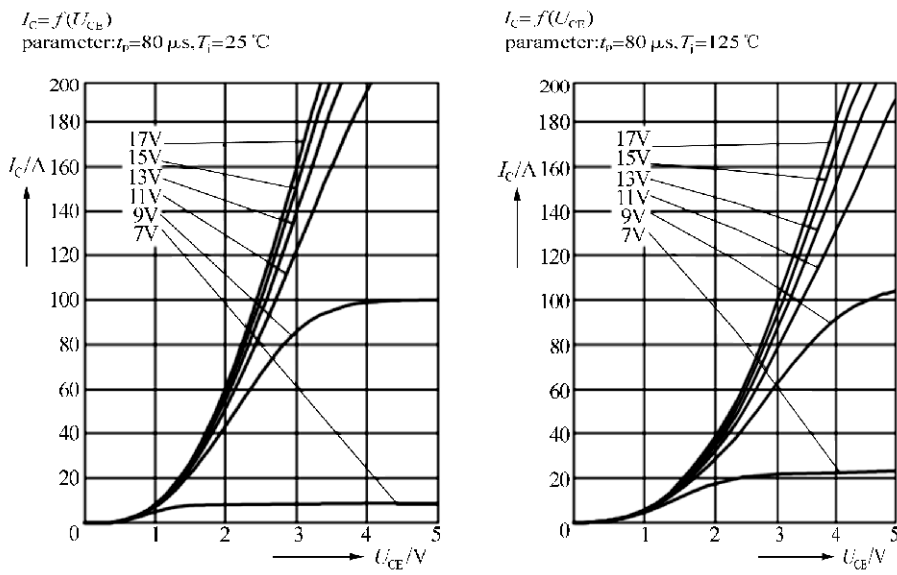


图 7 集电极电流 I_C 和饱和压降 $U_{CE(SAT)}$ 关系

导通状态下 IGBT 的 I_C 波形近似为矩形,顶部也接近水平,但存在一定的斜率,计算通态损耗时电流可取平均值,即 $(i_2-i_1)/2$, 如图 8 所示。IGBT 开

通后(此时电压已经接近饱和压降),电流还没有达到稳定的这段上升时间($t_0\sim t_1$)内的 IGBT 的损耗估算

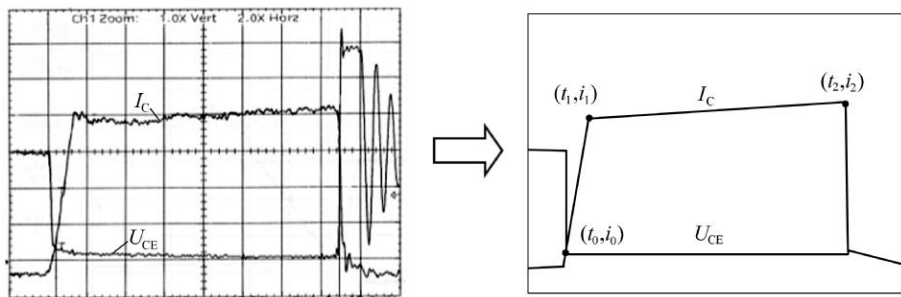


图 8 IGBT 通态损耗估算波形

$$P = \frac{i_1-i_0}{2} \cdot U_{CE(SAT)} \cdot \frac{t_1-t_0}{T}$$

综上,IGBT 的通态损耗为

$$P_{\text{通态}} = \frac{i_2-i_1}{2} \cdot U_{CE(SAT)} \cdot \frac{t_2-t_1}{T} + \frac{i_1-i_0}{2} \cdot U_{CE(SAT)} \cdot \frac{t_1-t_0}{T}$$

式中 T 为 IGBT 工作周期。

(2)开关损耗。

当 IGBT 工作频率高于 5 kHz 时,IGBT 开关损耗会显著增加,随频率的提高在总损耗中所占比例也

会大大增加。目前国内主流逆变焊机的工作频率为 15~20 kHz,开关损耗所占比例较大,有的甚至超过 50%。

开关损耗的计算比较复杂,较为精确的方法是测量 I_C 和 U_{CE} 在开关过程中的波形,将此波形逐点相乘、相加。鉴于实际波形的不规则性,所以实际工程上是采用将波形分段积分再相加的方法近似计算。

在开关损耗中,主要为关断损耗。 I_C 的变化总是延迟于 U_{CE} 的变化,造成开通时电压较小,损耗较小;而关断时电流较大,损耗也较大。

将 U_{CE} 和 I_C 波形近似分为四条直线段($U_1 \sim U_4$, $I_1 \sim I_4$), 线段数越多, 计算越接近实际情况, 一般为 3~

5 条, 根据各线段的坐标点求出各线段的直线方程, 如图 9 所示。

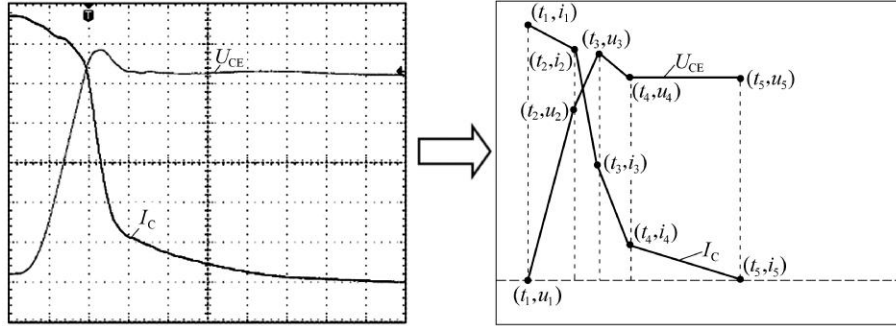


图 9 IGBT 关断损耗估算波形

电压表达式:

$$U_1 = \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1) + u_1,$$

$$U_2 = \frac{u_3 - u_2}{t_3 - t_2} \cdot (t - t_2) + u_2,$$

$$U_3 = \frac{u_4 - u_3}{t_4 - t_3} \cdot (t - t_3) + u_3,$$

$$U_4 = \frac{u_5 - u_4}{t_5 - t_4} \cdot (t - t_4) + u_4.$$

电流表达式:

$$I_1 = \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1) + i_1,$$

$$I_2 = \frac{i_3 - i_2}{t_3 - t_2} \cdot (t - t_2) + i_2,$$

$$I_3 = \frac{i_4 - i_3}{t_4 - t_3} \cdot (t - t_3) + i_3,$$

$$I_4 = \frac{i_5 - i_4}{t_5 - t_4} \cdot (t - t_4) + i_4.$$

各部分功率计算:

$$P_1 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U_1 I_1 dt}{T},$$

$$P_2 = \int_{t_2}^{t_3} \frac{U_2 I_2 dt}{T},$$

$$P_3 = \int_{t_3}^{t_4} \frac{U_3 I_3 dt}{T},$$

$$P_4 = \int_{t_4}^{t_5} \frac{U_4 I_4 dt}{T},$$

式中 T 为 IGBT 工作周期(频率的倒数)。

IGBT 总的关断损耗为

$$P_{\text{关断}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4.$$

(3) 开通损耗。

IGBT 开通损耗估算也可采用上述方法, 开通时损耗很小, 根据实际波形忽略不计, IGBT 开通损耗估算波形如图 10 所示。

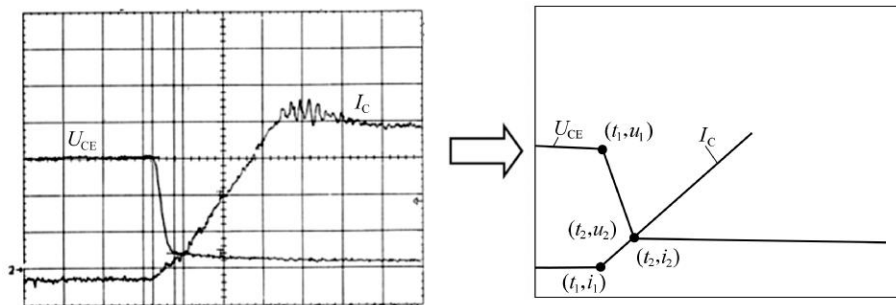


图 10 IGBT 开通损耗估算波形

$$U_1 = \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1) + u_1,$$

$$I_1 = \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1) + i_1,$$

$$P_{\text{开通}} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U_1 I_1 dt}{T},$$

式中 T 为 IGBT 工作周期。

(4) 二极管 FWD 损耗。

逆变焊机中 IGBT 负载为感性负载, 可以近似地通过二极管正向压降与二极管平均电流的乘积来计算功耗, 而不再区分通态和开关损耗, 二极管

的功耗相对较小,忽略不计。续流二极管损耗估算

波形如图 11 所示。

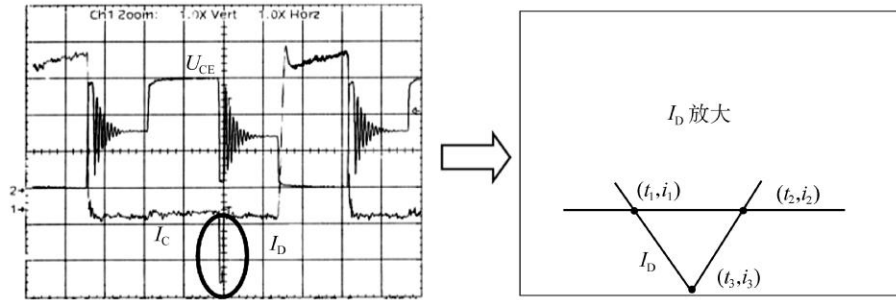


图 11 续流二极管损耗估算波形

$$P_{FWD} = \frac{(i_3 - i_1) \cdot U_F \cdot (t_2 - t_1)}{2T}, i_1 = i_2 = 0$$

式中 U_F 为二极管正向压降; T 为 IGBT 工作周期。

(5) IGBT 模块总损耗 P_{total}

$$P_{IGBT} = P_{通态} + P_{关断} + P_{开通}$$

$$P_{total} = P_{IGBT} + P_{FWD}$$

对于 2 单元的 IGBT(包括 2 个 IGBT 和 2 个二极管),则总功耗为 $2P_{total}$

根据损耗计算 IGBT 外壳允许温度

$$T_c = T_{jmax} - 2(P_{IGBT}R_{th(j-c)} + P_{FWD}R_{th(j-c)D})$$

式中 T_c 为 IGBT 壳温; $R_{th(j-c)}$ 为 IGBT 结对外壳的热阻; $R_{th(j-c)D}$ 为二极管结对外壳的热阻。

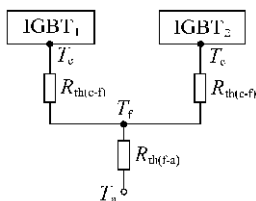
根据经验,计算出来的壳温应该留出 20℃ 的安全裕量,即 $T_c - 20$ (常用方案);或留出 20% 的裕量,即 $T_c \times 80\%$ 。上述 IGBT 允许的壳温,前提是焊机所处的环境温度为 40℃。

(6) IGBT 散热器的选择。

选择散热器的关键是先求出 IGBT 外壳和散热器之间的热阻,再根据热阻选择合适的散热器。

为节省体积和成本,一块散热器上可安装 IGBT,也可安装其他功率器件,如整流桥、二极管模块等。在此为了方便计算,仅考虑 IGBT(两个 2 单元 IGBT,全桥电路)安装到散热器上的情况。

建立热等效电路(见图 12),列出热方程式。



T_a —环境温度; T_c —IGBT 壳温; T_f —散热器表面温度; $R_{th(c-f)}$ —IGBT 外壳和散热器之间的热阻; $R_{th(f-a)}$ —散热器和周围环境之间热阻(涂导热硅脂)。

图 12 热等效电路

$$T_c = 2P_{total}R_{th(f-a)} + P_{total}R_{th(c-f)} + T_a$$

则

$$R_{th(f-a)} = \frac{T_c - (P_{total}R_{th(c-f)} + T_a)}{2P_{total}}$$

根据计算结果,参考热阻曲线,选择相应材质、形状、体积的散热器,如图 13 所示。

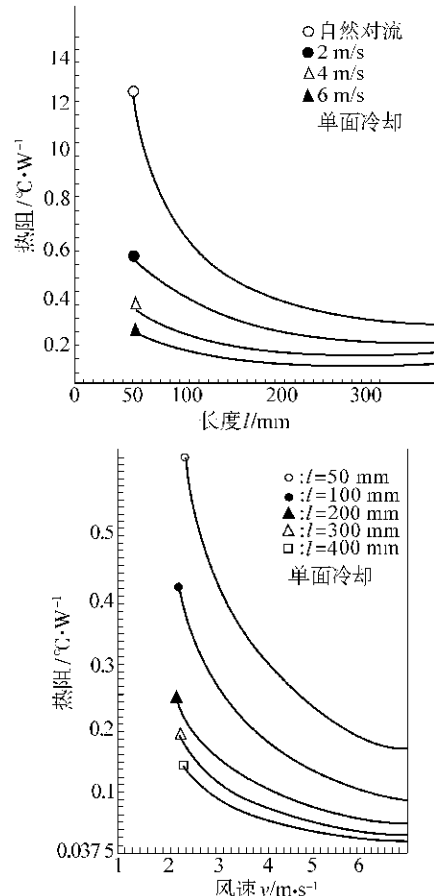


图 13 热阻和散热器长度、风速关系曲线

2.2.2 实际温升测试

(1) 壳温测试。

选定散热器并确定 IGBT 的安装位置后,即可实

际测试 IGBT 的温升,并推导出结温是否满足要求。

利用热电偶测试壳温。理论上较准确的壳温测试点应在 IGBT 铜基板的正中心,但实际测试时非常不方便,通用的测试方法是测试 IGBT 铜基板侧面中间部位的温度,且两侧都要测试。由于此处的温度低于中心位置的温度(相差约 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$),所以在测量侧面壳温时要钻深 2 mm , $\varphi 1.0\text{ mm}$ 的孔,再放入热电偶测试,这样测出的壳温才比较接近中心的壳温,如图 14 所示。

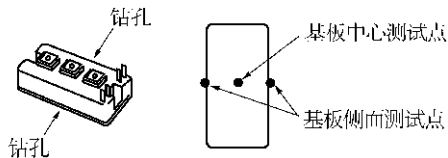


图 14 IGBT 壳温测试方法

(2)降低 IGBT 温升的方法。

- a. 选择更大容量的 IGBT,如 75 A 的模块变为 100 A 。
- b. 选择开关速度更快,电流拖尾更小的 IGBT。
- c. 将硬开关改为软开关控制,也是减小逆变焊机体积的有效方法。
- d. 减小 IGBT 驱动电阻 R_G 。
- e. 降低栅极驱动电压 $U_{GE}(+U_{GE}, -U_{GE})$ 。
- f. 降低关断时的浪涌电压,以减少关断损耗。如减小线路寄生电感,修改缓冲保护电路等。
- g. 改变散热器材料;加长或加宽散热器;选择有效散热面积大(例如肋片数量多)、耗散功率强的散热器。

h. 在强制风冷的前提下,改善风道设计。

①风道的影响。

在焊机结构允许变更较大的前提下,焊机(风扇吹向)可由“卧式(前后吹风)”改为“立式(由上向下吹风)”,或“立式”变为“卧式”。

“卧式”结构中的“吹风式”(由后向前)变为“抽风式(由前向后)”,或相反。

②风力的影响(风扇与散热器的距离)。

风扇与 IGBT 的距离不一定越近散热效果越好,可尝试不同的距离。

③风向的影响。

如果传统的电机加扇页的方式不能满足温升需求,可选择轴流风机替代,轴流风机体积小,安装方便,气流集中,散热的目标性比较强。轴流风机需配合“桶装”风道才能更好地发挥优势。

利用挡风板使原来发散的气流更加集中地吹

向 IGBT。

④风速、风量的影响。

选择转速更快,风量更大的冷却风机;在焊机上增开或减少散热孔、百叶窗。

(3)IGBT 的过热保护。

焊机可能超负载持续使用,也可能发生其他异常情况,如风扇损坏,都可能造成 IGBT 温升过高而损坏,所以必须对 IGBT 进行过热保护。常用的方法是加装温度继电器,当温度超过规定时,温度继电器动作使 IGBT 停止工作并报警。

对于全桥电路,温度继电器一般先安装在两个 IGBT 的中间位置,然后根据试验结果适当调整。

a. 温度保护继电器的选择。

温度继电器的动作温度不能过高也不能过低。过高则不能有效保护 IGBT,过低则动作过早,影响焊机正常使用,尤其是在工作环境温度较高时。

另外还需特别注意温度继电器的“延时”特性,即当温度继电器下面的散热器表面温度已经达到动作温度但温度继电器却不动作,而是再升高一定温度才动作,温差一般 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由结构、制造工艺、散热方式以及周围环境温度决定的。

如果动作温度已经提前设定,那么应选择低于这个动作温度的继电器,否则继电器不会及时动作。

温度继电器的选定还要综合考虑焊机变压器、电抗器、以及其他功率器件的温升,焊机负载持续率也是必须考虑的。

温度继电器的动作温度应该在 IGBT 模块允许壳温之上(估算值再留出 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 裕量)、IGBT 估算值以下,一般取中下值较好。所以估算值的准确性非常重要,必须通过试验验证。在认为估算外壳温度(结温已经达到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$)就是 IGBT 损坏温度的前提下进行 IGBT 过热爆破试验。

b. IGBT 过热爆破试验。

对于负载持续率不是 100% 的焊机,将负载持续率提高到 100% ,焊机设定为最大输出,拆除温度保护继电器,监测 IGBT 壳温,记录当 IGBT 因过热而损坏时的壳温,此温度和估算出的壳温(实际允许温度)误差应该在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内。根据爆破温度可以进一步修正 IGBT 允许壳温和温度保护继电器动作值。

c. 风扇停转试验。

验证温度保护继电器是否及时动作的另一个方法是人为将焊机风扇停转(不供电),然后焊机加电工作,监测 IGBT 壳温,记录温度继电器动作时 IGBT

壳温,此时 IGBT 的壳温必须小于爆破温度(即保证 IGBT 不能损坏),并且尽量接近风扇正常运转时温度继电器动作时的壳温。

d. 热循环能力的考虑。

IGBT 除最高结温限制外,还受温度循环变化的限制,随着焊机的开通与关断、输出功率的变化、环境温度的变化等,IGBT 芯片温度也相应变化。在实际使用中,IGBT 的结温将随着焊机的工作状态而循环变化,其温度变化范围 ΔT_j 是热设计最后需要考虑的,往往容易被忽视。IGBT 温度变化 ΔT_j 和循环次数关系如图 15 所示。

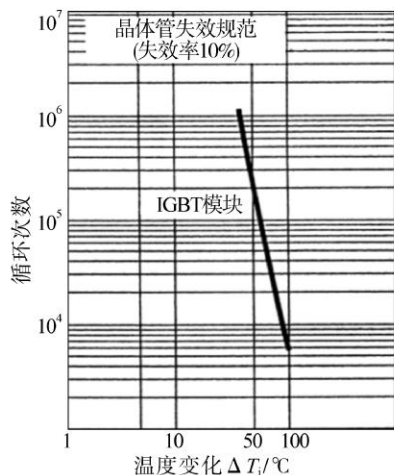


图 15 ΔT_j 和循环次数的关系

IGBT 芯片是用焊料焊在基座上的,芯片、焊料、基座等各种材料具有不同的膨胀系数,随着 IGBT 的加热、冷却,会引起结合面之间的机械应力,不同膨胀系数的材质将使中间层处于弯曲应力和剪切应力状态下。这种应力循环累积,会使内部结构逐渐变差,最终导致破坏。

因此 IGBT 最好不要处于温差较大、骤冷骤热的温度循环状态下,这样容易造成 IGBT 机械损伤,这种损坏一般在焊机使用较长一段时间后才易出现。当焊机使用高转速、大风量散热时应注意。

ΔT_j 的大小并不一定拘泥于厂家提供的数据(如有的厂家给出 $\Delta T_j=30^\circ\text{C}$),焊机的工作状态和厂家的测试状态区别较大, ΔT_j 是影响 IGBT 寿命的一个因素,尤其是当使用较长时间后 IGBT 开始不明原因的批量损坏时,应该考虑是 ΔT_j 的原因。

e. 海拔对 IGBT 温升的影响。

随着海拔的升高,散热条件变差,会造成 IGBT 温升增加,所以当焊机在高原地区使用时(如我国西北地区),IGBT 的温升设计要留够裕量,否则容易

发生温度保护继电器频繁动作,影响焊机的正常使用。海拔 1 000 m 以下可不作考虑。

2.3 IGBT 的防尘和防腐

IGBT 多应用于高压回路,对使用环境的要求更苛刻。由于焊机工作环境的复杂性和恶劣性,所处的环境往往存在高粉尘(很多都是金属粉尘)或腐蚀性气体(海边或海上作业时的盐雾问题),所以只能加强焊机本身的防尘和防盐雾性能。

IGBT 为单面散热的器件,这给防尘、防盐雾提供了前提条件,现在很多逆变焊机的散热结构由两块散热片组成,其中一块安装 IGBT 和一次整流桥,另一块安装二次二极管,两块散热器散热肋片相对安装组成桶装风道,从而进行散热。

IGBT 的正面几乎不具备散热功能,但却很容易积尘短路,最好完全隔离于风道,常用钣金做成相对独立的腔体将整个 IGBT 散热器正面封闭起来,IGBT 附近也不要开设散热孔或百页窗(防尘、防腐、防水)。

如因焊机整体结构的原因,IGBT 不得不处于风道之中,也需采取相应措施,如利用一片阻燃的 PET 薄膜将 IGBT 顺着风道方向罩起来,也能取得一定的防尘效果。考虑到防盐雾腐蚀,IGBT 端子还需进行如涂胶等防腐处理。

另外,“卧式”结构焊机的风向设计也需慎重考虑,现场大多情况是焊接施工工位位于焊机前方,如果采用“抽风”式的气流设计,气流从焊机前部吸入,后面吹出,焊接过程中的飞溅或打磨的金属粉尘更易被吸入焊机内部,所以“卧式”结构的焊机不提倡采用“抽风”式设计。

2.4 IGBT 的安装

(1)考虑温升和应力的因素,在安装时应注意以下几点。

a. IGBT 的安装位置。

由于热阻随 IGBT 安装位置的不同而不同,因此,当散热器上仅安装一个 IGBT 时,应将其安装在正中间,以使热阻最小;当要安装几个 IGBT 时,应根据每个 IGBT 的发热情况留出相应的散热空间。

b. IGBT 的安装方向。

使用带纹路的散热器时,应将 IGBT 较宽的方向顺着散热器的纹路,以减少散热器的变形;将 IGBT 安装在由挤压模具制作的散热器时,模块的安装方向与散热器挤压方向最好平行,以减小散热器变形的影响。

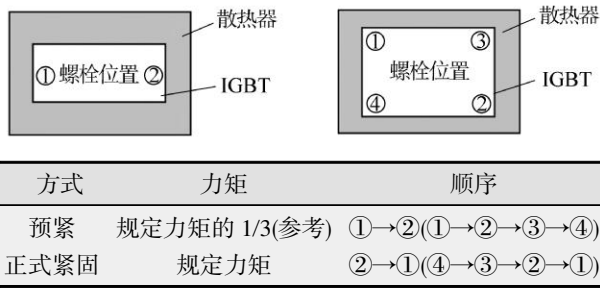


图 16 IGBT 螺栓固定顺序

c. 散热器表面处理。

散热器的安装表面粗糙度应小于等于 $10 \mu m$, 如果散热器的表面不平, 将大大增加散热器与器件的接触热阻。

d. 导热硅脂的涂敷。

为了减少接触热阻, 最好在散热器与 IGBT 间涂抹导热硅脂, 且一定要均匀, 但不必太厚, 涂敷良好的导热硅脂能有效降低热阻 20%~30%。

e. IGBT 模块的固定。

为了保证 IGBT 不受应力的影响, IGBT 的固定螺栓安装时需按照一定的顺序, 如图 16 所示。

最终紧固时必须按照厂家规定的力矩进行紧固, 过大的力矩将会损坏 IGBT 壳体或绝缘层; 过小的力矩则会增大热阻, 影响散热, 也会使 IGBT 在运输或使用中松动。

IGBT 功率端子和铜排或电缆连接时也应注意力矩大小, 连接用螺栓不要过长, 以免破坏 IGBT 内部锡焊配线。

(2) IGBT 栅极防静电措施。

IGBT 栅极比较脆弱, 对静电非常敏感, 静电是 IGBT 损坏的一个重要原因。这是因为 IGBT 栅极输入阻抗非常大, 输入电容很小, 很小的电荷积聚就能引起较高的电压 ($U=Q/C$); 另外, 栅极只通过一层氧化膜与发射极实现电隔离, 该氧化膜较薄, 耐压也很低 (20~30 V)。所以需要 IGBT 进行防静电。

安装使用 IGBT 时, 应穿着防静电服和防静电鞋, 并在接地的导电垫板上进行操作。取用 IGBT 时, 要拿封装壳体, 不要直接接触端子, 尤其是驱动端

子。插接驱动端子时要佩带防静电手镯, 如需焊接 (尽可能不用焊接方式), 电烙铁必须接地并且在加热断电后才能焊接, 焊接温度也不能过高。绝对不能带电插拔驱动端子。栅极和发射极之间的导电泡沫塑料或短路金属环不可随意取下, 装配时也不可用手指直接接触, 直到栅极管脚进行永久性连接。生产线上 IGBT 的安装还需注意保证空气湿度, 必要时安装加湿器, 以防止静电积聚, 尤其在北方干燥的冬春季更应当注意该问题。

2.5 IGBT 的保管与运输

(1) 保管。

a. IGBT 的存储温度理论上范围很宽 ($-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim +150 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 但半导体电子设备的保管以温度 $5 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿度 45%~75% 为宜, 所以 IGBT 的存储场所需注意保持温度和湿度, 必要时可架设空调器、加湿器。

b. 避开产生腐蚀性气体和粉尘多的场所。

c. 避免温度积聚变化的场所。

d. 不要在 IGBT 包装箱上施加外力或负荷, 避免过度叠放。

e. 对于脱离原包装的 IGBT, 应选择不易产生静电的容器放置。

(2) 运输。

a. 搬运时不要受到外力冲击或使其跌落。

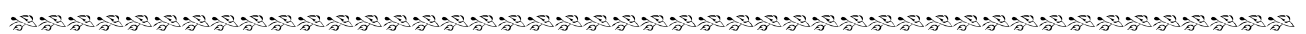
b. 拆除包装的 IGBT 搬运时相互间应用柔软的防静电衬垫间隔, 以免碰伤。

c. 使用防静电容器搬运。

d. 防止运输振动, 以免栅极和发射极之间的导电泡沫塑料或短路金属环脱落。

3 结论

IGBT 模块的综合性能非常优秀, 已成为当今逆变弧焊机中逆变器的主流器件。IGBT 模块工作在高频状态, 使用时更要注意器件容量的选择, 严格考核安全工作区和进行温升设计, 并提供完善的保护电路和抗干扰措施, 只有这样才能确保其使用中的安全性和可靠性。



焊、背面应用陶瓷衬垫+正面大能量输入的双细丝单面埋弧焊焊接, 焊缝正反面一次成形, 性能完全达到中国船级社《焊接与材料》规范要求。实现了在使

用普通埋弧焊方法时得到的 FCB 专机效果, 可用于板厚 12~18 mm 的船体结构或曲面外板拼接, 提高焊接效率 10 倍以上, 焊接质量稳定, 应用前景良好。