

LY12CZ铝合金随焊锤击碾压工艺规范研究

赵 征 李京龙

(西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室,西安 710072)

文 摘 针对生产现场大尺寸 LY12CZ铝合金薄板(2 500 mm ×6 000 mm ×2 mm)的拼焊成形,采用动态随焊锤击碾压焊接新技术,有效防止了 LY12CZ铝合金焊接热裂纹的产生,并基本消除了薄板焊接变形。通过调整随焊锤击工艺参数和焊接线能量,使锤击碾压行为与焊接熔池的凝固过程相匹配,从而实现了 LY12CZ铝合金焊接无裂纹、小变形的目的。

关键词 随焊锤击碾压,热裂纹,焊接变形

Welding Technology of LY12CZ With Hammering and Rolling Technique

Zhao Zheng Li Jinglong

(Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract Aimed at elimination of hot cracking and deformation control, the site welding of large structure (2 500 mm ×6 000 mm ×2 mm) of LY12CZ aluminum alloy is investigated experimentally, in which hammering and rolling technique (HRT) trailing welding is incorporated. The results show that HRT effectively relaxes thermal stress. The optimized HRT parameters with the appropriate heat input enable the hammering and rolling to be cooperated well with the welding pool solidification, thus eliminating hot cracking and reducing the welding deformation.

Key words Hammering and rolling technique, Hot cracking, Welding deformation

1 前言

LY12CZ铝合金具有良好的耐蚀性,较高的比强度与比模量、优良的导电性及导热性等,多用作火箭和导弹等飞行器的壳体、贮存箱、弹头蒙皮等大尺寸薄壁铝合金板结构制造。对于这类高强薄壁铝合金的焊接装配,焊接应力变形和焊接热裂纹是两大关键问题。为此,需要研究铝合金焊接热裂纹敏感性,并采取有效措施防止高强铝合金焊接热裂纹产生^[1-2];另外,可以采用预制适宜的反变形,焊接过程中采取强力固定法、强力拉伸法等控制铝合金薄板变形,也可以发展无变形焊接新技术,如随焊同步碾压法或温差拉伸法等^[3-5]。

为了预防焊接热裂纹,需要对处于高温脆性温度区的焊缝金属适时地施加挤压,以抵消脆性温度区的金属在冷却收缩而承受的拉伸应变,消除脆性温度区金属产生焊接热裂纹的动力,达到预防焊接热裂纹的目的^[6]。这种热裂纹不限于焊缝中的凝固裂纹,而且也包括熔合区母材一侧的液化裂纹。目前已知的

具体做法包括焊道两侧随焊局部碾压法、焊道两侧随焊局部加热法和焊道中心随焊局部激冷法等^[7-8]。但是焊道两侧随焊局部碾压法设备体积庞大、操作复杂。随焊激冷方法则由于采用液氮或者干冰直接与工件接触,容易造成污染熔池、产生气孔等缺点,并增加成本,同时必须辅以静态温差拉伸技术,这使生产效率受到很大影响。所以,现在需要的是一种新型的控制裂纹和变形的新技术。

文献[9~10]通过对碾压锤击结构及对 LY12CZ铝合金接头组织和性能的影响的讨论,总结出在试验室条件下锤击碾压工艺消除焊接热裂纹和控制焊接变形的试验结论,并完成了小样试件的试验。本文针对生产现场大尺寸工件(2 500 mm ×6 000 mm ×2 mm)的实际情况,采用动态随焊锤击碾压焊接新技术,通过大量工艺试验对工艺参数进行摸索,有效实现了防止焊接热裂纹的产生,并控制 LY12CZ铝合金薄板焊接变形的目的。

2 试验

收稿日期:2006-05-10;修回日期:2007-04-02

作者简介:赵征,1972年出生,高级工程师,主要从事焊接结构的变形和应力应变控制、钎焊工艺和材料的研究工作

采用哈尔滨工业大学和西安长峰机电研究所联合研制的 PH - 2500型大尺寸薄板拼焊设备 (图 1), 采用随焊锤击碾压工艺, 针对大尺寸 LY12CZ ($l=2500$ mm、 $b=2$ mm宽板试件)薄板考核不同工艺参数的防裂和控制变形的效果。焊接方法采用交流钨极氩弧焊 (设备采用美国 L NCOLN TIG355 焊机, 钨极直径为 2.5 mm)不填丝的表面熔敷方式。

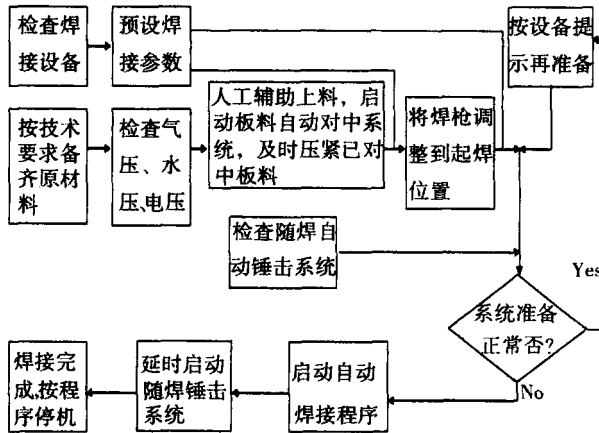


图 1 拼焊设备工作流程

Fig 1 Working flow chart of welding equipment

PH - 2500型大尺寸薄板拼焊工装示意图如图 2 所示。工件压紧采用琴键式气囊压紧方式。为了保证压紧均匀,压脚宽度为 25 mm,压脚间距 20 mm。工件背面采用开成型槽的紫铜垫板强制成型。在焊枪后面紧跟着锤击机构,其碾压轮和冲击轮宽度 \times 长度控制在 10 mm \times 50 mm 范围内,后轮比前轮稍大稍宽。工件接缝均匀间隙 0.5 mm 和直线度 0.3 mm。

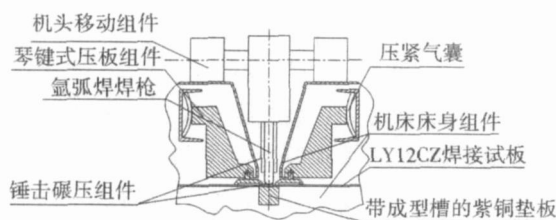


图 2 焊接工装正视图

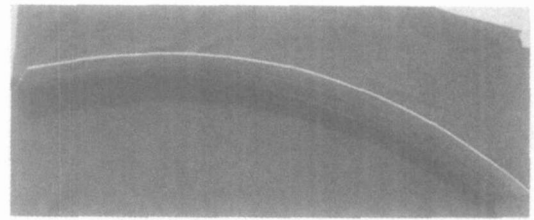
Fig 2 Section view of welding set up

3 结果与分析

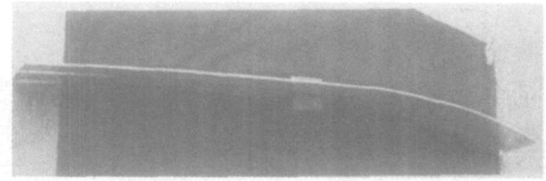
图 3 为 300 mm 窄板的焊后形态,可以看出,焊接试板经过随焊锤击碾压后的变形情况得到了很大的改善。采用该项技术拼焊成的板材达到了平面度 <2 mm/m² 的要求。

在设定锤击机构和锤击频率后,随焊锤击碾压工艺规范参数对焊接质量有较大影响。试验中的初步优化工艺参数如表 1 所示。其中焊接速度是从起始焊接速度开始逐步上升的。

宇航材料工艺 2007年 第3期



(a) 未随焊锤击碾压



(b) 随焊锤击碾压 2/3 长度

图 3 LY12CZ 拼焊效果比较

Fig 3 Deformation comparison of welded samples with and without HRT

表 1 焊接工艺参数

Tab 1 Welding parameter in experiments

起始焊接速度 /mm·min ⁻¹	锤击压力 /MPa	琴键压力 /MPa	氩气流量 /L·min ⁻¹	电流 /A
170	0.22	0.30	10~15	103

3.1 琴键压力

适当的琴键压力可以使工件之间装配间隙保持一致,并和铜垫板贴合均匀,从而保证焊缝成形。试验发现,0.3 MPa 压力是比较适宜的,继续增大琴键压力如 0.4 MPa 时,造成工件拘束过大,会产生随焊随裂的现象。

铝合金的线胀系数比钢大 1 倍,并且在温度循环中它的线胀系数变化多达 4 倍。当琴键压力比较合适时,冷却过程中母材线胀系数减小,金属产生收缩,会带动压紧点下的母材金属向焊缝中心移动,使拘束拉应力有所松弛,焊接裂纹出现的机率降低。随着夹紧力的增加,对于热裂纹敏感性材料,试件与琴键夹具之间的静摩擦增大,工件不易产生滑动,从而限制了琴键压紧范围内已被压缩的焊缝及母材金属焊后冷却产生的收缩。随着温度的降低,收缩量不断增大,夹具对焊缝金属的拘束拉应力也不断增大而造成开裂。据文献 [11] 介绍,琴键压力一般以每 100 mm 长度接缝上有 3.5 kN 左右的均匀夹紧力为好。

3.2 锤击压力和锤击高度

焊接热裂纹产生的充分条件可表示为:

$$\frac{\partial e}{\partial T} > CST \quad (1)$$

式中, $\frac{\partial e}{\partial T}$ 表示随温度降低的应变增长率, CST 为临界

应变增长率。设由凝固收缩和热收缩变形所导致的拉伸应变为 e_m , 外加压缩应变表示为 e_c , 则在冷却过程中通过脆性温度区 (BTR) 的焊缝或热影响区 (HAZ) 金属实际承受的拉伸应变 (e_m) 为:

$$e_m = e_m - e_c \quad (2)$$

当满足:

$$\frac{\partial e_m}{\partial T} = \frac{\partial e_m}{\partial T} - \frac{\partial e_c}{\partial T} < CST \quad (3)$$

即可防止焊接热裂纹的产生。

试验结果表明, 随着随锤击力的增加, 出现裂纹的几率先减小后增大, 当气泵压力为 0.22 MPa 左右时, 裂纹现象降为最低。锤击高度是与锤击力相互配合发生作用的。锤击高度不宜过大或过小, 只有与 BTR 区的位置相对应, 并且与焊接熔池的凝固过程相匹配时, 才具有最佳的止裂效果。试验中, 锤击高度在 0.8 mm 左右, 并通过调节机头高度, 使 0.8 mm 塞尺手动拉扯时感觉比较紧时就可以达到比较好的效果。

随焊锤击碾压防止焊接热裂纹的机理, 可以归结为力学、冶金两个方面的共同作用而形成的。如图 4 所示, 该结构同时汲取了“随焊碾压”和“随焊锤击”两种方法的优点, 采用高速多针空气凿锤, 利用其往复运动产生的高频冲击能力 (40 ~ 80 Hz), 并对空气凿锤的头部进行改造, 设计制造专用的锤击碾压滚轮, 并将其紧跟在焊接电弧的后方, 形成一个同步锤击源。根据力学分析, 空气凿锤利用压缩空气进行瞬间冲击加载, 由 $m \cdot v = F \cdot t$ 可知, 冲击时间和锤击压力控制了对焊缝金属延展的输入能量。同时前轮的碾压点尽量靠近了半熔化 BTR 区间, 焊缝及其近缝区在冷凝结晶的过程中, 对 BTR 区金属产生了连续的横向挤压应变, 从而有效抵消了冷凝收缩过程中产生的拉应变, 由式 (3) 所示, 可以大大减少焊接接头产生焊接热裂纹的可能性, 起到实时消除热收缩产生的拉伸应变的作用; 前轮碾压相当于三点或四点弯曲, 可消除角变形; 并且后轮的轮缘近似平直并有凸起, 既可消除前轮造成的不平, 又可加大横向延展和纵向延展。随着锤击过程的进行, 随焊锤击所产生的高频震荡, 对熔池产生了很好的搅拌作用, 使焊缝金属晶粒得到细化, 产生细晶强化的效应, 并避免了焊缝产生偏析而减小了热裂倾向。

为了利于板材的存放, 材料表面存在一定的压力是适宜的。但锤击碾压产生的应变并非越大越好。需要消除的残余应力大约与材料的屈服强度的 2/3 次方成正比。试验证明, 焊接凝固过程中所产生的最大横向拉伸应变为 0.7% ~ 0.9% [3], 并且 LY12CZ 材料的焊缝峰值拉应力总低于材料的屈服强度。当

随着锤击力进一步增大超过一定数值, 碾压轮和压板附加增强的散热过程产生加强的冷却作用, 增加了 BTR 区间焊缝或 HAZ 区的降温速度, 反而使应变相对于温度的变化率增加, 超过了 CST, 致使产生了焊接裂纹; 并且过大的锤击力还会造成焊接熔池的过分震荡, 影响熔化金属的结晶过程, 形成偏析、夹杂等诱发形成焊接裂纹或其他焊接缺陷的因素; 过大的锤击碾压压力会造成焊件表面留有较深的压痕, 影响焊件外观。如果锤击力不够大, 焊接变形又不能得到有效的改善。考虑到控制变形和裂纹的综合因素, 锤击力为 0.22 MPa, 锤击高度在 0.8 mm 左右, 可以得到成形美观、质量稳定的焊缝。

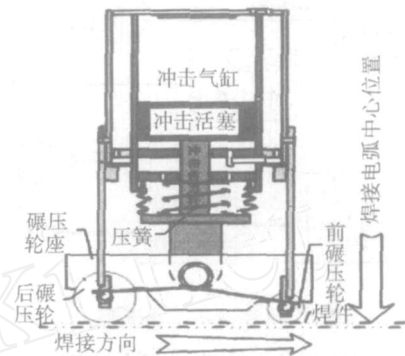


图 4 随焊锤击碾压原理图

Fig 4 Principle of hammering and rolling technique

3.3 焊接速度和电流

在焊接过程中, 焊接方法和焊接规范影响着凝固过程的不平衡性和凝固的组织状态, 也影响着凝固过程中的应变增长速度, 因而影响着裂纹的产生。

对于薄板, 采用薄板高速热源传热数学模型, 其温度场可表示为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - bT \quad (4)$$

式中, a 为热扩散率, b 为散温系数, $b = 2/c h$, 为表面散热系数, h 表示板厚。可求得:

$$T(y_0, t) = \frac{q}{h(4/c t)^{1/2}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{y_0^2}{4at} + bt \right) \right] \quad (5)$$

式中, c 为材料的热物理性质, q 表示焊接线能量, y_0 表示某点距离熔化边界的垂直距离。

取 $y_0 = 0$, 可知其焊缝位置冷却速度 c 为:

$$c = \frac{dT}{dt} = \frac{q}{h(4/c)^{1/2}} \cdot \frac{1}{e^{bt/2t}} \left(b - \frac{1}{2t} \right) \quad (6)$$

对焊接应变速率进一步进行分析, 可得:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial T} \cdot c = \frac{\partial e}{\partial T} \cdot \left[\frac{q}{h(4/c)^{1/2}} \cdot \frac{1}{e^{bt/2t}} \left(b - \frac{1}{2t} \right) \right] \quad (7)$$

式中, $\frac{\partial e}{\partial T}$ 可理解为自由线胀系数。

由式(7)可以看出,当被焊材料和接头形式确定,焊接温度场趋于稳定时,焊接应变率主要受焊接线能量 q/l 的控制。

虽然以经典的传热理论,适当增加焊接线能量可以控制焊接应变率的增加,但由于碾压轮的高速锤击过程,为了适当消除碾压轮高速冲击附加产生的散热过程,减小 BTR 区间焊缝或 HAZ 区的降温速度的斜率,所以必须适当减小焊接线能量,减缓降温速度,以降低出现焊接热裂纹的可能。但是,如果焊接电流较小,焊接速度低,也容易促进形成方向性强的粗大柱状晶,结晶裂纹敏感性较大。而焊接电流太大,熔池过烧严重,焊缝在高温停留时间长,焊接接头应变速度增加,从而也会增加裂纹倾向。

针对试验中的情况,首先,在薄铝板不填丝的表面对接方式下焊接,由于没有焊丝熔化以供给焊缝金属在焊接过程中因为烧损、蒸发等产生的损失,同时被焊工件厚度很小,少量母材的烧损和蒸发将会形成微观上较大的缺口,所以在焊接过程中,焊接规范的微小波动可能会造成工件较大的缺陷;再者,针对工件在约束条件下,由于随焊锤击碾压过程中的长直焊缝,点状热源致使焊缝不同部位形成不同的热循环过程,各部位经历的应力应变过程不同,其自由收缩过程受到限制,同时,由于加工手段的限制,采用的紫铜垫板必须分段(每 500 mm 一段)再接长,所以在垫板接头部位散热条件不同,也会造成焊接缺陷。

试验证明,为了保证在焊接过程中不产生烧穿或者裂纹等缺陷,必须在焊接过程中逐步降低焊接电流或者增加焊接速度,以减少被焊工件在焊接区域内的焊接线能量,降低焊接熔池的过热状况。

在焊接过程中,工艺参数是连续并按一定规律变化的。通过对固定点的焊接工艺参数多次记录,对数据进行平均后记录如表 2 所示。如果同时调整这两个参数,则可以使用较小的焊接速度和焊接电流,如大约 197 mm/min 和 93 A 就可以满足质量要求了。

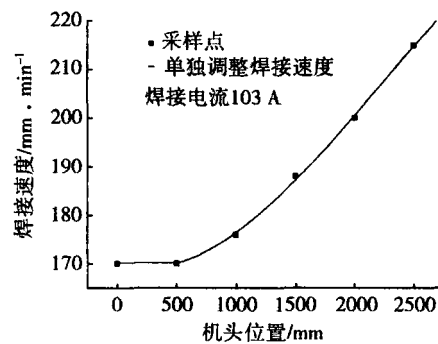
表 2 焊接规范的变化情况

Tab 2 Regulations of welding parameter		
机头位置 /mm	单独调整速度时的 焊接速度 /mm · min ⁻¹	单独调整电流时的 焊接电流 /A
0	170	103
500	170	103
1000	176	101
1500	188	97
2000	200	93
2500	215	89

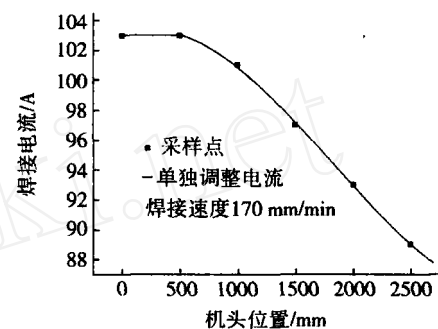
为了实现消除焊接变形和热裂纹的计算机柔性自动控制,可以以目前的数据,采用数值方法拟合一

定的变化率,以机头位置为参量来单独调解某一个工艺参数,通过计算机控制软件进行调试,从而自适应防止烧穿和热裂纹的产生。

以相对拟合误差小于 10^{-4} 对上述数据进行拟合,在 500 ~ 2 500 mm 内具体的拟合曲线如图 5 所。



(a) 改变焊接速度



(b) 改变焊接电流

图 5 各焊接参数独立调节时焊接规范的变化趋势

Fig 5 Change tendency of independent regulation of welding parameter

通过数值拟合,可知:

焊接速度的三次拟合曲线为:

$$v = \begin{cases} 170, & x \leq 500 \\ 169.95238 - 0.00737x + 1.62381 \times 10^{-5}x^2 - \\ 2.44444 \times 10^{-9}x^3, & 500 < x < 2500 \end{cases}$$

式中, x 表示机头位置。

焊接电流的三次拟合曲线为:

$$I = \begin{cases} 103, & x \leq 500 \\ 102.98413 + 0.00312x - 6.44444 \times 10^{-6}x^2 + \\ 1.18519 \times 10^{-9}x^3, & 500 < x < 2500 \end{cases}$$

4 结论

(1) 随焊锤击碾压技术有效减少了焊接残余应力的存在,基本上消除了焊接变形。

(2) 随焊锤击过程中的拘束压力是存在临界值的。压力过大或者过小都不适合变形和裂纹的控制。在不出现焊接热裂纹的情况下,琴键压力为 0.3 MPa 比较适宜。

(3) 考虑到控制变形和裂纹的综合因素,锤击发

生在与 BTR 区相对应的位置上,锤击压力有效抵消焊缝的横向拉应变,并且锤击过程与焊接熔池的凝固过程相匹配时,才具有最佳的止裂效果。试验中,随焊锤击碾压过程的锤击压力和锤头高度配合调试,即锤击高度在 0.8 mm 左右,锤击压力为 0.22 MPa 可以得到成形美观、质量稳定的焊缝。

(4)选择适合的焊接线能量,以减小熔池的过热,有利于改善抗裂性。焊接线能量的选择可以尝试通过调整焊接速度和焊接电流来实现。

参考文献

- 1 李晓梅. 铝合金薄板焊接热裂敏感性研究. 航天工艺, 1994; (6): 14~16
- 2 彭云. 铝合金焊接结晶裂纹的防止. 焊接, 1995; (1): 2~5
- 3 刘伟平. 一种防止高强铝合金焊接热裂纹产生的新方法. 焊接学报, 1995; 16(2): 106~110
- 4 郭绍庆. 温差拉伸控制铝合金薄板的焊接变形. 焊接

学报, 1999; 20(1): 34~41

- 5 关桥. 航宇薄壳结构的低应力无变形焊接新技术. 航空工艺技术, 1996; (4): 4~15
- 6 周振丰, 张文钺主编. 焊接冶金和物理焊接性. 北京:机械工业出版社, 1988
- 7 田锡堂. 随焊激冷对 LY12CZ 铝合金焊接热裂纹倾向影响的研究. 宇航材料工艺, 1998; 28(5): 48~52
- 8 郭绍庆. 温差拉伸和随焊激冷配合使用控制焊接变形. 焊接学报, 2004; 25(6): 82~86
- 9 徐文立. 动态低应力小变形无热裂随焊锤击焊接技术研究. 材料科学与工艺, 2001; 9(1): 6~10
- 10 范成磊. 随焊冲击碾压对 LY12CZ 铝合金接头组织和性能的影响. 材料工程, 2004; (10): 24~28
- 11 American Society of Metals Brazing, Soldering, American Society of Metals HandBook 9th Edition Vol 6 Welding, 1983: 525~529

(编辑 李洪泉)

(上接第 42 页)

采用本工艺制备 2D - C_f/SiC 复杂形状构件的过程包括以下两步。

(1)预制件的制作与成型

设计了带翻边的石墨芯模,外型面和方形件的内型面一致(稍稍有余量),通过边涂浆料边叠层碳布的方式,一次成型出坯体。将带模具的坯体放入烘箱中 50 处理 1 h,然后 1200 下高温裂解,冷却后脱模即得构件的预成型体。

(2)后续致密化与加工

由于先驱体在裂解时会放出小分子而在制品中留下气孔,所以在后续过程中,重复单组分真空浸渍—裂解过程来提高制品致密度。

另外,研究发现致密化周期对构件的加工性能有非常重要的影响,致密化周期太短,构件强度太差,加工时易受到损伤,而构件完全致密化后,构件硬度很高,加工十分困难。通过反复摸索发现在致密化一定周期后通过铣床进行精加工以保证构件法兰面的平整度和尺寸精度。加工完成后再浸渍—交联—裂解几个周期使构件致密化。同时为了满足 CMC 结构件所要求表面粗糙度,粗坯及每次浸渍裂解后构件表面都需用细砂纸打磨。当达到所需致密度后,再将表面打磨光滑即最终制得符合要求的 C_f/SiC 构件。

所制备的 2D - C_f/SiC 尾喷管,经试车考核具有良好的耐高温和抗冲刷能力,试车后尾喷管结构仍然完整,内型面保持光滑。

4 结论

(1)选用合适的浆料组分,采用无压成型工艺制备的 2D - C_f/SiC 具有良好的综合性能,弯曲强度达到 327.73 MPa,断裂韧度达到 14.92 MPa·m^{1/2},层间剪切强度达到 35.90 MPa,和加压成型制备的材料性能相近。

(2)无压成型的 2D - C_f/SiC 具有很好的高温抗氧化性能,完全可以满足短时高温热结构部件的要求。

(3)应用本工艺制备的某型号发动机尾喷管成功通过了试车考核表明无压成型工艺具有良好的应用前景。

参考文献

- 1 Sanokawa Y, Ido Y, Sohda Y et al Application of continuous fiber reinforced silicon carbide matrix composites to a ceramic gas turbine model for automobiles Ceram. Eng & Sc. Proc, 1997; 18(4): 221~228
- 2 Wulz H G, Trabant U. Large integral hot CMC structures designed for future reusable launchers AIAA - 97 - 2485
- 3 Morscher G N. Stress-dependent matrix cracking in 2D woven SiC-fiber reinforced melt-infiltrated SiC matrix composites Composites Science and Technology, 2004; 64: 1311~1319
- 4 Babul D H. The role of chemistry in the synthesis of ceramic materials Key Eng Mater, 2002; 206~213: 15~20
- 5 Lamouroux F, Camus G, Thebaut J. Oxidation behavior of 3D-C/SiC composites in two oxidizing environments Comp. Sci Techn, 2001; 61: 977

(编辑 李洪泉)