复合材料学报 第20卷 第1期 2月 2003年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 1 February 2003

文章编号: 1000-3851(2003)01-0111-05

SHS/QP制备(TiB_2+ Fe)/Fe叠层材料的温度场与应力场分析

刘建平, 傅正义, 周志光, 翟鹏程, 张清杰
(武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: 采用有限元分析方法, 研究SHS/QP技术制备叠层材料过程中试样的温度分布和变化, 为工艺参数的选择和试样界面结构分析提供参考。有限元计算表明SHS反应层厚度增加时, Fe基片界面处温度升高, Fe以液相存在的时间延长。采用有限元分析方法计算叠层材料残余热应力, 叠层材料中TiB_2+ Fe金属陶瓷层与Fe基片的界面结合处径向边缘出现轴向应力和剪切应力的奇异点, 导致在这个区域出现应力集中。

关键词: (TiB_2+ Fe)/Fe叠层材料; 有限元; 温度场; 应力场
中图分类号: TF12 **文献标识码:** A

FABRICATION OF (TiB_2+ Fe)/Fe LAYERED MATERIALS BY SHS/QP PROCESS ——ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELD AND STRESS FIELD

LIU Jianping, FU Zhengyi, ZHOU Zhiguang, ZHAI Pengcheng, ZHANG Qingjie
(State key lab of advanced technology for materials synthesis and processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Temperature field and stress field in (TiB_2+ Fe)/Fe layered materials fabricated by self-propagating high-temperature synthesis plus quick pressing (SHS/QP) were analyzed. Finite element analysis shows that the temperature of Fe substrate at the interface increases and liquid Fe exists longer with the increase of the thickness of SHS layer. The peculiar point of the axial stress and shear stress is located at the peripheral area of the bonding boundary of (TiB_2+ Fe)/Fe two-layered sample and this peculiar point would be considered as the major reason for the exfoliation between the bonding boundaries.

Key words: (TiB_2+ Fe)/Fe layered materials; finite element; temperature field; stress field

SHS(自蔓延高温合成)工艺由于过程简单、能耗低, 已被广泛用来制备难熔陶瓷、金属间化合物、复合材料, 但无压SHS工艺得到的产物为疏松、多孔状态, 傅正义等人利用自蔓延高温快速加压(简称SHS/QP)工艺制备了TiB_2, TiC系金属陶瓷[1~3]。笔者在课题组以前工作的基础上, 利用SHS/QP工艺来制备(TiB_2+ Fe)/Fe叠层材料, 将TiB_2+ Fe金属陶瓷的制备及其与Fe的连接一步完成。

SHS/QP工艺制备叠层材料过程简单, 由于在试样内可获得梯度分布的温度场, 因此可制备其它工艺无法制备的难熔陶瓷与金属体系叠层材料。要成功制备叠层材料的关键是控制试样中的温度场, 利用数值计算的方法, 研究SHS/QP过程中试样的温度分布和变化以及试样中残余热应力与分布, 其结果对工艺参数的选择和试样界面结构分析有参考意义。

1 计算模型及方法

1.1 温度场计算

$Ti+2B \rightarrow TiB_2$是强放热反应, 其摩尔热为-323.84 kJ/mol, 利用SHS反应获得TiB_2+ Fe金属陶瓷层过程中放出巨大的热量, 热量向铁基片和环

收稿日期: 2001-08-20; 收修改稿日期: 2001-12-21
基金项目: 国家杰出青年科学基金(59925207)
作者介绍: 刘建平(1976-), 男, 硕士研究生, 主要从事陶瓷-金属复合材料的研究。
通讯作者: 傅正义, E-mail: zyfu@public.wh.hb.cn

境介质传热是一个瞬态热传导问题,分析中,采用柱坐标系,以半径方向为 y 轴,圆盘的回转轴为 x 轴。由于材料的结构和温度载荷均关于圆盘的回转轴(x 轴)对称,其温度分布也将关于 x 轴对称,可将三维热传导问题简化为子午面(oxy 面)内的二维问题,采用轴对称模型,按纵截面的一半 15 mm 进行计算。计算时忽略点火热,将试样、沙子、模具作为一个整体考虑,由于模具温度几乎没什么变化,因此不考虑模具向空气中的热辐射。如图 1 为计算所采用的网格模型图,外面蓝色区域为钢模具,中间红色区域为沙子介质,最里面为试样。图 2 为其中的试样网格模型放大图,由于计算软件的要求,计算模型与实物向左转了 90°方向,原来在 Fe 层上面的 SHS 层变成在其左面,但文中仍以实物方位称呼。灰色网格区域是 Ti+ B+ Fe SHS 反应层,粉红色区域是 Fe 基片层,a, b, c 三点分别表示 SHS 反应层顶部、SHS 反应层与 Fe 基片界面处、Fe 基片底部三个节点。试样为最关心的区域,其网格比其它区域要密得多。一个典型的网格划分为结点总数 2052,单元总数 1998,对于不同的材料体系,试样厚度不同,网格划分稍有不同。

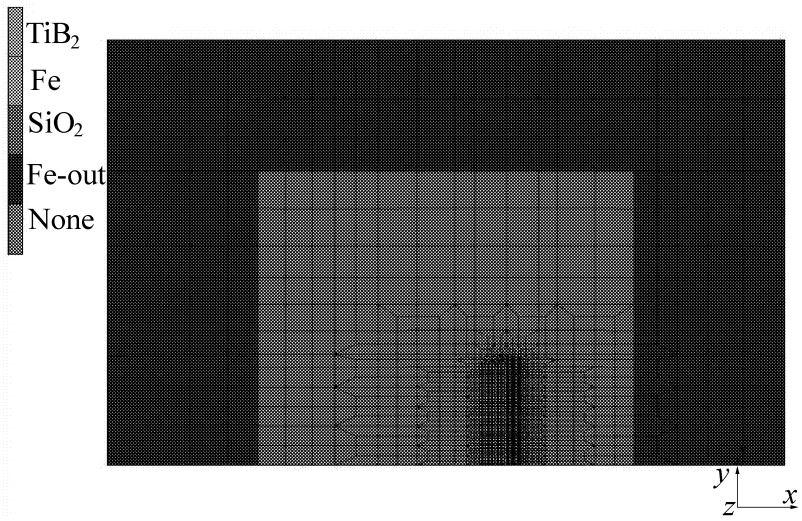


图 1　温度计算有限元网格模型

Fig. 1　FEM mesh for temperature calculation

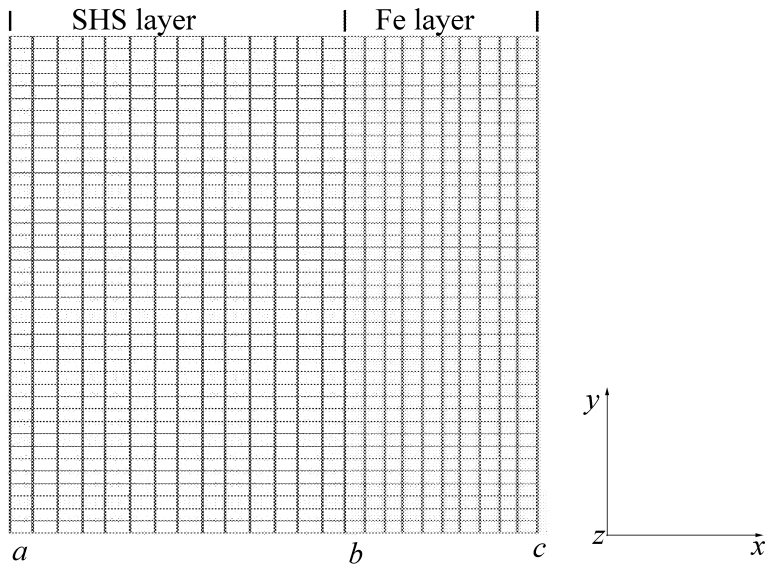


图 2　试样区域有限元网格模型

Fig. 2　FEM mesh in sample region

表 1　TiB_2 和 Fe 性能[6]

Table 1　Properties of TiB_2 and Fe

Material	Young's Module/GPa	Poisson's Ratio	Thermal Expansion Coefficient/$10^{-6}\cdot K^{-1}$
TiB_2	550	0.2	6.39
Fe	200	0.3	11.6

文中铁层的厚度是相同的,SHS 反应层(Ti+ B+ Fe)厚度不同时,自蔓延反应放出的热量不同,传递到铁层的热量也不同,这将直接影响 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层和 Fe 基片层的界面结合,界面显微结构及试样中的残余热应力大小与分布,因此陶瓷层的厚度是 SHS 一次焊接工艺中一个重要的参数,它将直接决定能否成功焊接自蔓延反应层和铁层。为研究 SHS 反应层厚度对试样结构及性能的影响,取 SHS 反应层厚度分别为 3 mm, 3.5 mm, 4 mm, 4.5 mm, 分别称为 S10, S12, S14, S16, 铁基片厚度都为 2 mm。

考虑 TiB_2, Fe, 沙子的比热容随温度的变化, Fe 的导热系数随温度变化。TiB_2 的导热系数为 24.4 $w\cdot m^{-1}\cdot k^{-1}$, TiB_2 的生成焓为 -323.84 $kJ\cdot mol^{-1}$。沙子的导热系数为 1 $w\cdot m^{-1}\cdot k^{-1}$。计算的数据分别来自参考文献[4, 5]。

1.2　应力场计算

热应力计算采用轴对称有限元分析模型,计算采用的网格模型图同图 2,对于不同的材料体系,试样厚度不同,网格划分稍有不同。

计算时采用以下条件:

(1) 选择 1500 K 为零应力温度。终了温度为室温,取为 298 K。

(2) 模型的边界条件为:在对称轴上(x 轴)处径向位移 u_r= 0,其它边界均为自由。

(3) TiB_2+ Fe 金属陶瓷层与 Fe 基片层间结合良好。

(4) TiB_2 只考虑弹性变形。

(5) 各单元的材料热弹性性能,根据各组分的体积分数,按混合法则确定。

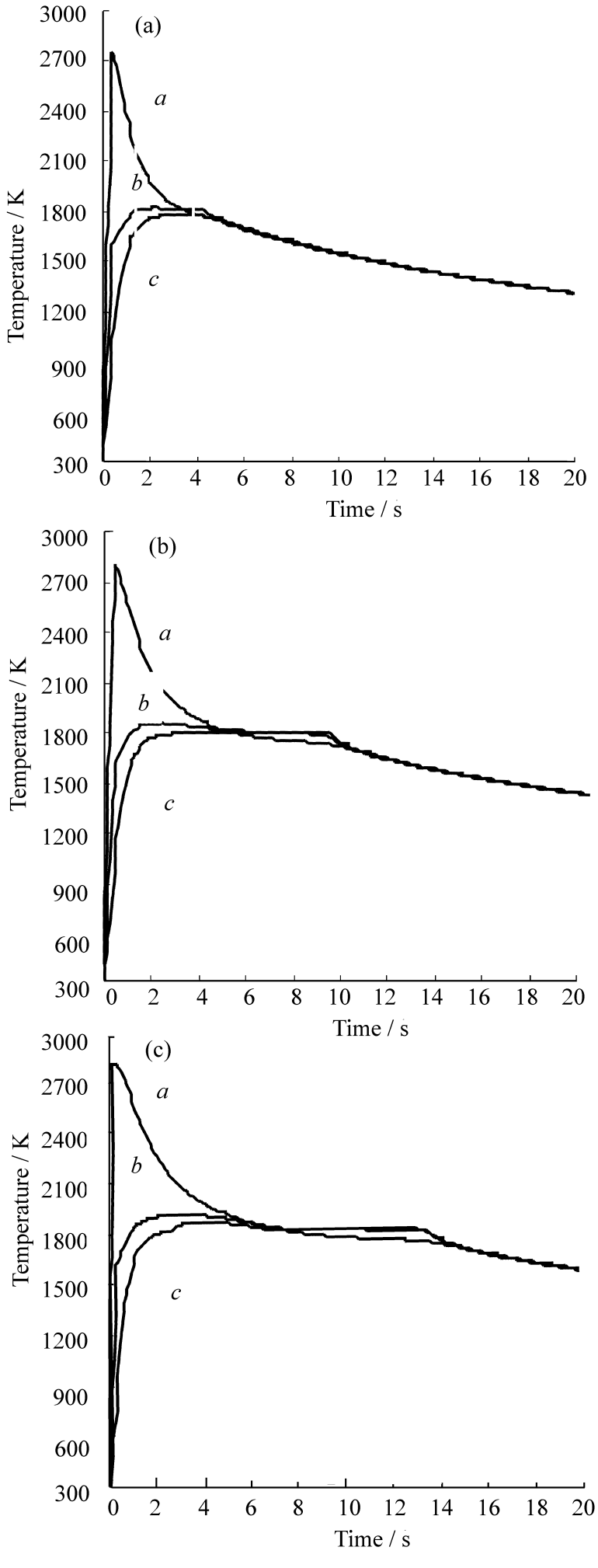
(6) TiB_2+ Fe 金属陶瓷层厚度分别为 3 mm, 3.5 mm, 4 mm, 4.5 mm, 铁基片厚度都为 2 mm。

2　结果与分析

2.1　温度场分析

图 3(a) 是 SHS 反应层厚度为 3 mm 试样

(S10 试样) SHS 反应层顶部、SHS 反应层与 Fe 基片界面处、Fe 基片底部三点温度随时间变化关系，a, b, c 曲线分别对应于图 2 所示的三个节点，可以看出，由于 SHS 反应非常快，在 SHS 反应结束时，SHS 反应层顶部温度(a 点)达到最高，随后，由于要向 Fe 基片和沙子介质传热，其温度迅速下降，在不到 2 s 的时间内使 Fe 基片顶部(b 点)的温度升高到其熔点，由于 Fe 的熔化要吸收较多的热量，此时出现一个温度平台，对应于 Fe 的熔点，Fe 基片底部(c 点)的温度比上部界面处要低一些，但相差不大。在 4 s 时间内，试样内温度趋于均匀，然后以相同的速率冷却下来。



(a) S10　(b) S12　(c) S14

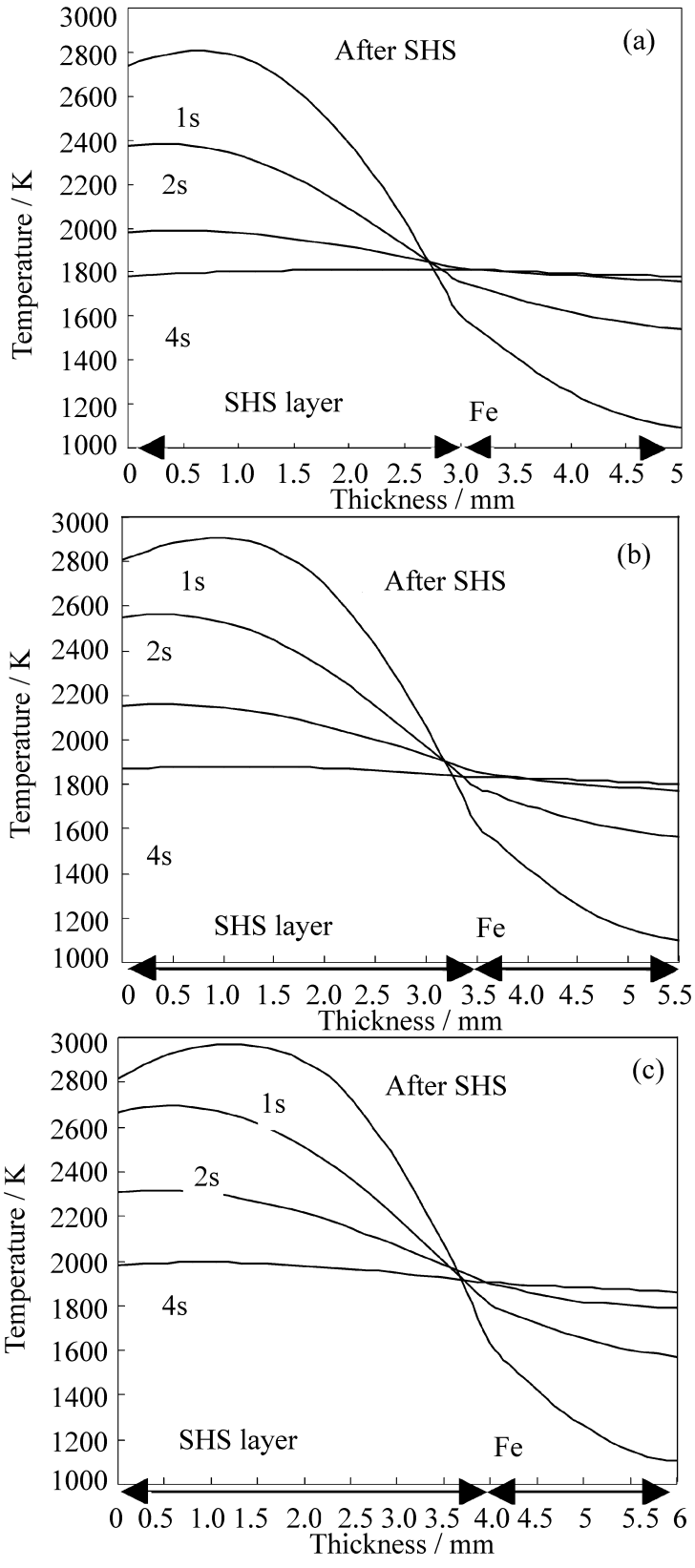
图 3　试样中节点 a, b, c 温度-时间图

Fig. 3　Temperature-time relationship of node a, b, c in sample

图 3(b), 3(c) 分别是 SHS 反应层厚度为 3.5 mm (S12 试样), 4 mm (S14 试样) 试样温度随时间变化关系，可以看出 SHS 反应层顶部温度(a 曲线) 同样在反应结束时达到最高，由于 SHS 反应层更厚一些，因此，S12 试样、S14 试样 a 节点温度比 S10 试样 a 节点稍微高一些，温度下降的速率要慢一些。在这两个试样中 Fe 基片界面处温度(b 节点)都比 Fe 的熔点稍微高一些。另外，随着反应层厚度增加(SHS 反应放出的热量增加)，对应于 Fe 熔点的温度平台明显变长，Fe 以液相存在的时间分别为 10 s 和 14 s。

此外，从图 3 也可看出，由于 Fe 基片温度升高要吸收大量的热量，这些热量是由 SHS 反应层放出来并传递到 Fe 基片的，这导致在试样中沿厚度方向存在很大的温度梯度。图 4 分别为三个试样厚度方向在不同时刻的温度分布，可以看出，由于 SHS 反应层放出的热量向 Fe 基片传递，开始时，试样内温度梯度很大，随着传热的进行，试样内温度梯度减小，到 4 s 时，试样内温度基本达到均匀。

实验中 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层的致密化及其与 Fe 层的结合所需的热量都由 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层的 SHS 反应提供。TiB_2+ Fe 金属陶瓷层越厚，SHS 反应放出的热量越多。实验中 Fe 基片的厚度是固定的，当 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层太厚时，SHS 反应放出过多的热量使 Fe 基片层严重变形，甚至熔化；当 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层太薄时，SHS 反应放出的热量不足以实现 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层的致密化及其与 Fe 基片层的结合。通过以上的数值计算可以知道在 SHS 制备过程中，TiB_2+ Fe 金属陶瓷层和其与 Fe 基片层界面结合处达到的温度，从而可以知道能否成功制备试样。通过对温度场的分析初步确定能成功制备试样的 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层厚度，此厚度范围是 2～5 mm(由于篇幅限制，其它厚度的温度场分析没有给出)。



(a) S10　　(b) S12　　(c) S14

图 4　试样不同时刻轴向温度分布

Fig. 4　Temperature across axis at different times

2.2　应力场分析

图 5 所示为不同厚度叠层材料试样的最大轴向应力和最大剪切应力的变化。可见，随着 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层厚度增加，叠层材料的最大轴向应力和最大剪切应力增加。实验结果也证实了这一点，实验中发现，当 TiB_2 + Fe 金属陶瓷层厚度为 4.5 mm 时，金属陶瓷层出现垂直于叠层材料界面的裂纹，当 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层厚度进一步增加时，试样中的 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层出现剥落和层裂现象。一般认为，轴向应力是造成层裂发生的主要原因[7]。

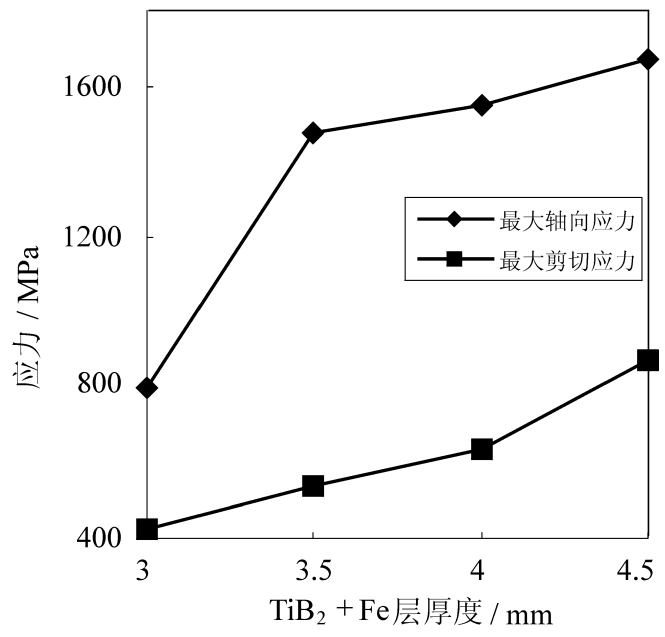
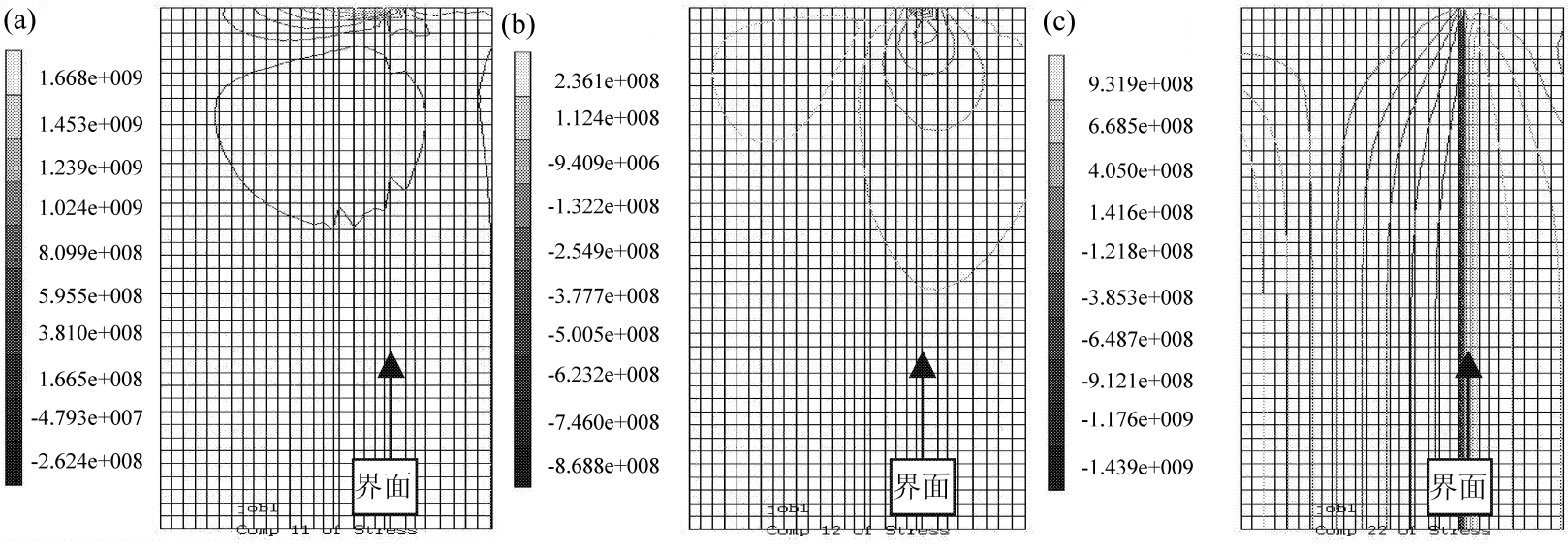


图 5　叠层材料 TiB_2+ Fe 层厚度不同时的应力

Fig. 5　Stress of layered materials with different thickness of TiB_2+ Fe

图 6 是 TiB_2 + Fe 金属陶瓷层厚度为 4.5 mm (记为 S16) 的叠层材料的轴向应力、剪切应力、径向应力分布图。计算结果表明，叠层材料试样中的轴向应力最大，而且集中在 TiB_2 + Fe 金属陶瓷层与 Fe 基片界面径向自由边界处，这是造成一些试样出现层裂的主要原因。叠层材料试样中的径向应力也较



(a) Axis stress　　(b) Shear stress　　(c) Radial stress

图 6　S16 叠层试样室温残余应力分布　　Fig. 6　Stress distribution of Sample S16

大，而层间剪切应力则较小。在 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层与 Fe 基片的界面结合处径向边缘出现轴向应力和剪切应力的奇异点(应力不连续点)，导致在这个区域出现应力集中，这被认为是界面结合剥落的重要原因[8]。

3 结 论

(1) SHS 反应层厚度增加时，Fe 基片界面处温度升高，温度下降的速率降低。三个试样中 Fe 基片界面处温度达到 Fe 的熔点。随着反应层厚度增加，对应于 Fe 熔点的温度平台明显变长，Fe 以液相存在的时间延长。

(2) 由于 Fe 基片温度升高要吸收大量的热量，导致在 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层中沿厚度方向存在很大的温度梯度。

(3) 通过温度场分析，初步确定了能成功制备试样的 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层厚度范围。

(4) 分析了叠层材料试样中的残余应力，认为叠层材料中 TiB_2+ Fe 金属陶瓷层与 Fe 基片的界面结合处径向边缘出现轴向应力和剪切应力的奇异点(应力不连续点)，是一些试样出现层裂的主要原因。

参考文献:

[1] 傅正义，王为民，王 皓，等. TiB_2 系金属陶瓷的 SHS/QP 制备[J]. 硅酸盐学报，1996，24(6)，654-659.

[2] 傅正义，王 皓，王为民，等. 采用 SHS/QP 技术制备 TiC-xNi 金属陶瓷——Ⅰ. 燃烧合成过程研究[J]. 复合材料学报，1997，14(2)，56-60.

[3] 傅正义，王 皓，王为民，等. 采用 SHS/QP 技术制备 TiC-xNi 金属陶瓷——Ⅱ. 加压工艺与材料性能[J]. 复合材料学报，1997，14(3)，61-64.

[4] 梁英教，车荫昌. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳：东北大学出版社，1994.

[5] 工程材料实用手册[M]. 北京：中国标准出版社，1988.

[6] 李荣久. 陶瓷金属复合材料[M]. 北京：冶金工业出版社，1995. 231-252.

[7] 翟鹏程. 梯度材料设计理论研究[D]. 武汉：武汉工业大学. 1998. 30-32.

[8] Yamada Y. Study on the coating of oxidation resistant layer by SHS [J]. Materials Science Forum, 1999, 308-311, 271-276.