

SHS-离心法制备陶瓷复合管道 热应力的有限元分析

Finite Element Analysis of the Thermal Stress of the Ceramic
Composite Piping Prepared by Centrifugal-SHS

王宇飞, 杨振国, 郭宝山

(复旦大学材料科学系, 上海 200433)

WANG Yu-fei, YANG Zhen-guo, GUO Bao-shan

(Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

摘要: 模拟分析了 SHS-离心法制备陶瓷复合管道在冷却凝固过程中的温度分布和变化, 从而为工艺参数的选择和管道界面结构分析提供了基础。利用 ANSYS 软件的瞬态热分析功能和热-结构耦合功能, 数值上模拟复合管道的残余热应力, 分析 SHS 层厚度对陶瓷复合管道性能的影响。数值分析结果表明, 合理调整 SHS 层的厚度, 可使界面残余热应力变小, 从而提高陶瓷复合管道的安全可靠性能。

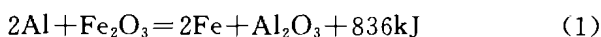
关键词: SHS-离心法; 陶瓷复合管; 残余热应力; 有限元分析; ANSYS

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2005)02-0006-04

Abstract: The temperature distribution and variation in the cooling course of the ceramic composite piping prepared by centrifugal-SHS were modeled and analyzed so as to provide the basis of the choice of process parameter and interface structure analysis of the piping. With the function of transient thermal analysis and thermal-structure coupling of ANSYS, the residual thermal stress of the composite piping was numerically simulated and the influence on the performance of the piping with thickness of the SHS layer was studied as well. The results of numerical analysis indicate that modulating the thickness of the SHS layer can reduce the residual thermal stress on the interface, and consequently, the safety reliability of the ceramic composite piping can be enhanced.

Key words: centrifugal-SHS; ceramic composite piping; residual thermal stress; finite element analysis; ANSYS

SHS (Self-propagating High-temperature Synthesis, 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、金属间化合物及其复合材料^[1]。SHS-离心法将 SHS 技术与离心铸造工艺相结合, 在金属管道或圆筒形容器的内壁直接涂敷较厚的陶瓷层, 使之具有优良的耐磨、耐蚀和耐热性^[2]。方程 (1) 为铝热 SHS-离心法制备陶瓷复合管道的反应式^[3]:



由于材料之间热膨胀系数差别大, SHS-离心法制备的复合管在高温反应冷却过程中, 会产生很大的热应力, 其大小不仅与材料物理性质有关, 还与材料的厚度及温度分布有关。复合管中的 Fe 层很薄, 厚度约 1mm, 且夹在陶瓷层和碳钢层中间, 用实验方法测量 Fe 层中的残余应力有极大的困难。张曙光、王克智等用有限差分法建立了离心 SHS 陶瓷衬管非稳态传热

过程的数学模型, 模拟了随时间变化的体系温度场^[2], 并由温度场模拟推断陶瓷层裂纹的成因, 但未对不同厚度的 SHS 层温度场进行比较; 席文君等分析了铝热-离心法陶瓷内衬复合钢管^[4], 计算了陶瓷层、不锈钢层和碳钢层中的残余热应力, 但给出的应力值远远超出材料的屈服强度, 这主要是模拟计算中没有考虑到降温过程中复合管道各层材料的热性能及其物理性能的变化。

本工作用有限元方法模拟计算了 SHS-离心法制备的陶瓷复合管道中陶瓷层、Fe 层和碳钢层中温度场和残余热应力的分布, 分析陶瓷和 Fe 构成的 SHS 层的厚度对残余热应力的影响, 据此用于指导陶瓷复合管道制品的工艺参数的选择以及力学性能的优化。

1 模型的建立

在 SHS-离心反应后, Al_2O_3 和 Fe 熔体凝固放热

及传热是瞬态热传导问题。分析中可将陶瓷复合管道简化为无限长轴对称水平圆筒的传热问题,温度场呈轴对称分布;反应产物仅由 Fe 和 Al_2O_3 两相组成,二者瞬间分离,此间钢管保持初温;各层间的传热为热传导,界面为理想接触,钢管外表面与周围空气介质的传热为强制对流。

以钢管轴线 z 轴为对称轴,非稳态导热方程可写为^[5]:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: T 为物体瞬态温度; t 为过程进行的时间; k 为材料的导热系数; ρ 为材料的密度; C_p 为材料的比热; Q 为材料的内热源强度。

应用有限单元法,可将 (2) 式化为^[6]

$$[C_e^c]\{\partial T_e/\partial t\} + ([K_e^{th}] + [K_e^c])\{T_e\} = \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\} \quad (3)$$

式中: $[C_e^c] = \rho \int_{vol} c\{N\}\{N\}^T d(vol)$, 为元素热容矩阵; $[K_e^{th}] = \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol)$, 为元素热导矩阵; $[K_e^c] = \int_{S_3} h_f \{N\}\{N\}^T d(S_3)$, 为元素热流矩阵; $\{Q_e^c\} = \int_{S_3} T_B h_f \{N\} d(S_3)$, 为元素对流表面的热流矢量; $\{Q_e^g\} = \int_{vol} \dot{q} \{N\} d(vol)$, 为元素热生成载荷; $\{T_e\} = \{T_e(t)\}$, 为元素的节点温度矢量; $\{N\}$ 为插值函数; $[B] = \{L\}\{N\}^T$; $\{L\}$ 为对坐标轴的矢量操作; h_f 为膜系数,除非特别指定,一般取 $h_f = (T_B + T_S)/2$; T_B 为整体平均温度; T_S 为模型表面温度; \dot{q} 为元素生热率。

用有限元分析软件 ANSYS 进行数值计算^[7],管道的轴对称有限元模型如图 1 所示,取无限长管道中的一段 (5mm) 做研究,钢管使用 $\phi 273\text{mm}$ 的普通钢管,SHS 层 (陶瓷层和 Fe 层) 中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 Fe 的体积分数按照反应 (1) 式中生成物的摩尔体积比来确定。单元网格划分采用 ANSYS 软件提供的 4 节点四边形单元并激活轴对称分析的选项。在不同材料接合的交界面处将网格细化,共得到 450 个离散单元。



图 1 有限元模型

Fig. 1 Model for FEA

计算时首先给出 SHS 层凝固前管道的温度场分布情况,再以此作为初始条件,用非线性瞬态分析模拟降温过程的温度场,继而采用轴对称有限元理论,用间接法通过热-固耦合分析得出陶瓷复合管道冷却到室温时的残余应力。

在大多数数值分析中,相关材料物理属性的精确数据是模拟精确与否的关键因素^[8]。在非线性的瞬态热分析中,需要指定 3 种材料随温度变化的比热、导热系数。另外,在 ANSYS 软件中还需通过定义材料的焓随温度的变化来考虑结晶潜热,来模拟对 SHS 层中的氧化铝和 Fe 层凝固的相变过程。这些热物性数据以及热应力分析时材料的物理属性来自文献 [9-11]。

本研究通过改变 SHS 层的厚度,来比较分析陶瓷复合管道凝固冷却的速度和残余热应力。设外层 $\phi 273\text{mm}$ 钢管的参数不变,分别计算厚度为 3.5, 4.0, 4.5, 5.0mm 的 SHS 层凝固冷却过程中的温度场和冷却至室温时的残余应力,用同样的 ANSYS 参数化命令求解,得到管道中的环向应力沿复合管道径向距离的变化。

2 模拟结果与分析

2.1 凝固冷却过程的温度场分析

图 2a 是 SHS 反应层厚度为 3.5mm 时试样的 SHS 反应层的温度随时间变化关系曲线,从图 2a 可知,陶瓷层冷却速度很快,在 SHS 反应点燃烧后几秒钟内降温至其熔点,在此时段凝固过程中基本上没有恒温台阶,但之后随着凝固前沿向内推进及由于结晶潜热的释放,其冷却速度迅速趋缓,在 2336K 左右出现一个小的温度平台,随后继续迅速冷却。Fe 层内外壁分别在 Fe 的熔点 1809K 附近出现温度平台,其外壁温度比内壁温度要低一些,但相差不大。在大约 25s 以后,试样内温度趋于均匀,然后以相同的速率冷却下来。在约 40s 左右冷却至 1600K,此时 Fe 层已完全凝固。在持续冷却约 1.5h 后,SHS 层温度降至室温。

图 2b, c 是 SHS 反应层厚度分别为 4.0, 4.5mm 时试样的 SHS 反应层的温度随时间变化关系曲线。对比图 2a 可以看出,随着反应层厚度增加,SHS 反应放出的热量也增加,对应于 Fe 熔点的温度平台明显变长,三种情况下,Fe 以液相存在的时间分别是 6, 10, 18s, 并且试样冷却到室温的时间也将相应的延长。

若 SHS 反应层过薄,则陶瓷层凝固冷却速度较快,其放出热量不足以实现陶瓷层的致密化,很容易在凝固时产生裂纹,使陶瓷层与外层结合不牢固。若 SHS 反应层过厚,则陶瓷层凝固冷却速度缓慢,造成内外层温度梯度也较大,从而产生较大的热应力,也

将影响使用。所以通过对温度场的分析可以初步确定能成功制备陶瓷复合管道的 SHS 层厚度，此厚度范

围是 3.5~6.0mm。

2.2 室温下的残余应力

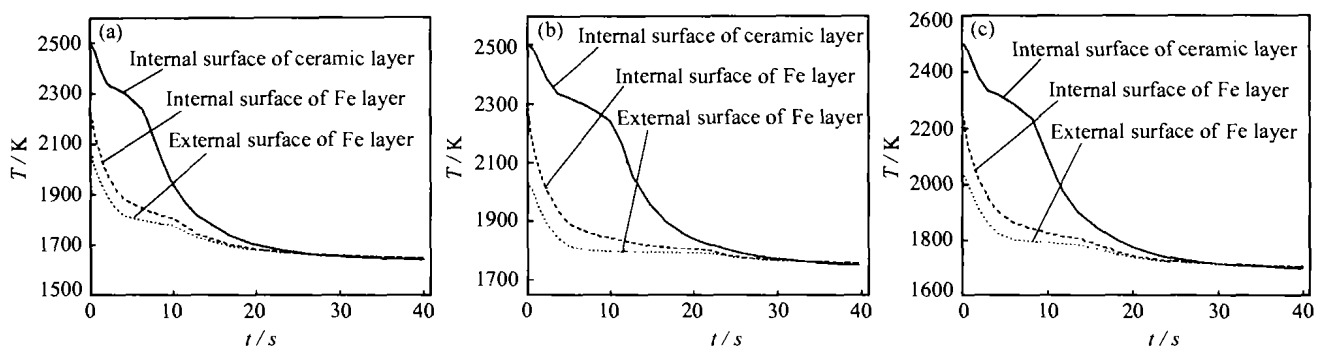


图2 不同SHS层厚度的温度-时间曲线 (a) 3.5mm厚; (b) 4.0mm厚; (c) 4.5mm厚
Fig. 2 Temperature-time curves of the different thickness of SHS-layer
(a) 3.5mm thickness; (b) 4.0mm thickness; (c) 4.5mm thickness

图3给出了SHS层为4mm的陶瓷复合管道在空气中冷却至室温时的环向残余应力曲线。从图3可知，Al₂O₃层在冷却后受到约152.22MPa的压应力，Fe层中受到约62.288MPa的压应力，环向应力在不同材料的交界面处发生突变，在钢管层与Fe层的交界面处，钢管受到102.76MPa的拉应力，随后沿着半径增大的方向逐渐减少。

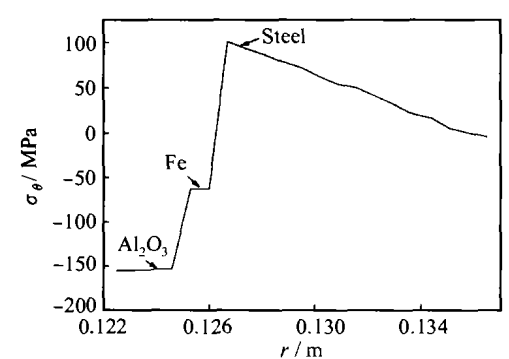


图3 室温下的环向残余应力-半径曲线
Fig. 3 The residual circumferential stress-radius curve at room temperature

2.3 不同厚度SHS层的残余应力比较

图4中给出了SHS层厚度分别为3.5, 4.0, 4.5, 5.0mm时的环向残余应力和半径的关系曲线，图5则直观地给出各层材料中环向应力的大小和SHS层厚度的关系，具体数值见表1。由表1可见，随着SHS层的厚度增加，复合管道冷却至室温时的环向应力值增加，在SHS层厚度从3.5mm增加到4.0mm后，其冷却后陶瓷层中的环向应力增加了约84.284MPa，而SHS层厚度由4.0mm增加到5.0mm后，环向应力增加的并不大。相应的Fe层和钢管层内的环向应力也有所增加。

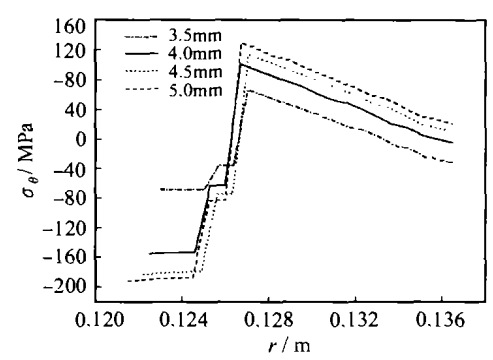


图4 不同SHS层厚度的环向残余应力比较
Fig. 4 The comparison of the residual circumferential stress of the different thickness of SHS-layer

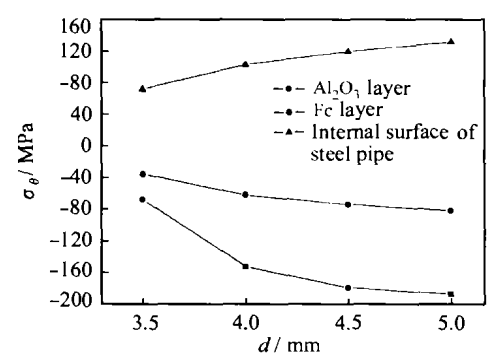


图5 环向残余应力与SHS层厚度的关系
Fig. 5 The relation between the residual circumferential stress and the thickness of SHS-layer

3 结论

(1) SHS反应层厚度增加时，试样的降温时间延长，对应于Fe熔点的温度平台明显变长，Fe以液相存在的时间也延长。通过温度场分析，可估算出性能优异的复合管道SHS层厚度的适用范围。

表1 不同厚度SHS层的残余应力比较

Table 1 The comparison of the residual circumferential stress value at the interface of the three-component composite piping of different thickness of SHS-layer

Thickness of SHS-layer/mm	3.5	4.0	4.5	5.0
σ_{θ} on outer surface of Al_2O_3 layer/MPa	-67.936	-152.22	-178.87	-186.70
σ_{θ} in Fe layer/MPa	-35.543	-62.288	-74.167	-82.212
σ_{θ} on inner surface of steel layer/MPa	71.771	102.76	119.67	131.74

(2) 冷却后, Al_2O_3 和 Fe 层受到压应力, 环向应力在不同材料层的界面处发生突变。在钢管层与 Fe 层的界面处, 钢管受到的拉应力最大, 随后沿半径增大而减少。

(3) 随着 SHS 层的厚度增加, 复合管道冷却至室温时的环向应力也增加。

(4) 选用适宜的 SHS 层厚度, 可以显著降低 SHS-离心法制备的陶瓷复合管道界面处的环向应力, 从而提高陶瓷复合管道的安全可靠性能。

参考文献

- [1] 刘建平. SHS/QP 制备 $(TiB_2+Fe)/Fe$ 叠层材料的温度场与应力场分析 [J]. 复合材料学报, 2003, 20 (1): 111-115.
- [2] 张曙光, 王克智, 吴龙翔. 离心 SHS 陶瓷衬管温度场数值模拟 [J]. 铸造, 1997, (2): 9-14.
- [3] 杨振国. 高耐磨金属陶瓷复合钢管在煤粉管和灰渣管中的应用 [J]. 华东电力, 2002, 30 (2): 9-12.
- [4] 席文君, 殷声, 周和平, 等. 铝热-离心法制备不锈钢内衬复合钢管残余应力有限元分析 [J]. 粉末冶金技术, 2000, 35 (2): 212-217.
- [5] 孔祥谦. 热应力有限单元法分析 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
- [6] ANSYS, Inc. Theory Reference [CP]. Swanson Analysis Systems, Inc. 2004.
- [7] CHAE S W, SON C H, KIM Y S. Finite element analysis on the effect of Si phase melting in combustion synthesis of $MoSi_2$ [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 279: 111-117.
- [8] 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.
- [9] 马庆芳. 实用热物理性质手册 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986.
- [10] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

基金项目: 上海市“火炬计划”项目 (03HJC1080)

收稿日期: 2004-07-28; 修订日期: 2004-08-18

作者简介: 王宇飞 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为复合材料

的数值模拟, 联系地址: 上海复旦大学材料科学系杨振国转 (200433).

(上接第 5 页)

4 结论

(1) 采用 Schelkunoff 理论可较好地描述高导电橡胶的屏蔽效果, 其屏蔽效能与实验结果符合得很好。

(2) 屏蔽效能随着阻值的改变产生了类似于渗流现象的突变; 在 $10^2 \Omega \cdot cm$ 以下随着电阻率的降低, 屏蔽效能迅速增加。

(3) 可用二次多项式来描述阻值随拉力的变化过程, 在受载情况下平衡阻值随拉力的增加而增大。

参考文献

- [1] 谭松庭, 章明秋, 曾汉民. 屏蔽 EMI 用导电性高分子材料 [J]. 材料工程, 1998, (5): 6-9.
- [2] 谭松庭. 金属纤维填充聚合物复合材料的导电性能和电磁屏蔽性能 [J]. 材料工程, 1999, (12): 3-5.
- [3] SAU K P, CHALI T K, KHASTGIR D J. Conductive rubber composites from different blends of ethylene-propylene-diene rubber and nitrile rubber [J]. Mater Sci, 1997, 32 (11): 5717-5726.
- [4] 曾戎, 曾汉民. 导电高分子复合材料导电通路的形成 [J]. 材料工程, 1997, (10): 9-13.
- [5] 邢丽英, 刘俊能, 任淑芳. 短碳纤维电磁特性及其在吸波材料中的应用研究 [J]. 材料工程, 1998, (1): 19-21.
- [6] 谢泉, 刘让苏, 徐仲榆, 等. 白炭黑和炭黑含量对导电硅橡胶拉敏特性影响的研究 [J]. 高分子材料科学与工程, 1998, 14 (1): 94-97.
- [7] 汤浩. 炭黑填充高聚物复合材料 PTC/NTC 现象研究 [D]. 长春: 吉林大学, 1992.
- [8] 罗延龄, 王庚超, 张志平. PTC 特性的复合导电体系中炭粒子分布的逾渗模型与电阻率的计算 [J]. 高分子通报, 1998, (4): 23-33.
- [9] SCHELKUNOFF S A. 电磁波论 [M]. 东京: 岩波大学出版社, 1964. 321-335.
- [10] SHENG P, SICHEL E K, GITTLEMAN J I. Fluctuation-induced tunneling conduction in carbon-polyvinyl-chloride composites [J]. Phys Rev Lett, 1978, 40 (18): 1197-1200.
- [11] 胡望宇, 王玲玲, 吴力军, 等. 炭黑填充硅橡胶导电机制的研究 [J]. 高分子材料科学与工程, 1995, 11 (2): 106-110.
- [12] SHERMAN R D, MIDDLEMAN L M, JACOBS S M. Electron transport processes in conductor-filled polymers [J]. Polym Eng Sci, 1983, 23 (1): 36-45.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50371012); 辽宁省科学技术基金资助项目 (20032125)

收稿日期: 2004-11-04; 修订日期: 2004-12-05

作者简介: 刘顺华 (1944-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事导电材料及电磁波吸收材料方面的研究, 联系地址: 大连理工大学铸造工程研究中心 (116023).