

# The Finite Element Analysis of Bilayer Structure of ZrO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Gradient Material

Zihao Zhang, Guangyuan Xie, Zhou Zhang, Ying Chen

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei  
Email: 1593620785@qq.com

Received: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2016; accepted: Nov. 25<sup>th</sup>, 2016; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The finite element software is used to simulate the thermal stress generated in the simplified model of the bilayer structure of zirconia and alumina. By comparing the possible failure method of materials during the simulative process of gear and gradient structure, the relationship among coordination mode, tooth width, component ratio and the thermal stress can be presumed.

## Keywords

Alumina, Zirconia, Gradient Material, Finite Element Analysis

---

# 氧化锆与氧化铝双层结构及梯度材料配合的有限元分析

张子豪, 谢光远, 张舟, 陈影

武汉科技大学, 湖北 武汉  
Email: 1593620785@qq.com

收稿日期: 2016年11月3日; 录用日期: 2016年11月25日; 发布日期: 2016年11月29日

## 摘要

采用有限元软件对氧化锆与氧化铝双层结构的简化模型中产生的热应力的过程进行模拟分析。对交齿配合和梯度配合等模拟过程中材料产生的失效方式进行比较, 得出模拟过程中配合方式、交齿齿宽、梯度比例与所得热应力之间的相关关系。

## 关键词

氧化铝, 氧化锆, 梯度材料, 有限元

## 1. 引言

汽车氧传感器由于在使用过程中的热循环和热膨胀系数的差异, 使结构中产生热应力, 进而导致结构的破坏。新型梯度材料可以降低分界面处的界面应力[1] [2], 保证结构的稳定, 然而不同的配合方式的热应力分布可能存在差异。为了优化结构, 本文拟用有限元方法对氧化锆与氧化铝梯度配合与交齿配合的快速升温过程中热应力分布进行模拟分析。

## 2. 基本假设和有限元热应力分析

### 2.1. 基本假设

根据氧化锆与氧化铝烧结工作条件作出热分析基本假设:

- ① 氧化锆和氧化铝层片质量都是均匀分布, 且无孔隙, 在氧化锆与氧化铝模拟过程中, 假设在材料施加一载荷固定, 使其更符合实际情况。
- ② 忽略外界条件影响, 假设温度在 0.1 s 内, 上升到使用温度, 即 400℃, 且温度分布均匀。
- ③ 氧化铝和氧化锆接触面为 bonded, 故假设两个层片协调变形, 不剥离。

### 2.2. 热应力分析

将梯度配合材料划分为一系列的单层, 每层的参数为常数, 厚度为  $h_i$ 。则应力场[3] [4] [5]为

$$\sigma = D(A + Bh_i - \alpha(h_i)T_i(h_i, t))$$

其中  $D$  为弹性矩阵, 可以根据 Voigt 移动规律写出对应关系,  $A$  和  $B$  为未知数,  $\alpha(h_i)$  为线膨胀系数,  $T_i$  为温度分布, 可用边界方程求解,  $t$  为时间。

## 3. 建立模型

### 3.1. 两种不同配合方式的氧化铝和 5YSZ 的几何模型

实验使用 Ansys Workbench 中的 SpaceClaim 工具来建立不同配合情况下的几何模型。配合后的模型尺寸为 30 mm × 3 mm × 4 mm, 且在其侧面中部留有 0.5 mm 宽的区域作为固定支撑。

#### 3.1.1. 层状氧化铝和 5YSZ 的配合

层状直接配合是将均为 1.5mm 厚的氧化铝片和 5YSZ 片配合在一起, 然后施加固定支撑。层状梯度配合是在直接配合的基础上, 在氧化铝片与 5YSZ 片的接触面, 分别插入 0.01 mm 厚的 20 wt%  $Al_2O_3$ 、40 wt%  $Al_2O_3$ 、60 wt%  $Al_2O_3$  和 80 wt%  $Al_2O_3$  片, 然后施加固定支撑。

### 3.1.2. 交齿状氧化铝和 5YSZ 的配合

交齿状结构在理想状态下的配合状态是完全配合，考虑到丝网印刷工艺成型的齿的尺寸误差，将交齿状结构分为无空隙配合和 5% 空隙配合。5% 空隙配合模型，采用梯形齿来模拟，空隙分布均匀。

无空隙配合模拟的齿的齿高为 0.05 mm，齿宽分别为 0.02 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.2 mm 和 0.5 mm。5% 空隙配合的梯形齿的齿高为 0.05 mm，上宽在无空隙配合的齿宽基础上减小 5%。下齿宽为 0.5 mm 空隙配合的交界处如图 1 所示。

## 3.2. 热学与力学参数

实验所用到的氧化铝和 5YSZ 的热学与力学数据如表 1 所示，数据引用自文献[6]。

## 4. 热应力分布

### 4.1. 层状配合

层状直接配合所产生的热应力集中在施加固定支撑的预设面附近，最大拉应力为 189.5 MPa，且最大压应力为 388.67 MPa。

在梯度配合下，热应力最大值位于施加固定支撑的预设面处，且有较大的热应力分散在中间梯度材料与氧化锆及氧化铝的分界面上，不同氧化铝含量的梯度叠合的最大热应力如表 2 所示。

### 4.2. 交齿状配合

无间隙与 5% 间隙配合的最大热应力数据如表 3 所示，且最大热应力出现在施加固定支撑的预设面处。

## 5. 讨论

氧化锆与氧化铝共烧结性能的改进通常是调整材料配方，本实验是在已优化材料的基础上，从材料的结构出发，通过模拟实验寻找优化方案。

随着梯度材料氧化铝含量的增加，热应力稍有增加。因热应力横向均匀分布(图 2(a)中氧化铝与氧化锆的交界处)且数值较大，层状梯度配合有横向开裂的倾向。



Figure 1. The junction of coordination of low tooth width of 0.5 mm  
图 1. 下齿宽为 0.5 mm 空隙配合的交界处

Table 1. The thermodynamic data of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and 5YSZ

表 1. 氧化铝和 5YSZ 的热学与力学数据

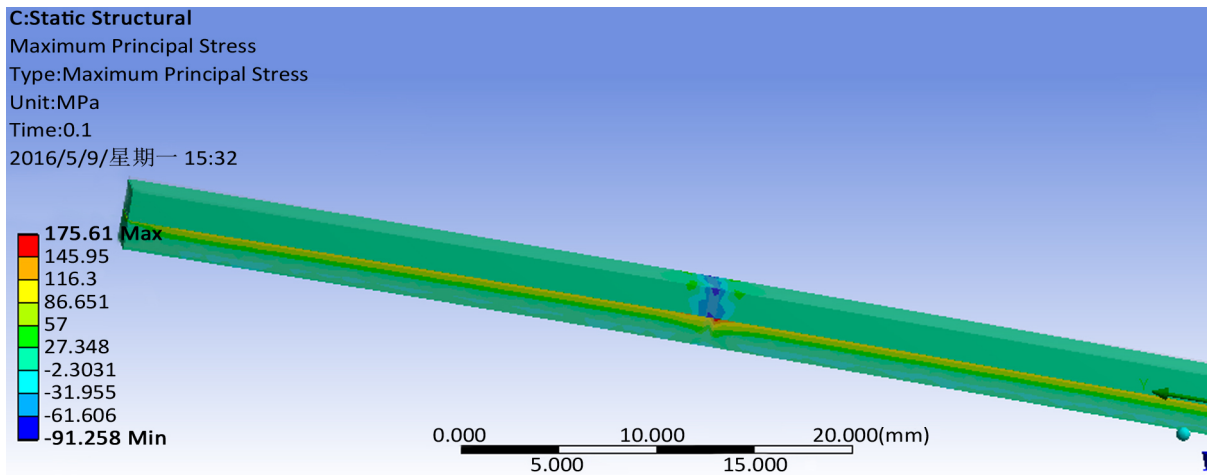
	密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	热膨胀系数( $\text{C}^{-1}$ )	杨氏模量(GPa)	泊松比	拉伸屈服强度(MPa)	导热系数( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ )
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3960	0.000088	190	0.22	143.13	35
5YSZ	5890	0.00001	360	0.179	236.5	2.5

**Table 2.** The maximum thermal stress data of gradient coordination  
**表 2.** 梯度配合的最大热应力数据

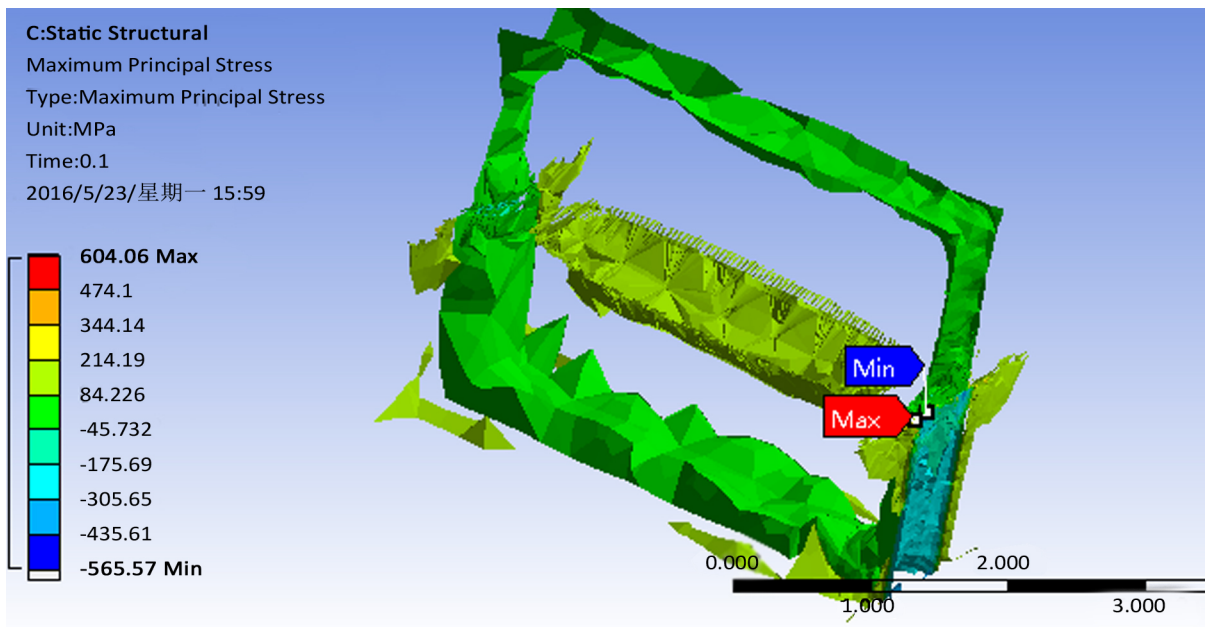
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量(wt%)	20	40	60	80
热应力(MPa)	175.61	175.69	175.78	175.87

**Table 3.** The thermodynamic data of gear structure of no gaps and 5% gaps  
**表 3.** 无间隙和 5%间隙的交齿状配合的热应力数据

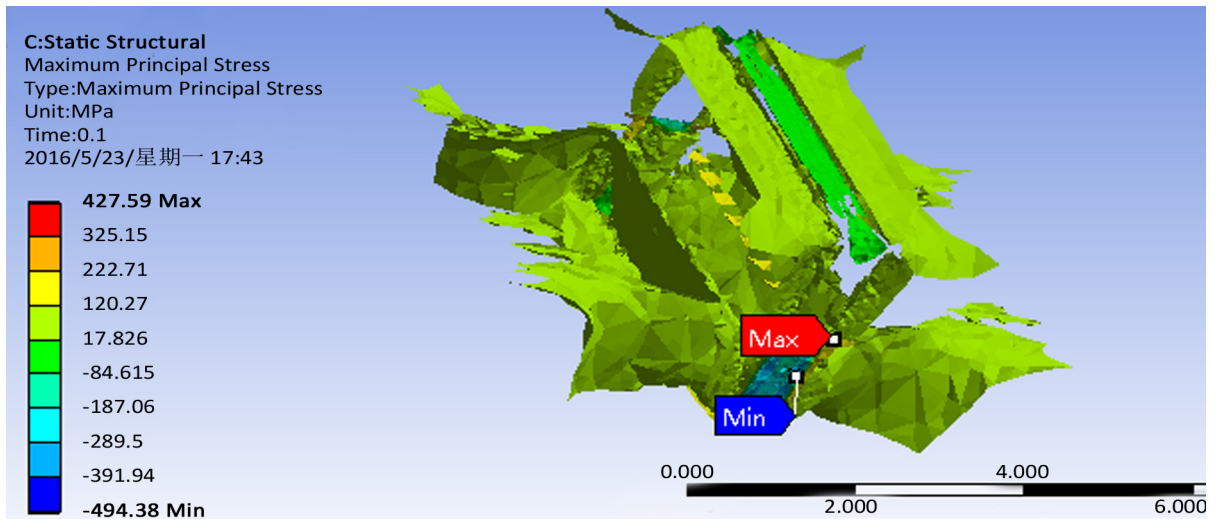
齿宽(mm)	0.02	0.025	0.05	0.1	0.2	0.5
无间隙(MPa)	604.06	595.81	541.63	476.35	427.59	276.83
5%间隙(MPa)	718.84	763.05	492.44	358.74	472.44	280.02



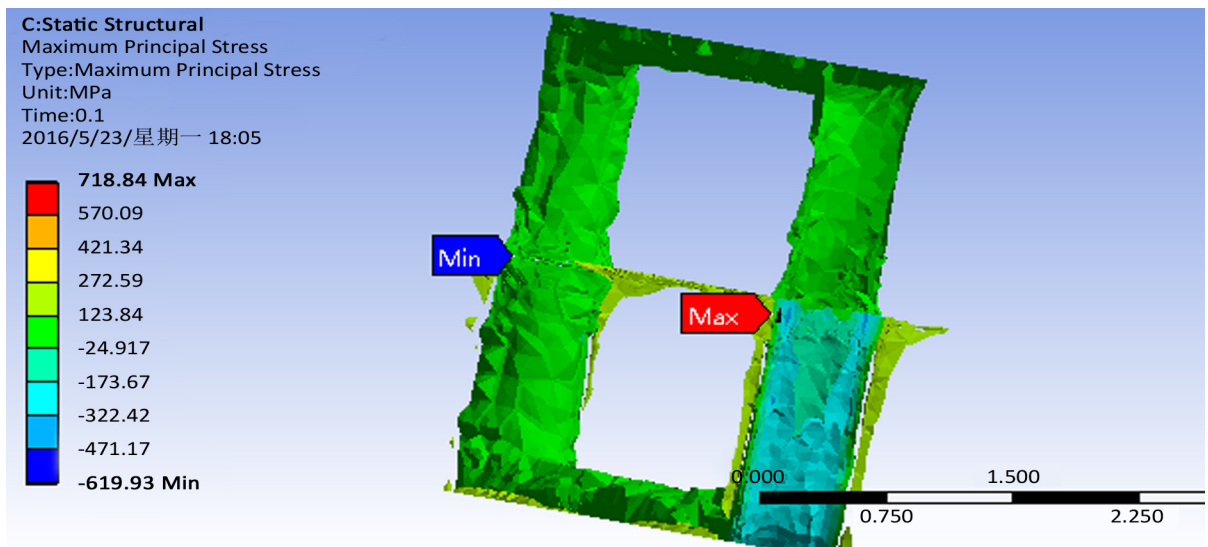
(a) 20 wt%氧化铝梯度材料热应力分布



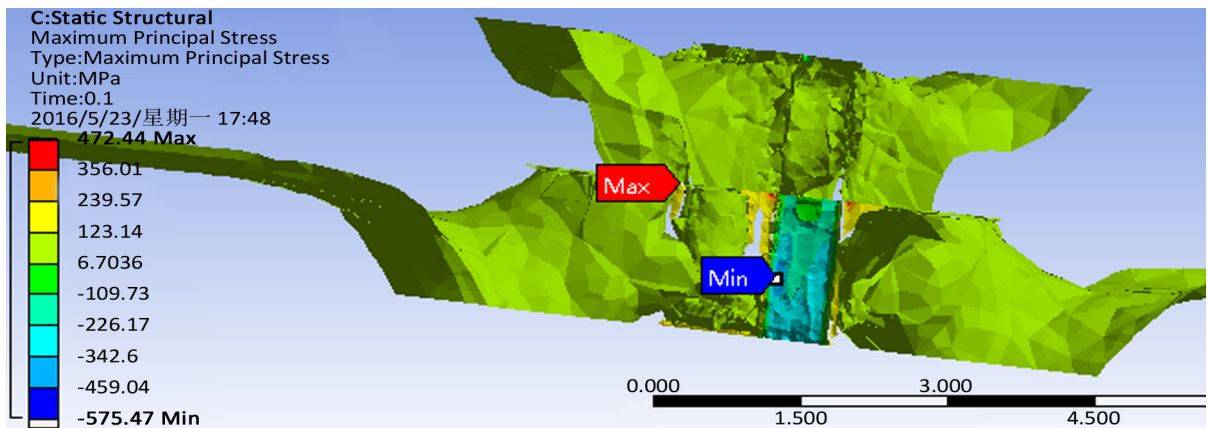
(b) 齿宽 0.02 mm 交齿配合热应力分布



(c) 齿宽 0.2 mm 交齿配合热应力分布



(d) 5%间隙齿宽 0.02 mm 的热应力分布



(e) 5%间隙齿宽 0.2 mm 的热应力分布

Figure 2. The thermal stress distribution  
图 2. 热应力分布

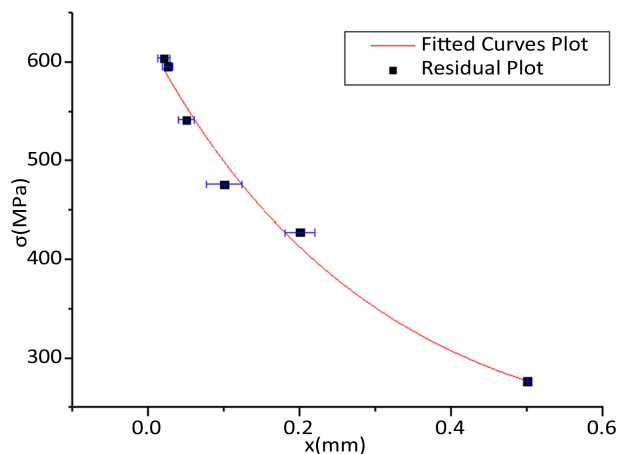


Figure 3. The fitted curve of maximum thermal stress of gear structure of no gaps

图 3. 无间隙交齿配合最大热应力拟合曲线

无间隙与 5%间隙交齿配合的最大热应力均大于梯度配合,但无间隙交齿配合的最大热应力集中于一点(图 2(b)和图 2(c)中最大应力标识),热应力分布集中在固定载荷区(图 2(b)和图 2(c)中热应力区域)。5%的间隙对最大热应力集中没有影响(图 2(d)和图 2(e)中最大应力标识),然而随着齿宽的增大,热应力向氧化锆与氧化铝交界处转变。

对无间隙的最大热应力作拟合(图 3),得出随着齿宽的增加,最大热应力均有减小的趋势,并最终趋于一极值。对比梯度配合的热应力分布可以发现,当齿宽较小时,交齿配合的最大热应力远大于梯度配合,当齿宽变大时,交齿配合的较大热应力分布范围变大,最大热应力减小,即当齿宽选择恰当时,可以既保证最大热应力不使材料被破坏,又可以确保氧化锆与氧化铝配合的绝缘性。

## 6. 结论

氧化铝与氧化锆梯度配合可以减小最大热应力,但其热应力分布在交界面会使结构开裂影响配合的绝缘性。交齿配合使热应力集中,减小结构开裂的可能性,但最大热应力大大增加,导致材料断裂。不过,选择合适的齿宽可以保证结构热应力分布不在交界处的同时减小最大热应力,使交齿结构性能优于梯度结构。

## 参考文献 (References)

- [1] 曹蕾蕾,裴建中,陈疆,等. 功能梯度材料热应力研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2014, 28(12): 46-54.
- [2] 田勃然,刘家臣,张欣欣,等.  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  陶瓷的坯体梯度连接[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(z1): 428-430.
- [3] 李云凯,林辉,韩文波. PSZ/Mo 功能梯度材料的有限元设计[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(s1): 837-840.
- [4] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 346-347.
- [5] 龚曙光,边炳传. 有限元基本原理及应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013: 177-178.
- [6] 王保林,韩杰才,杜善义. 基底/功能梯度涂层结构的动态热应力分析及结构优化[J]. 航空学报, 2000, 21(3): 286-288.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)