



# 领先的热处理工艺仿真技术及应用

青岛赛普克有限元科技发展有限公司

2024

# 01

## 热处理仿真与DANTE Solutions

## 热处理工艺行业痛点

**过度依赖试验数据和经验，耗时耗力  
耗材，试错成本高**

产品的设计与制造和加工工艺密切相关，加工工艺的优劣对于产品的质量影响至关重要。传统模式下，产品的加工工艺主要依靠“经验+试验”，存在设计和研发周期长、成本高、效率低等问题，产品的质量精度难以得到有效保证。





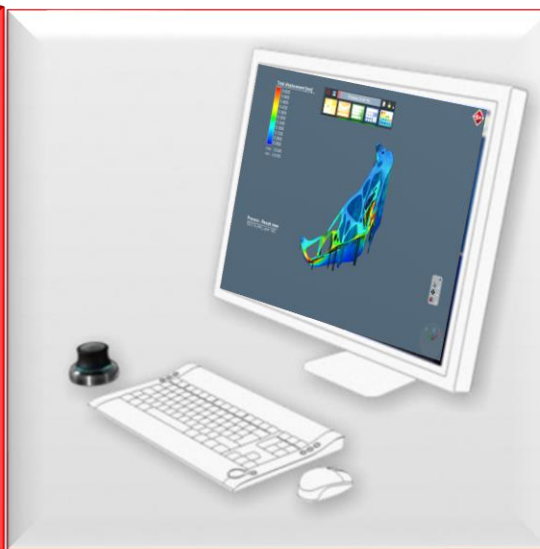
# 从不同的角度理解热处理 揭开热处理神秘面纱

在很长的时间里，热处理被认为是一个黑匣子；我们知道输入什么，也知道输出什么，但中间发生的事情完全是个谜。通过专业热处理仿真软件，您将能够从金属的角度了解热处理过程。这种独特的视角将使新的和令人兴奋的想法渗透到表面，并有机会改变热处理的方式。



# 计算机仿真技术模拟热处理工艺

将车间的物理试验  
搬进了计算机中



- 洞察工艺过程的原理
- 预测评估工艺方案的可行性
- 分析不同工艺方案的优劣
- 分析产生质量问题的原因
- 节省试验开发成本（物料成本，人工成本）
- 减少试验试错次数缩短开发周期（时间成本）

# 最先进的热处理仿真软件



## DANTE

DANTE® 是最先进的热处理仿真软件，它可以帮助热处理过程中的组件和工艺设计的改进。

DANTE 热处理仿真软件是一种基于耦合热、碳扩散及固体力学的有限元程序，主要用于钢零件的热处理仿真。工程师可以使用 DANTE 预测零件在热处理后的残余应力状态、冶金相的演变和最终体积分数、硬度和零件变形。DANTE 分析工具将多相材料本构模型与化学扩散相和马氏体相变动力学模型直接耦合。供冶金学家、工艺工程师、热处理工作人员和设计人员使用。

DANTE 的热处理模拟功能包括加热过程、渗碳、渗氮、各种淬火（浸入式淬火、气淬、喷淬、压力或固定淬火）以及回火。此外，DANTE 还可以连接到通用的前处理器和后处理器，方便操作人员使用。



## DANTE Solutions简介

Dante Solutions是一家工程咨询和软件公司，专门从事金属零部件的冶金工艺和热/应力分析。Dante Solutions公司于1982年由创始人B.Lynn Ferguson博士创立，历经三十余年研制开发，公司的热处理仿真软件——DANTE已成为目前全球唯一全面精确考虑热处理过程材料非线性的仿真软件，凭借DANTE热处理仿真软件，Dante Solutions已经发展成为首屈一指的热处理仿真模拟公司。

## DANTE Solutions创始人



B. Lynn Ferguson

### 林恩弗格森博士 创始人

B.Lynn Ferguson 博士毕业于德雷塞尔大学，研究领域时冶金与材料技术、热变形过程建模、粉末金属固结工艺、有限元分析、产品和工艺设计。他是ASMI克利夫兰分会的成员，活跃于国家ASMI委员会，技术期刊评论员，是ASMI，Alpha Sigma Mu和国际热处理和表面工程联合会（IFHTSE）的研究员。





# 全球客户

## Aerospace



## Automotive



FIAT CHRYSLER AUTOMOBILE

GENERAL MOTORS



## Steel Makers, Heat Treaters & Equipment Manufacturers



## Heavy Equipment



## Research Institutions





## 客户评价

“DANTE® 热处理模拟软件对康明斯来说是一个巨大的福音。自从我们开始使用他们的软件以来，我们已经完成了几个项目，这些项目增加了我们对热处理的理解，其中一些还为我们节省了生产成本。一个例子是启用我们获得了对遗留产品进行材料和工艺更改所需的影响力，现在至少为我们节省了25%的材料成本。DANTE Solutions的团队一直非常乐于助人，并且在任何时候都能迅速提供帮助和反馈即使问题是由模拟的其他部分而不是DANTE本身引起的，也会出现问题。随着我们扩大使用该软件的工程师名单，我期待在未来几年与DANTE团队合作。”

布莱恩·W·-康明斯



“在过去的几年里，我一直在使用Dante软件为汽车内燃机部件的各种热处理过程建模。该软件为控制感应淬火和渗碳过程的复杂物理提供了宝贵的见解。Dante也是一个有用的工具用于优化热处理配方，比物理测试快得多。此外，我可以依靠 Dante团队提供快速、有能力的帮助来解决出现的任何技术问题。我还与Dante合作过几个重要的项目软件开发项目，他们一直表现出高水平的专业性和效率。我期待在当前和未来的应用程序中继续使用Dante。”

Sheri K. - 通用汽车



# 02

## DANTE-领先的热处理仿真软件

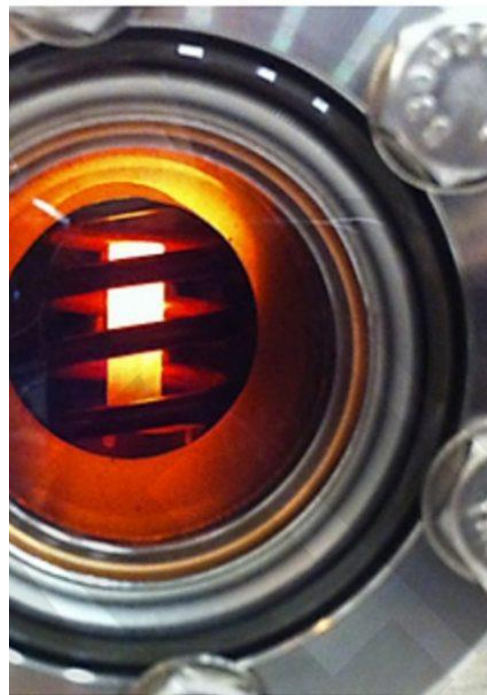


# 为什么选择DANTE— 以解决实际问题为核心价值的热处理工艺仿真模拟



## 运用DANTE能够节约生产成本、提高设计质量

- 快速、直观了解热处理工艺参数对变形、残余应力、微观组织和硬度影响
- 能够确定热处理变形和缺陷等问题的原因，优化热处理工艺
- 减少产品试验次数，提高产品试验通过率，降低产品研发成本
- 提高热处理零件质量，降低热处理零件后期的加工成本
- 辅助产品设计，在产品设计的初始阶段考虑热处理的影响

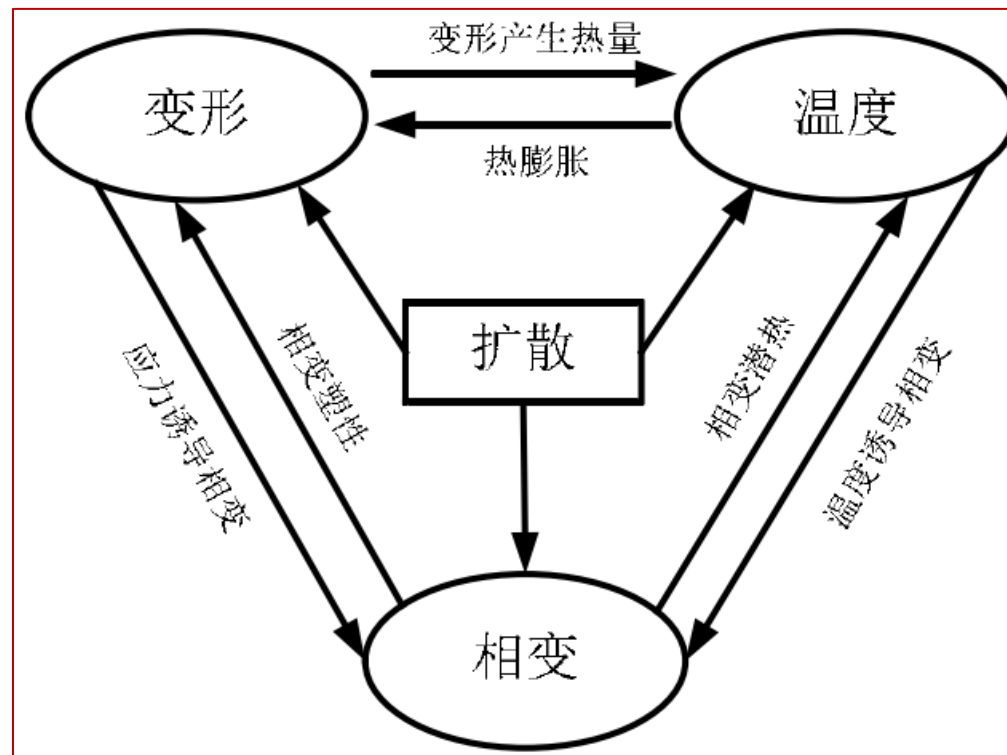




# DANTE 软件— 领先的基于热力学、相变与固体力学相互耦合的热处理工艺仿真模拟



- 金属材料热处理过程中，**温度（温度场）**、**相变（组织场）**与**变形（应力场）**三者之间紧密联系并相互影响，如图所示。温度升高降低过程中引起变形，诱导相变；变形过程中也会产生热量，导致相变潜热发生变化；组织转变过程中发生塑性变形。因此热处理过程的工艺仿真应该采用**温度-相变-变形**三者耦合的算法。
- 根据形核和长大的特点将热处理过程分为**扩散型相变**、**非扩散型相变**和**过渡型相变**。**奥氏体**与**珠光体**组织相互转变属于扩散型相变，新形成奥氏体和珠光体相形核和长大的过程依赖原子长距离扩散；**马氏体**转变过程中，形成的马氏体是通过切变和转动进行的，属于非扩散型相变；**贝氏体**转变属于介于两种类型之间的过渡型转变。



热处理过程中温度、相变与变形三者之间关系

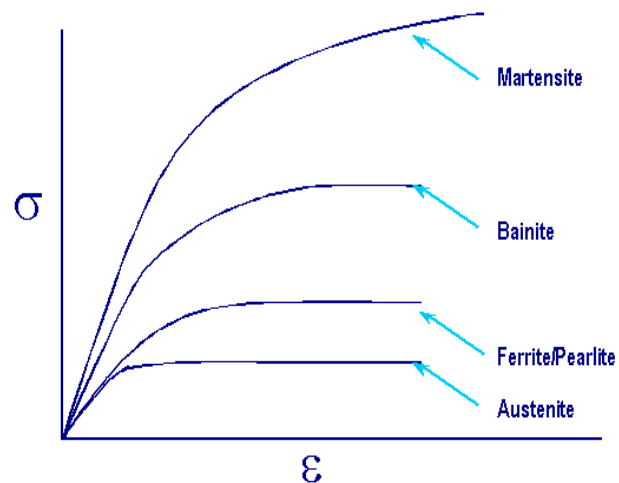
# DANTE 软件 — 模型



CEPC  
REALIZE YOUR PRODUCT DREAM

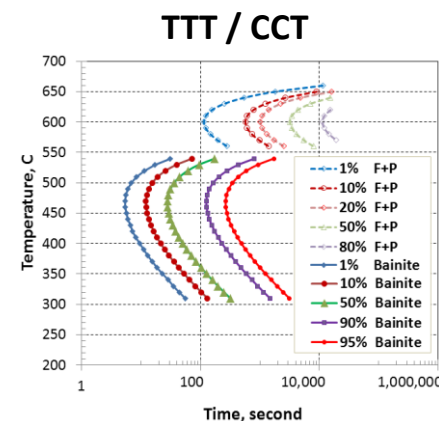
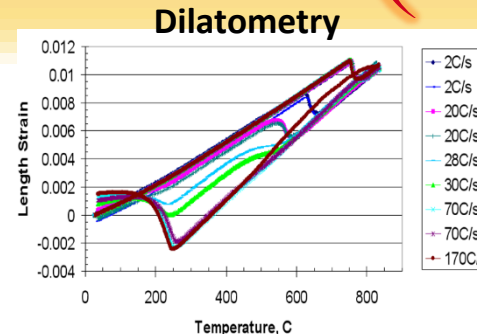


- DANTE软件中使用相变动力学模型
- 可以通过膨胀测量和TTT图确定
  - 膨胀测量数据提供扩散和马氏体转变信息
  - 膨胀测量数据提供了热膨胀系数和相变应变
  - TTT图中没有应变或马氏体转变信息



$$D_p = \left\| \left( \sigma_i - \frac{2}{3} \alpha_i \right) \right\| - \frac{2}{3} \left[ Y + K + V^* \cdot \ln \left( \frac{\| \dot{\epsilon} \| + \sqrt{\| \dot{\epsilon} \|^2 + f^2}}{f} \right) \right]$$

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_f &= v_f \Phi_f^{\alpha_f} (1 - \Phi_f)^{\beta_f - 1} \Phi_a (\Phi_{f, \text{equil}} - \Phi_f) \\ \dot{\Phi}_p &= v_p \Phi_p^{\alpha_p} (1 - \Phi_p)^{\beta_p - 1} \Phi_a \\ \dot{\Phi}_b &= v_b \Phi_b^{\alpha_b} (1 - \Phi_b)^{\beta_b - 1} \Phi_a (\Phi_{b, \text{stasis}} - \Phi_b) \\ \dot{\Phi}_m &= - \left[ \frac{d\theta}{dt} + c \frac{dP}{dt} \right] v_m \Phi_m^{\alpha_m} (1 - \Phi_m)^{\beta_m - 1} \Phi_a \end{aligned}$$

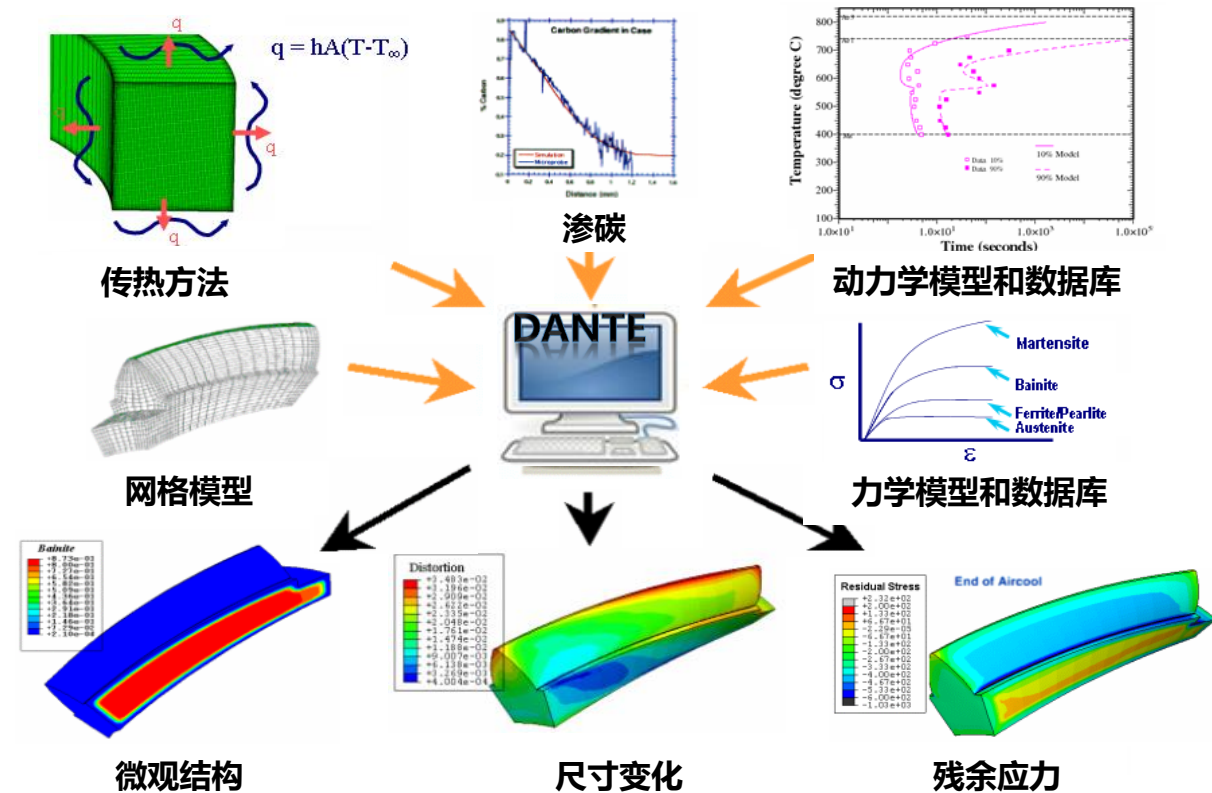


- 内部状态变量模型用于DANTE中的力学模型
- 属性是相、碳含量、温度、应变和应变速率的函数
- 也包括混合定律
- 捕捉淬火硬化过程中的硬化和恢复

# DANTE 软件— 全面深刻的热处理工艺仿真模拟



- 渗碳过程模拟
- 渗氮过程模拟
- 碳氮共渗过程模拟
- 氮碳共渗过程模拟
- 淬火、退火、回火等热处理过程模拟
- 液体浸入淬火、气体淬火、感应淬火、压力淬火模拟
- 组织扩散、相变和力学特性模拟
- 温度分布、组织的体积分数计算
- 硬度、变形量和残余应力计算





# DANTE 软件— 热处理工艺仿真功能



## 表面硬化

- 低压渗碳
- 感应淬火
- 火焰淬火
- 激光淬火
- 气体渗碳
- 气体渗氮
- 等等。

## 淬火硬化

- 在油、水或聚合物中浸没淬火
- 高压气淬
- 压力/模压淬火
- 强化淬火
- 喷雾淬火
- 空气冷却
- 等等。

## 其他过程

- 深冷或低温处理
- 高温回火和二次硬化
- 低温回火
- 析出硬化
- 马氏体回火
- 奥氏体回火
- 正火
- 退火
- 等等。



# DANTE 软件—初始材料条件

- 考虑初始微观结构，实现最准确的变形和应力预测
- 考虑晶粒尺寸和合金含量，以获得最准确的相变预测

| Details of "Material"                   |                            |
|-----------------------------------------|----------------------------|
| Geometry                                |                            |
| Scoping Method                          | Geometry Selection         |
| Geometry                                | 1 Body                     |
| Definition                              |                            |
| Material Name                           | S41XX                      |
| Density                                 | 7.8E-06 kg/mm <sup>3</sup> |
| Type                                    | Thermal                    |
| Carbon and Carbon in Carbide (Wt. frac) | 0.002                      |
| Iron Carbide (Wt. frac)                 | 0                          |
| Iron Carbide Size (nm)                  | 1                          |
| Alloy Carbide (Wt. frac)                | 0                          |
| Alloy Carbide Size (nm)                 | 1                          |
| Nitrogen (Wt. frac)                     | 0                          |
| Nitride A (Wt. frac)                    | 0                          |
| Nitride B (Wt. frac)                    | 0                          |
| Mat. Initial Phase                      | Tabular Data               |
| Chemical Composition                    | Tabular Data               |

| Mat. Initial Phase     |                       |
|------------------------|-----------------------|
| Initial Microstructure | Phase Weight Fraction |
| Ferrite                | 0.3                   |
| Pearlite               | 0.7                   |
| Upper Bainite          | 0                     |
| Lower Bainite          | 0                     |
| Martensite             | 0                     |
| Tempered Martensite    | 0                     |

| Chemical Composition |                            |        |
|----------------------|----------------------------|--------|
| Alloying Element     | Nominal Composition (WT %) | WT %   |
| Grain Size           | 0.0635                     | 0.0635 |
| Mn                   | 0.85                       | 0.85   |
| Si                   | 0.23                       | 0.23   |
| Ni                   | 0.05                       | 0.05   |
| Cr                   | 0.9                        | 0.9    |
| Mo                   | 0.2                        | 0.2    |
| Al                   | 0.0                        | 0      |
| Ti                   | 0.0                        | 0      |
| B                    | 0.0                        | 0      |

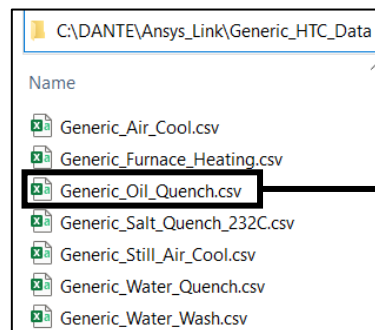
Ansys中的DANTE插件

使重量百分比略有不同。

# DANTE 软件 - 定义设备行为

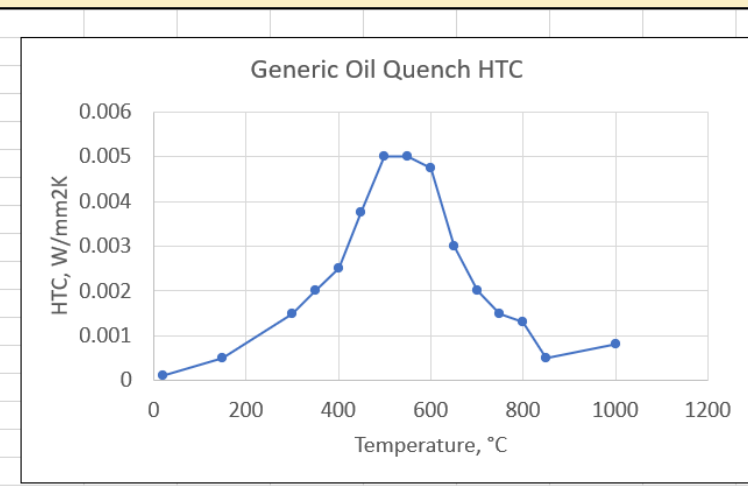


- DANTE附带通用数据来定义设备行为
- 数据可直接加载到DANTE软件中
- 可以定义来自生产设备的数据
  - 软件工具可根据时间-温度数据确定 HTC 数据（对流换热系数）
  - DANTE工程师拥有数十年的热处理设备特性设计经验

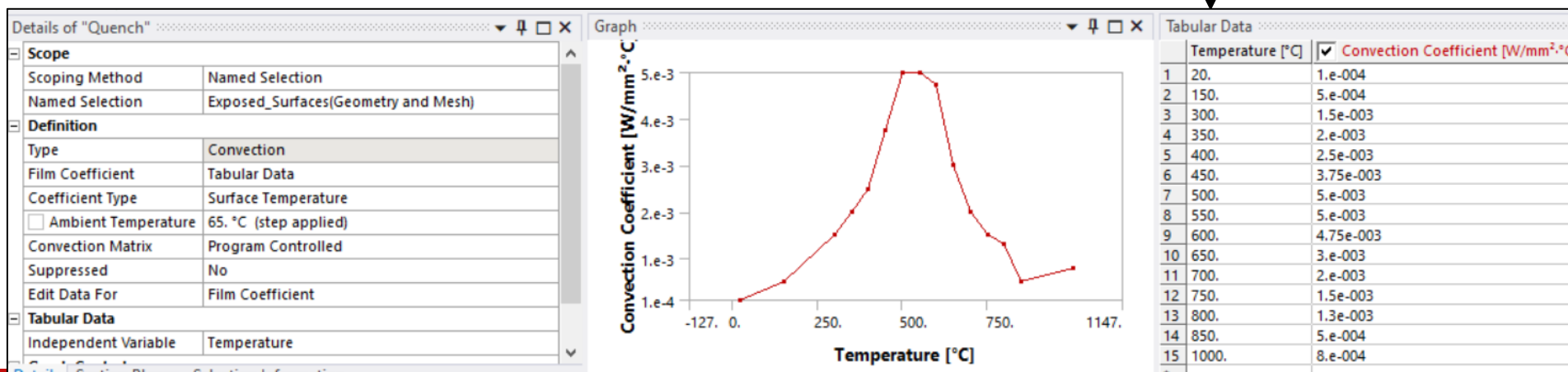


DANTE 过程数据库

| blf's trial oil data |              |
|----------------------|--------------|
| Temperature, C       | HTC, W/mm^2K |
| 20                   | 0.0001       |
| 150                  | 0.0005       |
| 300                  | 0.0015       |
| 350                  | 0.002        |
| 400                  | 0.0025       |
| 450                  | 0.00375      |
| 500                  | 0.005        |
| 550                  | 0.005        |
| 600                  | 0.00475      |
| 650                  | 0.003        |
| 700                  | 0.002        |
| 750                  | 0.0015       |
| 800                  | 0.0013       |
| 850                  | 0.0005       |
| 1000                 | 0.0008       |



DANTE数据在EXCEL中的显示



Ansys Mechanical 中的DANTE数据

# DANTE 软件 —用于热处理模拟的设备特性

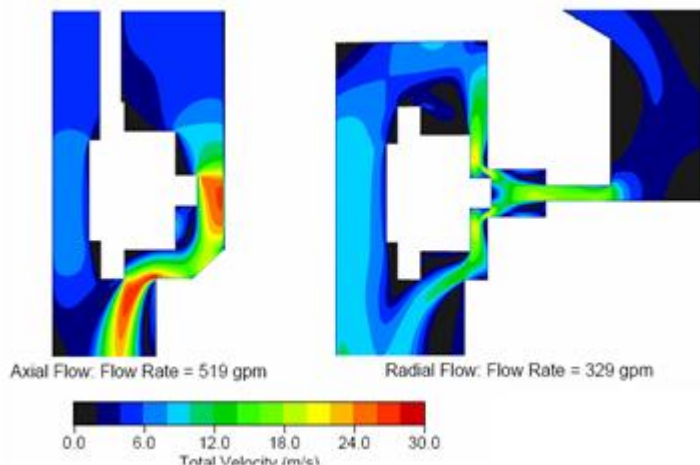


## ➤ 使用的典型方法:

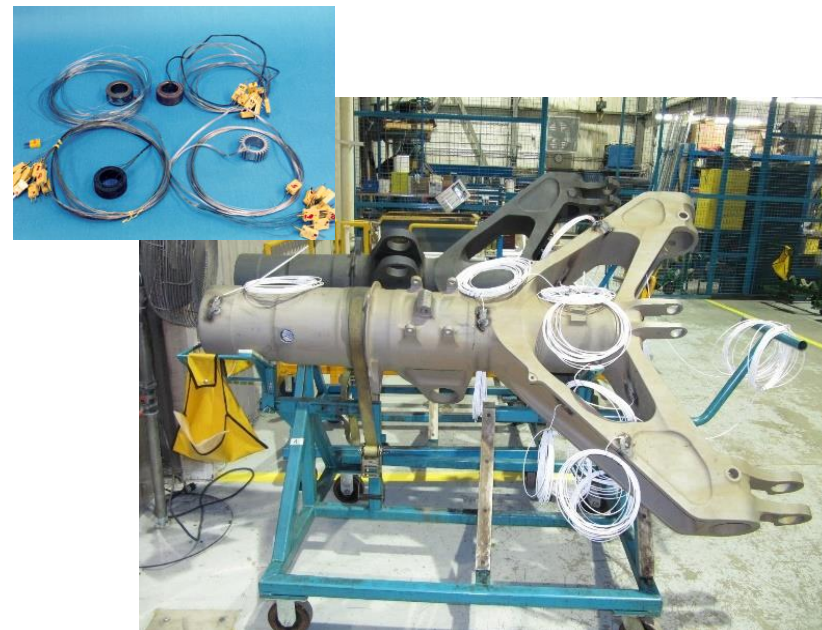
- 淬火探头
- 实际部件
- 计算流体动力学 (CFD)



不锈钢淬火探头



模拟高速水淬过程中的流体流动



轴承圈(左上)和起落架装有热电偶



# DANTE 软件— 独有的丰富材料数据库资源 保证热处理工艺仿真模拟的准确性



- 庞大的材料数据库资源，DANTE标准材料数据库中包含了常用碳钢、低合金钢、高合金钢等常用钢材热性能和机械性能等相关参数。
- 准确的材料性能参数，DANTE所有的材料性能参数都是通过试验获得，能够保证计算结果的准确性。

丰富的钢铁材料数据库，并直接将一个多相本构模型与扩散和马氏体相变动力学模型相结合，可用于渗碳/渗氮、淬火（压力淬火、感应淬火）、回火等生产过程中常用热处理工艺的仿真分析，克服了一般软件材料库和相变模型的局限



# DANTE 软件 –材料数据库



- DANTE 配有50种以上的标准合金钢系列材料
  - 数据经过工业应用的验证
  - 不断的更新材料种类
- 可以定制非标准材料数据
  - 软件工具可用来确定从膨胀测量或TTT数据的相变数据
  - 软件工具可用于确定拉力/压缩测试的机械数据



## 钢



## 铝

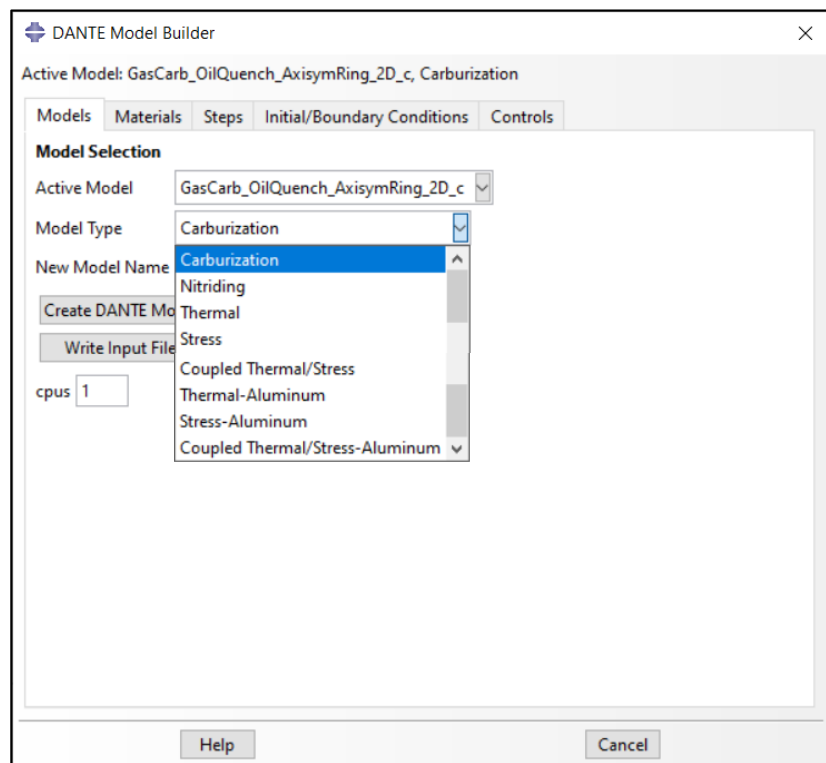


常用钢铁材料的热处理数据，如比热容、热传导率、热膨胀系数、相变潜热、杨氏模量、泊松比、TTT曲线、CCT曲线等，软件材料库自带或可采用软件自身子程序计算得到

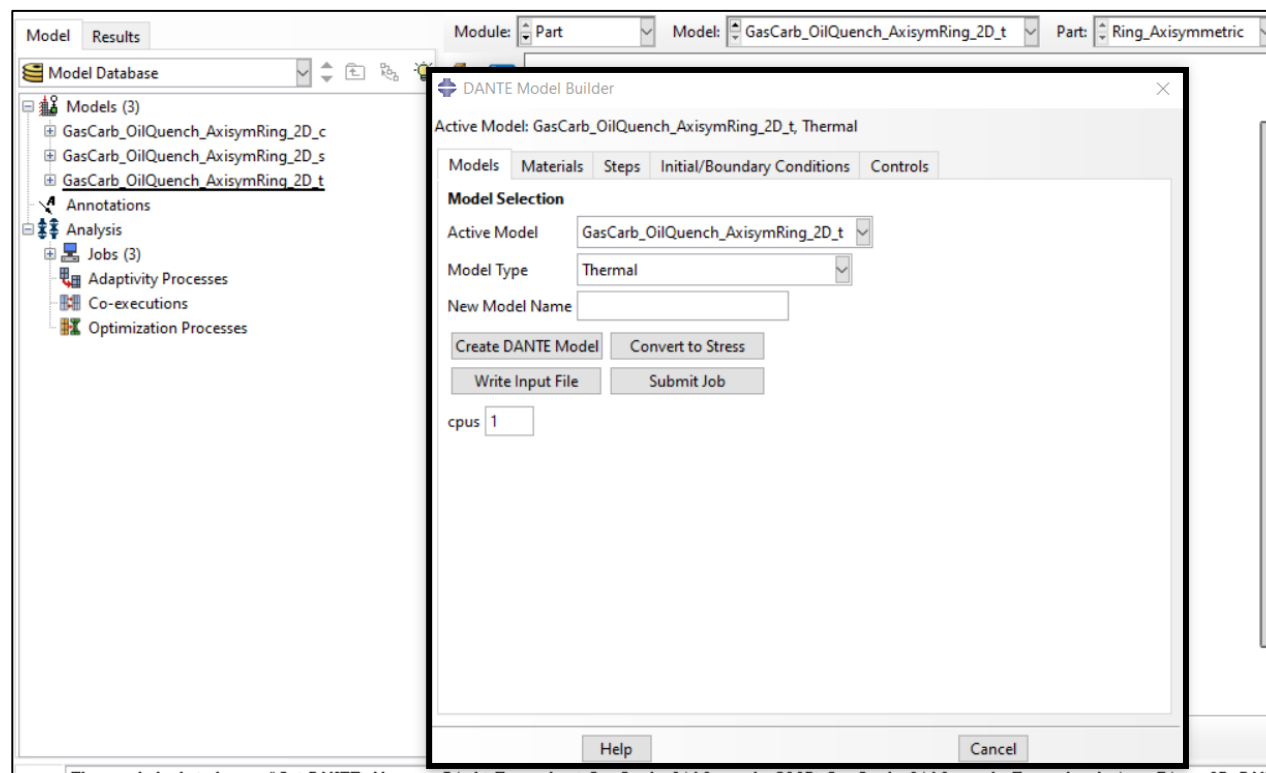
# DANTE 软件 -用户友好界面 为ABAQUS软件开发



- 方便设置热处理模型和查看结果
- 每种类型的DANTE模块都使用一套独特的输入方式，以简化模型构建过程。



DANTE模块的类型



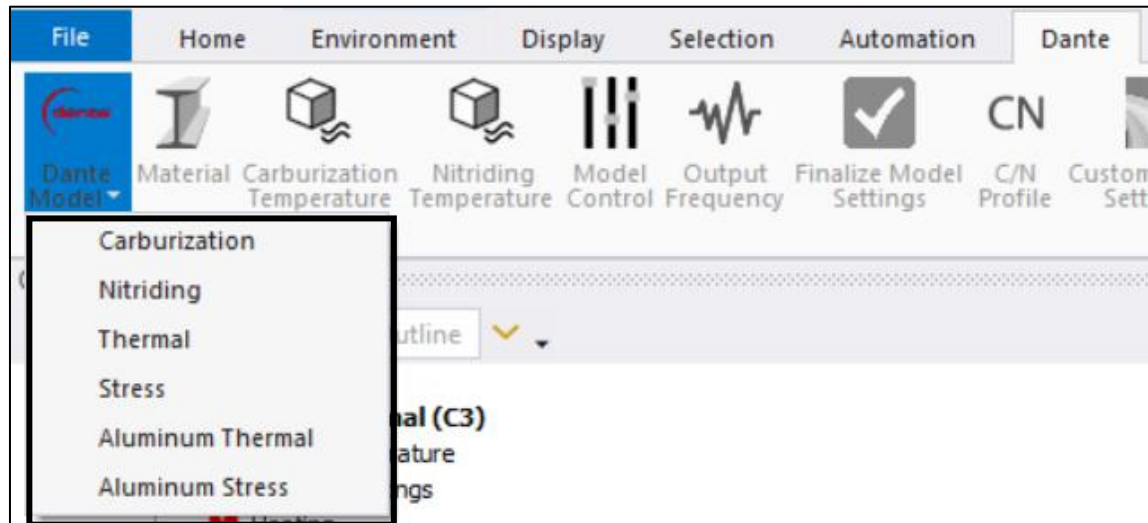
在ABAQUS软件中的DANTE插件

# DANTE 软件 –用户友好界面

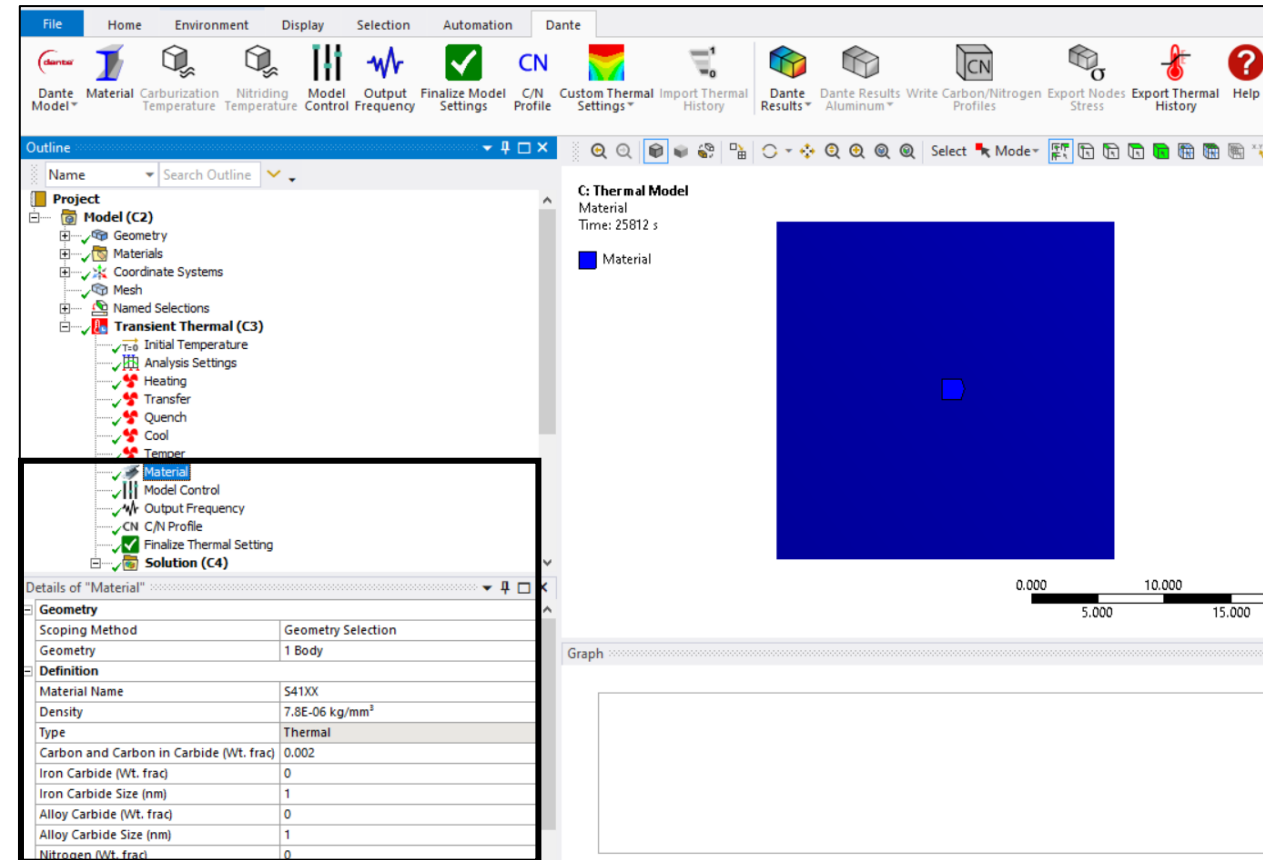
## 为ANSYS Workbench软件开发



- 方便设置热处理模型和查看结果
- 每种类型的DANTE模块都使用一套独特的输入方式，以简化模型构建过程。



DANTE模块的类型



ANSYS中的DANTE插件

# DANTE 软件—强大的子程序工具软件

## 帮助创建自己的核心材料数据库



### 为什么选择DANTE

- 用户可自定义材料数据库，DANTE材料数据库开发工具可以基于用户的试验数据，进行数据拟合，帮助用户创建自己的材料数据库
- DANTE软件可以继承前期工艺过程（锻造、焊接等）的仿真计算结果
- DANTE软件的计算结果可作为强度计算的预载荷与通用有限元软件无障碍传递



分别协助气体渗碳、气体渗氮、真空渗碳的工艺预测和工艺设计



将实验测得的力学性能数据、相转变数据、TTT曲线拟合成DANTE模型参数



针对不同的合金钢和碳钢生成等温转变曲线、连续冷却转变曲线、连续加热转变曲线

确定依据温度或时间的热交换系数



使用时间/温度或速率/时间数据来预测金相的体积分数、转变应变和最终的硬度

淬透性预测工具，生成淬透性曲线和理想临界淬透直径，该直径经常用于材料淬透性的快速测量





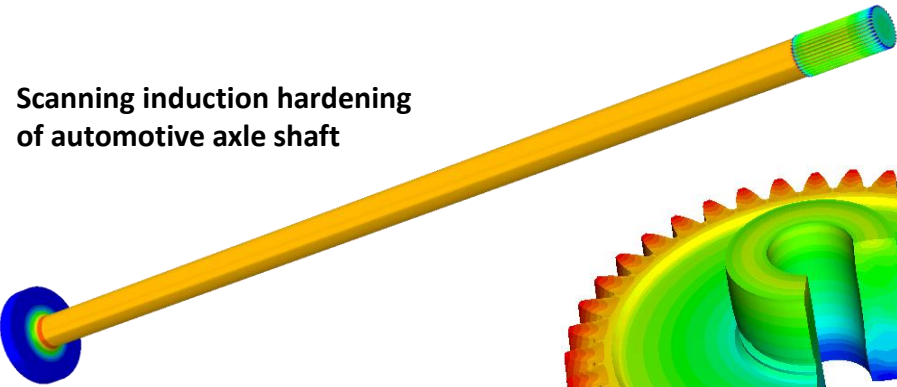
# 03

## 热处理工艺仿真应用

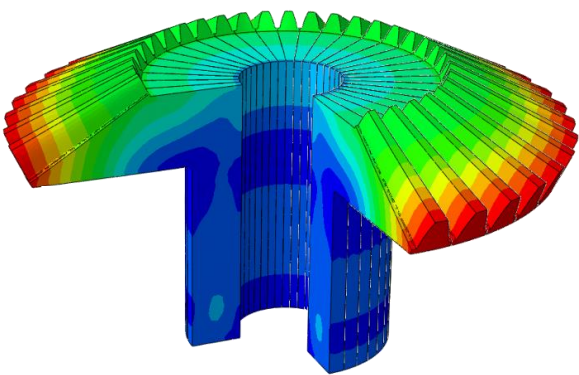
# 商业案例



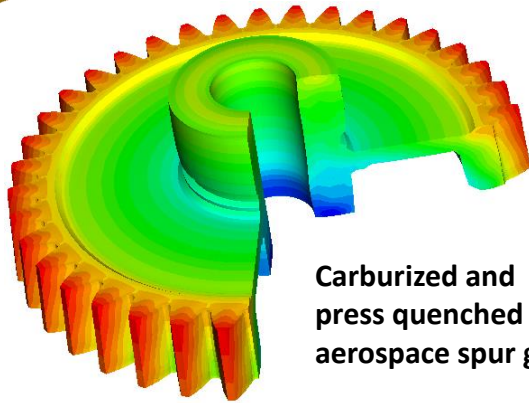
Scanning induction hardening  
of automotive axle shaft



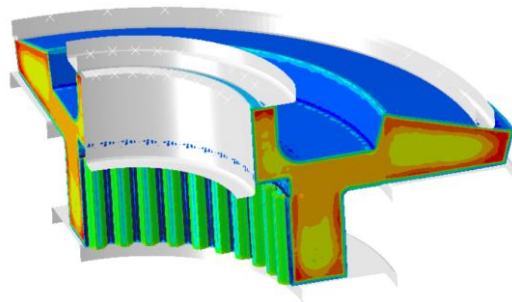
HPGQ of aerospace bevel gear



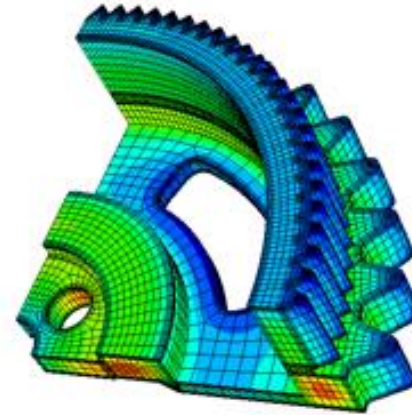
Carburized and  
press quenched  
aerospace spur gear



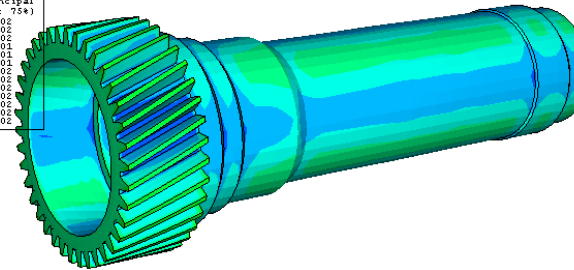
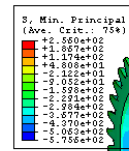
Bevel gear press quench



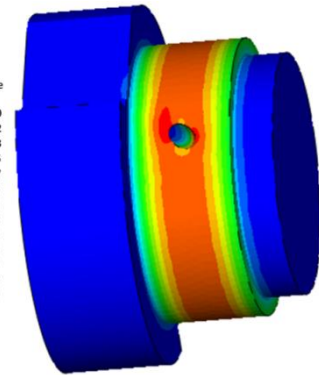
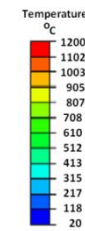
Complex powder-met  
heat treated gear



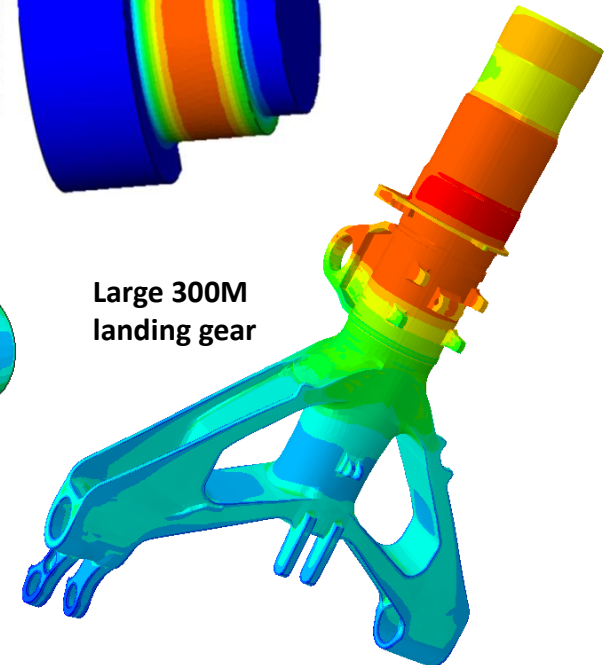
Oil quenched geared shaft



Induction hardened automotive crankshaft  
with angled lubrication thru-hole

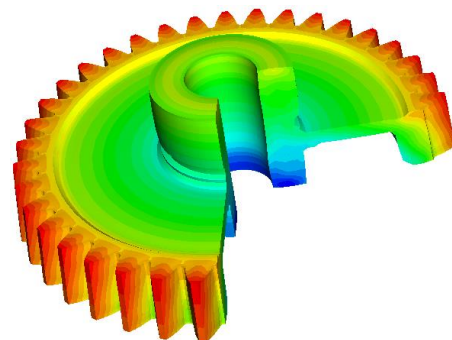


Large 300M  
landing gear

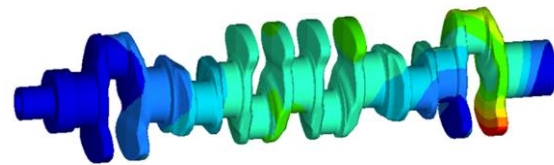


## 热处理工艺仿真典型应用项目

- 大型飞机起落架的热处理形变
- 滚子轴承座圈压力淬火
- 齿轮渗碳过程仿真
- 泵缸体氮碳共渗热处理工艺优化
- 传动轴和齿轮的热处理形变
- 解决大型商用车曲轴跳动超差问题
- 风电齿圈感应淬火工艺正向设计
- 航空齿轮气体淬火变形

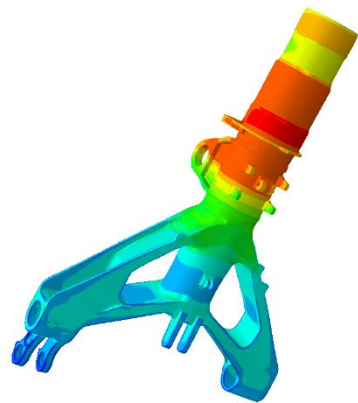


航空齿轮渗碳和压力淬火

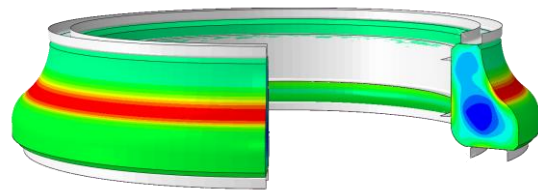


商用车曲轴感应淬火

大型飞机起落架淬火变形分析



轴承座圈压力淬火



# 齿轮渗碳工艺过程仿真





渗碳工件的材料一般为低碳钢或低碳合金钢（含碳量小于0.25%）。渗碳后，钢件表面的化学成分可接近高碳钢。工件渗碳后还要经过淬火，以得到高的表面硬度、高的耐磨性和疲劳强度，并保持心部有低碳钢淬火后的强韧性，使工件能承受冲击载荷。



齿轮渗碳过程常见缺陷包括：

1. 齿轮表层过度渗碳；
2. 淬火后表面硬度偏低；
3. 齿轮芯部硬度不足；
4. 齿轮硬化层偏浅；
5. 渗碳层深度不均匀。

通过DANTE软件进行齿轮渗碳热处理过程仿真，可快速验证渗碳热处理工艺参数合理性，预测渗碳后碳含量、渗层深度及齿轮表面硬度是否满足要求，同时可以得到渗碳后残余应力和变形结果。

**齿轮材料:** 20CrNiMo, 对应于美标8620

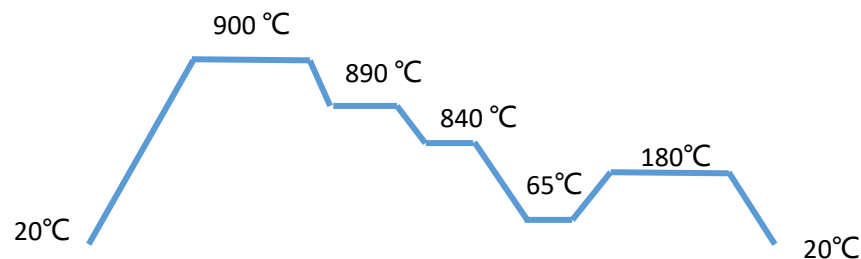
**材料性能:** 常用齿轮钢, 淬透性好, 焊接性好, 无回火脆性, 冷裂倾向小, 切削性及应变塑性良好。

| 20CrNiMo (8620) 材料化学成分 |             |             |             |             |             |        |        |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
| C                      | Si          | Cr          | Mn          | Mo          | Ni          | S      | P      |
| 0.18 ~ 0.23            | 0.15 ~ 0.35 | 0.40 ~ 0.60 | 0.70 ~ 0.90 | 0.15 ~ 0.25 | 0.40 ~ 0.70 | ≤0.040 | ≤0.035 |

**硬化层深度:** 0.8mm~1.2mm

**渗碳工艺参数:** 强渗温度900℃, 渗碳时间2h, 碳势1.05%; 扩散温度890℃, 时间100min, 碳势0.9%; 降温至 840℃ (淬火温度), 保温2h, 碳势0.8%。

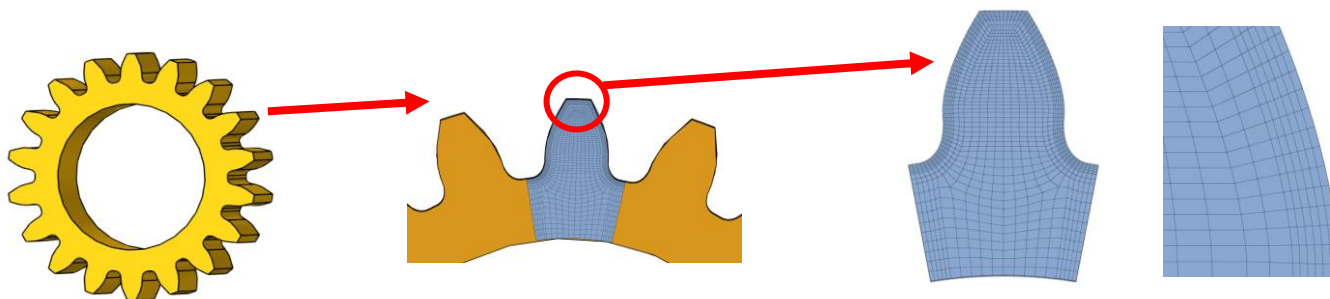
**渗碳淬火曲线:**



**表面硬度达到:** 58~63HRC

**心部硬度达到:** 32~45HRC

含碳量在0.35%以上为有效渗层, 通常表面残余奥氏体小于20%, 心部铁素体小于10%。



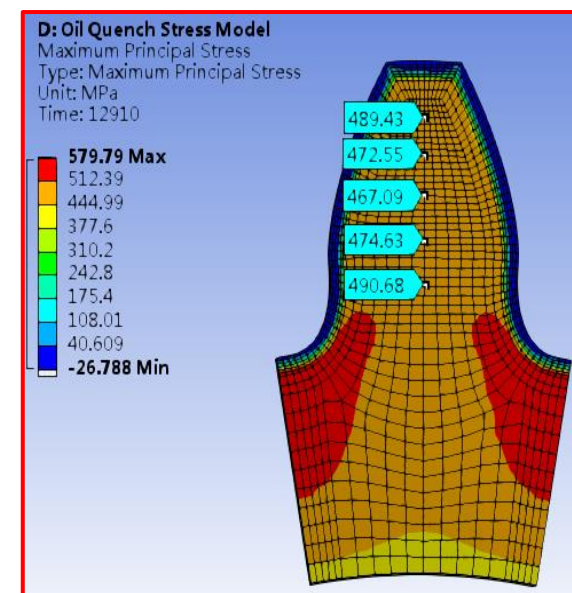
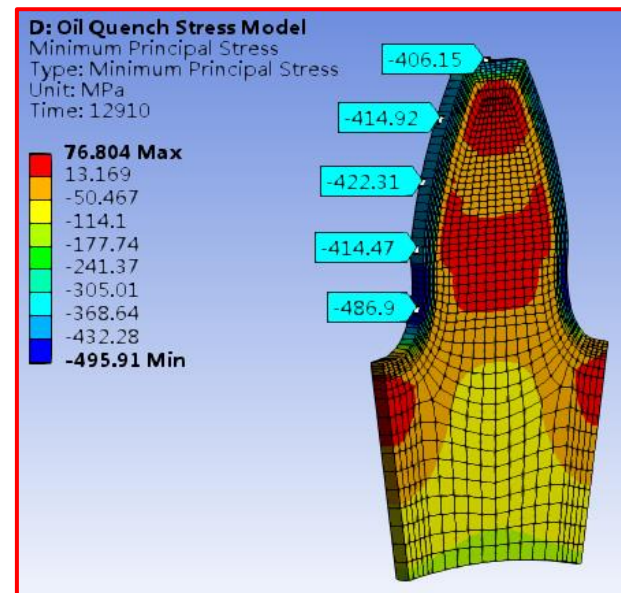
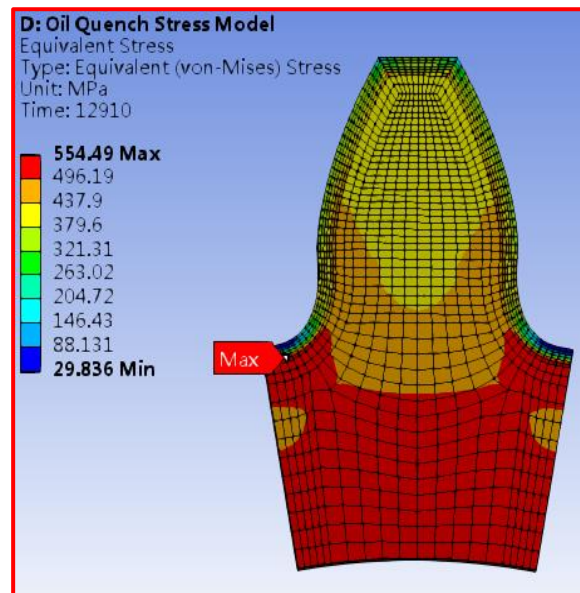
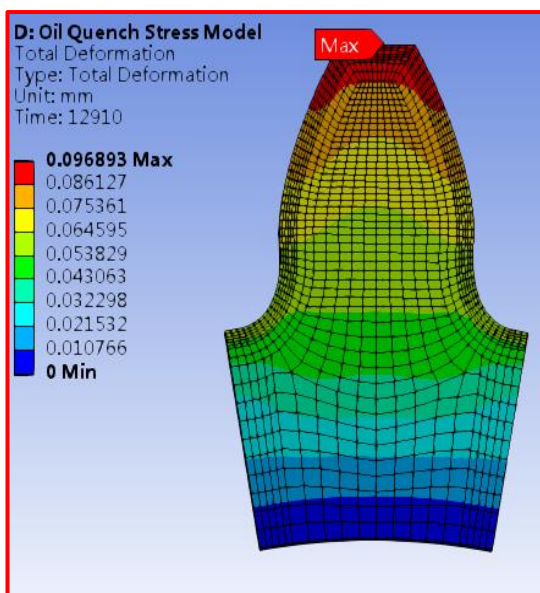
渗碳层网格细化, 网格尺寸0.2mm

➤ 整体变形结果

➤ 整体应力结果

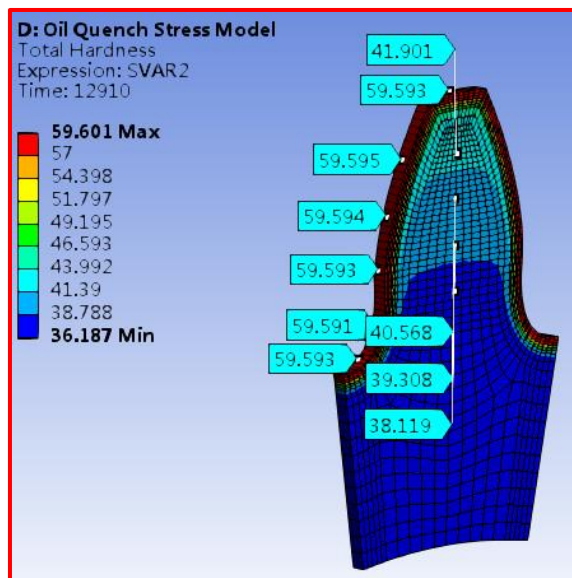
➤ 表面压应力

➤ 心部拉应力

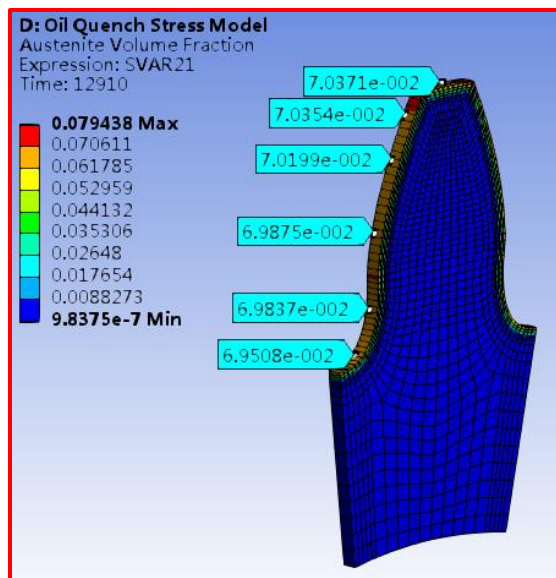




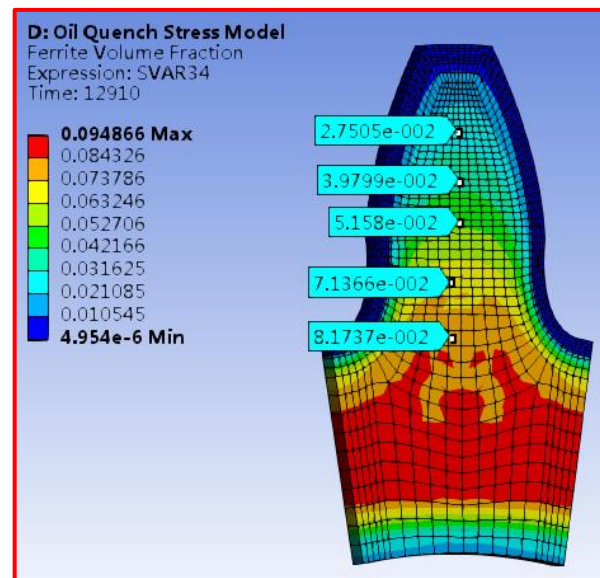
## ➤ 硬度



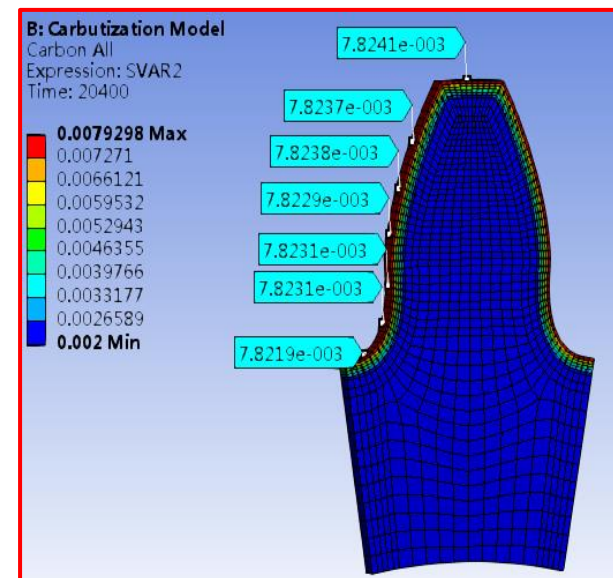
## ➤ 残余奥氏体



## ➤ 心部铁素体



## ➤ 表面碳含量



# 泵缸体氮碳共渗热处理工艺优化





### 1. 问题提出:

泵的缸体通常采用氮碳共渗的热处理工艺来提高工件表面的硬度、韧性、耐磨性和疲劳强度。但经常会出现渗层厚度不够以及分布不均匀的问题，目前企业一般的解决方法是根据经验对工艺参数进行调整，试制样件，这样势必会造成周期长花费高的问题，大大增加企业的成本。

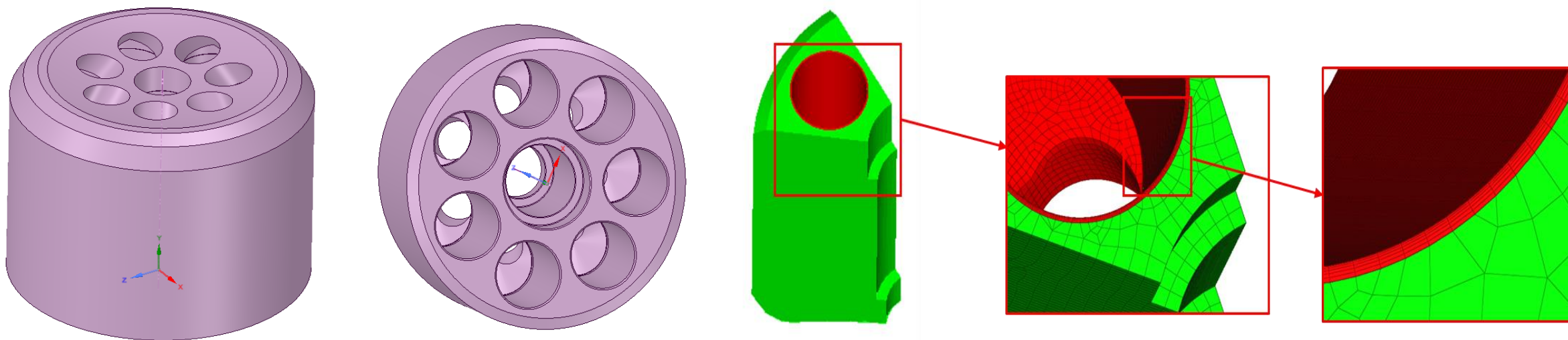
### 2. 解决方案:

采用DANTE专业热处理仿真分析软件，对氮碳共渗热处理工艺进行仿真分析，可以得到工件表面渗层的厚度及分布情况，快速修改工艺参数，验证新工艺参数的效果，直观看到工艺完成后碳含量及氮含量分布。

### 3. 客户价值:

采用科学的热处理仿真计算工具取代传统的经验设计方法，可以使产品获得更好的渗层分布，提高产品质量，提升企业信誉度。

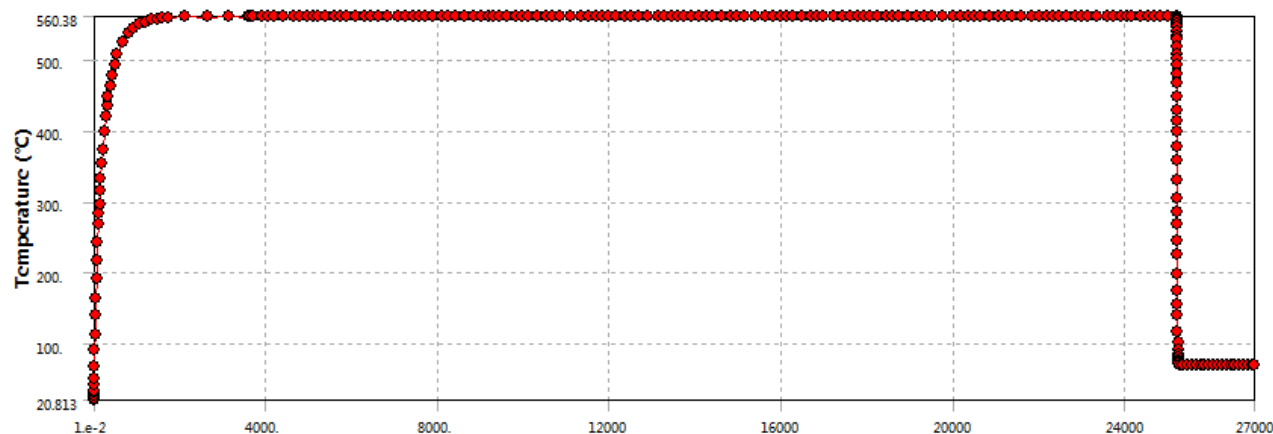
分析对象为泵的缸体，为回转体结构，计算模型采用具有代表性的一个扇面模型进行计算分析，角度约为51度，采用实体单元进行网格划分，对于重点关注的圆孔位置网格进行细化，细化为5层单元。



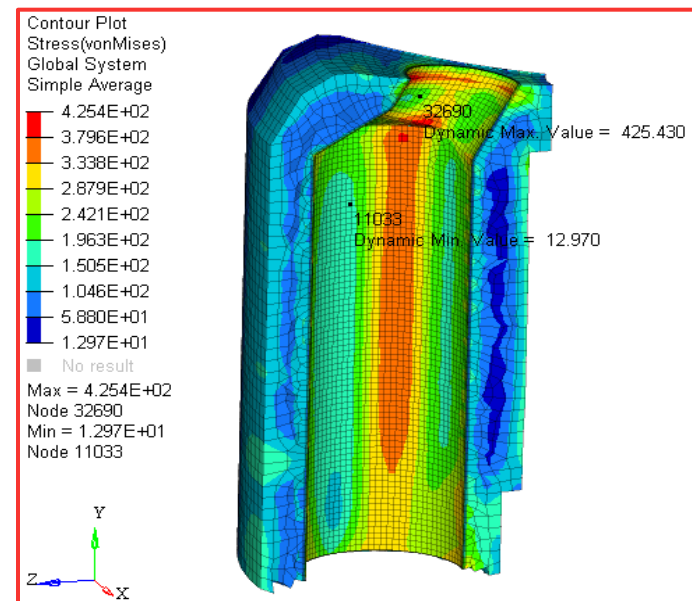
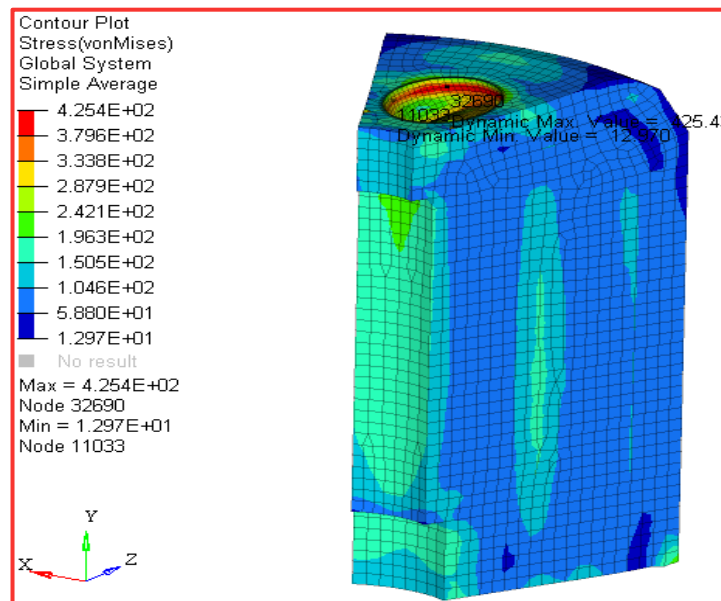
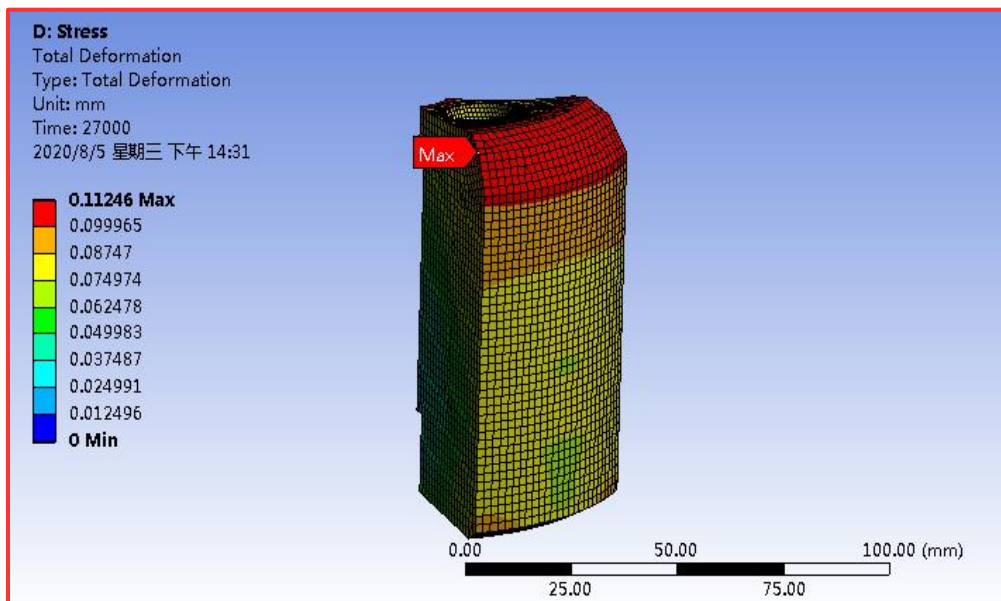
- 缸体氮碳共渗过程6小时，温度为560℃，冷却方式为淬火油快冷至70℃，冷却时间为30分钟。
- 缸体材料为45#钢，对应DANTE软件材料库中的软件为S1045。

涉及到的关键参数包括：

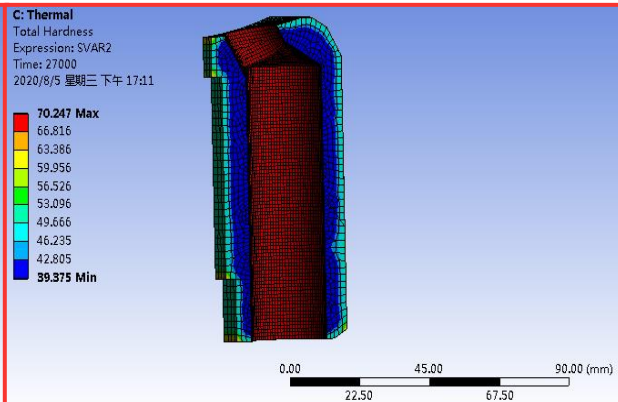
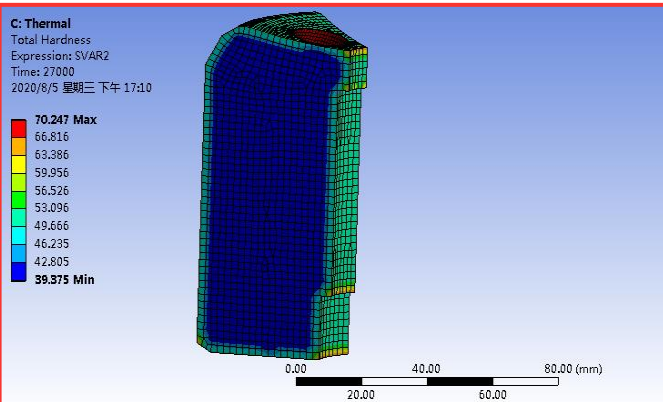
1. 缸体表面对流换热系数；
2. 渗氮后工件表面的氮势；
3. 渗碳后工件表面的碳势。



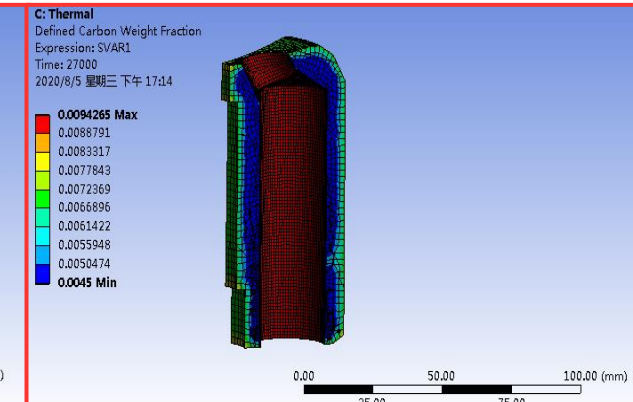
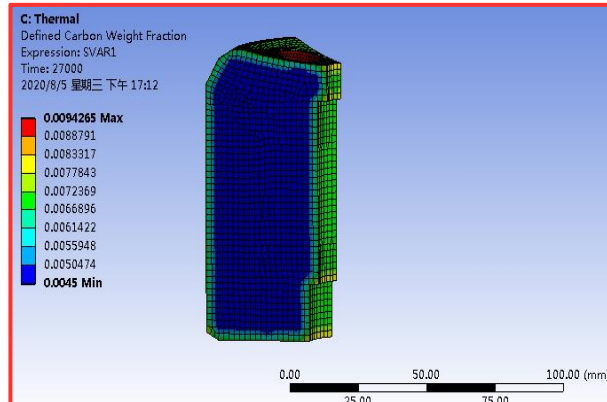
- 经过氮碳共渗过程后，模型最大变形量发生在缸体外侧，最大值为0.11mm。
- 缸体模型氮碳共渗完成后的残余应力最大值为425.4MPa，在圆孔位置。



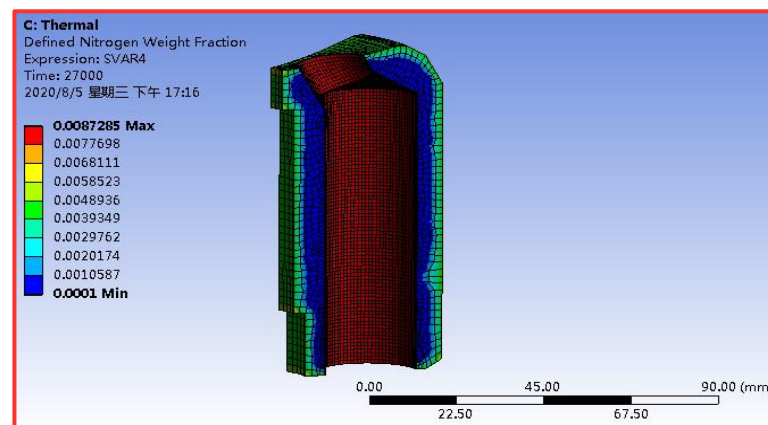
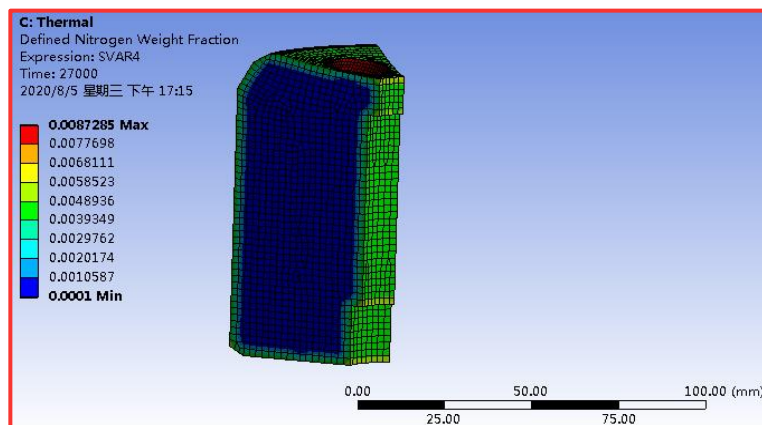
## ● 硬度层分布情况



## ● 碳含量分布情况



## ● 氮含量分布情况





# 商用车曲轴感应淬火仿真



## 项目背景

汽车发动机曲轴在热处理时常会出现变形，随着曲轴长度的增加，淬火后曲轴的变形越来越难控制，主轴轴颈和连杆轴颈经常会出现跳动超差。跳动超差常采用常温压力校直和热压力校直的方法来减小跳动量，达到产品合格的目的。这样虽然可以减小跳动量，但同时也会对曲轴的结构强度和使用寿命产生影响。

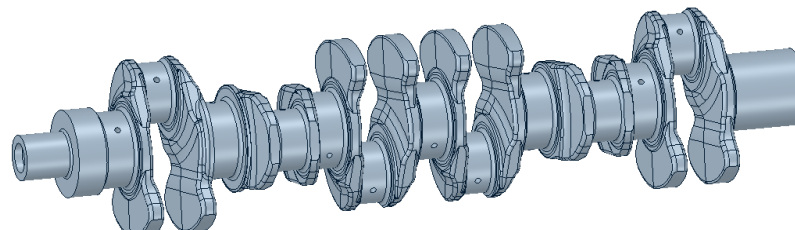
采用DANTE专业热处理仿真分析软件，对曲轴感应淬火工艺过程进行仿真分析，通过对感应淬火温度场的计算分析，可以得到感应淬火过程中的温度分布情况，奥氏体转变过程，淬火后的马氏体体积分数、硬化层厚度等结果。

通过感应淬火过程应力场的计算分析，可以得到淬火后曲轴残余应力分布情况和变形量。对曲轴淬火后的跳动尺寸进行预测，改进工艺参数，提高产品质量。

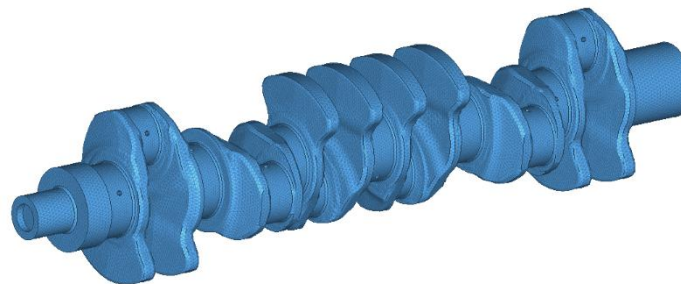


### 分析对象

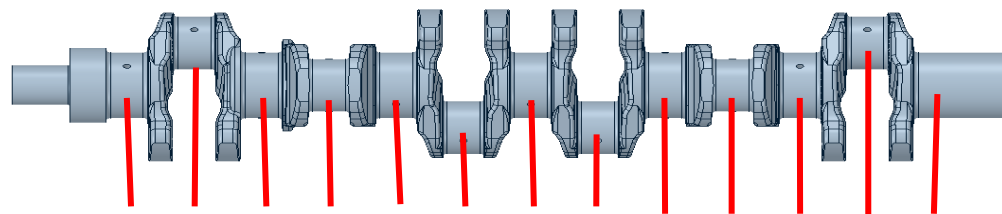
- 曲轴三维模型



- 曲轴有限元模型，网格数量68万



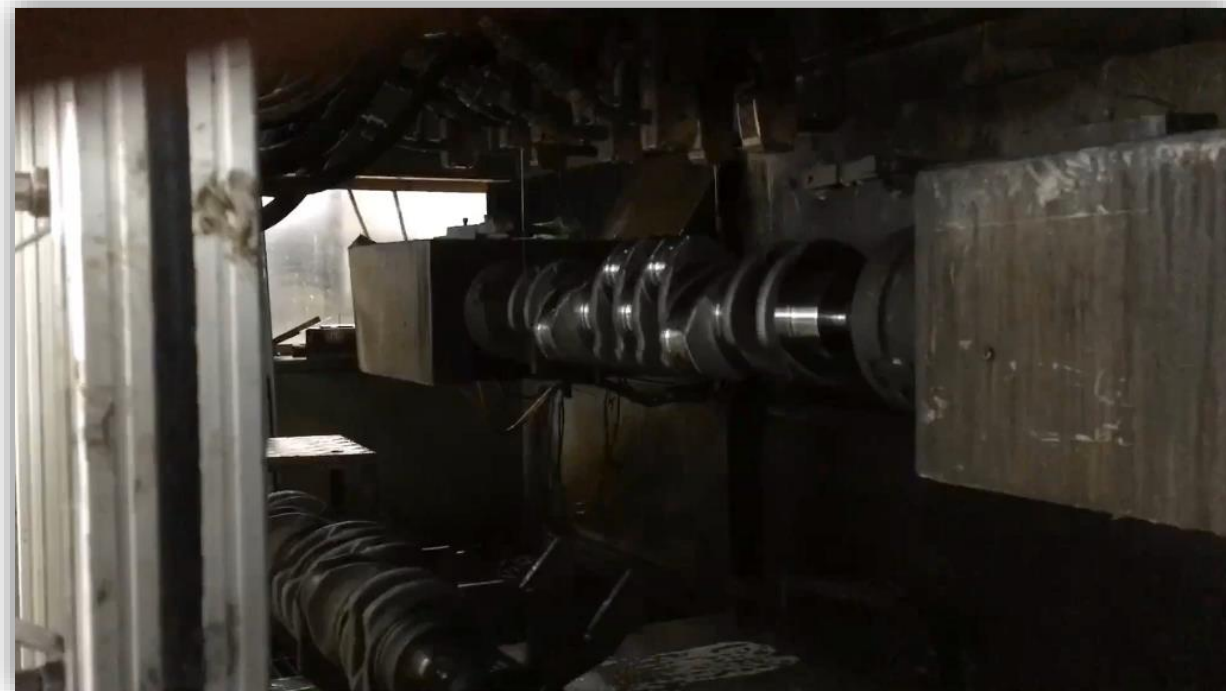
- 曲轴各部位名称



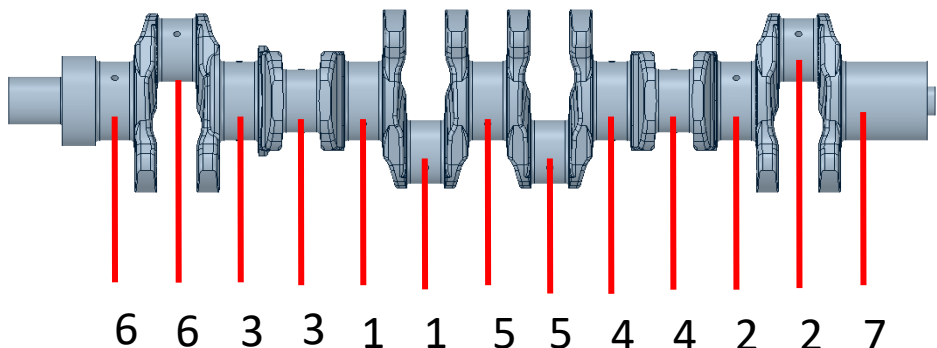
- 材料牌号：42CrMoA，对应DANTE材料库S4140

7主6连6主5连5主4连4主3连3主2连2主1连1主

电磁感应器

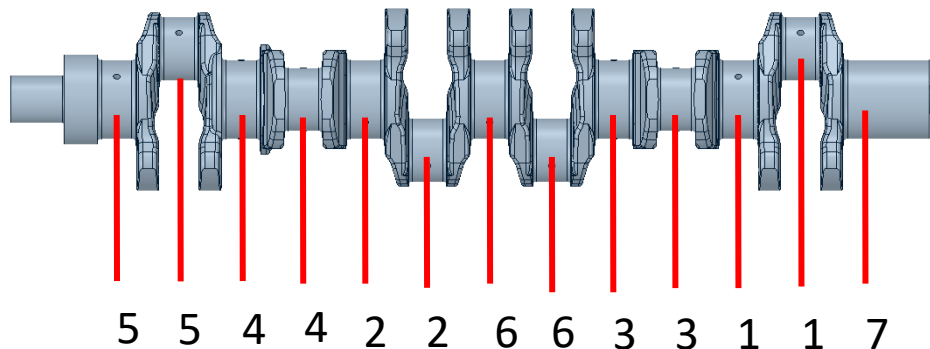


## 工步方案一：



1工步4连5主  
2工步1连2主  
3工步5连6主  
4工步2连3主  
5工步3连4主  
6工步6连7主  
7工步是1主轴

## 工步方案二：



1工步1连2主  
2工步4连5主  
3工步2连3主  
4工步5连6主  
5工步6连7主  
6工步3连4主  
7工步是1主轴

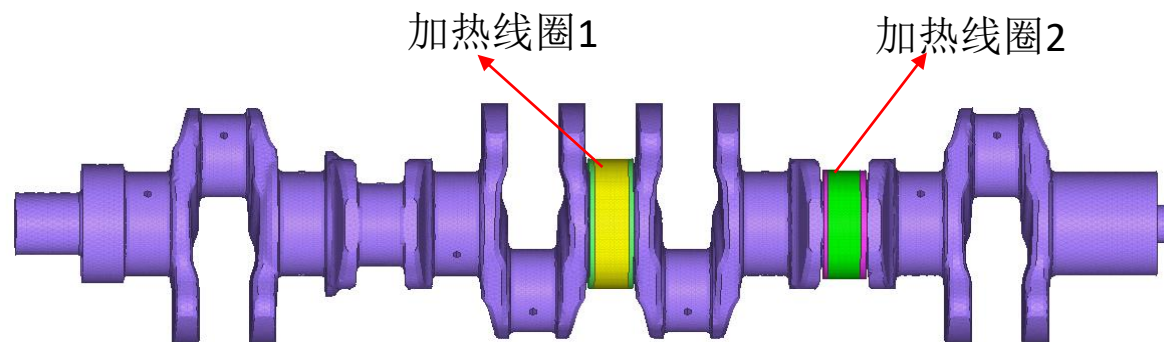
- 每步加热最高温度大约850°C~ 880°C，然后采用喷液冷却方式。

| 淬火工艺参数 |          |          |          |                      |                      |
|--------|----------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| 轴径     | 1主       | 2/3/4主轴  | 5/6/7主轴  | 1/2/3连杆              | 4/5/6连杆              |
| 感应器编号  | 6#       | 4#       | 1#       | 5#                   | 2#                   |
| 设定电压参数 | 3980±100 | 3800±100 | 3700±100 | 3450±100<br>3300±100 | 3020±100<br>3270±100 |
| 加热时间   | 16±2S    | 18±2S    | 17±2S    | 18±2S                | 18±2S                |
| 延时     | 2±1S     | 4±1S     | 4±1S     | 3.5±1S               | 3.5±1S               |
| 冷却时间   | 15±2S    | 18±2S    | 16±2S    | 19±2S                | 19±2S                |

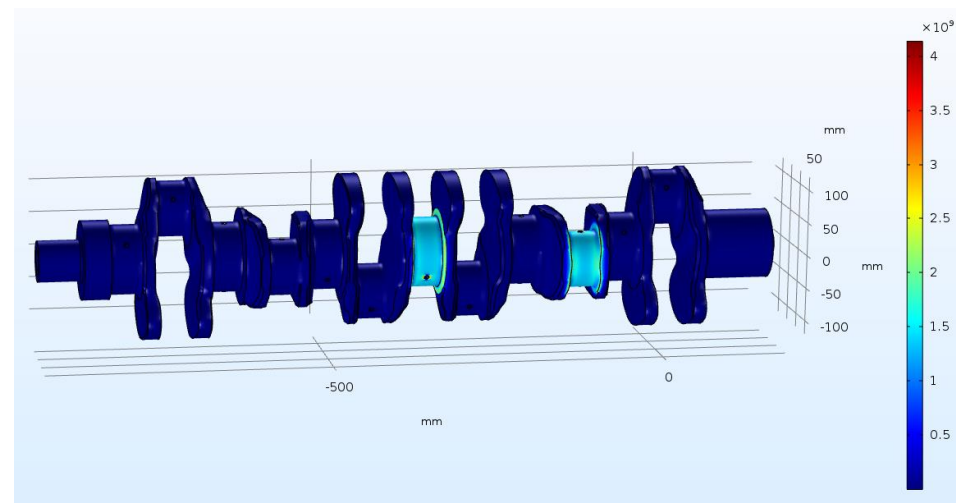
曲轴热处理  
工艺过程



## 一、在电磁场仿真分析软件中进行电磁感应加热过程仿真



曲轴热处理仿真过程

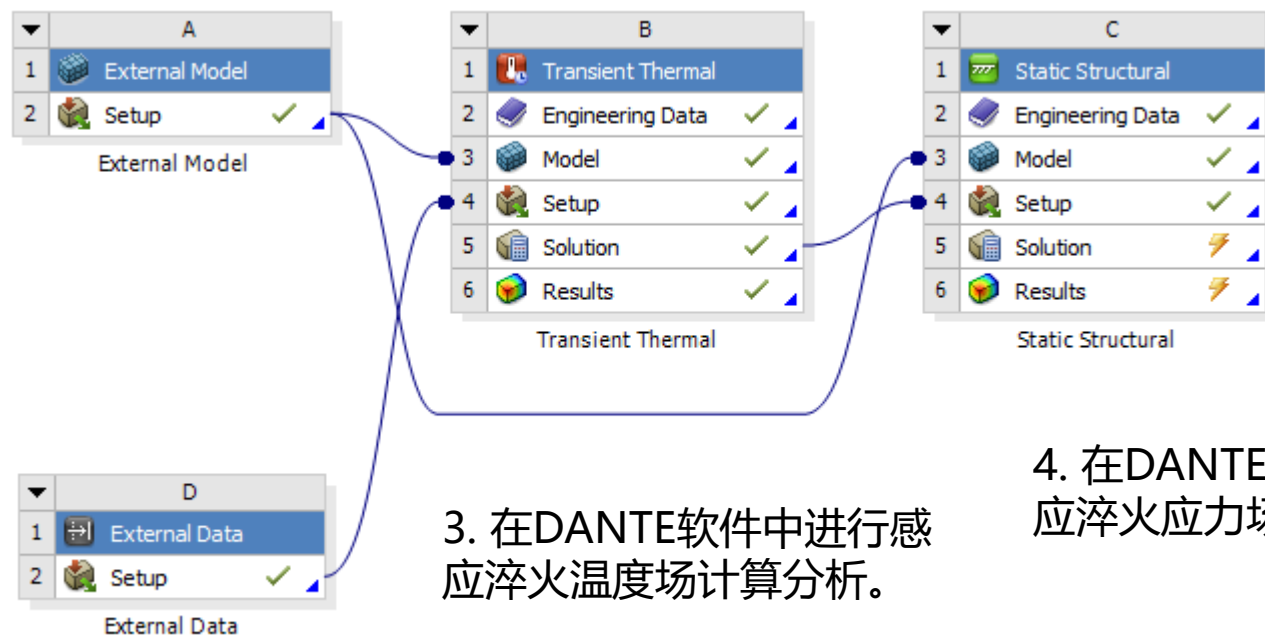


热源功率密度分布云图 (单位:  $\text{W}/\text{m}^3$ )

## 二、在DANTE软件中进行感应淬火过程温度场和应力场计算分析

### 曲轴热处理仿真过程

#### 1.导入有限元网格



3. 在DANTE软件中进行感应淬火温度场计算分析。

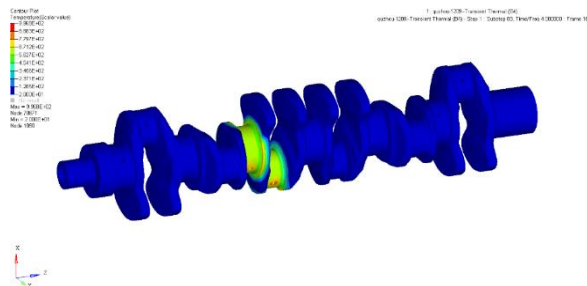
4. 在DANTE软件中进行感应淬火应力场计算分析。

#### 2.导入电磁场计算的热源功率密度结果。

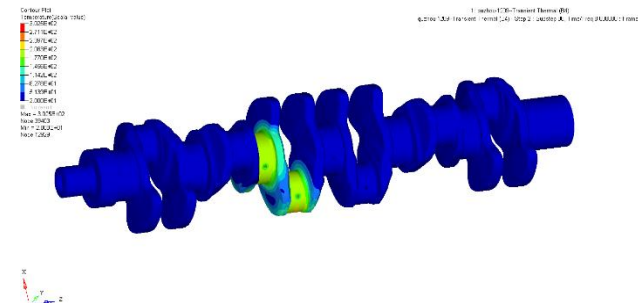
## 工步方案一：

### 1工步后温度场计算结果

#### ● 加热阶段



#### ● 喷液冷却阶段

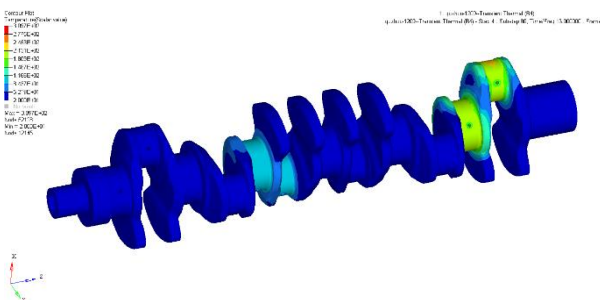
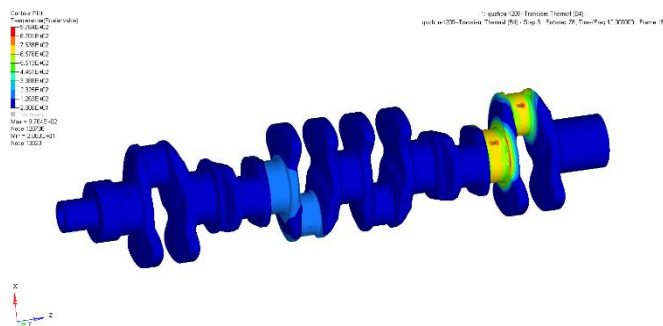


## 曲轴热处理仿真过程

### 2工步后温度场计算结果

#### ● 喷液冷却阶段

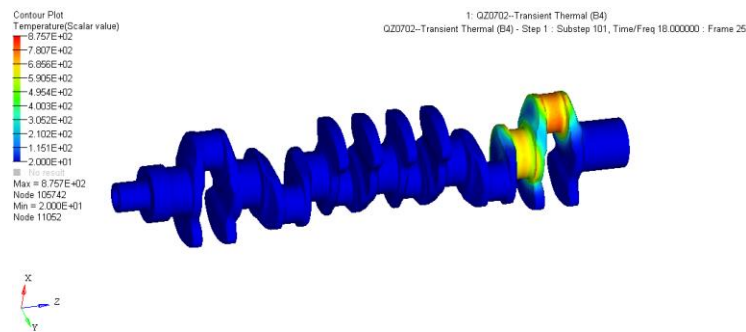
#### ● 加热阶段



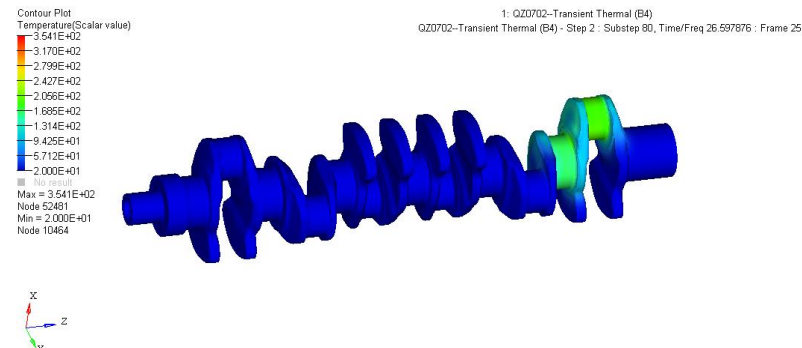
## 工步方案二：

### 1工步后温度场计算结果

#### ● 加热阶段

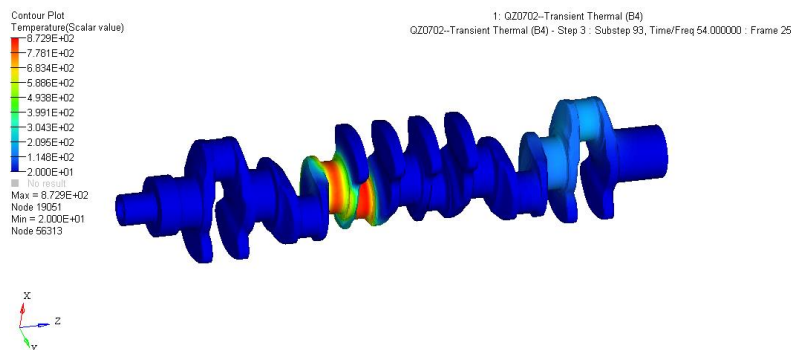


#### ● 喷液冷却阶段

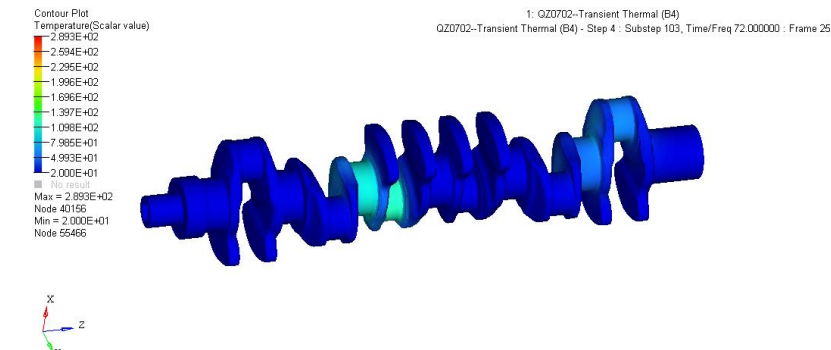


### 2工步后温度场计算结果

#### ● 加热阶段



#### ● 喷液冷却阶段



## 曲轴热处理仿真过程

## 工步方案一：

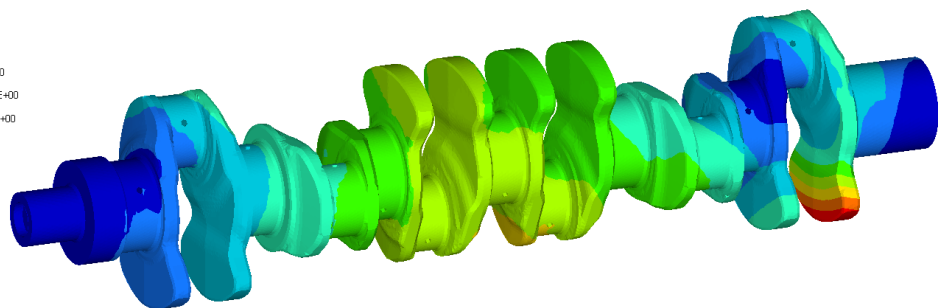
- 7工步加热完成后的变形结果（单位mm）  
最大变形量1.1mm

## 工步方案二：

- 7工步加热完成后的变形结果（单位mm）  
最大变形量0.29mm

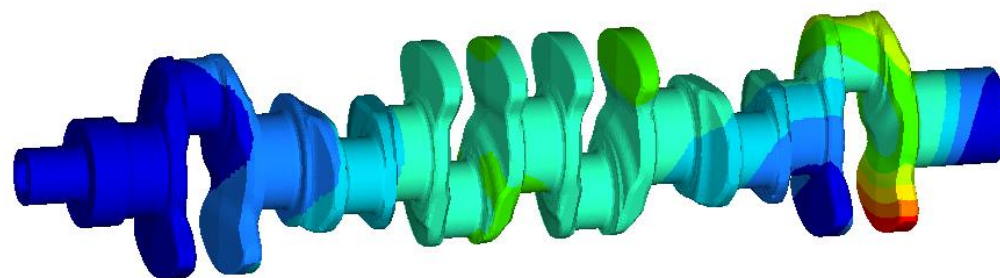
## 曲轴热处理仿真过程

Contour Plot  
Displacement(Mag)  
Analysis system  
1.104E+00  
9.811E-01  
9.585E-01  
7.368E-01  
6.132E-01  
4.906E-01  
3.679E-01  
2.453E-01  
1.226E-01  
0.000E+00  
No result  
Max = 1.104E+00  
Node 124121  
Min = 0.000E+00  
Node 56931



1: quzhou-1209--Static Structural (C4)  
quzhou-1209--Static Structural (C4) - Step 13 : Substep 48, Time/Freq 52.000000 : Frame 16

Contour Plot  
Displacement(Mag)  
Analysis system  
2.915E-01  
2.591E-01  
2.267E-01  
1.943E-01  
1.620E-01  
1.296E-01  
9.717E-02  
6.478E-02  
3.239E-02  
0.000E+00  
No result  
Max = 2.915E-01  
Node 109215  
Min = 0.000E+00  
Node 56326



1: QZ0702--Static Structural (C4)  
QZ0702--Static Structural (C4) - Step 1 : Substep 20, Time/Freq 3.018824 : Frame 25

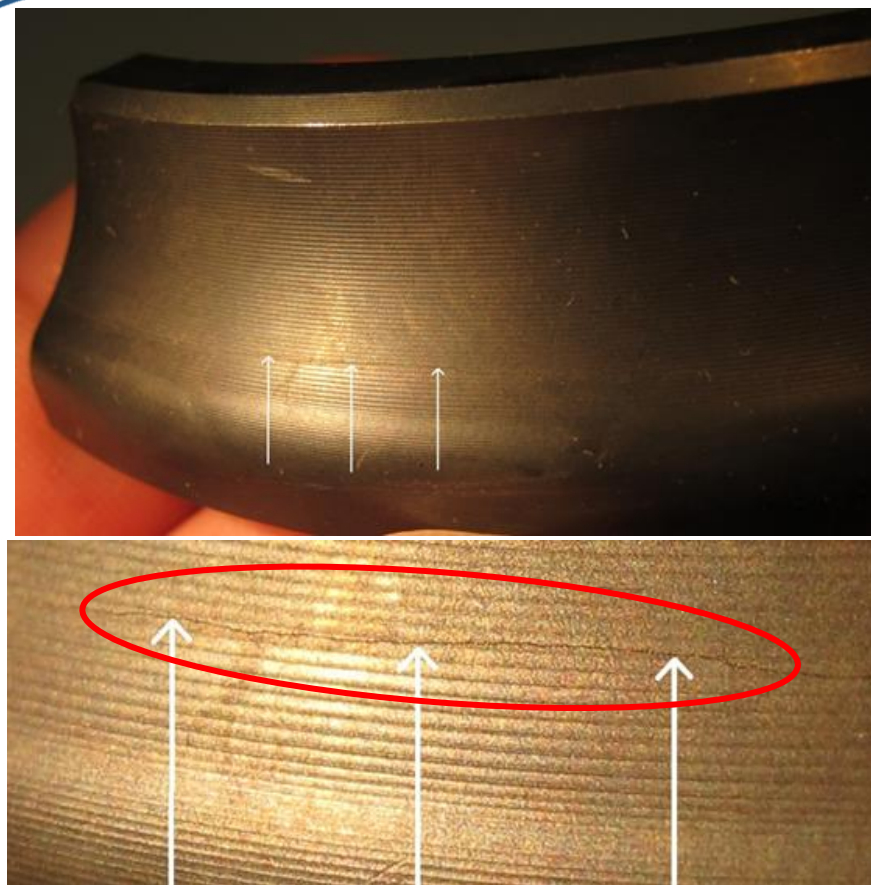


# 压力淬火过程敏感性分析



## 问题描述

分析对象是基于一个外径为4寸的轴承座圈，选用材料为AISI 52100钢。如表中所示，在压力淬火过程中有大部分的轴承座圈发生失效。在淬火和回火后，在轴承座圈的圆周方向上有超过一半的部分可以看到较大的裂纹。快速解决方案是在淬火期间使模具以脉冲的方式周期性地缓解部件上的压力。快速释放和重新施加载荷能够使零件更自然地收缩，同时仍保持所需的最终形状。当不使用脉冲方法时，由于上模和下模的夹装使零件不能自由的收缩，零件和上下模的接触产生的摩擦力会在淬火过程中增加额外的应力。



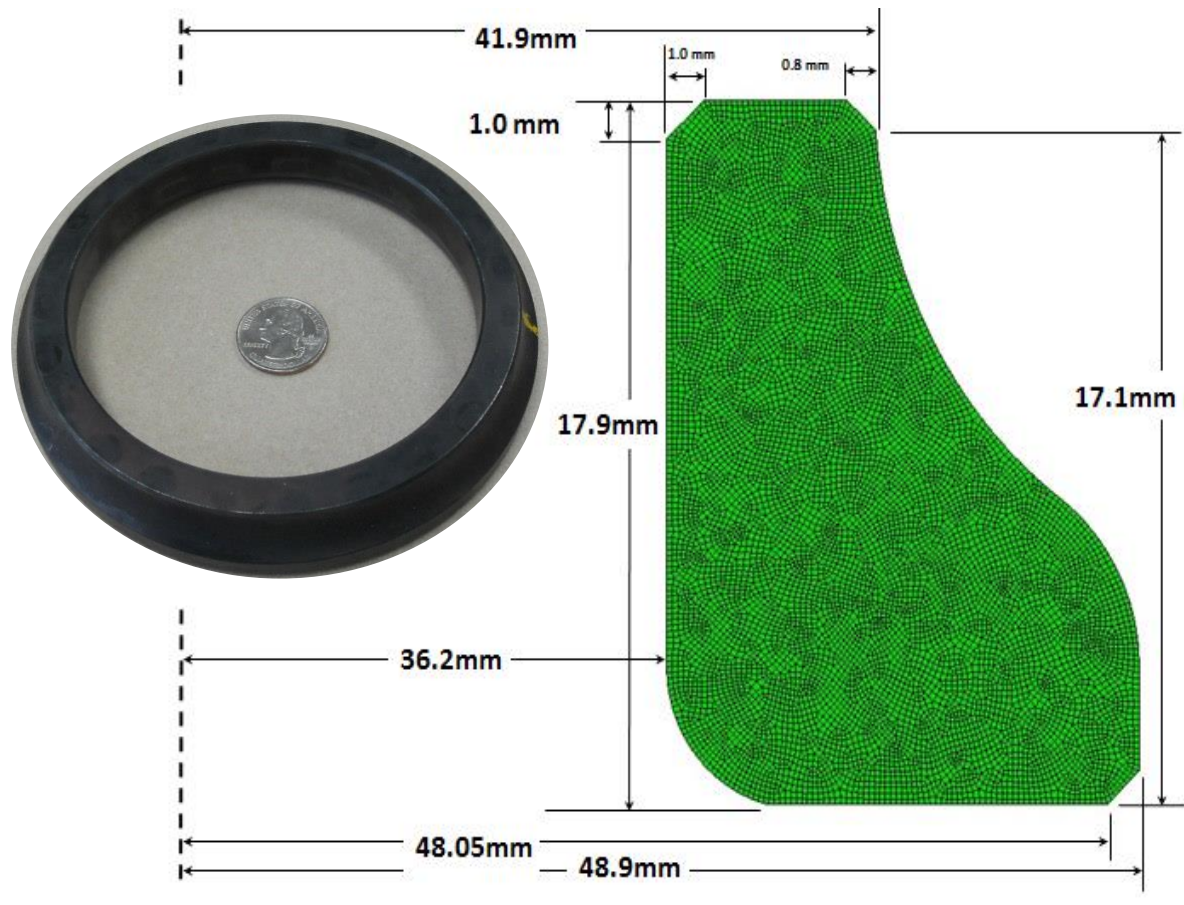
轴承座圈裂纹放大视图

## 有限元模型定义

为了充分了解所述问题中的工作机制，运用有限元模型来检验几种过程敏感性。轴承座圈的横截面为轴对称的，用细化的2D网格对单个横截面进行网格划分，以精确地捕获导致故障的热传递和应力。右图显示了建立好的有限元网格模型，节点数9,367个，线性单元数9,188个。下方的表格显示了AISI 52100钢的化学成分。DANTE热处理模拟软件在其材料数据库中有52100钢的数据，可直接用于此次分析。

AISI 52100钢的化学成分

| C, wt.%   | Mn, wt.%  | Si, wt.%  | Cr, wt.%  | Ni, wt.%  | Mo, wt.%  | Fe   |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| 0.93/1.05 | 0.25/0.45 | 0.15/0.35 | 1.35/1.60 | 0.25 max. | 0.10 max. | Bal. |



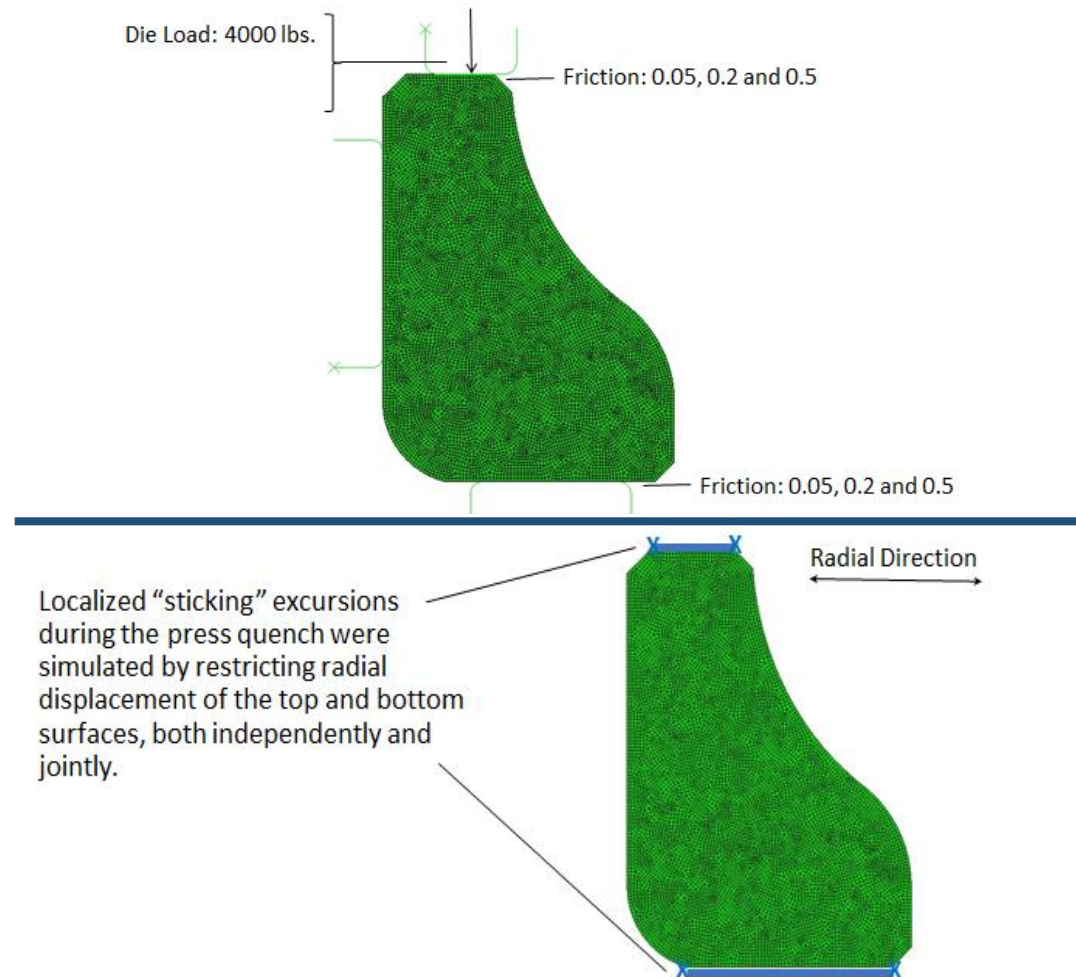
## 分析过程—考虑摩擦影响

对压力淬火过程的摩擦力以及得出摩擦力将如何影响残余应力进行分析计算。当零件冷却收缩时，零件与淬火模具之间会产生一些摩擦，因为模具的作用是保持轴承座圈平整。而在某些情况下，零件会粘附在淬火模具上，阻碍零件的自然收缩。这可能在淬火过程中导致部件中的额外应力。在这项研究中，将评估六种不同的摩擦条件。其中三个条件将使用恒定的摩擦系数，分别为：

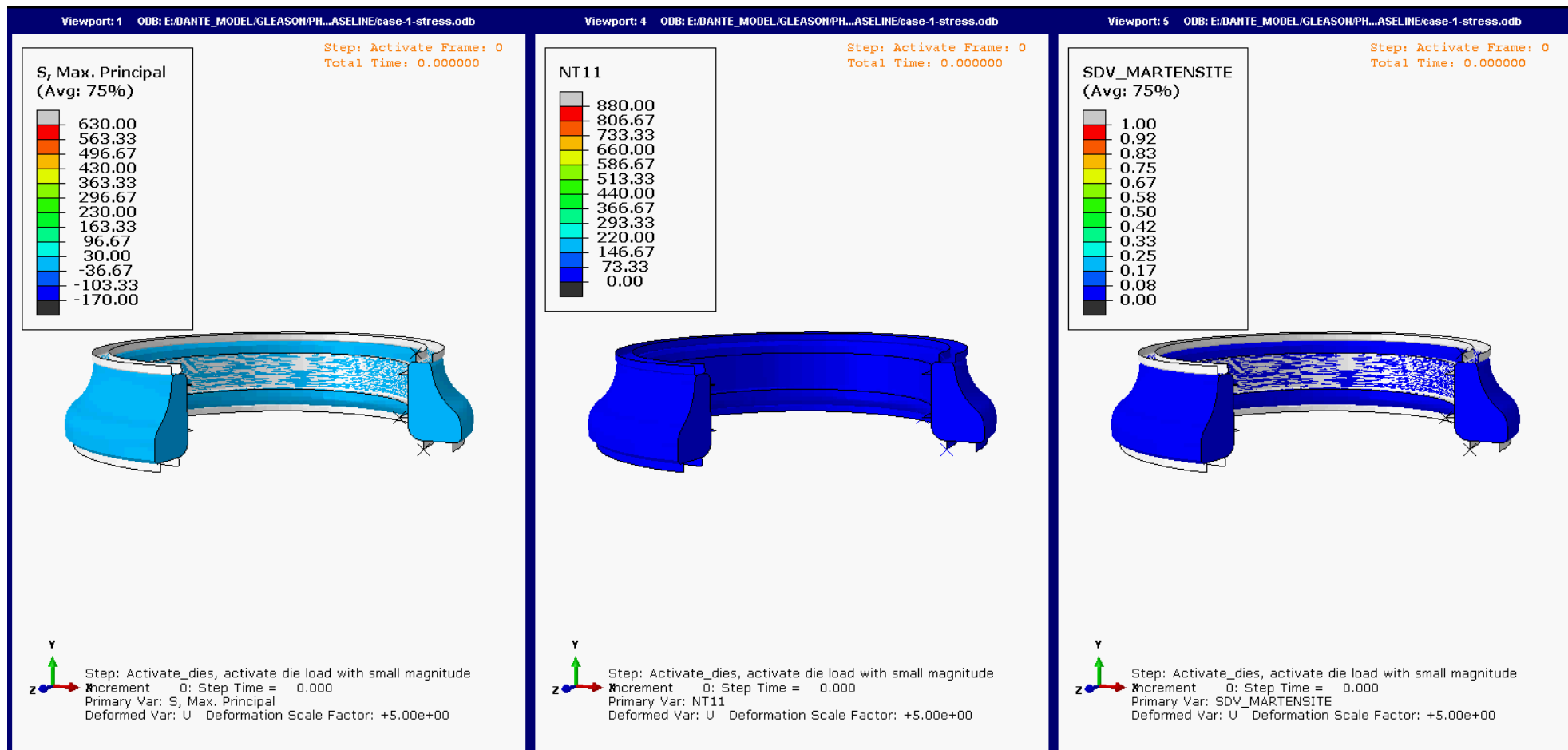
- ① 0.5    ② 0.2    ③ 0.05

还将探讨模具和零件之间粘附的几种情况：

- ① 上模到零件顶部    ② 下模到零件底部    ③ 上模和下模
- 通过在径向方向上固定所选区域来模拟粘附，从而限制轴承座圈的自然收缩。右图表示模具放置位置和载荷施加位置。









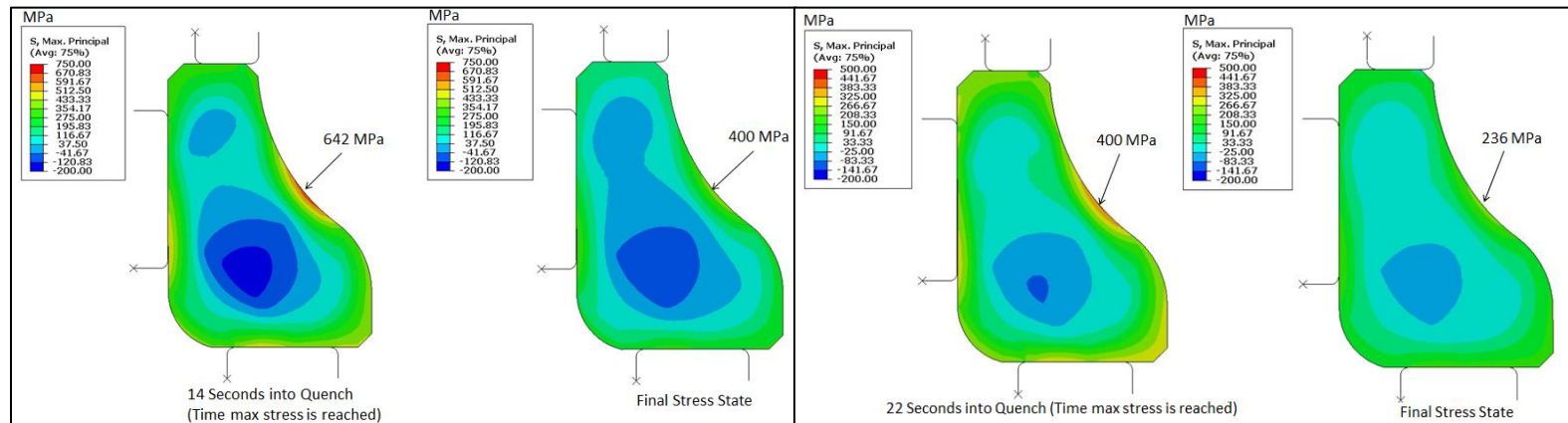
## 淬火速率影响分析结果

关于淬火过程敏感性研究的一些结论:

1.虽然改变淬火速率确实显示出过程中拉伸应力大小的变化,但是如果内径表面和外径表面上的淬火速率相等,则该应力产生的位置不会改变。

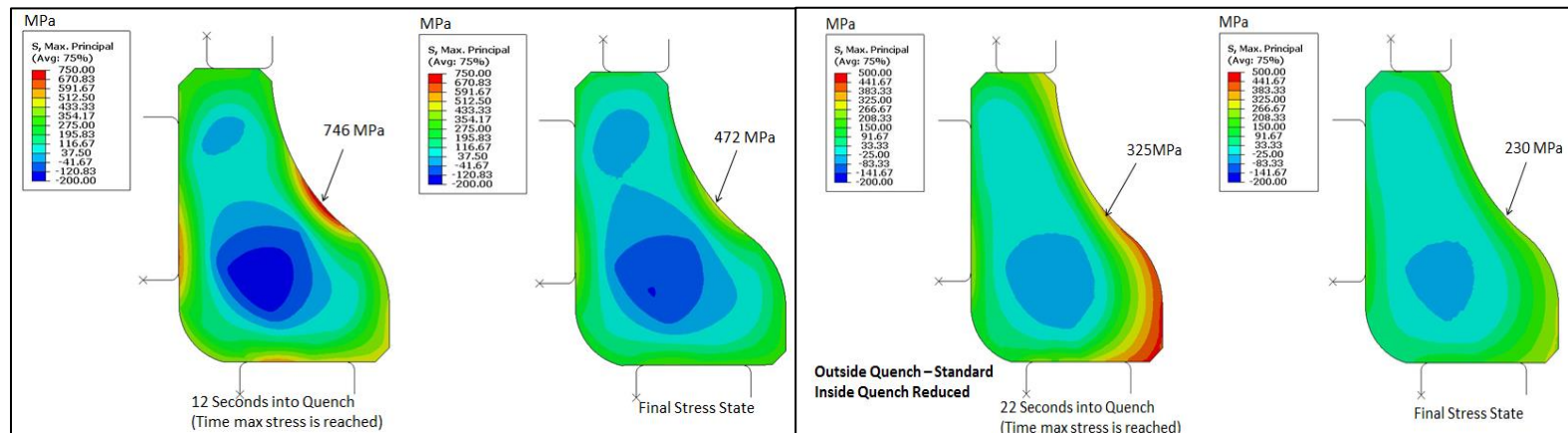
2.第四种(右下角云图)淬火情况由于内径表面上的冷却较慢而将最大过程中应力转移到部件的底部。结果显示问题区域的拉应力有所减小。

3.标准淬火速率的过程中应力不太可能导致开裂。



标准淬火速率

低流速淬火速率



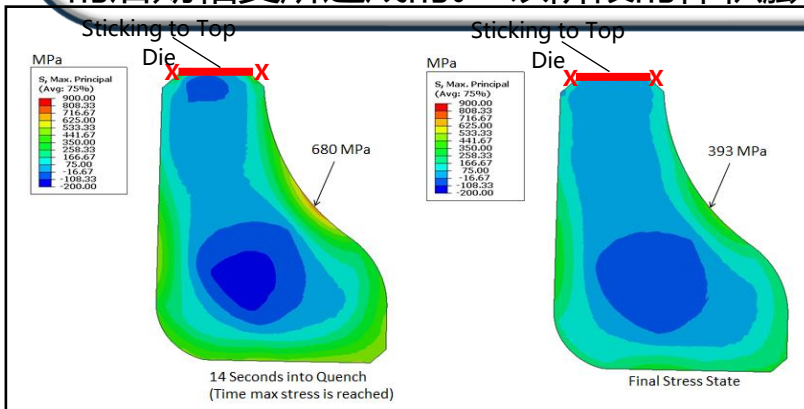
高流速淬火速率

减少内表面淬火速率

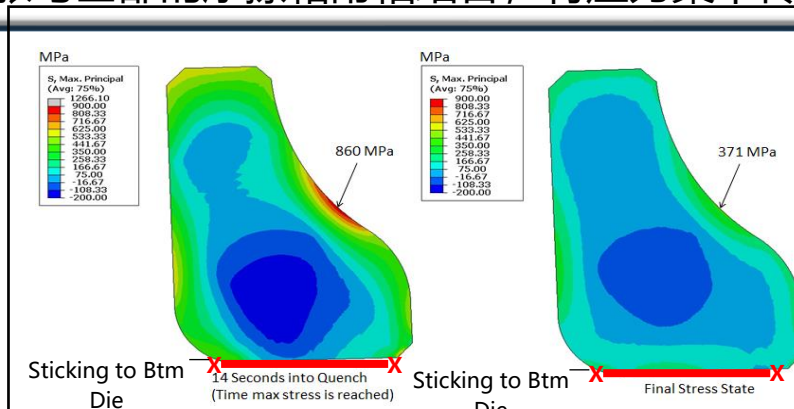
## 摩擦粘附影响分析结果

下面的云图证明了三种粘附条件带来的影响。从云图中可以观察到:

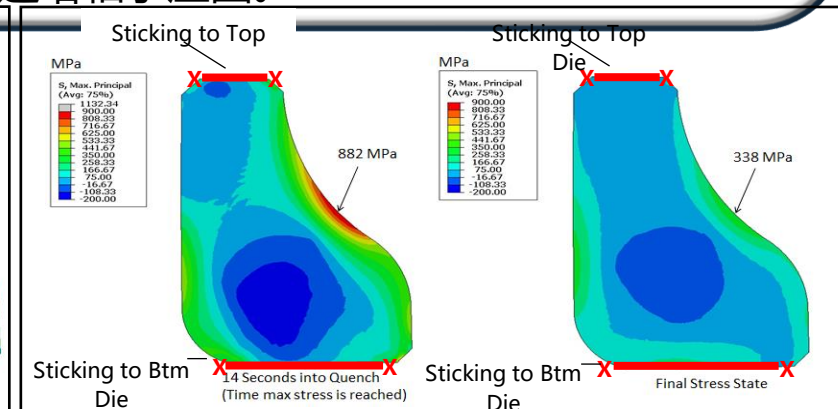
- 1.当底部模具和顶部模具均有粘附时所显示的最大过程中的应力为882MPa；而仅有底部磨具粘附时显示最大过程中应力为860MPa。
- 2.仅顶部模具粘附的最大过程应力仅为680MPa，略高于标准淬火速率模型。
- 3.将底部模具粘附模型的最大过程中应力与标准淬火模型的最大过程中应力进行比较，其应力的幅度超过标准淬火模型的应力200 MPa。
- 4.分析结果表明脉冲方式淬火的重要性及其对应力形成的显著影响。轴承座圈中大应力形成的机制是由于环向较大质量区域的后期相变所造成的。该阶段的体积膨胀与基部的摩擦粘附相结合，将应力集中传递给轴承座圈。



顶面摩擦粘附



底面摩擦粘附



顶面和底面摩擦粘附

# 汽车车轴的感应淬火



## 项目简介

### 零件:

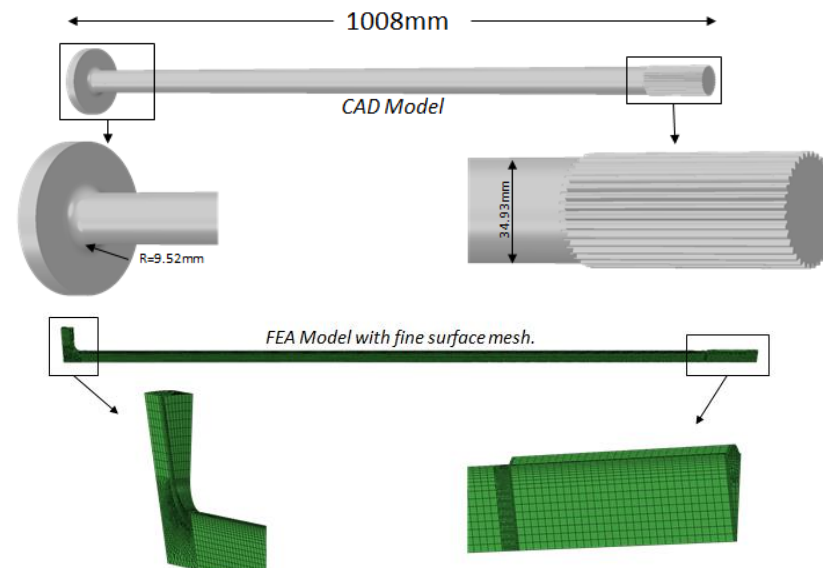
长1,008mm

直径34.93mm

一端是法兰，另一端35齿花键齿

### 有限元模型:

利用对称性，有限元模型将沿轴的长度切片，覆盖相当于一个齿键的角度。零件以较精细单元进行网格划分，以捕捉过程中出现的热梯度和应力梯度。



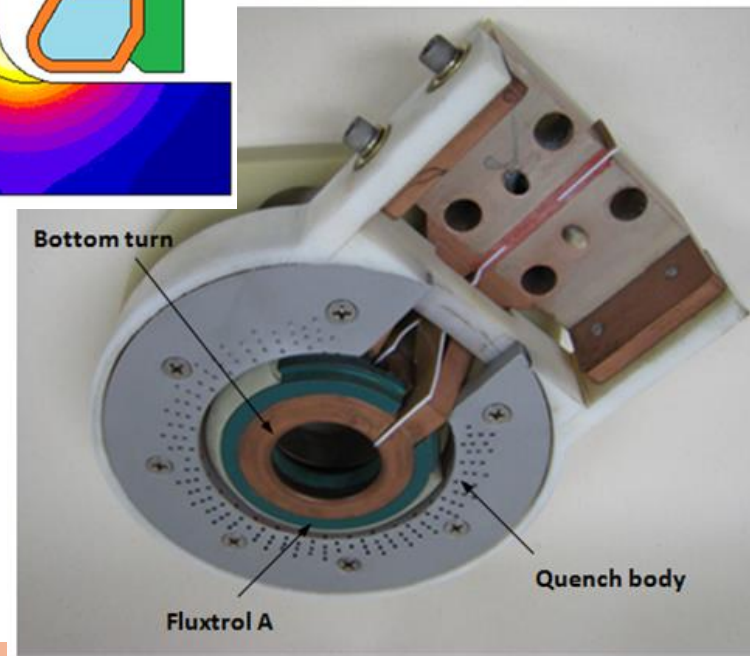
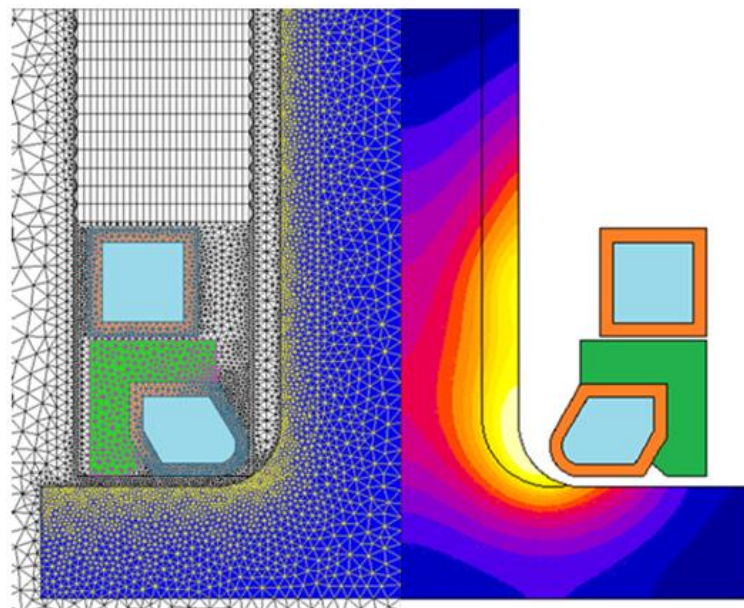
汽车轮轴通常使用感应工艺，通过迅速加热至材料的奥氏体化温度，使轮轴材料在其表面的一定深度范围内奥氏体化，然后将轮轴淬火以形成马氏体，使轮轴表面比母材更硬，并使其产生所期望的压缩残余应力，最终达到轮轴表面硬化的效果。预测感应淬火过程中轮轴的最终应力状态和整体尺寸变化，能确保轮轴满足所需的性能，并且可减少由于部件损坏或高度变形而产生废料的成本。使用DANTE热处理软件进行模拟仿真，可以预测过程中的最终应力、位移变化、金相分数以及硬度，以便调整过程参数，最终达到预期的结果。



## 工艺概要

右侧上图显示的是flux2d模型，用于模拟电感器处于起始位置时的电磁现象。下图是实际工艺中使用的感应器的图片。使用磁通2d软件选择并配置了一个2匝线圈，以满足所需的外壳深度，并对以下过程建模：

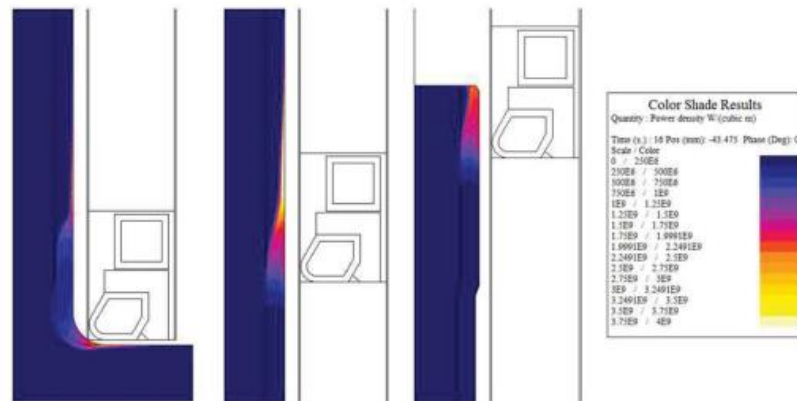
- 1.感应器在轮缘端停留9秒，让热量积聚起来。
- 2.感应器以12毫米/秒的速度向上移动1.5秒。
- 3.感应器减慢到8毫米/秒，喷射淬火在加热区域开始。感应器刚好停在花键齿附近，以防止过热。
- 4.感应器关闭后，齿键端允许空气降温60秒，工艺处理总时间为190.15秒。



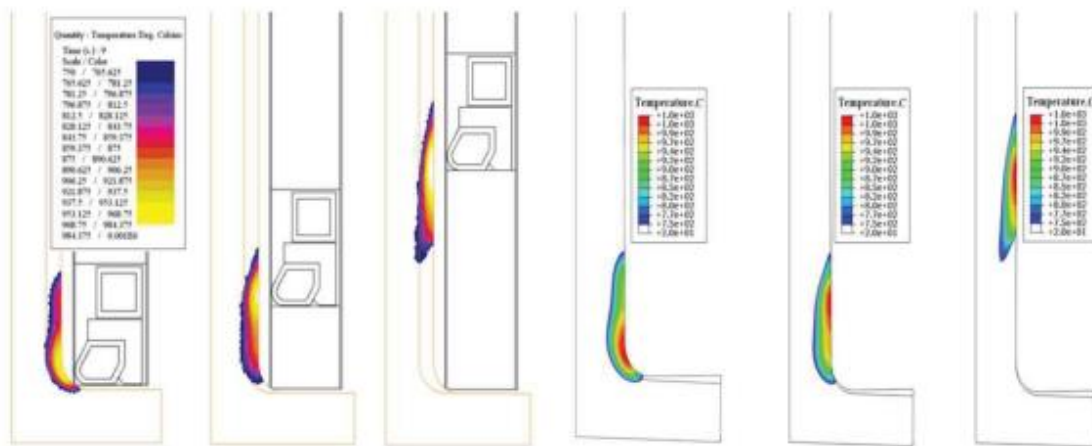


## 模型验证

- 上图显示了由Flux 2D软件预测计算的一些的功率密度分布瞬态图。
- 将Flux2d数据作为功率密度随时间的变化值输入 DANTE软件，为运行对称切片的热力模型提供数据
- 下图（左）显示了Flux2d的温度预测值，与下图（右）使用DANTE进行温度预测值相比，结果保持一致。
- 在DANTE中输入过程参数来建立建立热力模型和应力模型，以分析改变淬火速率及材料参数后模型的应力分布及整体位移情况。

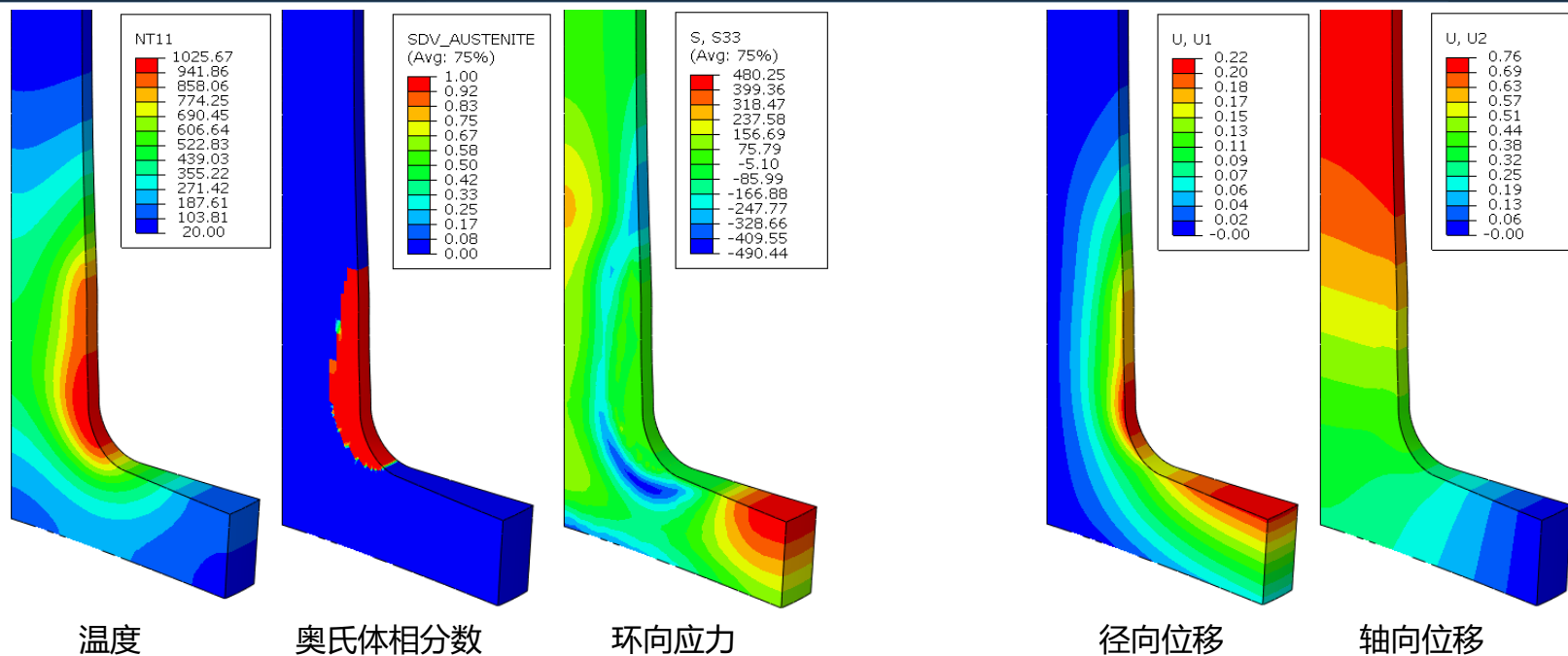


Flux 2D 能量密度分布



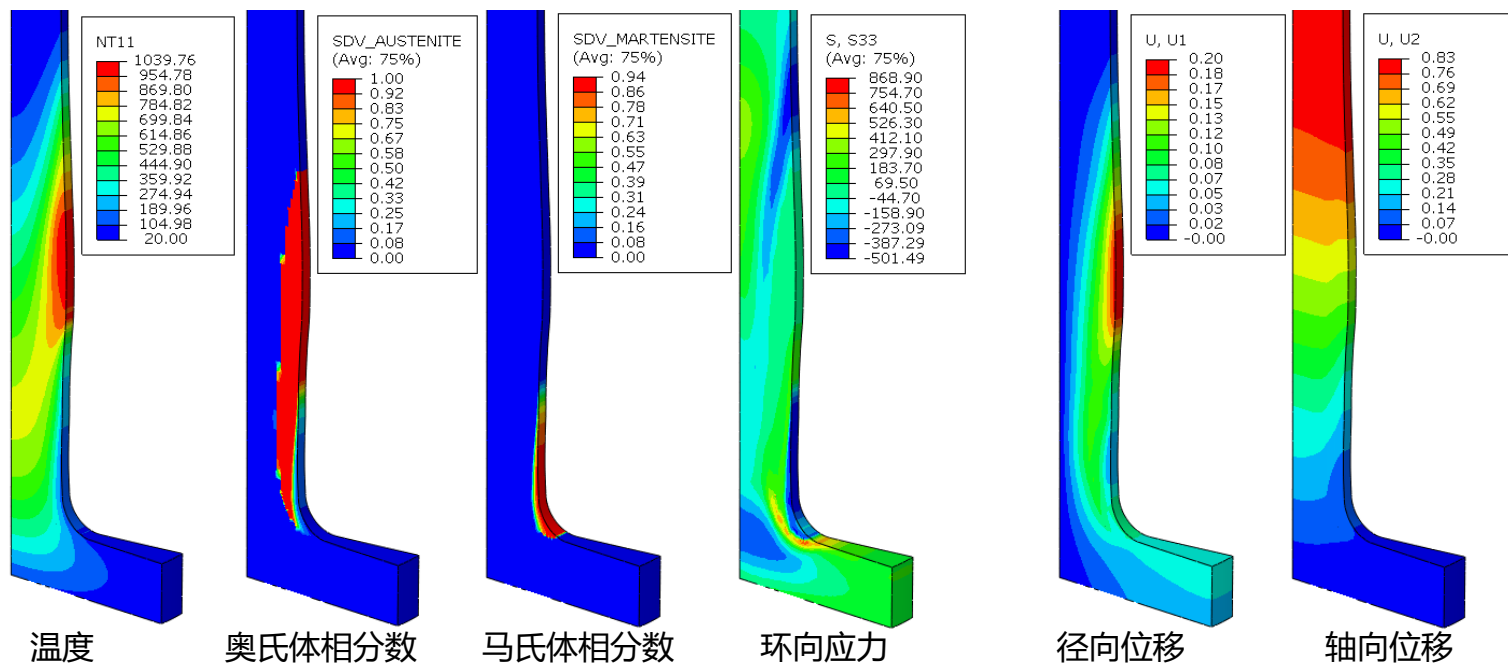
## 计算结果

在初始位置停留9秒时，法兰圆角的表面温度达到1025°C。奥氏体在法兰圆角处形成，部分组织沿轴向向上延伸。初始相变转变为奥氏体时，法兰圆角正下方的体积收缩，导致环向应力表现为压应力。在加热区正前方的核心区域存在张力。右边的位移云图显示由于热膨胀引起的径向和轴向增长。



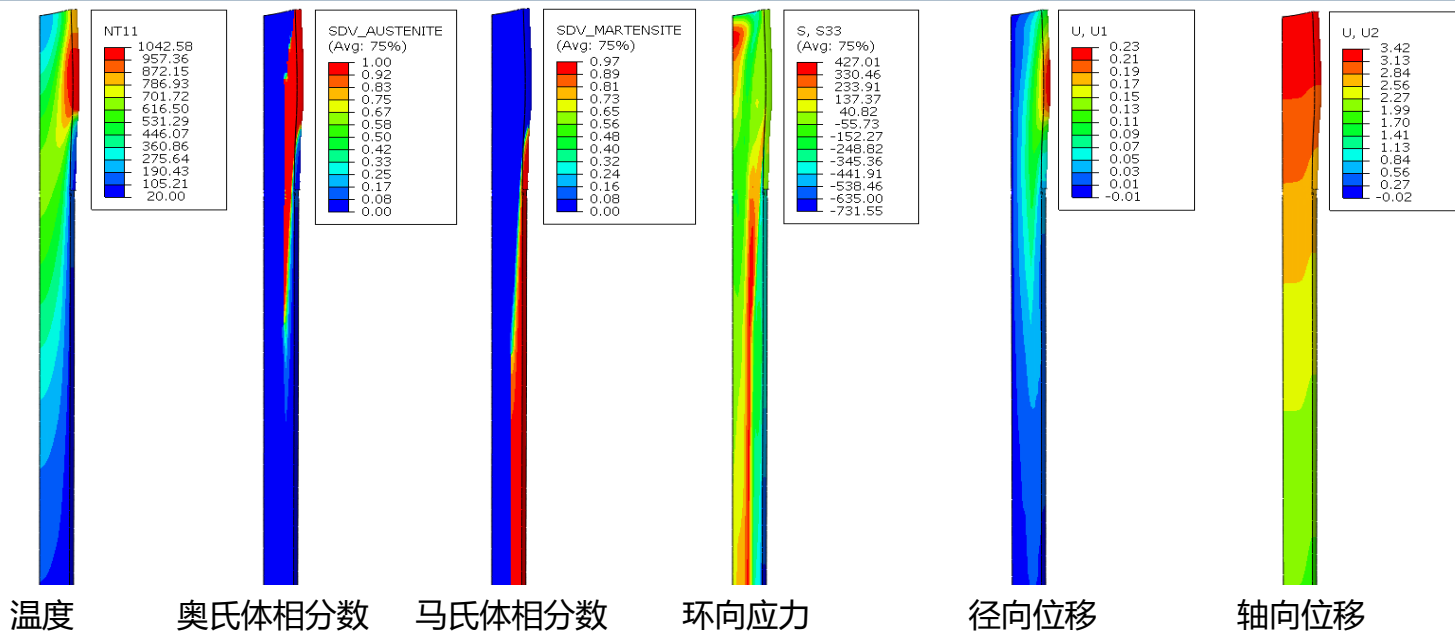
## 计算结果

在整个过程进行到16.5秒时，感应器以8毫米/秒的速度向上移动，并伴随着淬火及喷射。通过观察环向应力云图发现，由于淬火作用，在法兰圆角及以上部位的奥氏体迅速形成马氏体，导致马氏体相体积膨胀而产生压缩应力。由于相变的结果，张力位于马氏体层之下。在过程中，由于热膨胀导致存在轴向和径向位移。

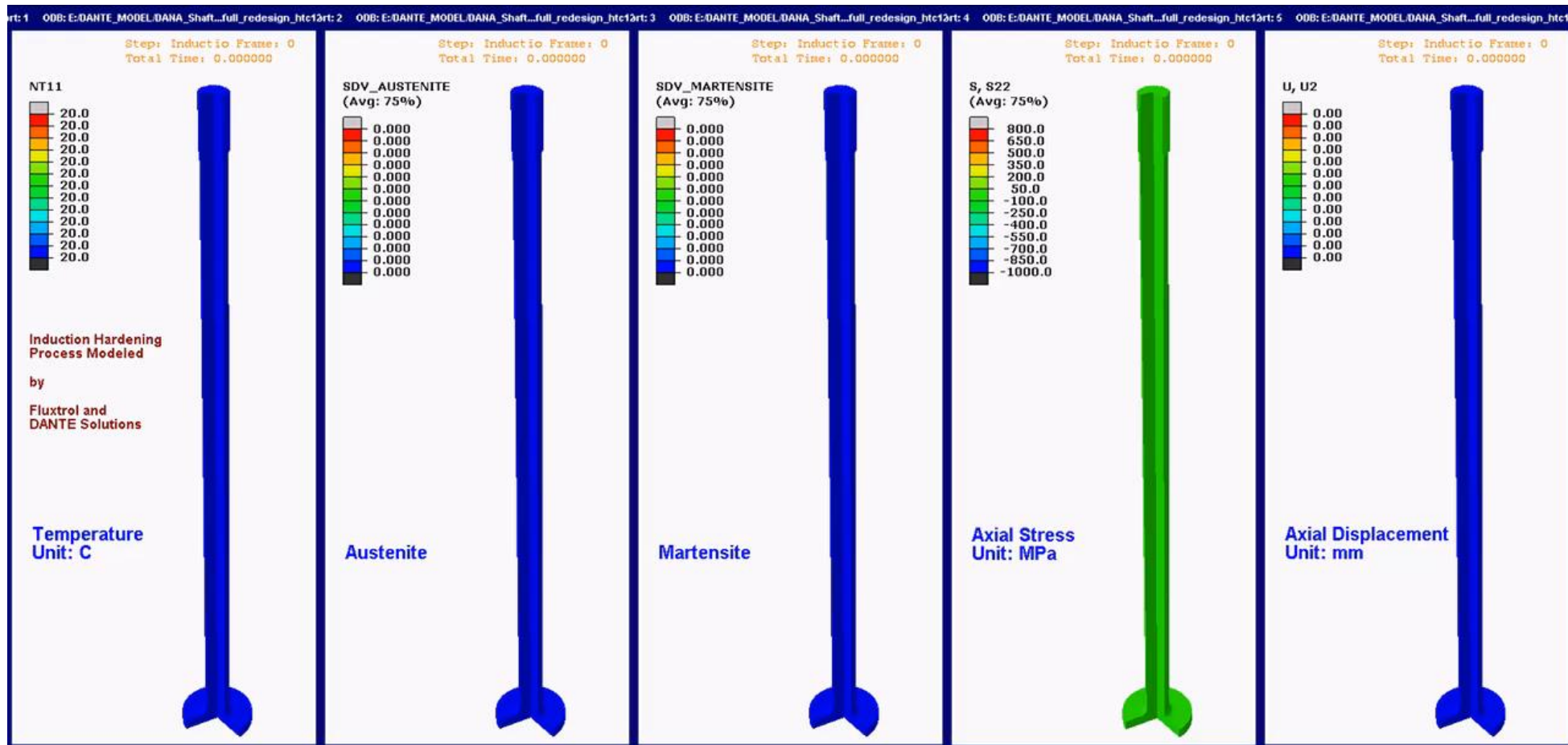


## 计算结果

全部过程结果时间为130.15秒，在此之后，感应器关闭，以防止花键端过热。花键齿上显示的温度为1040℃。其中一些热量将传导到该位置的核心区域，并缓慢冷却以将该区域的表面拉入压缩状态。环向应力云图显示完全转变马氏体区域的产生压缩应力，硬化层下仍存在张力。尽管轴向位移由于残余热膨胀而继续增大，但随着零件恢复热平衡，其大小会减小一些。



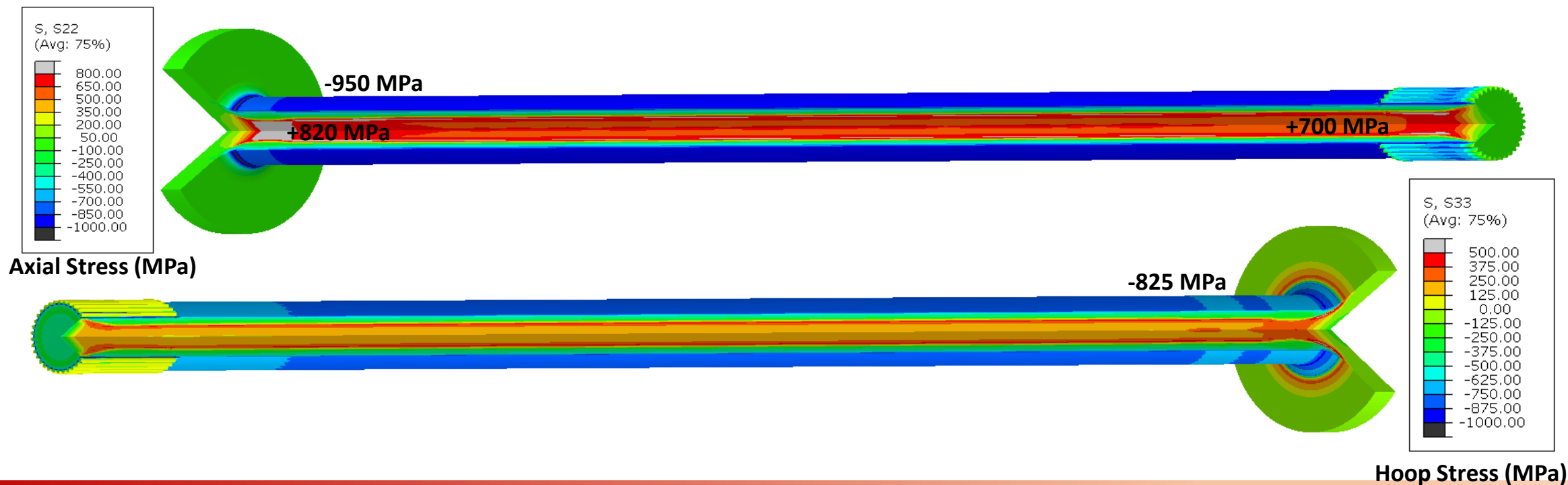
## 动画演示





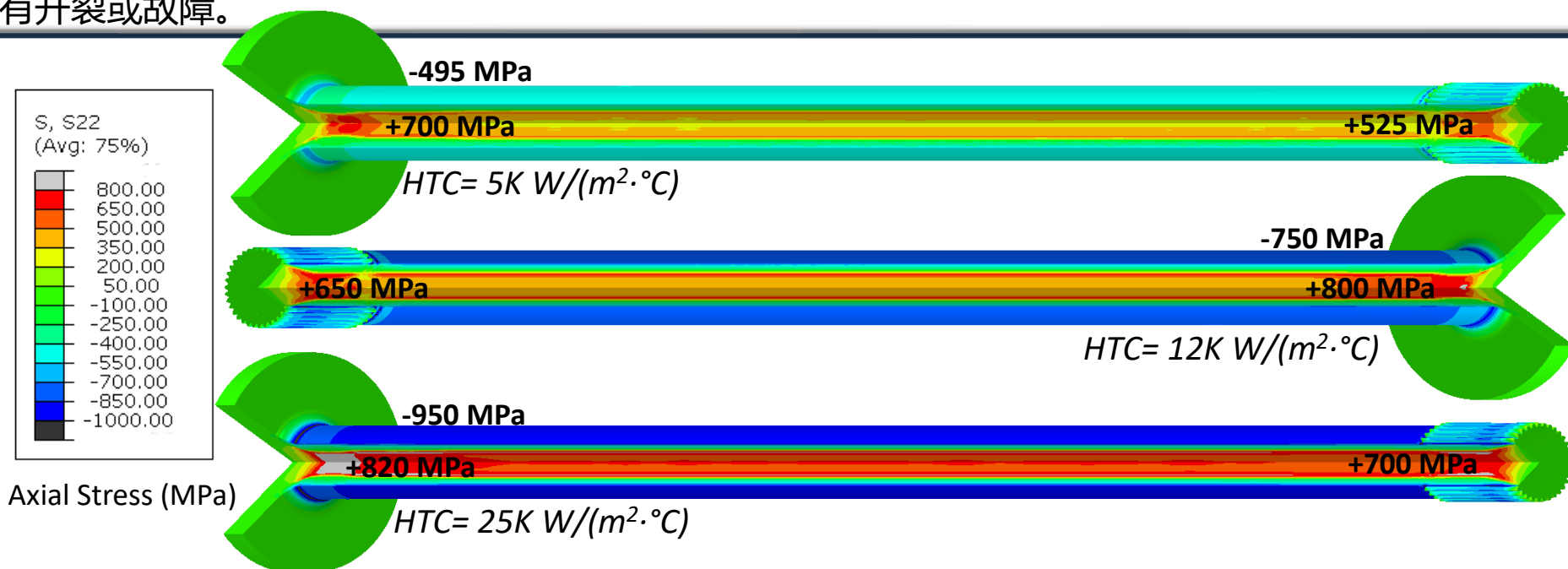
## 计算结果

下图是基准模型的最终残余应力状态。轴向应力表现为较强的沿轴长方向的表面压缩应力，并在表面正下方和法兰周围张力最大。尽管与轴向应力相比，环向应力大小较低，但环向应力结果与轴向应力类似，也显示为表面压缩应力，内部拉应力



## 计算结果

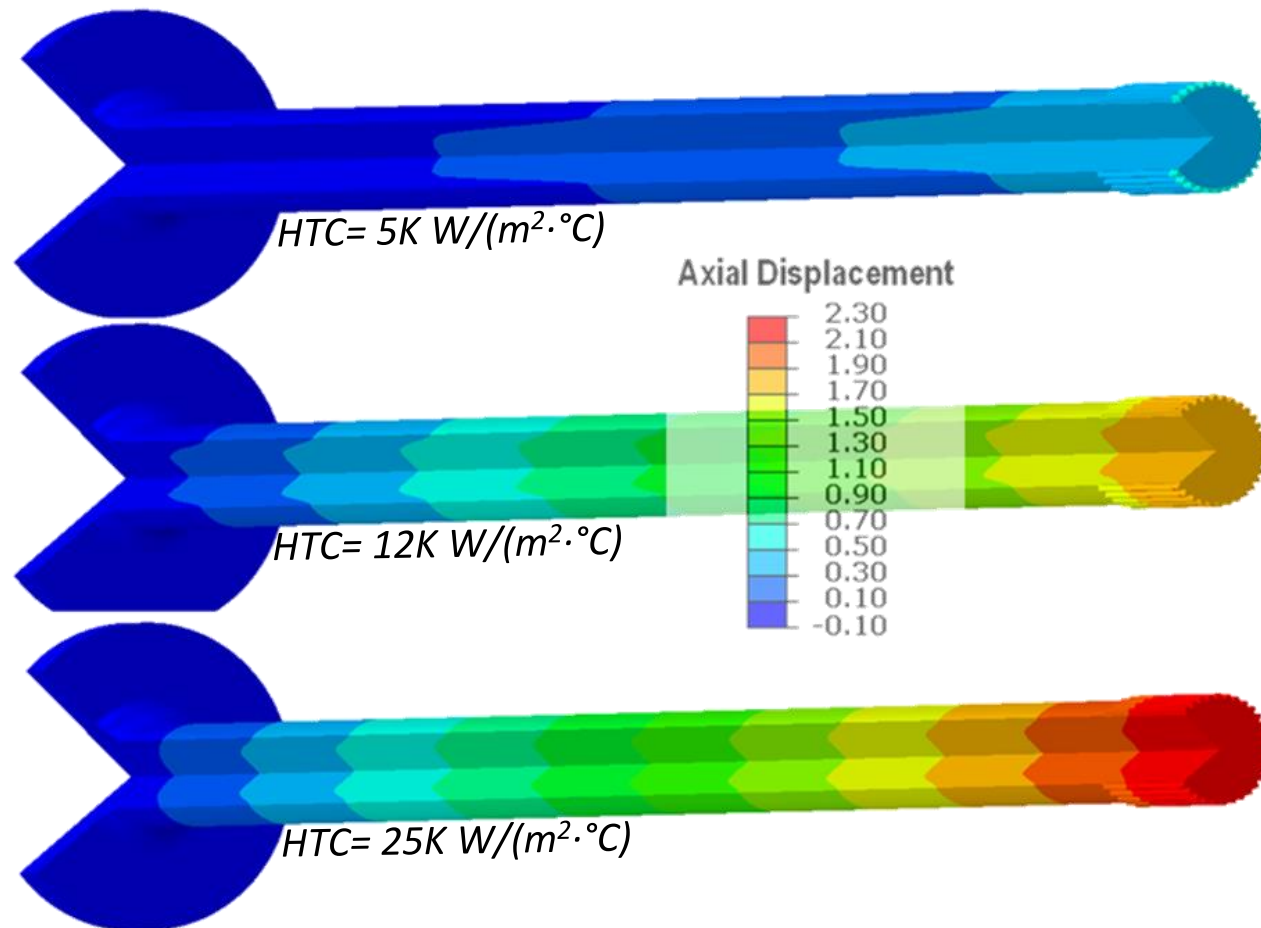
应用3种不同的淬火速度：5、12和25kW/(m<sup>2</sup>·°C)，显示残余应力的显著变化。随着换热系数的增加，表面压缩应力增加。为了平衡增加的表面压缩应力，零件表面下的拉伸应力也会增加。下方云图显示，当淬火速率达到25kw/(m<sup>2</sup>·°c)时轴表面压缩应力最高，但法兰附近轴芯内部张力的大小仍然存在一些问题。这可能会在零件装配过程中引起问题，应仔细观察是否有开裂或故障。



## 计算结果

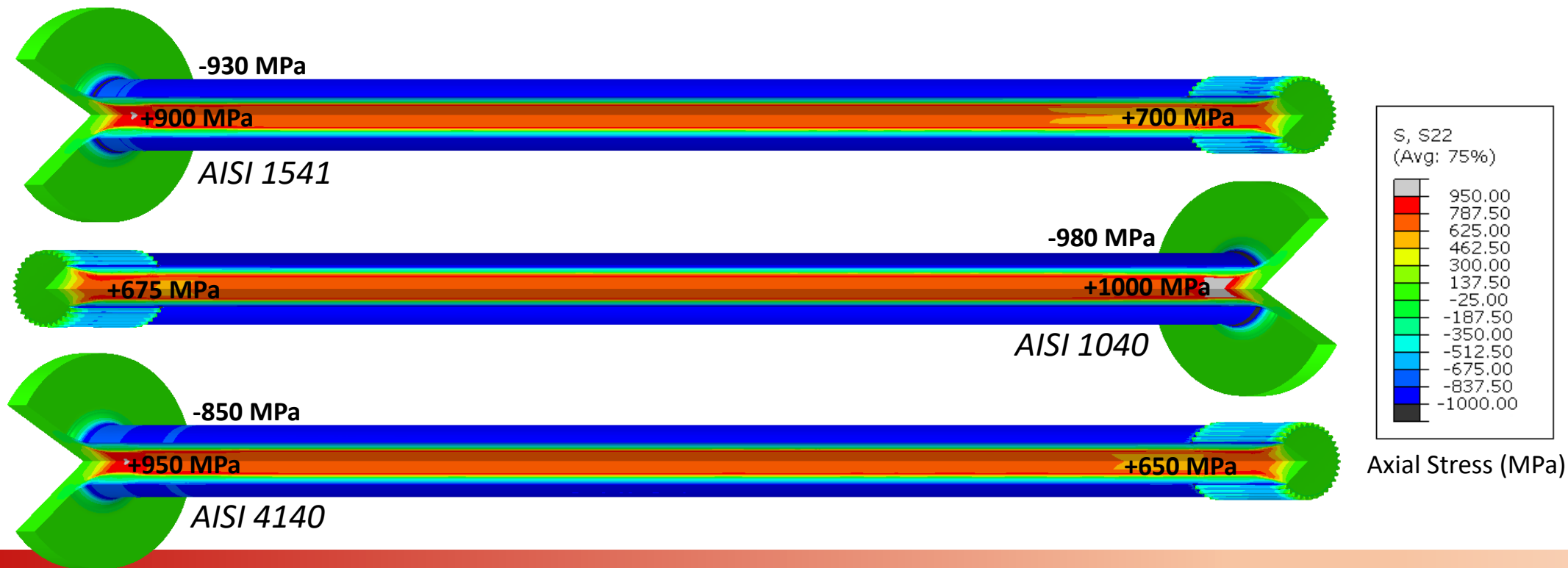
改变淬火速度对轴的整体变形有显著影响。三种淬火速率都显示相同的图例，色差则表示轴向位移的总大小。

冷却速度越快则轴向位移越大。  
5kw/(m<sup>2</sup>·°C) 淬火速率模型仅延长了约0.3mm，而25kw/(m<sup>2</sup>·°C) 淬火速率模型则较原始长度延长了约2.3mm。  
使用DANTE，这些预测的伸长可以在初始轴设计中考虑，以减少废料产生。



## 材料变化影响

下图表示的三种不同钢种的残余应力云图，云图显示了轴向应力的显著差异。AISI1040在法兰端的表面压缩应力与芯部张力最大；AISI4140的表面压缩应力最小；AISI1541的芯部张力最小，其值略低于AISI4140。





# DANTE在中国

## DANTE热处理仿真软件版本

- DANTE单机版
- DANTE集团版
- DANTE科研版
- DANTE教育版
- DANTE工具软件套件

## DANTE热处理仿真软件购买

- DANTE订阅购买-提供年度授权软件购买
- DANTE永久授权年费购买-支付初始费后支付年费购买
- DANTE一次性永久授权购买
- DANTE工具软件套件一次性永久授权按需购买



# DANTE在中国

DANTE为中国热处理行业提供一流的仿真分析服务，帮助中国热处理行业全面提升技术水平，降低研发成本。青岛赛普克有限元科技发展有限公司是中国热处理行业协会虚拟仿真技术委员会秘书长单位，作为DANTE在中国技术服务商，将为国内热处理企业和科研机构提供全方位的技术支持。

## DANTE热处理仿真服务内容

- DANTE软件技术支持
- DANTE软件培训服务
- DANTE仿真分析项目咨询
- DANTE材料数据库二次开发
- DANTE软件二次开发

## 仿真技术推动热处理工艺高质量发展

### 青岛总部

地址：青岛市宁夏路306号青岛大学科技园B座1号门3楼

电话：0532-86070065

网站：[www.cepc-global.com](http://www.cepc-global.com)

邮箱：[info@cepc-global.com](mailto:info@cepc-global.com)

