

# 齿轮成形工艺 CAE 解决方案



安世亚太科技股份有限公司

晏建军

2014 年 06 月

## 目 录

1. 齿轮的概述.....	3
1.1 齿轮的用途及分类.....	错误!未定义书签。
1.2 齿轮的制造工艺.....	4
2. 齿轮的关键工艺问题及其涉及的相关专业问题.....	4
3. 齿轮制造工艺的 CAE 需求分析.....	5
4. 齿轮制造工艺的 CAE 解决方案.....	6
4.1 齿轮的锻造成形工艺分析.....	6
4.2 齿轮的切削工艺分析.....	6
4.3 齿轮的粉末成形及烧结工艺分析.....	8
4.4 齿轮圈的环轧成形工艺分析.....	9
4.5 齿轮的铸造成形工艺分析.....	10
4.6 齿轮的热处理工艺分析.....	10
4.7 齿轮锻造模具强度分析.....	13
5. 安世亚太提供的齿轮制造工艺 CAE 解决方案.....	14
6. 安世亚太公司及技术支持.....	15
7. 齿轮相关行业国内典型用户.....	16

# 1. 齿轮的概述

## 1.1 齿轮的用途及分类

齿轮是轮缘上有齿能连续啮合传递运动和动力的机械元件。

齿轮在传动方面的应用非常广泛，作为整机设备的一个重要组件，其行业应用主要包括：（1）用于汽车手动变速箱（含重、中、轻、微），轿车变速箱，摩托车齿轮、工程机械换挡变速箱，大、中型农机变速传动的配套机构；（2）用于车辆驱动桥、主被动螺旋锥齿轮、直齿锥齿轮及轮边减速机方面；（3）第三，用于汽车、通用机械工业等通用变速箱领域；（4）第四，用于特殊、专用车轮传动方面。



图 1 齿轮传动系统

齿轮可按齿形、齿轮外形、齿线形状、齿轮所在的表面和制造方法等分类，按其外形分为圆柱齿轮、锥齿轮、非圆齿轮、齿条、蜗杆蜗轮；按齿线形状可分为直齿轮、斜齿轮、人字齿轮、曲线齿轮；按轮齿所在的表面分为外齿轮、内齿轮；按制造方法可分为铸造齿轮、切制齿轮、精锻齿轮、粉末成形齿轮等。



图 2 齿轮

## 1.2 齿轮的制造工艺

齿轮的制造工艺主要以切削和精锻工艺为主，另外还包括铸造和粉末成形工艺以及后续所进行的热处理工艺。

- 1、锻造成形工艺：
- 2、切削成形工艺
- 3、齿轮圈环轧成形工艺
- 4、粉末成形和烧结工艺
- 5、铸造成形工艺
- 6、热处理工艺

## 2. 齿轮的关键工艺问题及其涉及的相关专业问题

表 1 关键工艺问题涉及的相关专业问题

序号	工艺问题	涉及的相关专业问题
1	锻造成形材料填充、折叠、成形吨位、温度场	热-结构耦合、塑性成形问题
2	滚齿及插齿工艺切削力、温度场、切削屑、切削齿形等	热-结构耦合、摩擦、金属切削问题
3	环轧工艺成形尺寸、凹坑、截面变形、温度场等	热-结构耦合、塑性成形问题
4	粉末成形工艺成形密度、裂纹、成形力、温度场、摩擦力等	粉末材料、热结构耦合、摩擦及结构运动问题
5	粉末烧结、体积变化、残余应力、裂纹	热-结构、微观组织问题
6	铸造工艺填充不足、缩孔缩松、铸造应力、温度场等	流场、相变、热-结构耦合问题
7	热处理相转变、硬度、变形、渗碳深度、温度场等	微观组织、热处理、热-结构问题

8	模具强度、裂纹、磨损、结构优化	结构变形、强度、优化问题
---	-----------------	--------------

### 3. 齿轮制造工艺的 CAE 需求分析

齿轮的多种制造工艺及其模具设计所涉及的工业问题，以往的研发手段基本是在研发过程中进行不断“试模”和实验，这种靠经验式的方法不但延长了研发周期、增加了开发成本，而且对于出现的很多制造工艺问题也无法找到内在原因，对于新材料及新产品也需要长期的过程来积累加工经验，因此已不能满足现代高效的齿轮制造工艺需求。

齿轮的各制造工艺可以通过 CAE 技术实现快速试模，在研发过程的早期发现工艺设计、模具设计的缺陷和内在问题，优化成形工艺，降低制造成本，提高产品质量。

齿轮的 CAE 制造工艺分析需求包括：

#### 1、齿轮的锻造成形工艺分析

- 齿轮的锻造成形工艺分析主要包括预制毛坯的锻造分析（预制毛坯件用于切削加工）、齿轮的精锻分析、齿轮圈的环轧分析。

#### 2、齿轮的切削工艺分析

- 齿轮滚齿及插齿工艺分析

#### 3、齿轮的粉末成形和烧结工艺分析

- 齿轮粉末成形工艺分析
- 齿轮粉末成形后的烧结工艺分析

#### 4、齿轮圈环轧工艺分析

- 齿轮圈环形轧制工艺分析

#### 5、齿轮的铸造成形工艺分析

- 齿轮的铸造工艺过程分析，包括充型、凝固、冷却应力分析

#### 6、齿轮的热处理工艺分析

- 齿轮加工后的热处理分析，包括淬火、回火、调质、渗碳等分析

#### 7、齿轮锻造模具强度分析

- 齿轮模具强度、裂纹、变形及磨损分析

## 4. 齿轮制造工艺的 CAE 解决方案

### 4.1、齿轮的锻造成形工艺分析

齿轮的锻造成形工艺分析主要包括预制坯的锻造及齿轮精锻成形分析，齿轮的锻造成形工艺分析可实现：

- 通过锻造全过程模拟，获得齿轮形状及尺寸，有助于分析齿轮缺陷发生的原因；
- 获得锻造过程工件应力场、应变场及速度场分布；
- 分析材料流动规律及材料纹理流动现象；
- 预测成形缺陷，包括裂纹、凹坑、飞边、折叠、填充不足等；

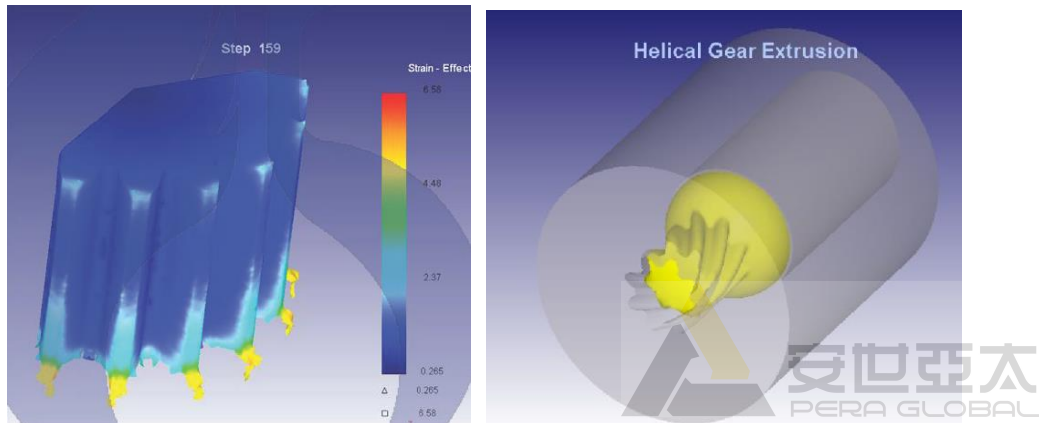


图 3 齿轮精锻成形

- 可优化工艺参数，包括成形力、成形速度、润滑方案、毛坯尺寸等；
- 分析及优化齿轮结构参数，降低成形吨位、避免成形缺陷；
- 获得锻造成形过程中金属微观组织相图、晶粒尺寸变化情况。



图 4 齿轮预制坯锻造成形

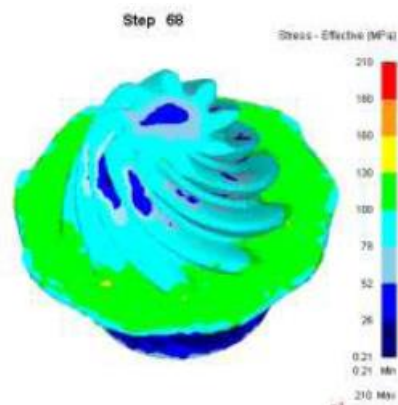


图 5 齿轮精锻等效力云图

### 4.2、齿轮的切削工艺分析

齿轮切削成形工艺主要是滚齿切削与插齿切削，齿轮切削工艺分析可实现：

- 实现机加工过程中的结构-热耦合分析，具有完整的热传输模型，包括热对流、热传导、热辐射、摩擦生热、塑性功转热、微观组织潜热；
- 可计算切削屑形状、切削温度场、切削液快速冷却过程；
- 可进行加工过程刀具控制力的计算；

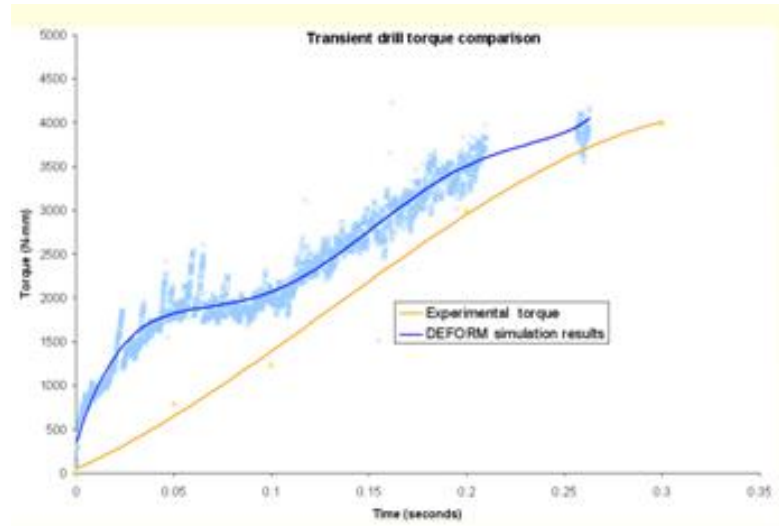


图 6 机加工切削力曲线

- 可进行刀具的磨损、疲劳寿命分析；
- 可进行刀具的应力应变及强度分析；
- 可优化刀具结构及加工工艺参数，包括进给量、切削速度及深度等；
- 可进行机加工后机车卸载后的工件变形及残余应力分析；

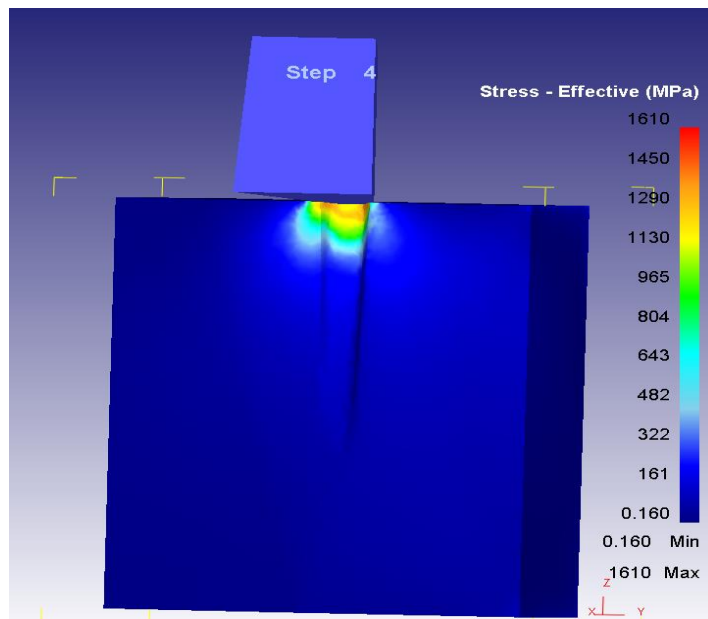


图 7 齿轮滚齿分析



### 4.3、齿轮的粉末成形及烧结工艺分析

齿轮粉末成形数值模拟可实现不同材料、不同装填密度等状态下的压实成形工艺的仿真分析，获得成形形状预测、应力应变分布、成形密度分布、成形载荷力、模具强度及成形裂纹预测，齿轮粉末成形及烧结工艺分析可实现：

- 考虑粉末物质的多种材料特性参数，包括粉末材料流动应力特性、弹性特征、温度敏感性的热相关数据、初始松装密度等，独到的粉末材料模型可反映压实过程材料的流动情况。
- 实现初始均匀松装密度、不同部位不同松装密度，实现单组或多组模具压实、浮动压实成形；
- 提供模内粉末流动现象，分析粉末流动规律；
- 获得齿轮压实成形内部各应力应变场云图，预测成形缺陷；
- 可优化工艺参数，包括压实吨位、初始松装密度、压实速度、润滑方案等；
- 获得压实过程形状尺寸及各部位密度分布，评估压实质量；

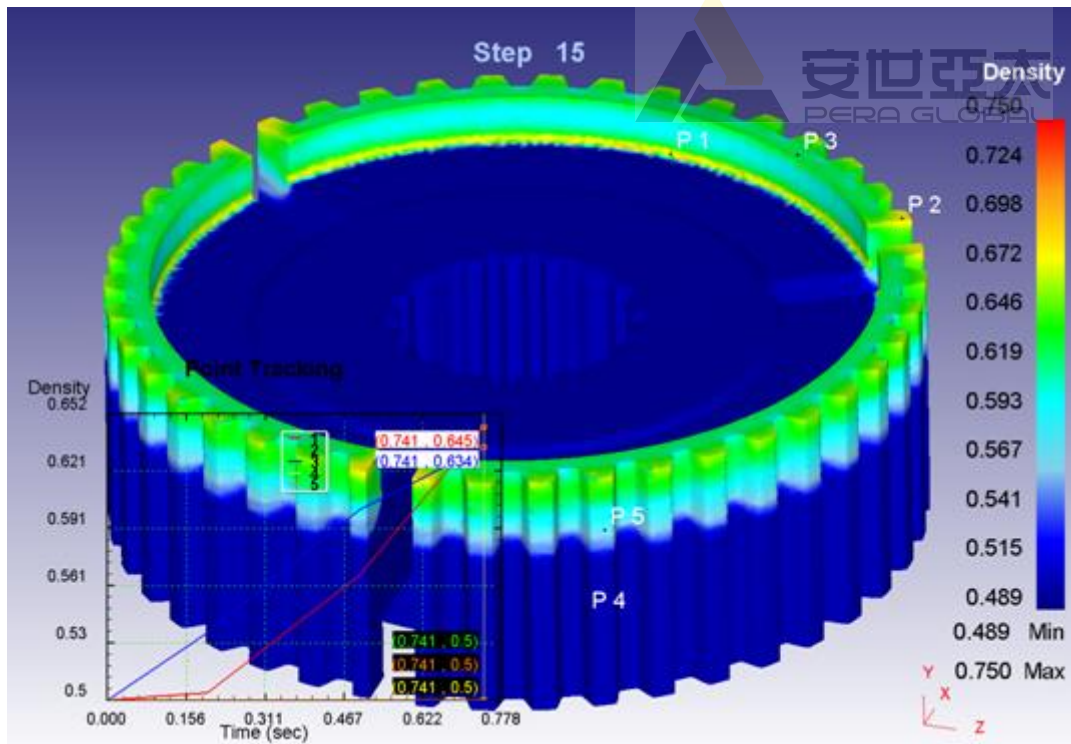


图 8 齿轮粉末成形密度云图



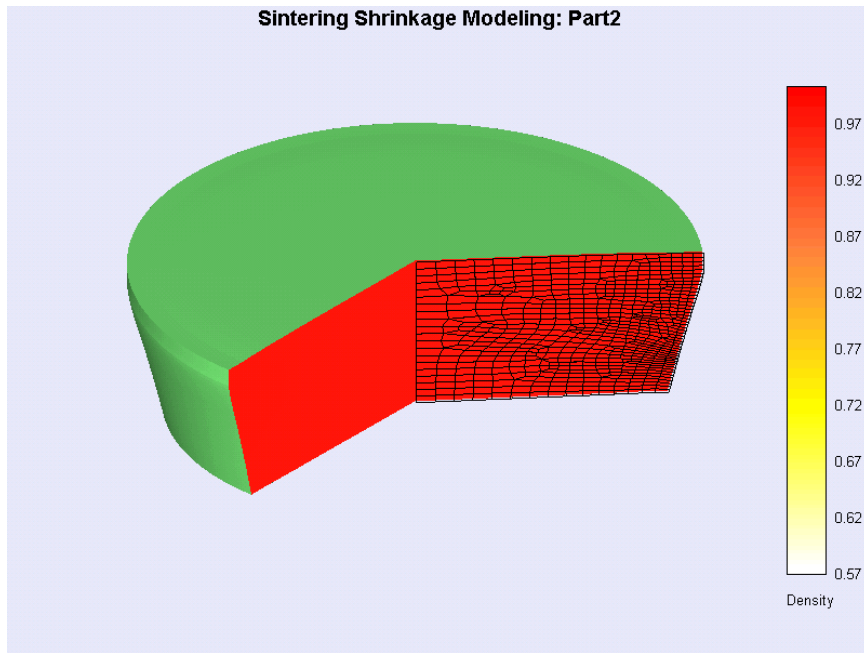


图 9 粉末烧结分析

#### 4.4、齿轮圈环轧工艺分析

齿轮圈环轧成形工艺分析可实现：

- 可进行轧制及温度的耦合分析；
- 可进行环轧变形过程模拟、模具应力及磨损分析；
- 预测环轧过程中出现的折叠、凹坑、蝶形、壁厚不均、压扁、椭圆、锥度等成形缺陷；
- 获得轧制温度场、应力应变、形状尺寸、材料损伤等结果

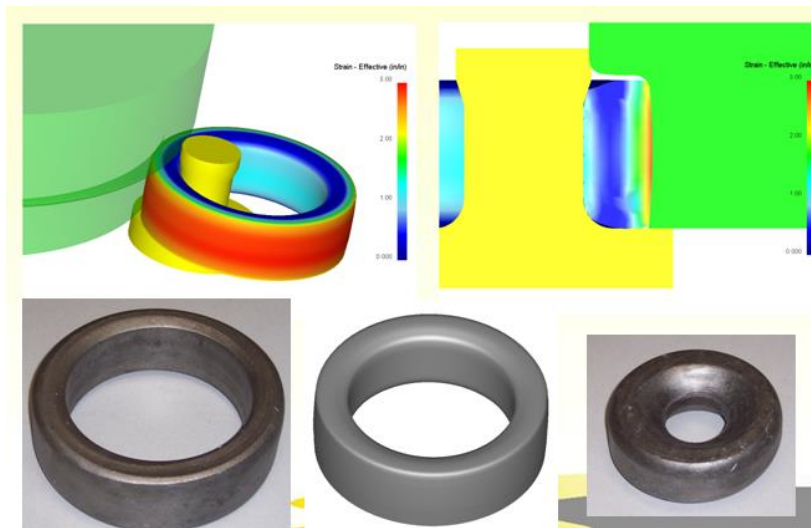


图 10 齿轮圈环轧成形分析

#### 4.5、齿轮铸造成形工艺分析

齿轮铸造成形工艺分析包括金属液充型过程、凝固过程和冷却应力计算过程的分析，可实现：

- 浇注及压铸齿轮成形工艺过程的金属液充型、凝固和冷却应力分析；
- 浇铸系统、排气孔和溢流槽的位置及个数优化；
- 冒口的位置及大小优化；
- 冷铁的布局优化；
- 模具冷却方案优化；
- 压铸套筒温度及寿命预测；铸造缺陷预测，包括，包括缩松、缩孔、浇不足、冷隔、卷气、气孔、夹杂、热裂、粘砂、收缩等；
- 可计算合金氧化膜的卷入及破碎、熔液压力及氢浓度，铝合金微孔缺陷的定量推定；
- 考虑球墨铸铁奥氏体的凝固收缩、球墨体积膨胀、石墨颗粒尺寸的变化

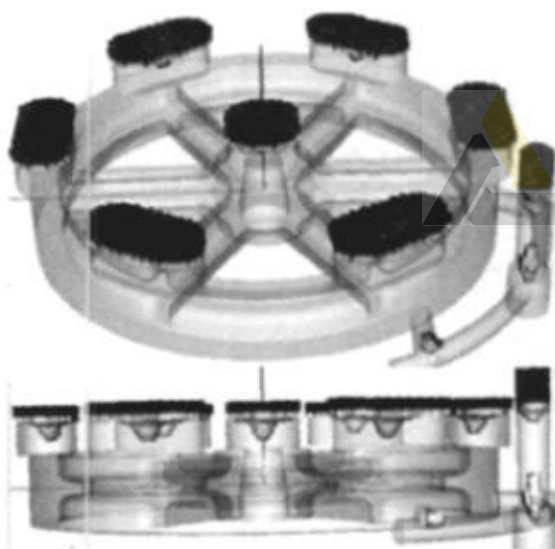


图 11 铸造齿轮缩孔、缩松位置

#### 4.6、齿轮热处理工艺分析

齿轮的热处理工艺，主要包括奥氏体化，渗碳，淬火，回火。热处理阶段中，常会出现热处理过程相变过程无法监控，渗碳深度及碳含量无法确定、淬火马氏体转变率不能准确控制、工件发生淬火扭曲变形、残余应力过大或分布不合理、淬火硬度不够等缺陷，而通过传统“试错”及经验的方式并不能准确和科学化、数据化地分析热处理工艺的合理性，造成了金属的热处理工艺失败，延长了生产周期。齿轮工艺分析可对热处理整个工艺过程进行模拟分析，通过直观分析云图

及各种数据判断齿轮在热处理过程中产生的缺陷及工艺设计问题，达到良好的设计需求。

➤ 复杂热处理工艺模拟过程的实现

可进行齿轮复杂热处理工艺的流程设置，包括炉内加热的奥氏体化，渗碳工艺的环境碳含量，淬火介质的水、油、碱液，各工艺阶段的保温及冷却时间、温度等。通过计算分析获得热处理过程各阶段、各时刻的产品外部及内部变化情况。

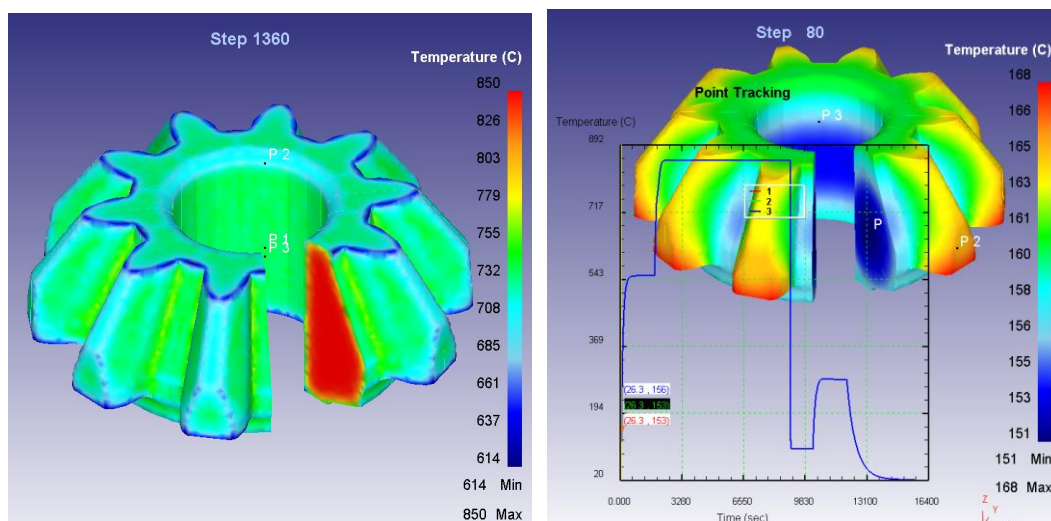


图 12 齿轮热处理温度场

➤ 热处理过程相变含量模拟

热处理中，通过相变动力学方程进行各相在该过程中的转变情况，包括初始阶段的珠光体+贝氏体到奥氏体的转变，奥氏体向马氏体的转变，马氏体向低碳马氏体的转变，马氏体到渗碳体+铁素体的转变等，计算不同热处理阶段、不同时刻的各相转变百分比及相得分布，帮助用户更合理地设计工艺保温时间及温度值。

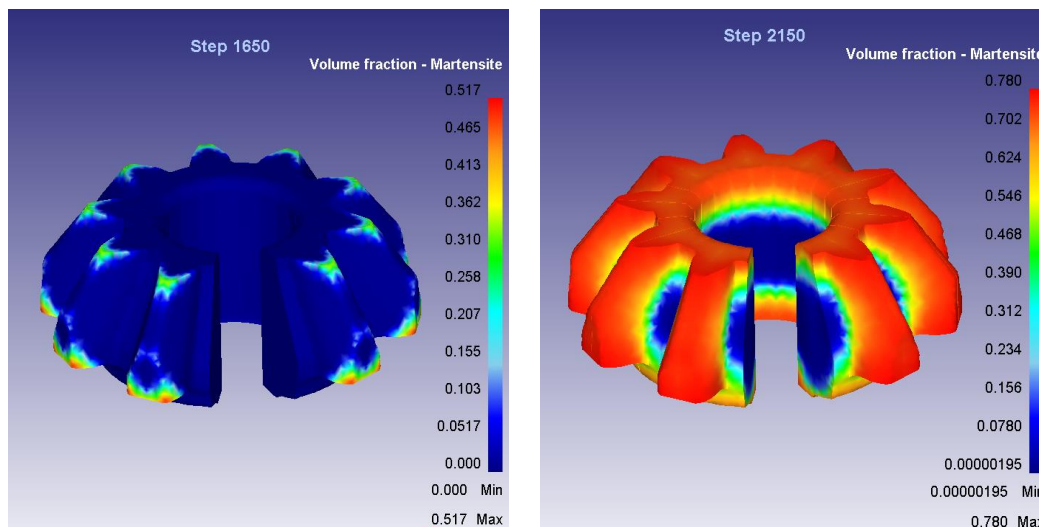


图 13 马氏体转变百分含量分布

➤ 渗碳及碳含量模拟

可模拟金属热处理渗碳过程中碳的内部扩散、环境碳的固溶渗透，获得渗透过程中碳的渗透深度、碳含量及分布情况，更好地优化渗碳时间、渗碳温度等工艺参数。

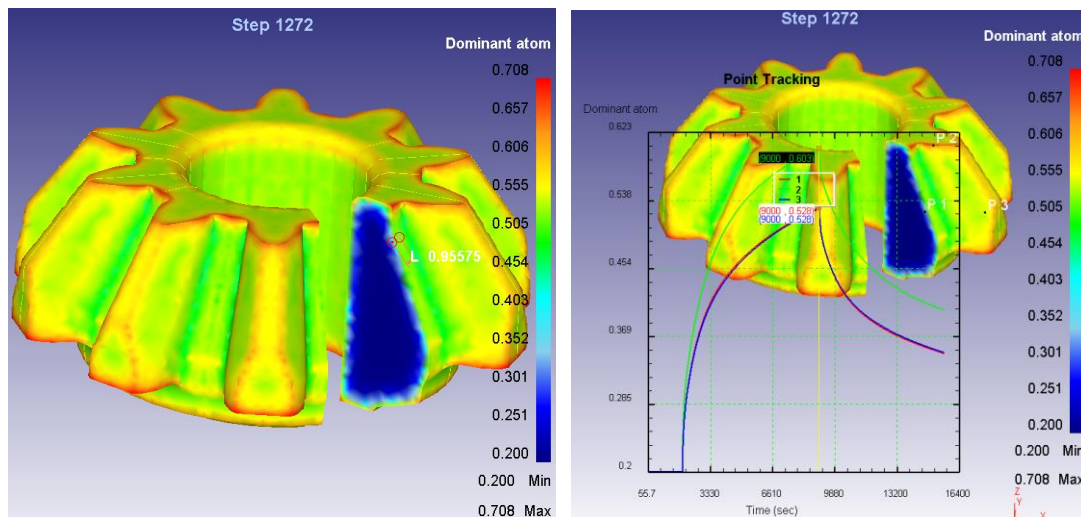


图 14 齿轮渗碳深度分析

➤ 热处理硬度模拟

热处理过程中不同相具有的硬度不同，可计算热处理各阶段金属产品内部及表面硬度的变化和数值，同时可考虑渗碳后表面碳含量对淬火硬度的影响。

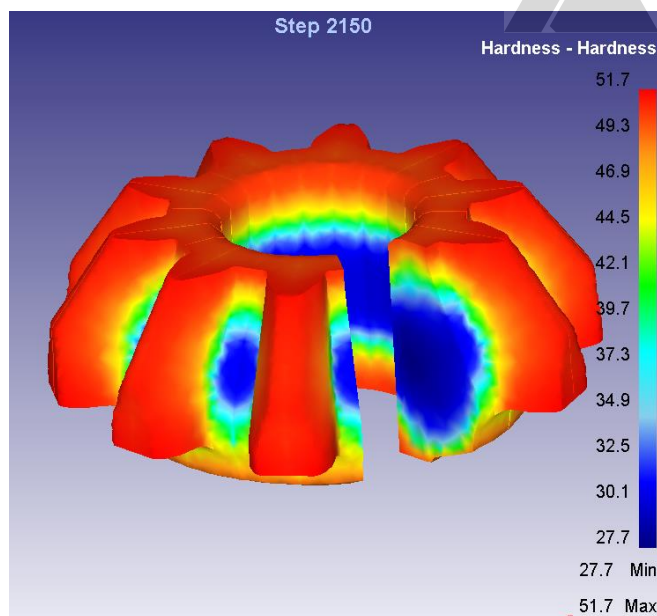


图 15 齿轮淬火后硬度分布

➤ 热处理变形模拟

齿轮热处理分析可同时考虑热处理过程中由热膨胀、相变塑性、相密度及相转变所造成的尺寸及体积变化情况，从而分析热处理过程发生的形状扭曲，体积膨胀等热处理缺陷，对于齿轮的变化差异可精确到微米级别。



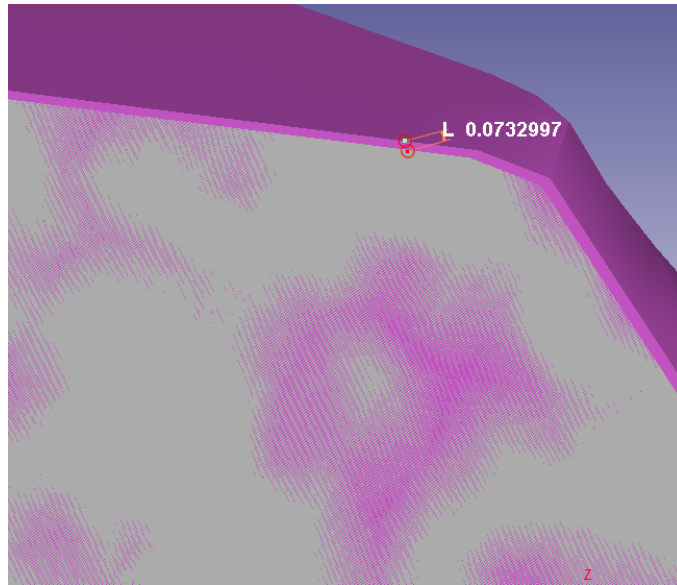


图 16 齿轮热处理前后变形

➤ 热处理残余应力模拟

齿轮热处理残余应力计算包括热应力及组织应力的耦合结果，采用的弹塑性有限元模型可完全计算金属热处理过程各个时刻及淬火之后的残余应力分布情况，包括笛卡尔坐标系及圆柱坐标系下等效应力、最大主应力、环向应力、轴向应力及径向应力及其拉压应力情况，进行热处理残余应力的优化和淬火产生裂纹的判断依据。残余应力的计算及优化，可避免金属热处理裂纹及增强产品的疲劳使用寿命，提高齿轮热处理后的产品质量。

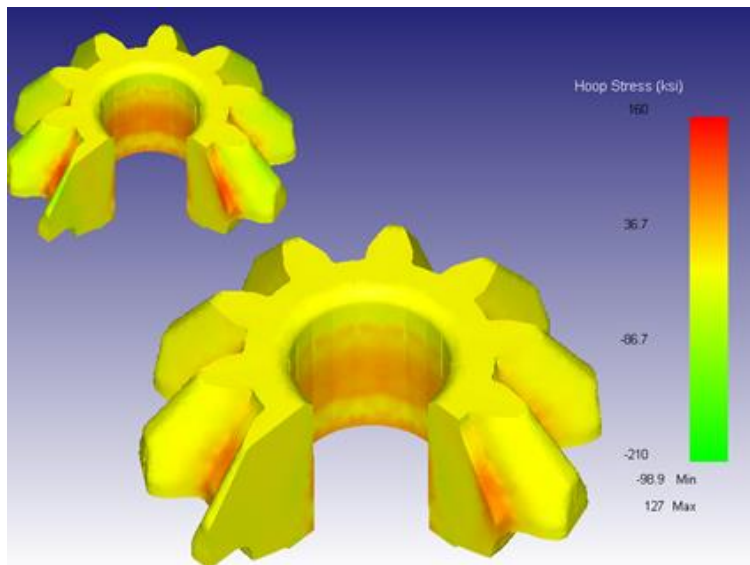


图 17 齿轮热处理残余应力分析

4.7、齿轮锻造模具强度分析

齿轮锻造成形过程中，模具受到较大成形力作用，可能会使模具产生局部集

中应力，造成裂纹或低周疲劳断裂，模具产生较大弹性变形或者磨损，齿轮模具分析可实现：

- 齿轮锻造模具在齿轮成形过程中的应力分析；
- 模具热装及组合模具应力分析；
- 模具磨损分析；
- 模具弹性变形分析；

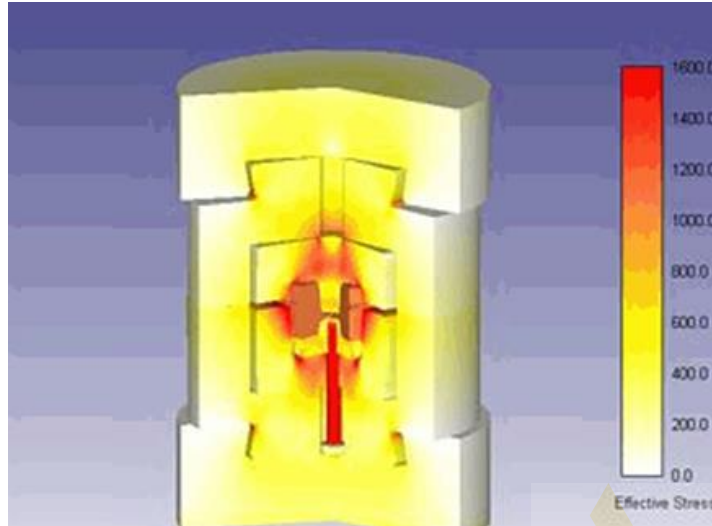


图 18 齿轮模具应力分析



## 5. 安世亚太提供的齿轮制造工艺 CAE 解决方案

根据齿轮的制造工艺特点和 CAE 分析需要，安世亚太科技股份有限公司结合自身多年的 CAE 实施经验，为齿轮的制造工艺提出了全面的 CAE 解决方案：见下表 2。

表 2 安世亚太提供的齿轮制造工艺 CAE 解决方案

序号	工艺问题	CAE 解决方案
1	锻造工艺材料填充、折叠、成形吨位、温度场	锻造工艺模拟技术 DEFORM3D
2	滚齿及插齿工艺切削力、温度场、切削屑、切削齿形等	切削工艺模拟技术 DEFORM Machining
3	环轧工艺成形尺寸、凹坑、截面变形、温度场等	环轧工艺模拟技术 DEFORM Ringrolling

齿轮成形工艺 CAE 解决方案

4	粉末成形工艺成形密度、裂纹、成形力、温度场、摩擦力等	粉末成形模拟技术 DEFORM3D
5	粉末烧结、体积变化、残余应力、裂纹	粉末产品烧结模拟技术 DEFORM3D
6	铸造工艺填充不足、缩孔缩松、铸造应力、温度场等	铸造工艺过程模拟技术 JSCAST
7	热处理相转变、硬度、变形、渗碳深度、温度场等	热处理工艺模拟技术 DEFORM HT
8	模具强度、裂纹、磨损、结构优化	模具强度分析模拟技术 DEFORM3D

具体产品功能与特色见安世亚太科技股份有限公司官网：  
[www.peraglobal.com](http://www.peraglobal.com) .

## 6. 安世亚太公司及技术支持

安世亚太科技股份有限公司一直是国内最大的工程仿真技术提供者和技术服务商，为金属成形软件客户提供全方位本地服务和技术支持。

### 安世亚太及其服务支持能力：

- 安世亚太在中国有 12 个分公司，17 个技术支持中心，500 多名员工，其中一半以上是专职技术人员；
- 有成功的商业用户 1400 多家，大学版用户 800 多家；
- 超过 170 多所大学开设软件课程，每年有最少 16000 名受过正规产品培训的大学生走上工作岗位；
- 在软件本地化方面也走在最前列，自 1998 年就率先在国内推出全套中文手册，目前所有的分析过程指导手册和高级培训手册都有相应的最新版汉语版本。

在贵公司软件调研阶段，安世亚太公司提供就近的服务，包括：

- 提供方案、解释方案；
- 探讨最佳配置；
- 解释安世亚太软件所有模块功能以供选择；



- 负责建议硬件配置。

在贵公司成为安世亚太正式用户之时起,安世亚太公司提供全方位本地服务和技术支持, 包括 (ISO9001 认证的服务方式):

- 指导并完成用户所购软件的安装;
- 建立详细的用户信息档案;
- 为用户提供各种方式的技术支持, 包括:
  - 软件维护;
  - 操作指导;
  - 解决工程技术问题的技术路线指导;
  - 服务方式:
    - E-mail (24 小时);
    - 电话 (工作日);
    - 用户现场;
    - 定期发放用户跟踪表, 定期的用户回访;
    - 提供初级、高级培训;
    - 免费提供安世亚太相关专业杂志, 年会论文集;
    - 有偿提供项目导航、工程项目咨询及软件定制等服务



## 7. 齿轮相关行业国内典型用户

- 陕西法士特齿轮有限公司
- 太平洋精密锻造有限公司
- 湖北三环锻造
- 北京理工大学机械系
- 厦门大学机电系
- 东风粉末冶金厂
- .....