

# 基于模拟技术的自由锻典型问题的研究

刘寒龙

北京创联智软科技有限公司 100027

**【摘要】**本文采用锻压软件模拟的方法优化大型自由锻实际锻造工艺。使用数值模拟技术进行工艺优化需要了解自由锻技术的特点，包括在有限空间内为大铸锭锻造选择合适的设备，减少火次，减少铸锭体积使锻件形状与最终形状更为接近等。在产品质量控制方面，包括铸造缺陷例如缩孔和锻造过程中的孔洞闭合问题，也是数值模拟可以解决的问题。目前通过数值模拟还可以预测多工步锻造过程中晶粒度变化以及晶粒再结晶。本文还介绍了某型号核反应设备法兰锻造成形的工艺优化过程。最后介绍大型转子锻造和热处理过程中应力的优化过程。

**【关键词】**锻造模拟, 自由锻, 孔洞闭合

## 前言

自由锻技术是在锻造的上下砧之间直接对坯料施加外力，使得坯料产生变形而获得所需几何形状和内部质量的锻件的加工方法。在铸造过程中可能产生缩孔缩松，通常锻造过程中人们关心孔洞闭合问题，这取决于很多因素，如局部位置的变形量，孔洞的大小及位置，模具和坯料的接触条件，砧子的形状和自由锻的锻压顺序等。

## 1 自由锻过程中孔洞闭合研究和材料属性的改变。

自由锻中关注的一个问题是坯料中心的应变以及铸造缺陷的闭合。

在第一个例子中我们研究初锻对于铸锭中心的铸造缩孔的影响。铸锭缩孔分布在坯料的中心，坯料长2000mm，直径为1000mm。最大的缩孔直径为50mm，最小的直径5mm。

自由锻包括2个工序，

第一工序，四次初锻高度减少300mm

第二工序，四次锻打高度减少300mm

坯料内部缺陷的位置如下图1所示。

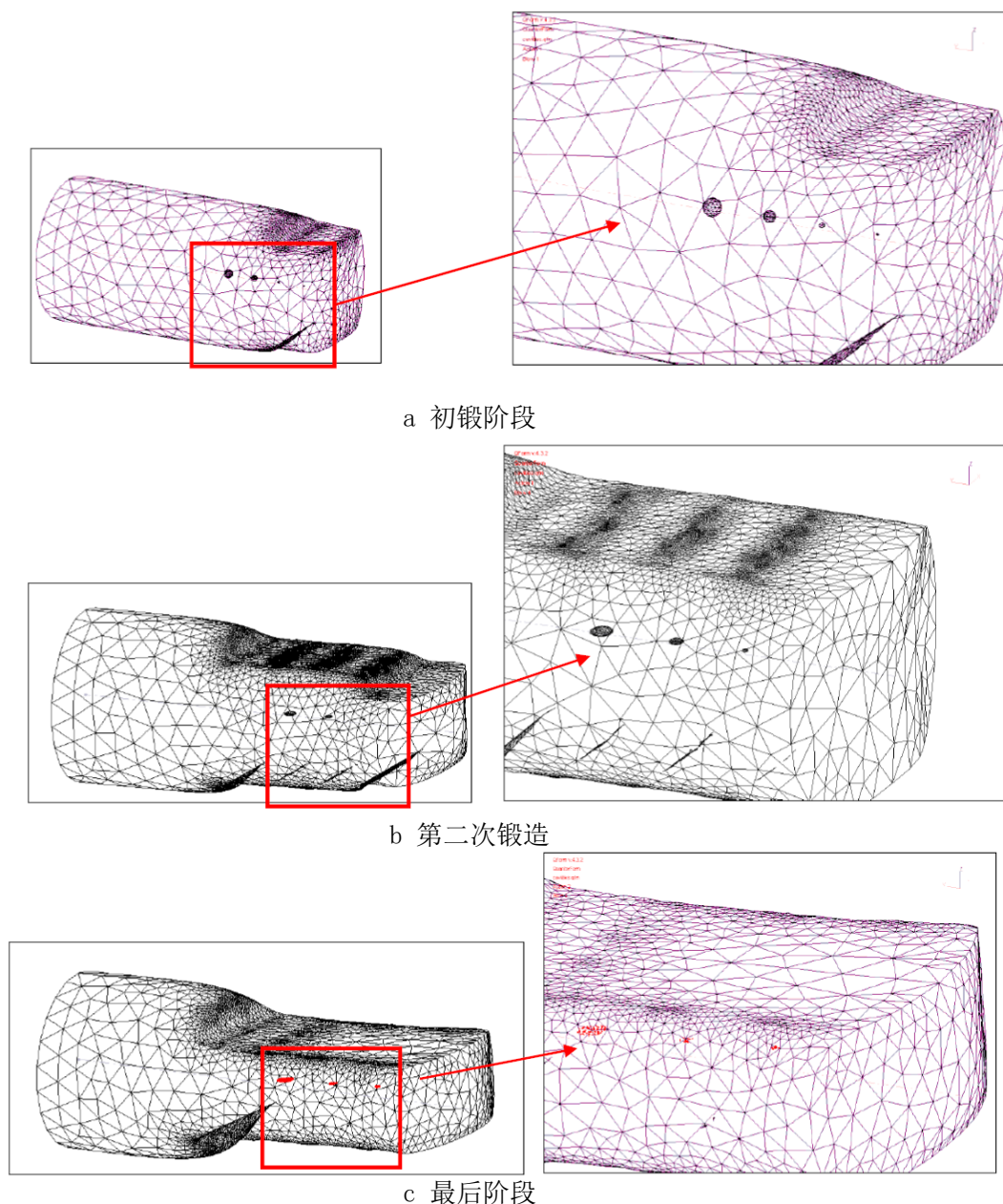


图1 坯料内部缺陷的位置

a 锻压过程开始时，内部缩孔的分布情况。

b 中间过程。

c 最后阶段，闭合了孔洞用红点表示。

图1显示坯料中心缩孔闭合的顺序。软件通过计算并使用红点标记指示出闭合的情况。在本次例中所有的孔洞在最后都闭合了，计算结果与实际生产相一致。

在设备方面，大型液压机的液压系统故障是常见的问题<sup>[1]</sup>。它会导致工件生产周期延长而导致成本增加，在图2中显示了1994年50MN液压设备在锻压35号钢时液压系统的损坏情况，类似的在2004年在35MN液压机在锻压35号钢时液压缸的底部发生损坏。更早之前30MN和70MN液压机在生产火车轮的过程中也发生过这种问题。损坏通常是由疲劳引起发生在液压缸底部与侧壁连接处。

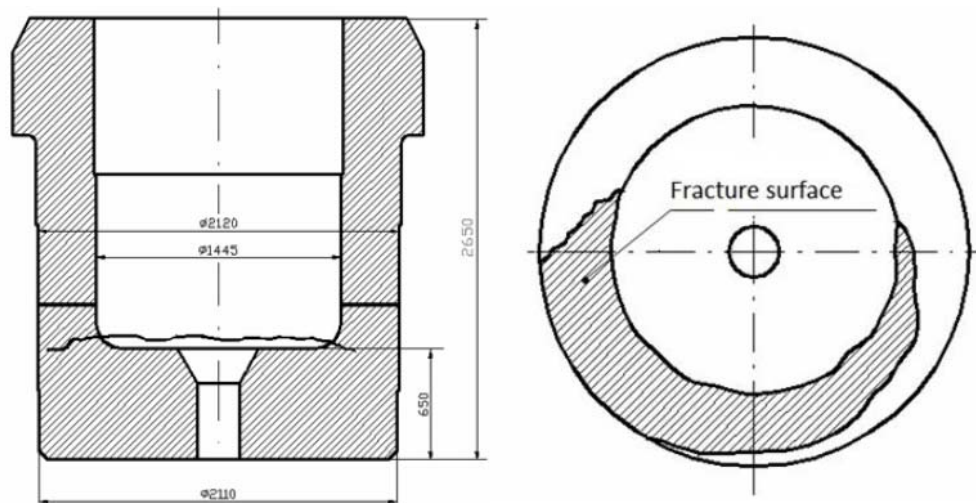


图2 50MN液压机缸体损坏

在液压缸底部拐角处的拉应力显示零件强度对于锻造35号钢来讲要低很多。我们首先假定液压系统寿命较短的原因是铸锭存在缩孔。铸件缩孔在锻造过程中从中心位置移动到裂纹位置。使用模拟技术可以验证这种假设<sup>[2]</sup>。锻造条件：形状为圆桶工件，材料为35号钢，直径1280mm，高2500mm预热到1250° C，墩粗的锻造速度为35mm/s没有润滑剂。墩粗到为860mm。在图3中显示晶粒的流动方向(左图)和应变分布(右图)。缸体的轮廓在云图中用线框表示。

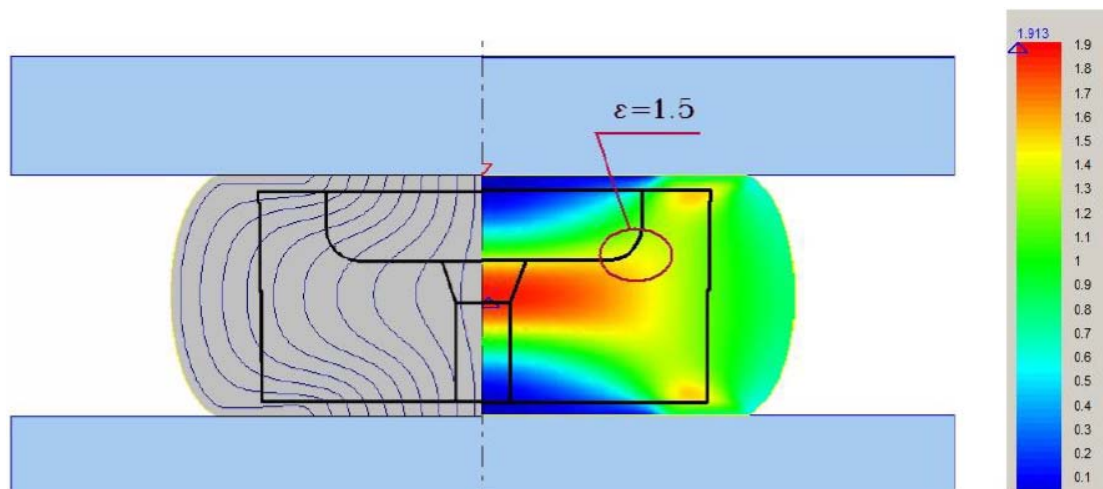


图3 35MN液压机的缸体圆角区域的流线分布，右侧为应变分布。

在加工零件的底部圆角位置流线垂直于零件表面。这会使材料的疲劳强度降低。最大变形区域是中心位置此处应变  $\epsilon = 1.9$ ，而缸体圆角处的应变  $\epsilon$  仅为1.5。因此液压缸的圆角位置在这种传统工艺条件下可能会出现孔洞未闭合的现象。这也意味着孔洞可能引起在圆角处的疲劳强度降低。经过标准循环载荷疲劳试验验证了这种猜测是正确的<sup>[3]</sup>。在缸体的中心疲劳强度是230MPa同时在圆角处的疲劳强度是165MPa。

图4是一种改进的自由锻工艺，过程包括：从直径1380mm长2830mm墩粗到直径1950mm，拔长到直径1280mm，截断为长2500mm，最后墩粗到高度为860mm。通过QForm模拟结果显示在

关键位置的应变要比传统工艺得到的应变高7倍，并且分布均匀。在整个锻压变形过程中考虑坯料上的孔洞缺陷。图5显示了锻压过程中的孔洞闭合情况的结果。

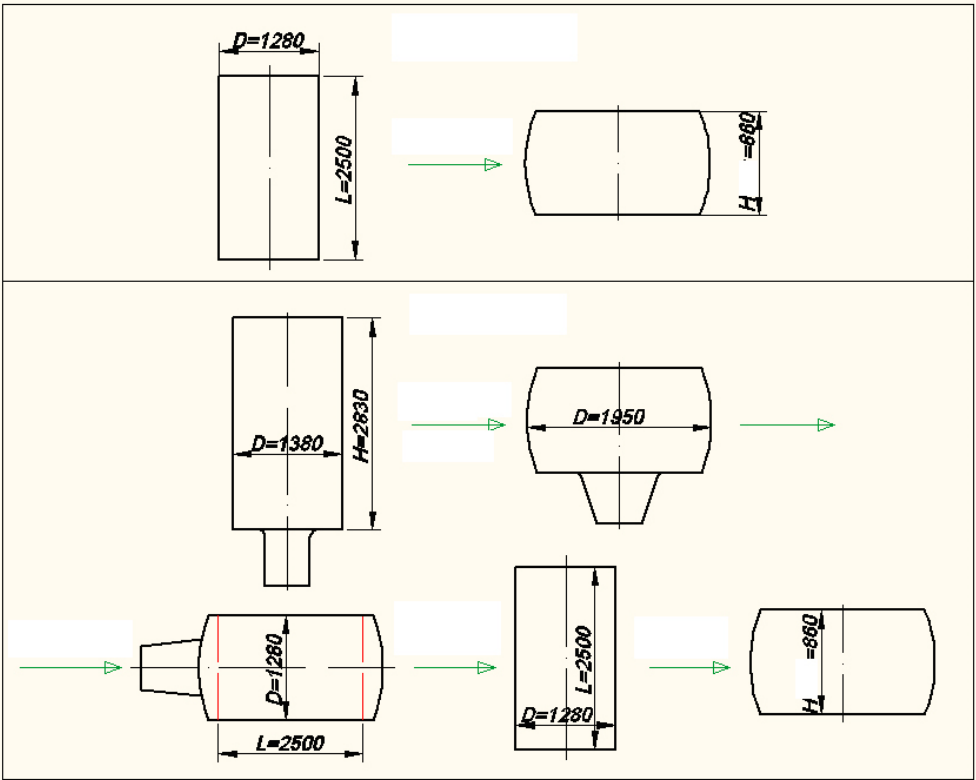
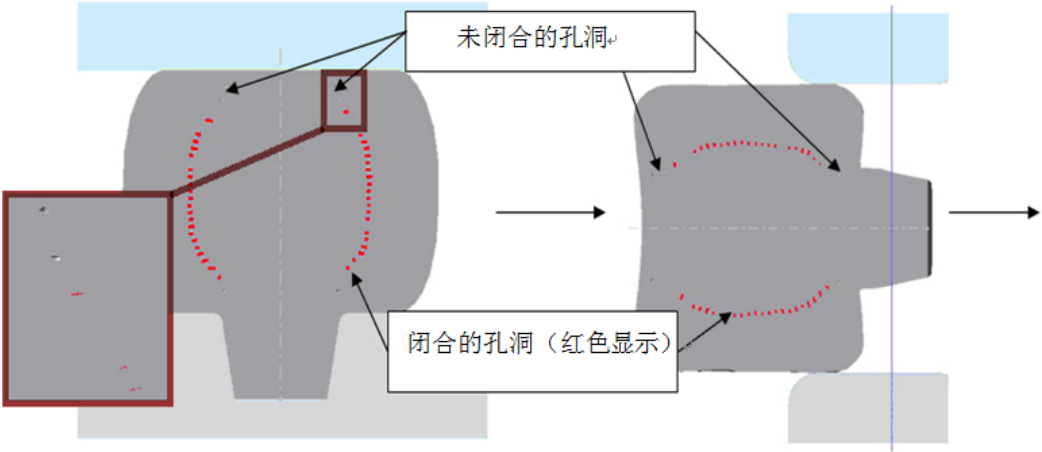


图 4 生产液压缸的锻压工艺 a 传统方法 b 新工艺



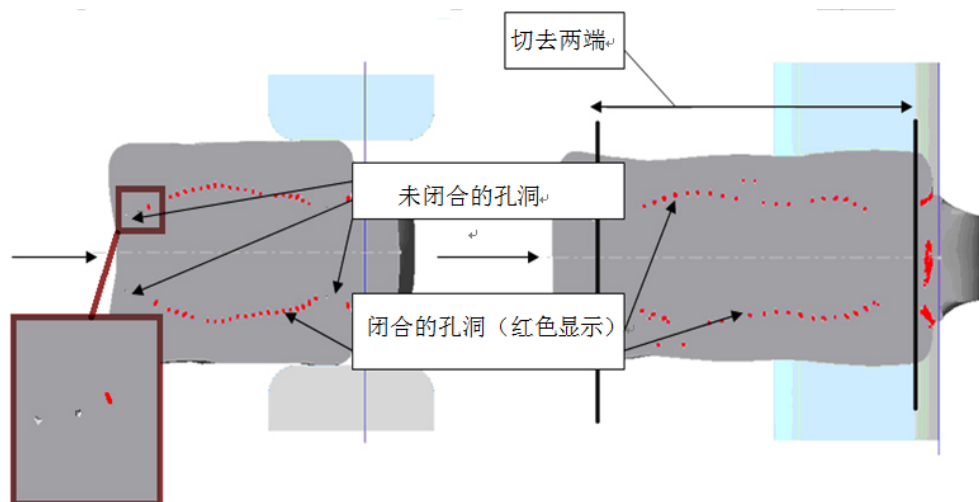


图 5 液压缸的锻压过程中的孔洞闭合现象分析结果

使用模拟方法优化液压缸自由锻工艺是效率非常高的一种方法。计算出的材料流动和载荷也可以用来为制定锻压工艺提供参考作用。图 6a 显示在核设备 VVER-1500 的筒形底部冲出直径为 850mm 的孔的过程。图 6b 显示实际生产中的图片。

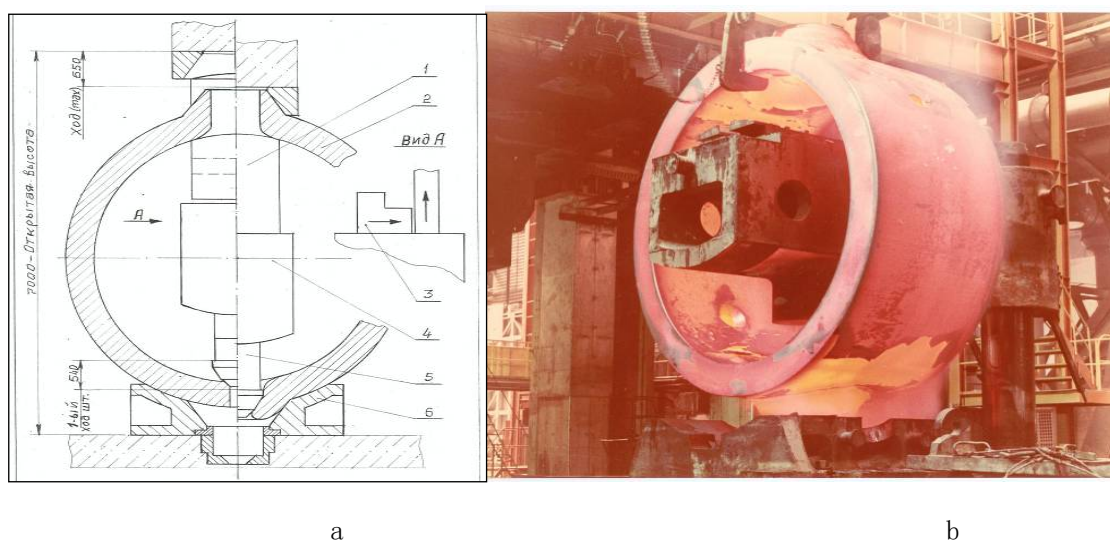


图 6 a 冲孔工艺过程图

b 实际实现过程

本次研究计算的目的是找到合适的冲头形状,可以使用最小的载荷来得到接近最终零件的形状, 下图 7 是使用两种不同冲头的冲孔情况。



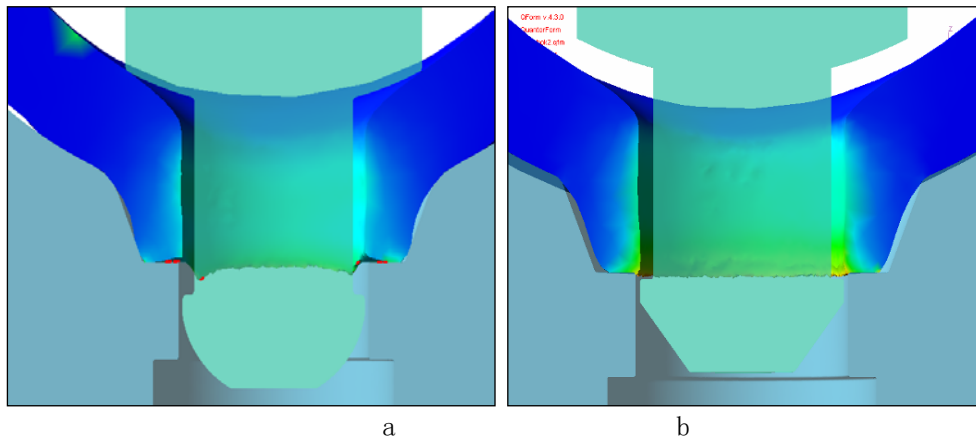


图 7 两种不同冲头的冲孔情况 a 使用球形冲头；b 使用锥形冲头

模拟结果显示使用球形的冲头可以使用较小的载荷情况下得到接近最终零件的形状。

## 2 转子加热的实验研究和模拟仿真

与乌克兰的 EMSS 公司合作研究转子热处理之前在气氛炉内的加热过程。这项研究包括工业实验和 QForm 数值模拟。加热时间接近 50 个小时。此次优化加热工艺的目的在于减少工艺时间来节省大量的燃气消耗。此次研究包括

- 使用热电偶测量转子在加热过程中不同位置的温度变化。
- 对于大型锻件的加热模拟需要精确的边界条件。

对于气氛加热 QForm 采用了以下的边界条件：炉内环境温度变化曲线，热传导系数和材料的辐射系数随环境温度的变化曲线。图 8 显示了转子材料 30CrMoNiV5-11 在加热过程中热点偶的位置分布。红色标记 1-6 标示出热电偶的位置，4，5，6 在转子表面，2 和 3 在转子内部，同时炉内的气体温度也被测量记录下来。

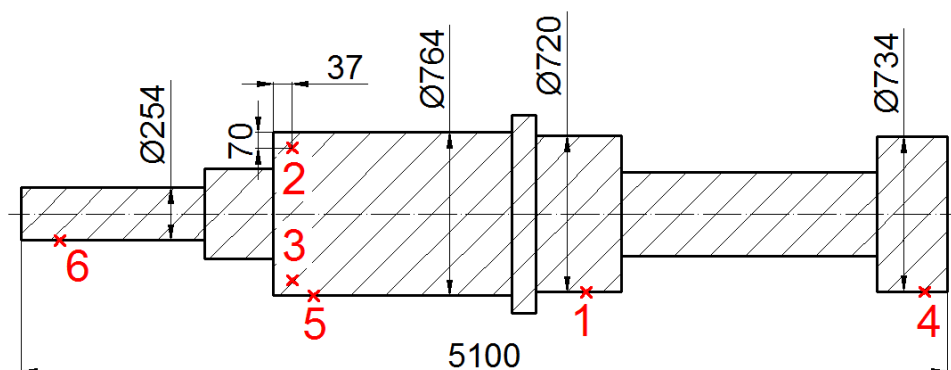


图 8 30CrMoNiV5-11 转子上热电偶的分布。红色 1-6 标记了热电偶的位置

下图 9 是在气氛炉内和 2, 5 热电偶位置的温度随时间变化的曲线

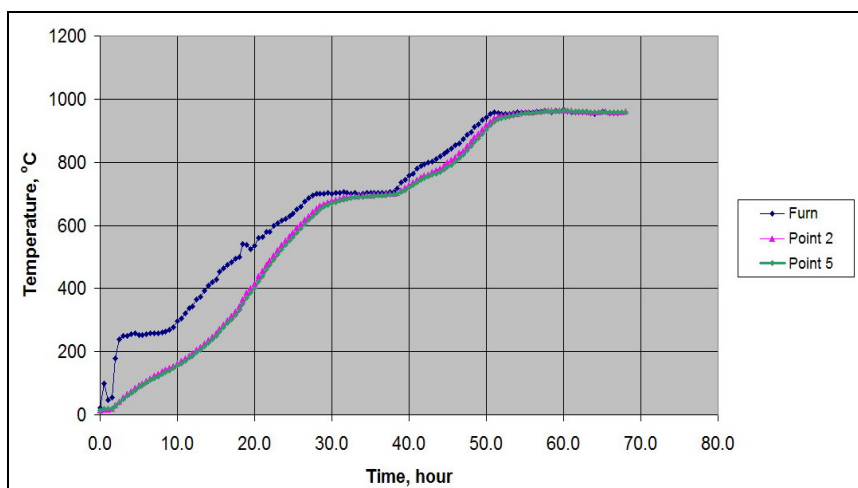


图9 气氛炉和热电偶2和5位置的温度变化曲线

在一些技术文献中，对于大型锻造钢零件推荐热传导系数  $\alpha = 11 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$  辐射系数  $e = 0.5$ 。通过实验结果与模拟结果的相互比较研究发现  $\alpha = 7 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$  和  $e = 0.43$  更接近实际。

### 3 低合金 NiCrMo 钢的热处理模拟

对于大型转子锻件和高强马氏体-贝氏体钢，数值模拟应用很广泛，我们可以预测钢的微观组织和晶相变化。这些材料经常进行锻后的热处理，对零件性能的影响很大。整个锻造工艺的设计需要考虑多种因素相互的影响，包括钢的成分，温度时间变化曲线，金相转变，奥氏体状态，冷却条件，微观组织和热应力属性。

热处理模拟中材料的微观组织数据和材料属性非常重要，同时还包括材料的TTS和TTT曲线，回火或淬火温度变化曲线等条件。这些重要的信息可以查找参考技术文献和实验研究<sup>[4]</sup>的结果。所有的图表都是在各自限定条件下的验证的结果。

这个模型除了显示NiCrMo耐热钢回火过程，还显示此过程中复杂的晶相转变过程。

- 确定各相组织的比例与 $t_{8/5}$ 的关系，包括铁素体，贝氏体，珠光体，马氏体和残余奥氏体。
- 确定维氏硬度与 $t_{8/5}$ 的关系。
- 确定硬度与淬火温度的关系。

对于NiCrMo低合金钢需要的输入数据如下表1所示。

表 1: NiCrMo 低合金元素的含量，奥氏体转变温度( $T_A$ )，冷却参数 ( $t_{8/5}$ )，回火温度( $T_{temp}$ )

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Al	$T_A$	$t_{8/5}$	$T_{temp}$
---	----	----	----	----	----	---	----	-------	-----------	------------

	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[° C]	[s]	[° C]
最小	0.18	—	0.15	0.50	0.30	2.2	—	—	820	10	200
最大	0.42	0.40	0.70	2.00	0.70	4.0	0.20	0.05	1050	10 <sup>5</sup>	700

输出结果是各晶相的数量变化与  $t_{8/5}$  的关系，图 10 中是两种不同的元素含量下微观组织成分和转化曲线，在相同的冷却条件下碳和镍的元素含量影响贝氏体的开始转变点和增长。

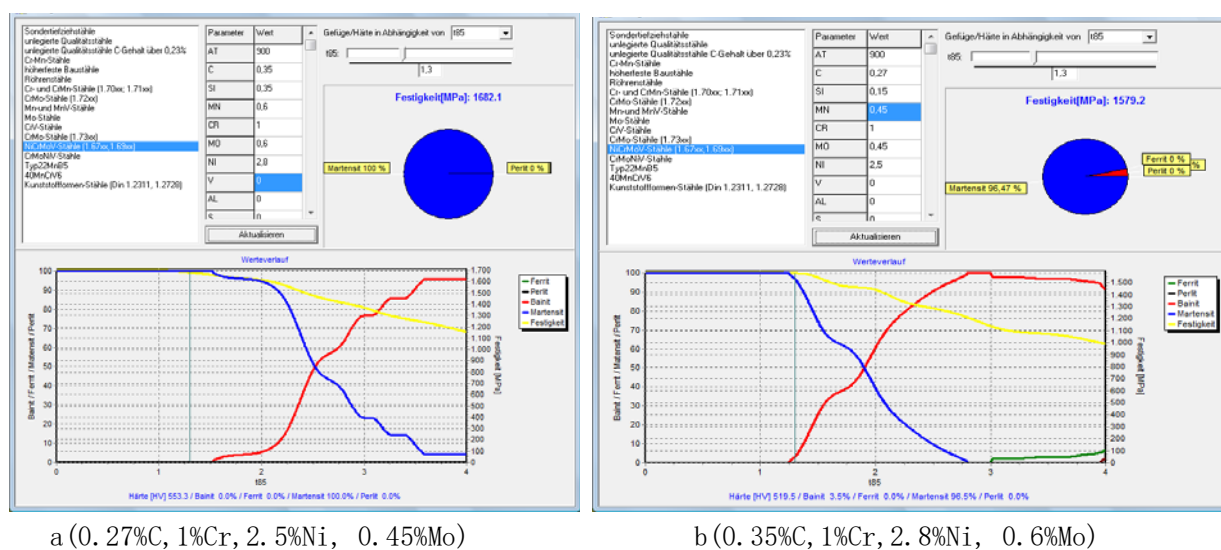


图 10 NiCrMo 低合金钢的各晶相组成的变化

下面是一个对BS S154钢航天叉形零件热处理的例子，如图11，分析元素组成见表2.

表2 BS S154航天叉形零件的元素组成

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
最小值	0.27	0.15	0.45	0.50	0.45	2.30
中间值	0.30	0.25	0.60	0.70	0.50	2.50
最大值	0.35	0.35	0.70	0.80	0.65	2.80



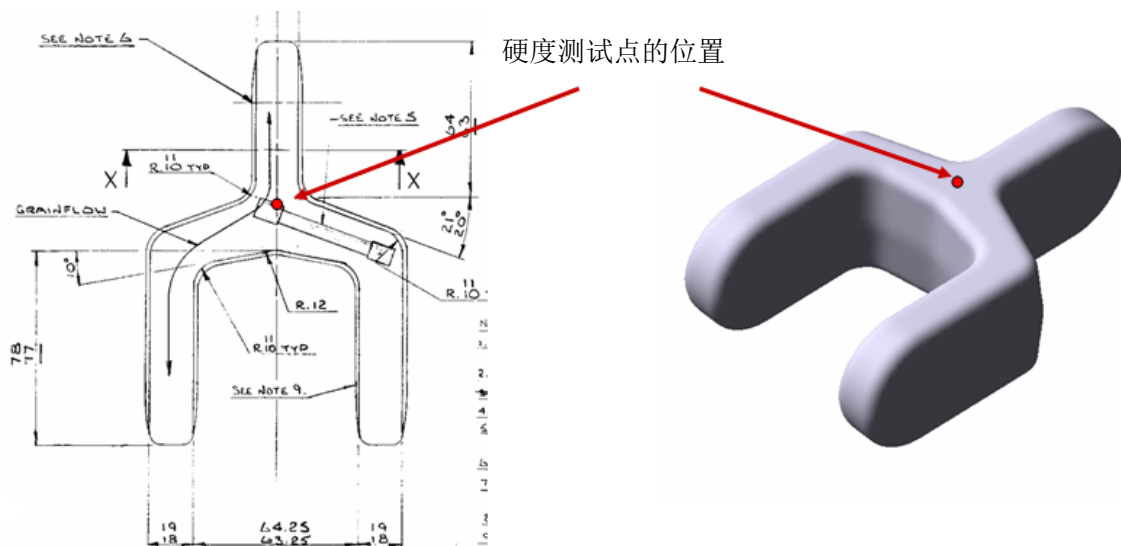


图11 锻件模型

叉形锻件在850℃锻后退火2-4小时，然后在油中冷却，紧接着在630℃回火3-6小时。

使用有限元模拟软件QForm与表2中的元素含量可以预测微观组织含量和硬度。图12显示模拟结果中的马氏体含量和表面硬度。

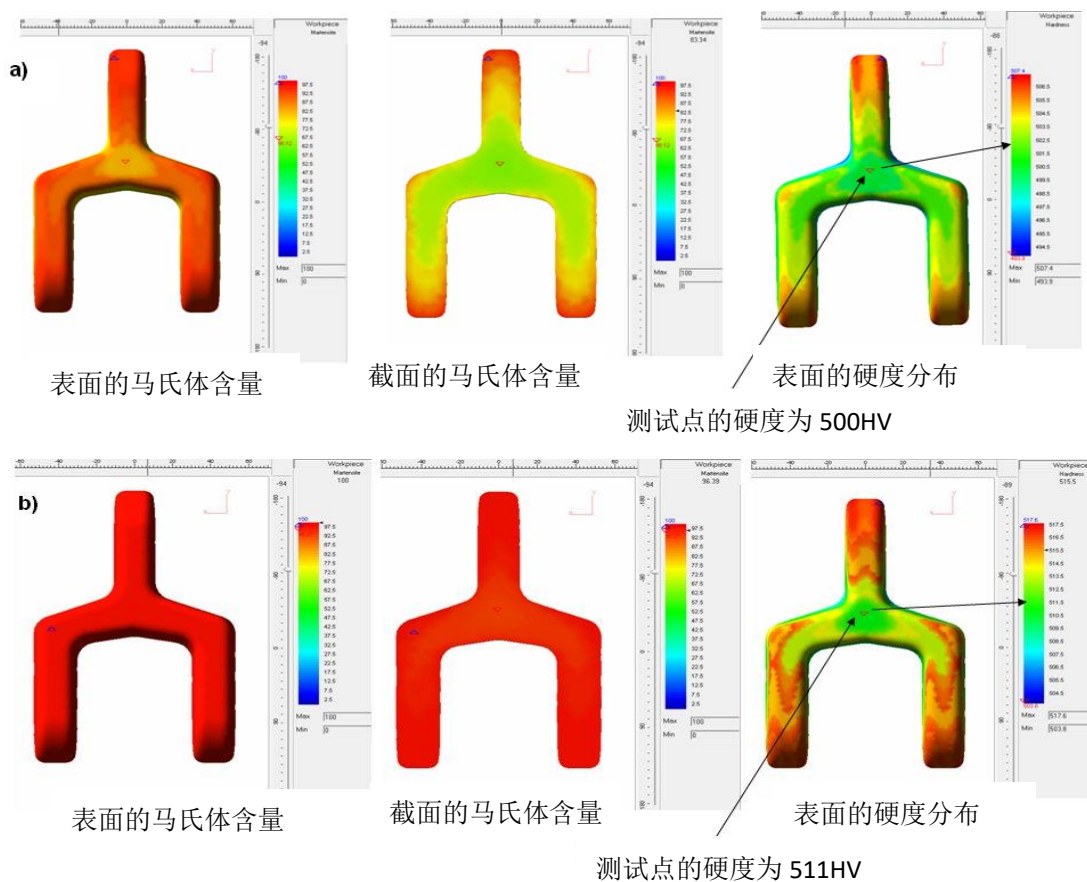


图12 马氏体含量分布和表面的硬度 a 最小值 b 中间值元素含量

使用测试点（见图11）测试硬度与模拟结果对比来验证模拟计算的结果<sup>[5]</sup>。表3列出了测试点在淬火和回火后的模拟结果。中间元素含量零件的硬度实际测量结果为273-290布氏硬度，拉应力为925-990MPa，实际测量数据结果与模拟结果相一致。这些表明使用QForm这种方法模拟的结果可以对实际生产提供可靠的参考依据。

表3 在淬火(Q)和回火(T)后测试点的模拟结果

合金含量	马氏体 <sub>Q</sub>	硬度 <sub>Q</sub>	拉应力 <sub>Q</sub>	硬度 <sub>T</sub>	拉应力 <sub>T</sub>	硬度 <sub>T</sub>
	[%]	[HV]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[HV]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[BHN]
最大值	100	547	1810	340	1080	323
中间值	95	511	1665	295	950	280
最小值	66	500	1630	290	920	276

结果表明，模拟与零件几何模型，合金的元素含量，热处理工艺的关系可以使用软件来预测，因此，我们得出数值模拟可以对热处理工艺进行优化，帮助我们更好的理解在热处理过程中微观组织和材料性质的变化。

## 结论

通过上面案例分析得出，使用模拟软件可以模拟大型自由锻：

- A. 使用数值模拟技术可以模拟大型自由锻的成形过程，预测孔洞闭合，预测成形性以及材料的应力，应变的变化，同时观察锻造过程中的载荷变化，对锻造工艺进行优化改进。
- B. 使用数值模拟技术可以模拟热处理过程，让我们更好的理解热处理过程中的晶相变化以及晶粒度的改变和材料硬度的变化，观察不同的温度变化曲线以及材料元素组成情况下的组织变化，对热处理工艺过程进行优化改进。

## 参考文献

1. Pilaykin P.A. The analysis of the failure the based parts of the big hydraulic presses -Forging and Stamping production, 1966, # 3, p 21-27

2. Moiseev A.Z et. al. Development and optimization the technology of the opened die forging of the high pressure cylinders by QForm simulation- Blank production in machinery building (Forging, Casting and others) - 2010. - N 11. - p. 22-25
3. Melnikov V.I., Monahov G.P., Pilaykin P.A. Fatigue failure limits for the basic parts of the big hydraulic presses. VNIIMETMASH, 1988, p 76-84.
4. Zajac, G. u. J. Pacyna: The kinetics of phase transformations during tempering in structural steels with nickel. Proc. of 13th International Scientific Conference Achievements in Mechanical and Materials Engineering, S. 719-722, Poland, (2005).
5. Borowikow, A. ; Wehage, D. ;Biba N. Simulation of Thermo-Mechanical Treatment in Industrial Manufacturing Process. Proceeding 10<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2011), pp. 827-831, September 25-30 2011, Aachen, Germany