

可视化铸锻技术

—— e-Science 在材料加工领域的应用

李殿中 肖纳敏 郑成武
中国科学院金属研究所, 沈阳 110016

摘要: 可视化铸锻技术在大型支承辊铸造、大型船用曲轴锻造等技术开发上的成功应用表明, 以高性能计算平台为核心、材料成形过程“可视”的热加工技术成为提升我国铸造、锻造等传统材料加工水平的有效方法, 在大型铸锻件的工艺开发方面具有科学合理、缩短时间、节省成本等独到优势。大型铸锻件的模拟计算主要有计算资源需求大、计算精度和效率要求较高等特点, 综合整个专业领域的现状和未来的发展趋势, 建立一个以大规模数值计算为核心的材料加工模拟高性能计算平台是整合计算资源、解决数值计算瓶颈的有效途径, 可以使可视化铸锻技术上升到一个新的层次, 极大提升工艺开发的速度。

关键词: 可视化; 铸造; 锻造; 高性能计算

The Technology of Visual Casting and Forging ——Application of e-Science in materials processing

Li Dianzhong, Xiao Namin and Zheng Chengwu
Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: The application of the technology of visual casting and forging in production of large backup roll and ship crankshaft shows that the hot-working technology based on high performance computation is an effective method to improve the traditional casting and forging technology. The technology of visual casting and forging has the special advantages of saving the cost and time. The modeling and simulation of forging and casting of large-size specimens need high computation capacity, high accuracy and the high efficiency. Considering the present situation and the developing trend in this field, building a platform of high performance computation is a useful method to overcome the bottleneck of numerical computation. This platform can improve greatly the speed of casting and forging technology development in the future.

Keywords: visualization, casting, forging, high performance computation





1. 前言

我国是铸锻件生产大国，铸锻件产量连续8年位居世界第一位，目前年产量突破3000万吨，占全球产量的1/3^[1,2]。但是我国不是铸锻件生产强国，特大型和高附加值铸锻件依赖进口，受制于人。有些特大型铸锻件花钱也买不到，严重制约了我国能源、冶金机械、船舶动力等重要产业的发展。针对大型铸锻件长期依赖进口，受制于人的被动局面，胡锦涛总书记、温家宝总理等党和国家领导人都做过重要批示。大型铸锻件和高附加值铸锻件依赖进口的根本原因是国内制造工艺落后，核心技术缺乏。由于铸锻成形于高温，其内部金属流动和缺陷演化过程不可见，工艺设计主要依赖经验积累和“试错”。国外在铸锻件研制方面投入了大量的人力和物力，现有的先进技术都是他们多年积累和开发的结果。而我国铸锻工艺比较落后，工艺设计思想几十年没有改变。要想在短时间内赶超国际先进水平，实现技术跨越，就必须开发更加创新的铸锻技术。

在国家“973”和“863”等项目、科学院“百人计划”项目、中英合作项目支持下，中国科学院金属研究所在材料制备工艺模拟领域致力于用信息化技术提升铸造、锻造等传统材料加工水平，形成了以高性能计算平台

为核心、材料成形过程“可视”的热加工技术，取得了良好的研究和应用效果。所谓的可视化铸锻技术通常分为三个步骤：第一步，采用计算机模拟软件和热加工理论，模拟金属铸造和锻造等成形过程；第二步，用三维X射线等手段实时观察和透视金属成形过程；第三步，将实时观察结果和计算机模拟结果对比，建立准确的数学物理模型，模拟实际尺寸的金属成形过程；第四步，通过企业的中试并与模拟、监测结果对比，确定最佳的铸锻工艺，开发核心技术。可视化铸锻技术是计算机模拟技术的延伸，是理论、模拟与实测相结合的一项关键技术。近年来，中科院金属所先后与中国第一重型机械集团公司、上海重型机器厂有限公司、鞍钢重型机械有限责任公司、大连重工起重集团公司、中国第二重型机械集团公司等大型企业集团紧密合作，利用可视化铸锻技术成功开发了大型低速船用柴油机曲轴毛坯制造技术、大型铸钢支承辊制造技术、大型空心钢锭制造技术等，为实现我国关键铸锻件从无到有、替代进口提供了强有力的技术支撑。同时通过对现有铸锻件产品工艺的优化设计，降低了原材料和能源消耗，提高了生产效率和企业的经济效益。从以往的使用和推广经验来看，在可视化铸锻系统中，计算机模拟技术是不可或缺的一步。

特别是对于特大型和大型的铸锻件，由于尺寸和重量都非常大，考虑到经济成本和时间成本，几乎不太可能通过反复的实验来确定工艺，因此以大规模数值计算为核心的计算机模拟技术成为工艺制订的主要甚至是唯一手段。通常来说，要使铸造和锻造等成形过程的模拟结果能够很好的指导实际生产过程，需要对温度场、流场、应力应变场等多种物理场以及其中可能存在的各种组织演化过程进行精确的模拟。下面，我们将分别以大型铸钢支承辊的整体工艺模拟和大型船用曲轴弯锻过程模拟为例，从铸造和锻造两个方面来详细阐述计算机模拟技术在材料加工模拟领域，特别是大型铸锻件工艺模拟方面的应用。

2. 大型铸钢支承辊的整体铸造工艺模拟

随着钢铁工业的技术升级和结构调整步伐进一步加快，每年冷热连轧机新建和配件所需各类轧辊大幅度增加，其中支承辊是轧辊中消耗量较大的一个种类。最近十几年，随轧机向高速化、自动化方向的发展，以及优良的板形控制，轧制条件越来越苛刻，致使提高轧制效率、降低轧制成本、保证产品质量成为突出的问题。铸钢轧辊以其特有的使用、工艺和经济方面的优越性，

在国内外得到了广泛的应用。铸钢支承辊具有尺寸和重量较大，制作工艺复杂，成品率低的特点，因而制作大型支承辊难度较大，给铸造工艺带来很大困难，在铸造过程中容易产生缩孔、气孔、夹杂、热裂等缺陷。国内从20世纪80年代末期就开始了大型铸钢支承辊整体铸造工艺的研发工作，经过十多年的努力，取得一定的进展，但还没生产出合格的铸件产品。金属研究所自2002年起与中国第一重型机械集团公司合作，尝试使用可视化铸造手段来开发支承辊制造工艺^[3]。

对于像大型铸钢支承辊这样的大型铸件来讲，依靠经验和传统试错的方法确定铸造工艺的成本高、周期长。大型铸钢支承辊的铸型尺寸较大，浇注铸钢支承辊所需的金属液总重49吨左右，如果铸件报废，金属的回收十分困难，浪费非常严重。再加上生产过程中所耗费的造型材料、能源，一次的试验费用要在100万人民币以上。利用计算机模拟技术来设计铸钢支承辊的铸造工艺具有费用相对较低，设计周期较短的优势，不存在材料与能源浪费的问题，而且对于不同尺寸和规格的支承辊，更换工艺简单迅速。

轧辊的整个铸造工艺主要包括充型和凝固两个过程。充型过程是铸造过程中一个十分重要的环节，许多铸造缺陷，如冷

隔、冲砂、卷气、夹杂等都在充型过程中产生，因此充型过程与铸件质量密切相关。在实际铸造过程中，充型过程很难观察到，人们常常形容铸造过程是‘睁眼造型、闭眼浇注’。凝固过程是指高温液态金属由液相向固相的转变过程。在这一过程中，铸件会发生传热、相变、凝固收缩和自然对流等物理现象。铸件的缩孔、疏松、热裂、变形及表面粘砂等缺陷都在凝固过程中产生。凝固过程中的计算机模拟可以观察到不同时刻铸件的温度场，并预测铸件的缩孔产生的可能性及位置。

应用计算机模拟技术设计大型铸钢支承辊整体铸造工艺，主要是虚拟再现金属液的充型凝固过程，然后根据流场、温度场及缩孔预测的模拟结果，验证浇

注系统是否合理、设计冒口、确定铸型尺寸和浇注工艺参数，并为铸型材料的选用提供依据。从数值计算的角度来看，充型凝固过程包括热量传输、动量传输、质量传输和凝固相变过程，因而要精确的描述这一过程，就必须求解连续性方程、Navier-Stokes方程、Fourier传热方程和质量守恒方程。整个模拟计算分为三个主要的步骤，首先是前处理，包括构件造型、网格剖分和参数确定，然后选取合适的数值方法实施计算，最后是后处理，也就是对计算结果的分析 and 总结。以一重的大型铸钢支承辊为例，支承辊的铸件尺寸为 $\phi 1435\text{mm} \times 1615\text{mm} \times 4926\text{mm}$ ，铸件重量为40吨，加上浇注系统和冒口等设计，整个铸造系统更为巨大（图1）。为了保证辊颈等关

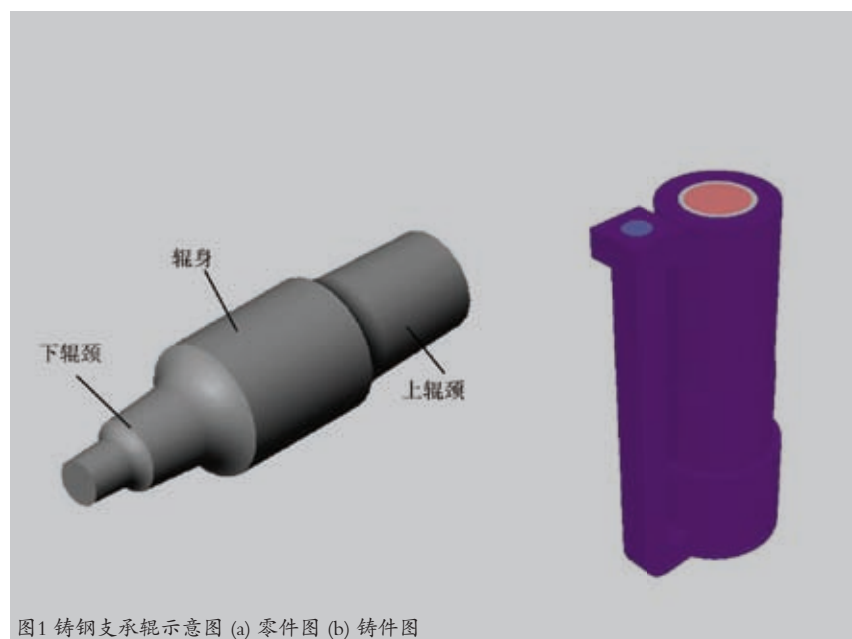


图1 铸钢支承辊示意图 (a) 零件图 (b) 铸件图

► 键部位的计算准确，整个模拟体系的网格剖分数为200万个。我们采用铸造商业软件ViewCast的有限差分模块来模拟整个充型凝固过程。大型铸钢支承辊体积大，液态金属热量高，凝固时间长达40多个小时，这也会导致整个工艺方案的模拟时间较长。

根据充型过程中温度场的变化可以判断是否产生冷隔、浇不足缺陷。图2中(a),(b),(c),(d),(e),(f)分别为充型过程中15s,63s,164s,287s,420s,565s时金属液在铸件型腔中的运动状态和温度变化模拟结果。图中的金属液上升平稳，以平面的方式向上运动。由于下辊颈分成两段，下辊颈下段的直径较小，而且充型初期的金属液流动速度很大，很快充满了下辊颈下段，见图2(a)。此过程中液态金属的温度几乎没有下降，温度基本在1535~1540℃左右。随着充型的进行，型腔横截面积逐渐增大，同时型腔内液面与浇口杯内液面的高度差减少，因而液态金属的上升速度逐渐减小，到63s时下辊颈才充满，温度也有所下降，在1525~1535℃之间，但温度分布比较均匀。辊身的直径最大，液面上升缓慢，充型到164s时，钢液上升到辊身中部，在这个过程中高温金属液从浇道进入型腔，由于做旋转运动，在从下辊颈下段向上运动的过程中偏离中心，偏向远离内浇口的一侧，见图

2(c)，该过程温度下降不多，高温的金属液还能升到表面，只是在

然对流的作用，温度趋于一致，温度在1510~1520℃，而后续进

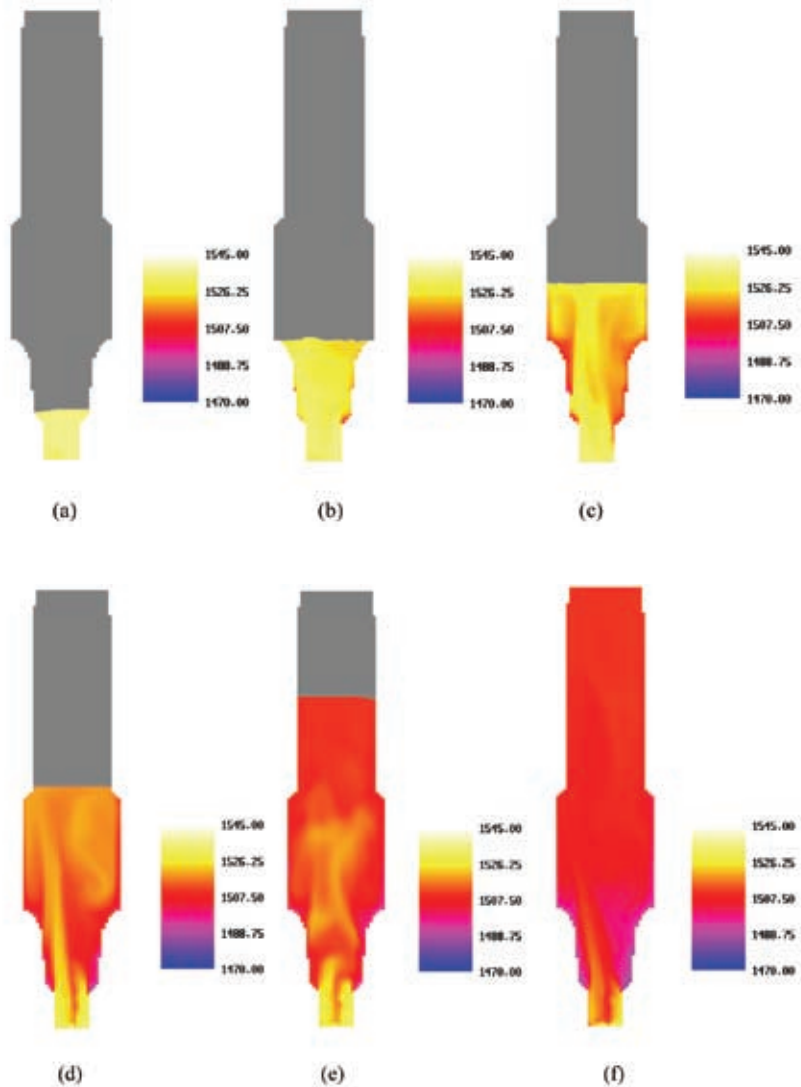


图2 充型过程中的温度变化

下辊颈的局部拐角，钢液的温度下降到1507℃左右，这说明下辊颈的冷却能力较强。充型到287s时，辊身已经充型完毕，见图2(d)，经过进一步的热量交换和自

入的高温金属已经很难上升到表面。在随后的充型过程中，液体金属进入型腔的速度大大减小，随着充型时间的延长，高温液体金属的热量散失也比较大，导致

温度下降比较明显, 见图2(e), (f), 下辊颈局部区域降到1485℃左右, 而冒口、上辊颈和辊身的温度均匀, 在1510℃左右。

充型过程中金属液的流动状态和温度场变化的模拟结果表明铸钢支承辊的浇注系统设计合理, 有效地避免了脉缩、卷气、喷溅问题。充型过程中虽然温度下降很多但没有降到固相线以下, 不会产生浇不足和冷隔缺陷。充型结束时, 铸件中的温度场整体上分布基本均匀。

此外, 不同部位金属型厚度、砂型厚度及保温材料厚度对铸钢支承辊凝固过程中温度场、铸件的微观组织和缩孔有重要影响。在能实现铸件顺序凝固、满足组织要求的条件下, 尽量减少铸型材料的耗费也是有效节约成本的一种方法。我们设计了多套工艺方案, 通过计算机模拟确定了最优化金属型、砂型及保温材料的厚度。金属所和一重合作, 利用计算机模拟, 配合缩比件的X射线的实时观察, 成功解决了平稳充型浇注系统设计、顺序凝固、滑动辊颈、自然保温冒口等关键难题, 开发出大型铸钢支承辊整体铸造技术, 并提供了铸造工艺参数和模具制造图纸。一重集团于2005年成功生产了50吨级优质的铸钢支承辊, 并应用到世界最大的太原钢铁公司不锈钢生产线, 使用性能超过了进口铸钢支承辊。

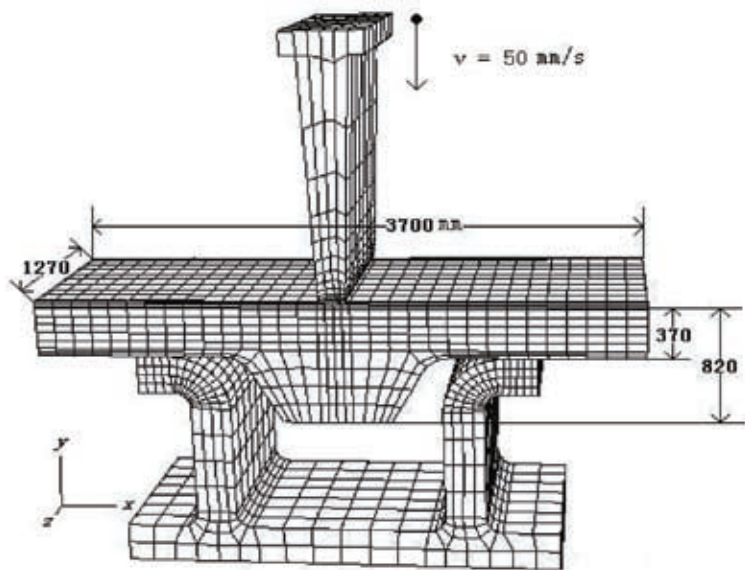


图3 曲拐坯料尺寸和网格划分情况

3.大型船用曲轴锻造过程的工艺优化设计

中国的造船业拥有从零部件到整机的柴油机生产能力, 但大马力低速柴油机的关键部件曲轴却一直依赖进口。柴油发动机是大型船舶的心脏, 曲轴是发动机的核心。目前一根90机船用曲轴价值约为1600万元人民币, 占整机价值的15%左右。近年来曲轴产品出现了世界性的供不应求局面, 给国内低速船用柴油机厂带来很大的压力, 同时影响船厂接单。进口船用曲轴不但价格昂贵, 而且交货不及时, 出现了“船等机、机等轴”的被动局面, 严重地制约了我国造船业的发展。

为尽快解决国家工程的重大

难题, 中科院金属所与上海重型机器厂合作, 承担了大型船用曲轴制造的任务, 金属所主要负责曲拐锻件成形过程的计算机模拟与工艺优化设计^[4]。曲拐整个弯锻成形过程需要4~6火。首先将钢锭锻粗拔长, 锻成带凸台的预成形方坯, 然后放在特制的弯曲下模上, 将坯料、模具摆好对中以, 用专用上模将坯料压弯, 当坯料的底部与下模接触时停止弯曲, 然后将坯料卸下, 更换模具, 插入舌板, 用平砧将坯料从头到尾反复精整压扁, 直至将毛坯锻成工艺所要求的尺寸。

从研究的难度来看, 在成形过程中, 既存在材料非线性, 又有几何非线性, 同时还存在边界条件非线性, 变形机制十分复杂, 并且接触边界和摩擦边界较难描述。此外, 曲拐的锻造属于

▶ 多火次成形过程，采用自由锻造方法。在计算机模拟中应相应地采用多步骤模拟，并且在计算过程中需要根据坯料的状态不断调整初始条件和边界条件，以便和真实工况吻合，因此多步骤自由锻模拟相对单步骤模锻模拟要复杂得多，并且由于曲拐锻件尺寸巨大，剖分网格数量多，多步骤模拟将消耗相当多的计算资源。在商用有限元软件ABAQUS中建立曲拐弯锻过程的多步骤热力耦合模型（图3所示），针对坯料

的外形特征以及与模具的接触条件对实体进行了不同密度的网格剖分，采用线性减缩积分单元C3D8RT，以适应该变形的大的网格旋转和扭曲特征。网格数量约为50,000个，使用双CPU3.2GHz，内存为4GB的计算设备，程序运行时间约为8天。

图4为曲拐弯曲结束后的应力场（ σ ）、应变场（ ε ）、应变速率场以及温度场（ θ ）的分布情况。从图4可见，在弯曲过程中，曲拐的塑性流动大致分为3个不同

区域，即曲臂末端部分(A区)、曲臂与曲柄销连接部分（B区）以及曲柄销部分（C区）。曲臂末端部分随着上模的下移而自由旋转，变形量很小；曲柄销区受上模的压紧作用，随上模向下运动，除与上模接触的一小部分外，其余基本为无变形的刚体运动；曲臂与曲柄销的连接部分则是上述两刚性区的过渡区，它产生侧向弯曲和横向镦粗的复合变形。由图4(a)、(b)可见，该区域中间位置的弯曲程度最大，内表面和外表面

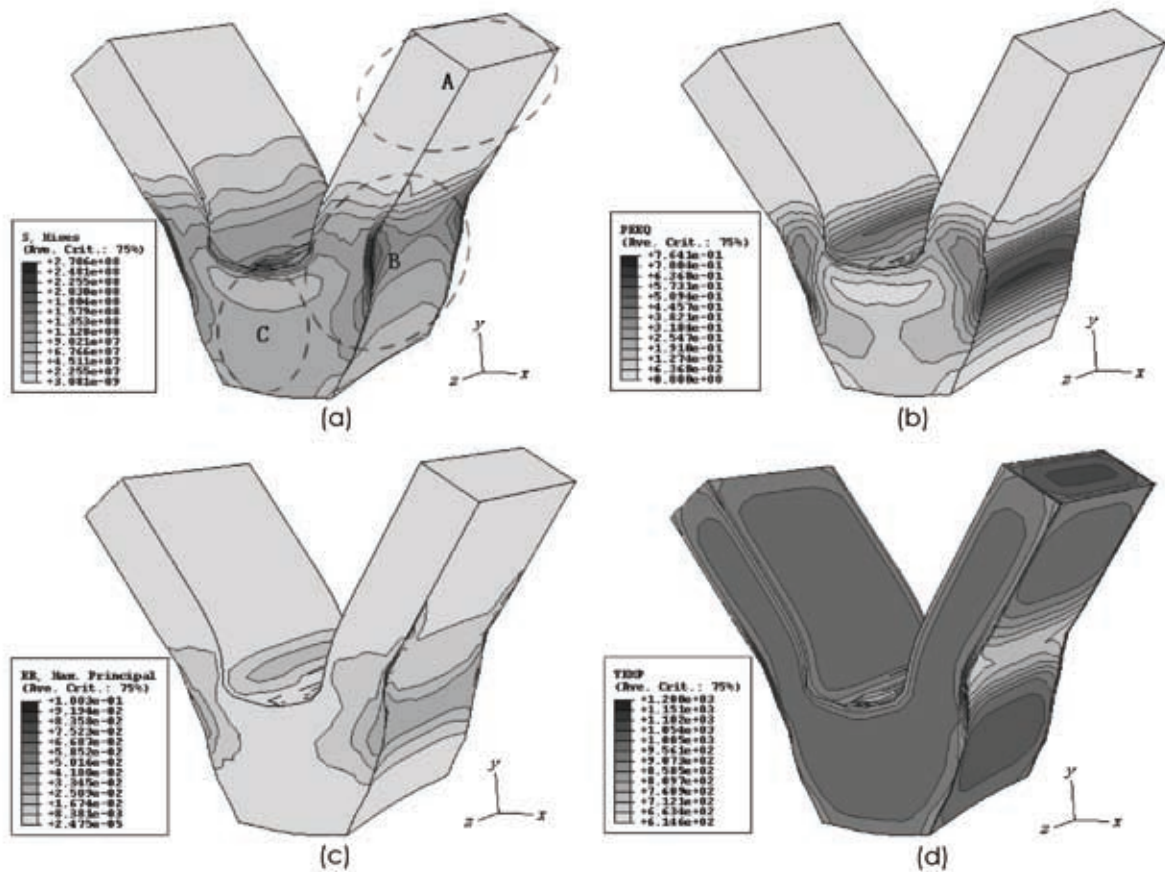


图4 弯曲结束时曲拐的应力场(a)、应变场(b)、应变速率场(c)和温度场(d)的分布

分别受压应力和拉应力作用，两侧受临近材质的挤压，所以应变最大。如图4(c)所示，金属流动比较剧烈的区域集中在内表面弯曲部位以及外表面发生拉伸的部位。由图4(d)可见，曲臂外侧贴模部位温度下降较大，造成材质塑性下降，产生应力集中。

由以上分析可知，曲臂外表面由于温度降低，并受较大的拉应力作用，因此塑性较差，产生裂纹的危险最大；曲臂侧面由于形成鼓肚，表面受拉应力，一旦形成裂纹，则很容易扩展；曲臂内表面受三向压应力作用，塑性较好，不易产生裂纹。

在曲拐的成形过程中，内

表面预先压一道压痕，试图减轻喇叭口，但事实表明，这种办法效果并不显著。因此，必须采用更加科学的预测手段，才能制定出具有最佳形状的曲拐预成形毛坯。

我们在计算机模拟结果的基础上，结合现场的操作方便情况，决定在预成形过程中先用V形砧在毛坯的两侧压出对称的V形槽来，这样就消除了弯曲变形的多余材质，使金属流动更加顺畅。图5为改进工艺弯曲结束和精整结束时毛坯的形状。由图可见，现场试验结果与模拟预测结果吻合得非常好，弯曲后的毛坯内开档尺寸 w 较小，由于两侧面V

表面和内部缺陷，局部取样检测后发现综合机械性能良好，完全符合产品质量要求。

中科院金属研究所与国内重企业合作共同开发曲拐弯锻技术的过程中，将计算机模拟技术引入到工艺优化设计过程中，通过在计算机平台上的反复试验，最终确定了优化的工艺方案，大大提高了曲拐毛坯的成品率。研究采用计算机模拟和试验手段研究了传统工艺弯锻曲拐的过程，总结出锻造曲拐容易出现的典型缺陷，充分分析了传统成形工艺的不足。在此基础上，采用反变形法改进了毛坯的形状因子，确定了优化的预成形毛坯形状。通过

计算机模拟发现改进后的工艺消除了喇叭口、裂纹、“细腰”、减薄等缺陷，曲拐内开档多余材质堆积现象减轻，毛坯变形区域向曲柄销中心面移动，毛坯变形抗力为传统工艺的72%。并节省原材料约15%。最后，对改进的工艺进行了试

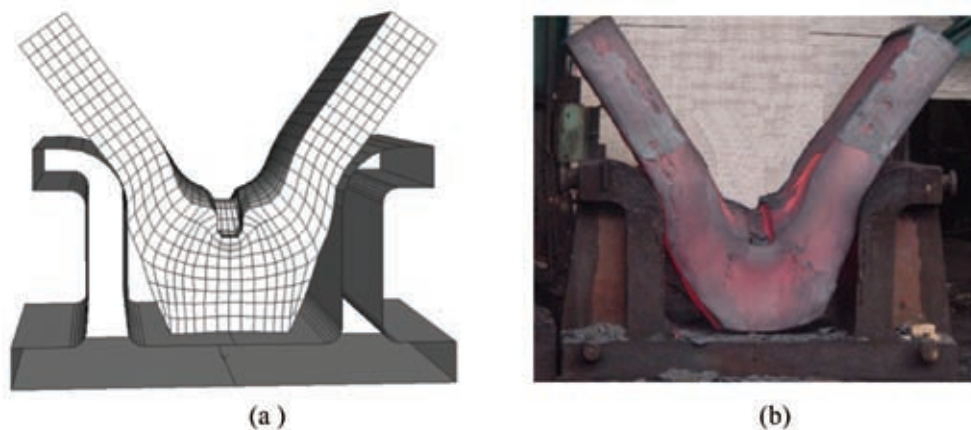


图5. 改进工艺弯曲结束和精整结束时毛坯的形状 (a)弯曲后的模拟结果, (b)弯曲后的实物照片

开档的喇叭口是困扰锻压工作者的最主要问题之一，喇叭口不但会使曲拐根部的加工余量减小，而且还会造成曲拐弯曲内表面产生折叠裂纹。致使锻坯报废。有些研究工作者曾经在弯曲毛坯上

形槽的作用，金属流动顺畅，精整时内开档两侧无鼓肚产生，完全消除了喇叭口及周围的裂纹，曲臂外表面的“细腰”和减薄现象也大大缓解。整个毛坯锻件形状合理，流线均匀，经探伤后无

验研究，试验结果验证了了模拟的准确性，得到了优质的曲轴毛坯锻件。

在曲轴项目的完成过程中，计算机模拟起到了核心作用。对于曲轴这类大型锻件来说，通过

► 工业试验来摸规律、试工艺会产生极其高昂的试制成本，因此必须将计算机模拟作为先行条件。通过设计不同的锻造工艺，在计算机平台上进行反复的“试验”，发现锻造过程可能产生的各种缺陷，及时通过工艺调整加以避免，并对整个成形过程有了更加深入的理解，可为今后生产类似锻件提供参考。

4. 高性能计算平台在可视化铸锻技术的应用

金属所已经在船用曲轴毛坯、大型铸钢支承辊、大型空心钢锭和核电用关键锻件等的制造技术上成功应用了可视化技术。以往的使用经验表明，大型铸锻件成形过程的计算模拟有以下几个主要的特点：

整个构件尺寸非常大，但是影响构件质量的关键部位尺寸往往很小，为了保障关键部位的计算准确，所需要的单元网格数目非常巨大。比如在大型铸钢支承辊的整体铸造工艺中，辊颈部位的工艺设计非常关键，设计不当会出现辊颈开裂等各种严重后果，导致支承辊报废，因此准确模拟辊颈部位的温度场、流场等各种物理场的变化是整个工艺设计的一个非常重要的细节。通常来说，辊颈部位的尺寸和整个支承辊相比要小1-2个数量级，因此在模拟剖分网格的过程中势必造



热加工领域的可视化技术是通过IT技术提升传统产业的关键技术，通过计算机模拟仿真、X射线实时观察，实现金属热加工过程可视化。

发达国家对可视化技术十分重视，美国、英国和德国等国不但采用计算机模拟技术进行铸件的浇注系统设计，而且采用X射线技术实时监测铸件的充型过程，对浇注系统进行优化，从而避免浇注过程中卷气和夹杂导致铸件质量的下降。优化的浇注系统设计有利于实现清洁生产，减少资源消耗并带来显著的经济效益。美国能源部在铸锻件的中长期发展规划中明确提出，到2020年，铸件生产废品率降低40%，可视化技术是解决问题的根本。欧洲在框架7计划中，也提出了“数字化冶金”的概念，希望用计算机模拟等技术引领材料的制备。

可视化技术对传统的浇注系统设计原则是一个重要的修正和补充，将有助于铸造工作者突破传统观念，生产更优质的铸锻件，对于推动行业技术进步具有现实意义。

——自中国科学院《热加工过程可视化及成套技术》

成计算节点的大量增加，从而导致整个工艺过程的模拟计算时间大大增加。

大型铸锻件的成形步骤复杂，成形时间非常长，某些构件的成形过程甚至以天为单位来计算，这也大大增加了计算所需的时间。比如50吨大型铸钢支承辊的实际凝固工艺时间在40-60个小时。大型船用曲轴整个锻造工艺

包括多个火次，其中每个火次都是一个热力耦合过程，因此整个计算模拟的时间也非常长，现在主流的PC机和工作站需要2-4周的时间才能完成一次完整工艺流程的模拟计算。考虑到以后更大尺寸和制造工艺更加复杂的铸锻件的需求，主流的PC机和工作站的计算速度是无法接受的。

由于现在大型铸锻件的模

拟计算必须和企业的实际生产保持同步，模拟必须走在工艺设计的前面，因此对高效率的工艺模拟提出了很高的要求。计算机模拟技术实际上是将实验的反复试错过程用数字化的方式虚拟再现出来。因此，在实际的计算过程中，往往需要设计多个工艺方案在计算机上反复试错，确定最佳工艺。以核电用大型锻件的制造工艺模拟为例，一个接管段的锻造工艺方案的模拟在一台主流工作站上一般需要1-2周的时间，如果需要设计三十个初始工艺方案，那么全部模拟完成需要半年到一年时间，这还不包括模型调试和参数确定的时间。这个时间对企业来说是不可接受的，会严重影响其生产进程。

从前瞻性的角度看，我们不仅要模拟宏观尺度下的各种物理场，也要模拟介观尺度下的组织演化过程^[5]，从而保证对整个成形过程的机理有更深入的认识，为开发更先进的铸锻工艺打下基础，这就涉及到多尺度的耦合计算，此类模拟消耗的计算资源亦非常巨大。比如为了将组织演变模拟和实验的结果作对比验证，我们建立的Gleeble试样尺寸（毫米级）的固态相变的介观尺度模型包含了将近1亿个计算节点，普通工作站的一次计算将需要3-6个月时间，这几乎是不可接受的。

此外，高效率、高精度的


模拟计算还依赖于大型的模拟仿真软件和庞大的材料热物性数据库，这些工作也要耗费大量的财力、人力和物力。综合整个专业领域的现状，建立一个以大规模数值计算为核心的材料加工模拟高性能计算平台是整合计算资源、解决数值计算瓶颈的有效途径。目前金属所正在建设刀片式高性能计算平台，在此基础上将解决目前计算机模拟技术中碰到的各种问题，把利用可视化铸锻技术开发新工艺上升到一个新的层次。正在建设中的平台将包含72个计算节点（144个Xeon 3.6G CPU），具有峰值性能1万亿次浮点运算的计算能力和容量12 TB的存储能力，同时拥有包括ABAQUS、Fluent、ProCast等大型模拟仿真软件的并行计算许可证资源，能够为材料领域的应用网格平台建设提供一些相对完备的软硬件资源；多年积累的材料热物性性能数据库为行业铸锻件模拟和实验提供支持。此外，作为可视化技术中的重要一环，正在建设中的9MeV电子加速器可以直接透视铸锻件成形过程，实现工业缺陷可视化和成形过程可视化，原有50mm的透视尺寸将提升至400mm，从而实现更大尺度的模拟与实验对比。从整个平台的前期运行来看，高性能计算将大大提升现在的工艺开发能力。以大型核电用锻件的制造工艺开发为例，企业合作方希望我们能在

三个月内给出合理的工艺优化设计。由于核电用锻件火次多，制造工艺复杂，每一套工艺方案的模拟就需要10天左右。因此如果采用常规的计算（两台主流的工作站），预设计30套工艺方案需要将近6个月的时间来完成。我们在刀片式超级计算集群上把不同的工艺方案同时分配给不同的计算节点，这样30套工艺方案的模拟时间大大缩短，1个月左右就可以完成所有的模拟工作，极大提升了工艺开发的效率。

5. 结论

可视化铸锻技术在大型支承辊铸造、大型船用曲轴锻造等技术开发上的成功应用表明，以高性能计算平台为核心、材料成形过程“可视”的热加工技术成为提升我国铸造、锻造等传统材料加工水平的有效方法，在大型铸锻件的工艺开发方面具有科学合理、缩短时间、节省成本等独到优势，从而为实现我国关键铸锻件从无到有、替代进口提供了强有力的技术支撑，同时通过对现有铸锻件产品工艺的优化设计，降低了原材料和能源消耗，提高了生产效率和企业的经济效益。

以往的使用经验表明，在可视化铸锻系统中，计算机模拟技术是不可或缺的一步。特别是对于特大型和大型的铸锻件，由于尺寸和重量都非常大，考虑到经

- 济成本和时间成本，计算机模拟技术成为工艺制订的主要甚至是唯一手段。大型铸锻件成形过程的计算模拟具有尺寸大、成形步骤复杂等特点，同时考虑到与实际生产的同步性，未来的可视化铸锻技术对计算精度和速度提出了更高的要求。综合整个专业领域的现状和未来的发展趋势，建立一个以大规模数值计算为核心的材料加工模拟高性能计算平台是整合计算资源、解决数值计算瓶颈的有效途径，可以使可视化铸锻技术上升到一个新的层次，极大地提升工艺开发的速度。 

参考文献

[1] J.T. Berry, R.D. Pehlke, P.V. Desai, The Place of Computer Simulation of Solidification in Casting Production, *Interdisciplinary Issues in Materials Processing and Manufacturing*, ASME, 1987:233-250.

[2] A modern casting staff report. 42th census of world casting production-2007. *Modern Casting*. 2007(12): 25~27.

[3] Xiuhong Kang, Dianzhong Li, Lijun Xia, John Campbell, Yiyi Li. Development of A Cast Steel Backup Roll, *John Campbell Symposium on Shape Casting*,

Specialized symposium held during the 2005 TMS Annual Meeting, San Francisco, CA, February 13-17, 2005.

[4] 孙明月, 李殿中, 李依依等. 大型船用曲轴曲拐的弯锻过程模拟与实验研究. *金属学报*, 2005, Vol.12(12):1261 ~ 1266.

[5] D.Z. Li, N.M. Xiao, Y.J. Lan, C.W. Zheng and Y.Y. Li. Growth modes of individual ferrite grains in the austenite to ferrite transformation of low carbon steels. *Acta Materialia*, 55 (2007): 6234-6249.

作者信息



李殿中:

博士，中国科学院金属研究所研究员，博士生导师，沈阳材料科学国家（联合）实验室材料加工模拟研究部主任。主要研究方向：可视化铸锻技术，材料制备工艺的计算机模拟。



肖纳敏:

博士，中国科学院金属研究所助理研究员。主要研究方向：金属相变及热处理的计算机模拟，材料加工的高性能计算。