

**中国锻压协会**  
**锻造工艺模拟工程建设指引**

中国锻压协会编  
2022年8月

# 目录

前言	3
第一篇 锻造、锻造工艺及工艺模拟概述	4
一、工艺模拟的意义与作用	4
二、工艺模拟的定义	6
第二篇 工艺模拟所需资源	7
一、工艺模拟需要的硬件、软件	7
二、工艺模拟可以解决的问题，模拟软件的主要功能	10
三、工艺模拟需要的人员	11
第三篇 工艺模拟技术应用	13
一、工艺模拟分析的操作流程	13
二、输入工艺模拟需要的数据（边界条件）及注意事项	15
三、工艺模拟需要的数据收集和获得方式	17
四、工艺模拟的主要输出内容及结果分析与判断准则	19
五、工艺模拟软件常见故障或显著错误判断原则	21
六、工艺模拟软件的验证方法	22
第四篇 模拟工程建设注意事项	23
一、模拟工程建设特点和行业应用现状	23
二、模拟工程未来建设模式	24
三、协会在新的工程建设模式中所起的作用	26
附注	27

# 中国锻压协会

## 锻造工艺模拟工程建设指引

### 前言

本指引适用锻造成形以及相关行业；面向制定锻造工艺、模具设计优化、锻造设备选择、锻件缺陷分析、工艺问题分析和锻造工艺优化等技术需要，可供具有一定理论基础或技能特长并愿意进行工艺模拟学习和工作的技术人员参考。

本指引适用于金属材料各种锻造成形工艺，包括但不限于热锻、冷锻和温锻。适用于常规锻造工艺，及其他特种锻造工艺，如模锻、挤压、辗环和径向锻造等。

本指引适用于各种锻造设备下的锻造工艺模拟，包括但不限于机械压力机、螺旋压力机、锻锤和液压机等。

本指引同时涉及锻造工艺，锻前下料和锻后热处理工艺，并关注与锻件机械性能相关的微观组织模拟，以及锻造模具的宏观受力状态模拟。

本指引在引导完善锻造工艺模拟体系的同时，鼓励应用本指引的单位和个人同时重视锻造过程的物理模拟技术发展与应用。

本指引系统地介绍锻造工艺模拟工程建设的一般步骤、分层分级的建设规范、以及新技术在本领域的可能应用趋势。

# 第一篇 锻造、锻造工艺及工艺模拟概述

## 一、工艺模拟的意义与作用

金属塑性加工是金属加工的一种重要工艺方法，它不仅生产效率高，原材料消耗少，而且可以有效改善金属材料的组织和力学性能。

锻造是金属塑性加工的一种主要工艺方法，在加压设备及工（模）具的作用下，使坯料或铸锭(块或厚板金属)产生局部或全部的塑性变形，以获得一定几何尺寸、形状的零件（或毛坯）并改善其性能的加工方法。

可以这样理解，锻造就是将金属棒材、线材、板材、铸锭或块金属加热或不加热，在力（能）的作用下成形的一种加工方法。俗称：打铁。锻造属于金属塑性成形，大都是体积成形，是指利用锻造设备上的锤头、砧块或模具，对金属坯料施力产生塑性变形。根据锻件的尺寸和形状、采用的工模具工装结构和锻造设备的不同，锻造分为自由锻和模锻，锻造出来的产品称之为自由锻件和模锻件。

自由锻是用简单、通用性工具，或者在锻造设备上、下砧之间直接对坯料施加外力，使坯料变形，而获得所需的锻件几何形状及内部质量的锻造方法。模锻则是利用模具使坯料变形而获得锻件的锻造方法。

一般是将粉状、粒状或纤维状的金属或非金属材料放入成形温度下的模具型腔中，然后加压合模而使其成形并固化的制造方法称为模压成形，又称压制成形或压缩成形，模压成形也可以归类于模锻范畴。

大锻件是相对概念，分大型模锻件、大型自由锻件、大型环形件和大口径厚壁无缝管件。使用 8MN 以上自由锻液压机或 30kN 以上自由锻锤生产的自由锻件称为大型自由锻件。使用 60MN 以上模锻造力机、80MN 以上模锻液压机或 100kN 以上模锻锤生产的模锻件为大型模锻件。大型锻件主要用于电力、冶金、石化、船舶、机车车辆、模具、航空航天、兵器、重型机械和汽车、矿山机械、通用机械等领域。

金属的挤压、墩锻和回转加工成形等属于特种塑性成形，在国内外也列为锻造生产工艺类，生产的产品也被称为锻件。

金属回转加工成形包括仅金属坯回转、仅工具回转、或两者都回转，从而使金属坯料变形的塑性加工方法，包括纵轧、斜轧、摆辗、辗环、楔横轧、辊弯（或弯卷）、辊锻、旋压和径向锻造等。成形环件内径  $\Phi 500\text{mm}$  以上的为大型环件；挤压管件内径  $\Phi 300\text{mm}$  以上壁厚 30mm 以上的为大口径厚壁管件。

现代锻造技术对毛坯与模具设计以及材料塑性流动控制等方面要求越来越高，所以采用基于经验的试错设计+高成本的现场调试方法已不能满足实际需要，引入以计算机为工具的现代数字化设计分析手段已成为行业共识。

随着信息技术和通信技术的发展，锻造行业的数字化时代已经到来。数字化技术是指利用计算机软硬件及网络、通信技术，对描述的对象进行数字定义、建模、储存、处理、传递、分析、综合优化，从而达到精确描述和科学决策的过程和方法。数字化方法在锻造行业中最重要的作用就是工艺模拟。

锻造成形时，材料特性、变形速度、温度、摩擦条件、坯料形状尺寸、模具几何外形等因素对成形有着非常重要的影响。金属锻造成形过程是复杂的非线性问题，包含材料非线性，边界非线性、几何非线性，采用传统理论计算方法很难计算成形过程中材料流动、应力应变。对于复杂产品，变形过程中材料流动通过理论计算难以完成。通过工艺模拟可以回答经验设计无法回答的问题，了解锻造成形的全过程，包括锻造过程中各阶段材料填充模具的情况、材料变形趋势、材料内部的应力、应变、应变速率、成形载荷及速度矢量场等，以此指导锻造成形的工艺设计、模具设计、毛坯的设计、压力机的选择以及成形质量的控制等，已经成为众多锻造企业新产品开发链中不可缺少的一环。同时，工艺模拟对于优化已有产品的生产工艺同样具有重要意义，通过工艺模拟能够直观地重现生产中出现的缺陷和问题，深入分析出现问题的原因并且针对问题进行大量优化计算得到最优的工艺。目前，工艺模拟在锻造工业中取得成功的领域有：制定锻造工艺、分析模具应力、分析锻造工艺缺陷、预测锻件组织性能等。另外，通过工艺模拟可以减少昂贵的车间试验，缩短新产品开发周期，减少锻造生产成本。

概括地讲，工艺模拟协助制订锻造工艺，确定需要的成形工步，目标就是合理地设计出成形工步及操作流程，其中任一工步的分析都基本上涉及以下几个方面：

- (1) 建立金属材料内部变形区与未变形区间的运动关系（如外形、速度、应变、应变率），即金属塑性流动的预测。
- (2) 确定材料与工艺的成形极限，即确定工件成形后是否会出现表面或内部缺陷。
- (3) 预测成形工艺所需的变形力，应力，以便模具及设备设计、制造或选用。
- (4) 确定或预测内部组织结构、影响变形和零件机械性能的因素；
- (5) 预测分析模具的受力情况，对模具应力集中区域进行二次优化设计。

## 二、工艺模拟的定义

工艺模拟（processing simulation）一词 1993 年经全国科学技术名词审定委员会审定发布，最初作为电子学名词使用，其定义是利用软件对化学、物理、生物和其它技术过程进行基于模型的表达和操作。在锻造行业中，工艺模拟主要包括锻造工艺及模具模拟，以及相关前序和后序工艺模拟，锻造前序可以延伸到铸造、轧制成形，后序可以延伸到热处理工艺、消除残余应力的冷压工艺等全流程工艺模拟等。

锻造工艺数值模拟指科技工作者或工艺技术人员使用专业的计算机模拟软件模拟整个成形过程各种物理量的变化，预测成形过程中温度场，应力场、应变场和成形力等重要信息，并将各种物理量以云图或动画的形式在计算机上显示出来。从中可以获取工件的详细变形过程、各种物理量随空间和时间的变化以及产生的各种主要成形缺陷，如开裂、折叠与回弹等等。

## 第二篇 工艺模拟所需资源

### 一、工艺模拟需要的硬件、软件

首先需要强调，为了能有效地开展模拟工作，工艺模拟必须建立独立的运算系统或使用独立的计算机，将进行模拟的系统和计算机独立，不可兼用。这是提升模拟效率，保证模拟精度的重要保证。特别需要指出的是日常工作使用的电脑不可作为模拟电脑使用。

#### 硬件需要

计算机/工作站：根据模拟需求以及专业软件的不同选择相应的硬件，可咨询软件公司获得具体配置，目前模拟软件普遍需要台式计算机、工作站甚至服务器，便携式笔记本大多不能够胜任。如果有多个使用者需要提交模拟任务一般推荐工作站，若这些任务超过现有工作站所用的内核数的 CPU，则建议适用服务器（或集群），并需要配置作业调度系统。

CPU（处理器）：高时钟速率芯片，按对模拟时间的要求选择。

内存：快速内存有利于提高计算速度，建议 2400Mhz，4GB 以上

硬盘：硬盘越快，模拟速度越快

显卡：参考 CAD 软件的要求选择

显示器：需要有一定的分辨率，以便于结果分析，主要参考 CAD 软件的要求选择。

例如可依据以下配置进行选择：

硬件	配置
CPU	4 Cores: 1×Intel® Xeon® Gold 5222 (4 Cores, 3.80 GHz, 16.50 MB L3 Cache)
	8 Cores: 2×Intel® Xeon® Gold 5222 (4 Cores, 3.80 GHz, 16.50 MB L3 Cache)
	16 Cores: 2×Intel® Xeon® Gold 5217 (8 Cores, 3.00 GHz, 11.00 MB L3 Cache)
	20 Cores: 2×Intel® Xeon® Gold 5215 (10 Cores, 2.5GHz, 13.75MB L3 Cache)
RAM	1 socket: 48 GB DDR4-2933 MHz (6×8 GB)
	2 sockets: 96 GB DDR4-2933 MHz (12×8 GB)
Storage	First volume (operating system): 300 GB SSD / SAS / NL-SAS / SATA
	Second volume (data storage): 2 TB SSD
GPU	NVIDIA Quadro (256 MB RAM minimum) or AMD FirePro (256 MB RAM minimum)

特别说明，以上给出的建议是基于 2021 年 12 月之前计算机发展的水平，以及该日期之前应用软件所存在版本确定，由于计算机技术和应用软件的不断升级和变化，在采购各软件时，需要依据各软件公司当时的具体建议执行。

本处的所有陈述对模拟工程建设提出了必须要考虑的硬件因素，这些因素必须予以遵守，应该说是需求的最低标准。

### 软件需要

系统平台：目前工艺模拟用专业软件普遍能够在 Windows 系统上运行，在选用 Windows 系统时，需要与销售软件公司确认。由于应用软件开发速度等原因，可能不建议使用 Windows 的最新版本。依据目前情况（2021 年 12 月前）部分软件可以在 Linux, Unix 等平台上运行，购买软件时需要与销售软件公司确认。

CAD 软件：工艺模拟需要的几何输入由 CAD 软件得到，常用的有 AUTOCAD、UG、CATIA、Pro-E、Solidworks 等。

模拟软件：工艺模拟专用软件，常用的锻造成形模拟软件有 QFORM、DEFORM、Forge NxT、SIMFACT、AFDEX 和 EESY-to-FORM 等，目前没有完全国产的用于锻造的模拟软件系统，有一款中国企业与日本大学合作开发的精密锻造模具辅助设计软件，是 RIPLS/锻王软件，这款软件也有金属塑性成形工艺模拟功能。

需要特别指出的是在进行模拟工程建设中必须充分考虑硬件和软件的配置，需要将配置建议和自己确定的配置放置在双方签订的技术或商务合同中，并随时咨询软件销售方升级建议，更新配置，防止配置不合适而影响后续操作使用。

### 工作环境

计算机、工作站以及服务器通常对于工作温度有一定的要求，应保证一定的散热空间，对于工作站和服务器需要保证工作环境的温度在适当范围内。

机房设备基本上都是电子设备，电子设备是由大量的电子元件、精密机械构件和机电部件组成的，这些电子元件、机械构件及材料易受环境条件的影响，如果使用环境不能满足使用要求，就会直接影响计算机系统的正常运行，加速元器件及材料的老化，缩短设备的使用寿命，因此要合理设计机房。

场地的选择。计算机机房应避免有害气体来源及存放腐蚀、易燃、易爆物品的地方，应避免低洼、潮湿、落雷区和地震活动频繁的地方，应避免强振动源和强噪音源，应避免电磁干扰、电磁辐射，应避免设在建筑物的高层或地下室及用水设备的下层或隔壁。

机房内环境设计。计算机房内环境应本着安全、防火、防尘、防静电的原则来设计，并应符合下列要求

安全。计算机机房最小使用面积不得小于 20m<sup>2</sup>，一般一套机器的占用面积按 1.5-2m<sup>2</sup>；计算机机房的建筑地面要高于室外地面，以防止室外水倒灌；机房顶棚与吊顶灯具、电扇等设备务必安装牢固，用电线路设计必须考虑安全用电；门窗应安装防盗网和防盗门，机房内应安装自动报警器。

防火。机房装修应采用铝合金、铝塑板等阻燃防火材料；应配备灭火器，计算机数量较多的机房应采用烟雾报警器，机房内严禁明火与吸烟；消防系统的信号线、电源线和控制线均应穿镀锌钢管在吊顶、墙内暗敷或在电缆桥架内敷设；应保证防火通道的畅通，以便发生紧急情况时疏散人员之用。

防尘。墙壁和顶棚表面要平整光滑，不要明走各种管线和电缆线，减少积尘面，选择不易产生尘埃、也不易吸附尘埃的材料（如钢板墙、铝塑板或环保漆）；装饰墙面和地面、门、窗、管线穿墙等的接缝处，均应采取密封措施，防止灰尘侵入，并配置吸尘设备。最理想的是安装新风系统

防静电。机房应严禁使用地毯，特别是化纤、羊毛地毯，避免物体移动时产生的静电(有时摩擦产生的静电可达几万伏，会击穿设备中的集成电路元器件和芯片(集成电路元器件和芯片的抗静电电压仅 200~2000V))，最好安装防静电地板。

温度和湿度。由于机房内的设备大部分均由半导体元器件组成，它们作时会产生大量热量，如果没有有效的措施及时散热，循环积累的温度就会加速设备老化，导致设备出现故障，过低的室温又会使印刷线路板等老化发脆、断裂；相对湿度过低容易产生静电干扰，过高又会使设备内部焊点及接插件等电阻值增大，造成接触不良；为此，机房内应配备高效、低噪音、低振动、有足够容量的空调设备，使温湿度尽可能符合《电子计算机机房设计规范》的有关要求，一般空调参数为：温度，夏季：23 ± 2℃，冬季：20 ± 2℃；湿度 45%~65%；同时应安装通风换气设备，使机房有一个清新的操作环境。

防灾设计和防灾备份。

如果使用 PC 机进行模拟，也需要考虑 PC 机使用环境建设，建议建立独立的模拟工作室，保证机器锻造 24 小时工作和人员长时间逗留。

## 二、工艺模拟可以解决的问题，模拟软件的主要功能

工艺模拟软件一般由前处理模块、求解模块和后处理模块三个部分组成，他们的主要功能分别为：前处理模块：模具和坯料的几何信息、材料信息、成形条件（设备参数、成形工艺等）的输入，并建立边界条件，形成能够表征实际工况的模型。求解模块：调用各种算法对前处理模块中生成的模型进行计算求解。后处理模块：将模拟结果可视化，输出使用者所需要的结果数据。通过这三个模块，模拟软件能够对锻造过程进行全流程、全工艺的连续分析，得到包括切削、加热、成形、热处理等工艺环节的材料流动、模具填充、应力应变、晶粒流动、金属微结构和缺陷产生发展情况等极有价值的工艺分析数据。解决的主要问题和主要功能具体列举如下：

- 新型锻件产品开发：锻造工艺制定以及优化、锻造模具设计、锻造设备选择、工件组织预测、成形缺陷预测、锻造模具寿命预测、锻件成本预测。
- 原有锻件产品优化：锻件缺陷分析、工件/模具形状优化、锻件材料利用率优化、锻造工艺优化、模具优化设计。
- 冷、温、热锻成形和热-力耦合分析；
- 提供材料流动、模具填充、成形载荷、模具应力、纤维流向、缺陷形成等信息；
- 刚性、弹性和热粘塑性材料模型，适用于大变形分析；
- 弹塑性材料模型适用于分析残余应力和回弹问题；
- 能够划分多面体网格，能够划分同一部件不同材料的网格；
- 可准确预测折叠，充型不足、裂纹、飞边等缺陷，材料变形流线与实际保持一致；
- 流线和质点跟踪可以分析材料内部的流动信息和各种场量分布；
- 温度、应变、应力和损伤及其它场变量等值线的绘制使后处理信息更加丰富；
- 自动接触条件及完美的网格再划分使得成形过程中即便形成了缺陷，模拟也可继续；
- 磨损分析模型用于评估成形过程中模具磨损情况；
- 基于损伤因子的裂纹萌生及扩展模型可以分析剪切、冲裁和机加工过程；
- 模具应力分析功能用于分析组合模具及多衬套挤压模具再成形过程中的变形和损伤；
- 可以分析成形过程中材料和环境的热交换；

- 提供依据模具运动时间、载荷力、成形温度、闭模间隙等精确成形行程控制准则；
- 可计算热锻过程中由于空气和润滑剂高温蒸发所造成的材料充填不满缺陷；
- 可将计算结果传递到 ANSYS、ABAQUS 等软件，实现残余应力、单元、成形形状、应变，进行成形-结构-疲劳的连续性分析
- 成形过程中再结晶现象及微观组织结构的变化；

一般情况下，模拟软件基本包括一个材料数据库，有各种钢、铝合金、钛合金和高温合金材料模拟需要的数据。但多数情况下，为了保证模拟结果更加准确和接近实际，需要使用者自定义材料数据库，软件允许使用者自行输入材料数据库中没有的材料数据；同时也需要使用者自行定义锻造设备。

一般情况下，模拟软件也会包含一个锻造设备数据库，主要数据有液压机、锻锤、螺旋压力机和机械压力机，依据特殊需要，也会提供其它特种锻造设备数据库，但有的时候，这也需要使用者依据实际自己得到的数据，对设备数据库进行修正，建立自己的设备数据库。

需要特别说明，以上提及的功能和能解决的问题，是最为基本的内容。但对于不同的软件，也具有不同的情况，需要使用者在选择软件时必须就以上技术点进行咨询。随着软件开发的不断发展，软件具有的功能和解决的问题也在不断地变化中，一些软件可以提供特种锻造工艺的模拟，一些软件没有。多数情况下，模拟软件都是在基本功能的情况下提供独特的模拟模块，基本功能不同的软件，内容不同，需要使用者依据需要具体了解和调研。

### **三、工艺模拟需要的人员**

工艺模拟应由企业技术研发人员或专业的研究分析人员进行，应具备一些模拟需要的基本知识。工艺模拟人员应具备优秀的数据收集能力、问题提出分析解决能力、逻辑思维能力、数据分析能力以及认真踏实、勤学好问、责任心强等个人素质。具体要求：

(1) 掌握金属塑性成形理论知识：

- ①了解常用材料（钢、铝合金及钛合金）晶体机构及性能曲线；

②了解常用材料在特定温度下屈服强度、抗拉强度、延伸率、断面缩减率等相关数据；

③掌握金属塑性成形中材料应力应变分析方法、屈服准则、金属滑移理论、金属应力应变关系（本构方程）、金属塑性成形过程中的摩擦和润滑及塑性成形的几种理论解法。

*(2) 实际生产经验，掌握锻造成形工艺基本知识：*

①具有锻造技术和工艺的基本概念和知识；

②了解典型产品的锻造成形工艺；熟知将要进行模拟的工艺关键参数，为后续工艺调整或优化奠定基础；

③了解通用锻造成形设备（电动螺旋压力机、热模锻压力机、液压机等）以及特种成形设备（楔横轧机、辊锻机、旋压机和楔横轧机等）；

④了解模具材料性能（锻造过程中模具受力状态，摩擦系数、温度、喷雾润滑等对模具磨损的影响）；

⑤应具有生产一线的经验或体验。

*(3) 掌握有限元基础理论：*

①有限元解决工程实际问题的理论基础；各种有限元单元类型的使用范围；有限元求解方法以及误差分析；

②划分质量网格；成形材料的几何非线性和接触非线性；

③锻造成形工艺仿真软件的前处理、求解器及后处理；有限元仿真实现步骤：划分网格、赋予材料模型及边界条件的设置；后处理中材料的应力应变场、速度场、收敛依据、摩擦条件等基本理论问题。

*(4) 计算机与软件知识与技能*

①具有一定的计算机软硬件知识，并具有简单故障的处理能力；

②需要的配套软件知识、使用能力和技巧。

③实际的计算机操纵技能，具有 CAD 制图建模基础。

特别说明：人员要求，不一定由一个人全部拥有上述要求，可以是团队合作。

## 第三篇 工艺模拟技术应用

### 一、工艺模拟分析的操作流程

#### 模拟规划，收集所需数据

- ①规划要通过模拟得到哪些方面的信息；
- ②确定使用二维模拟或者三维模拟，需要进行模拟的数量；
- ③收集模拟需要的数据，包括工件和模具的几何信息、材料参数、初始状态和边界条件。

#### 几何描述，建立几何模型

①利用 CAD 软件对工件和模具进行几何描述，建立模具 3D 造型，得到模拟的几何模型。有限元模拟仿真软件一般都具有 CAD 系统的文件接口，通过接口可将 CAD 设计的模具几何导入到有限元模拟软件。

#### 前处理，建立模拟模型

- ①选择合适的模拟模块，根据工艺选择热处理、热成形等模块；
- ②输入实体描述，包括几何模型及其网格、温度、材料等；

一些软件需要进行网格划分，将几何模型转化成离散化的有限元网格。一些软件不需要人工选择网格划分。所有软件在变形模拟过程中，软件能够对变形复杂的区域进行自动重划分。如果需要人工选择网格划分，初始化时网格划分的原则是在满足质量、精度的条件下适当考虑电脑的硬件条件，避免由于网格尺寸太小造成计算机运算时间过长。

③选择/输入材料性能，从材料库中选择或者输入材料在变形条件下的性能，若数据库中沒有相关数据需要进行实验得到；

根据产品的特性，选择合适的材料模型。材料的应力应变曲线对材料塑性流动影响较大。如果软件的材料库中有合适的材料可以选择，直接选取相应的材料数据输入即可。如果材料库缺少相应的材料数据，需要通过插值拟合（插值和拟合都是根据某个未知函数（或已知但难于求解的函数）的几个已知数据点求出变化规律和特征相似的近似曲线的过程。但是插值法要求的是近似的曲线需要完全经过数据点，而拟合则是得到最接近的结果，强调最小方差的概念。插值和拟合的区别如下图所示）或者通过实验测得材料应力应变数据，对数据进行处理后获得应力应变曲线，导入有限元软件中进行工艺模拟运算。

④选择求解算法。对于准静态成形过程，应尽可能选用隐式算法求解，避免采用动力算法时人为引入惯性效应，同时隐式算法采用迭代法，求得的应力应变场更为准确；对于高速成形过程，考虑材料的惯性效应，优先考虑显式算法；对于采用隐式算法无法收敛的准静态问题，也可采用显式算法进行求解，此时应注意合理选择时间步长。

需要特别说明，不同的软件对于这一问题的解决方式不同，需要依据不同软件的结构来进行规划和确定。

⑤定义实体之间相互作用，包括接触、摩擦和热传递等；

设定模拟成形过程中各种边界条件，包括环境温度、模具初始温度、坯料与模具热传导系数、坯料与环境热传导系数、坯料与模具之间的摩擦系数；模具运动过程定义及终止位置；也就是定义模拟控制，定义工艺过程的环境、计算步长、计算时间等。

不同软件，具有不同的输入方式和操作，一般依据软件引导可以完成选择和输入。

⑥其他特殊条件，包括材料的组织、需要追踪的位置等特殊模拟需求需要的输入。

### 运行模拟

①设定模拟所用的计算机以及 CPU 核数，模拟的储存位置、多个模拟的计算顺序等，运行模拟。

求解阶段一般不需要用户干预。成形过程由于具有高度非线性性质，计算量很大。计算过程有关的文字信息、运算状态可以从输出窗口获得，可以通过图形窗口获得已经计算完成的时间步的中间结果。在计算过程中，可能出现某些错误诸如网格发生严重畸变导致运算停止，在这种情况下需要人工干涉，继续模拟，无法解决的情况下，需要与软件公司服务人员沟通，寻求协助。

### 后处理，分析结果数据

① 观察模拟结束后的数据信息，包括几何体信息、场信息如应变、温度、应力和其他模拟数据信息，如模具载荷等。

②输出图形或数值信息以在其他应用中使用。

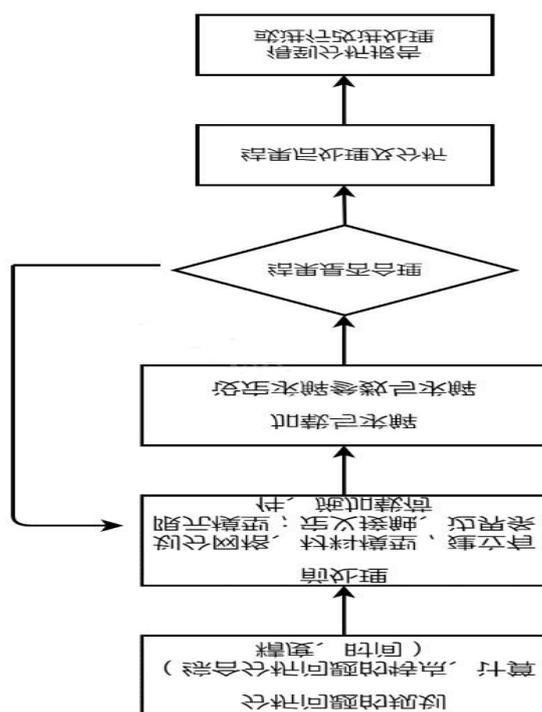
后处理通过读入分析结果数据文件，能够提供工件在变形过程中任何时间步的各种物理数据，包含材料应力应变场、任意部位的速度场；追踪工件内任意点的物理量

与时间的变化曲线，压力机力能曲线等。用户能直观方便地观察模拟结果，预测材料流动趋势及成形缺陷，为工艺优化提供重要的参考依据。

需要特别注意，不同的软件输出的格式，保存的结果格式不同，在软件应用中需要执行确定自己习惯和需要的格式和内容。

### ③ 加强结合现场工艺的模拟结果解读与细致分析

一般的工艺模拟流程图



## 二、输入工艺模拟需要的数据（边界条件）及注意事项

工艺模拟需要的输入条件以及注意事项如下：

输入条件种类	输入条件	注意事项
几何信息	工件/模具的几何模型	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 几何模型应与实际一致，对于复杂几何体应避免尖锐边或尖锐角特征；</li> <li>● 对于轴对称或中心对称体可简化几何模型为截面形状模型；</li> <li>● 几何模型边界需连续闭环，不能有间断点。</li> </ul>
网格信息	网格单元种类选择	网格单元选择应遵循原则：选用形状规则的单元；选用满足精度要求的单元；选用计算效率快的单元。
	网格划分/尺寸设定	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 应对结构变化大、曲面曲率变化大、载荷变化大或不</li> </ul>

		<p>同材料连接的部位进行细化；</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 单元尺寸过渡平滑，粗细网格之间应有足够的单元进行过渡，避免相邻单元差别太大；</li> <li>● 特别关注区域的网格密度应大于普通区域的网格密度；</li> <li>● 需保证总网格数量在计算能力范围内。</li> </ul>
材料信息	材料模型	材料模型应适合所模拟工艺，包括弹性模型、弹塑性模型、弹黏塑性模型等；
	材料性能数据	应检查材料库中是否有所选材料在成形条件下性能曲线，若没有或不全应以实验补充。
设备信息	设备种类选择	设备选择应与实际一致。
边界条件	初始温度	主要是模具的初始温度，初始温度条件应与实际保持一致；同时也需要输入坯料的初始温度。
	位置/运动条件	各实体的位置、运动根据实际中的运动设置
	对象间关系	<p>主要包括工件、模具、环境之间的热传导系数；工件与模具之间的摩擦系数。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 对象间接触关系：各实体之间不能有互相穿透的情况；</li> <li>● 对象间磨损关系：对象之间的摩擦条件按照生产条件选择对应的模型；</li> <li>● 对象间热传递关系：两对象之间以及对象与环境之间的热传递关系都需要定义；</li> </ul>
模拟控制	模拟控制条件	包括计算位置、计算步长、计算时间等

有的软件依据模拟的需要，需要确定：

数据	功能
模具硬度	与磨损密切相关的参数
模具磨损模型参数	模拟成形过程中模具磨损
材料损伤破坏模型	模拟脆性材料及塑性材料破坏，预测材料破坏部位
模具运动速度	影响材料变形速率
成形打击能量	影响工件最终变形程度
材料磨损模型参数	影响模具磨损部位及磨损程度

注意数据收集的准确性，了解误差来源，这对数值模拟结果的正确解读具有重要意义。

### 三、工艺模拟需要的数据收集和获得方式

工艺模拟需要的数据类型依据软件不同而需要有所不同，下表列出的是必需的一些数据，以及获取方式。在采购软件时，需要依据软件需要与软件销售商确定需要的数据表，依据数据表建立“工艺模拟卡”，而后开展模拟工作。

必需的数据如下：

数据	获得方式
几何信息	根据工件/模具的工程图纸或几何模型建立。
材料应力应变曲线	材料模型根据所模拟工艺结合所需要得到的结果数据从 CAE 软件支持的材料模型中选择，或经过二次开发编程输入材料模型；材料性能数据通过基础物理实验获得，例如应力状态实验（拉伸、压缩、扭转）等。软件材料库或通过材料压缩实验
摩擦系数	通过经验设定或通过实验测定
模具运动方式	根据成形方式和压力机类型，从设备生产厂家获得精确的运动参数
模具运动时间（或位移）设定	根据实际压力机类型与模具运动行程确定模具运动时间
模具运动终止位置	一般以成形力或能量作为判断模具运动的终止条件，可根据所选择的成形设备技术参数来确定
时间步长	根据单元长度及应力波速，可确定最小时间步长，设定时间步长不大于最小时间步长
算法选择	对于准静态问题（不考虑惯性效应），多采用迭代法，对于高应变速率问题，采用差分法
网格信息	网格类型根据工件/模具的几何特征以及工艺特征从 CAE 软件支持的网格类型中选择；网格尺寸以及划分密度根据工件/模具的几何参数，参考设计规则以及模拟经验确定。
设备信息	按照实际生产选择。

边界条件是工艺模拟需要数据的通用称呼，上表已经列出了最为重要的边界条件。依据软件的不同，边界条件需要不同，但所有的边界条件都必须从实际生产中测量或者通过经验设定。

就开展的模拟控制条件，需要依据计算机条件与模拟时间来确定，这也与使用的模拟软件相关，需要与软件销售商进行技术确定。

为了引导企业正确开展模拟，这里提出了建立“工艺模拟卡”的应用，下表为比较典型的一个“工艺模拟卡”（格式），企业可以依据本卡建立某零件的“工艺模拟卡”。

#### 工艺模拟卡（格式）

单位：
工艺模拟人：

设备			
机械压力机	螺旋压力机	锻锤	液压机
公称载荷力 ( ) MN	最大能量 ( ) KJ	能量 ( ) KJ	公称速度( )mm/s
行程数 ( ) min <sup>-1</sup>	公称能量 ( ) KJ	上模块重量 ( ) ton	最大载荷( )MN
行程高度 ( ) mm	最大载荷 ( ) KJ	下模块重量 ( ) ton	能量驱动形式 (直趋式/蓄势器)( )
	公称载荷 ( ) KJ		公称载荷/最大载荷率 ( )
	最大速度 ( ) m/s		
工件材料和润滑剂			
工件材料名称或化学成分			
润滑剂名称或化学成分			
技术参数			
工件加热温度 (摄氏度)			
工件从炉膛到设备的传递时间 (s)			
每次打击间隔时间(s)			
工序模具间距离(mm)	第一工序:		
	第二工序:		
	第三工序:		
	第四工序:		
	第五工序:		
	.....		
上下模的平均温度(摄氏度)			
打击次数			
打击能量	第一次 ( ) %		
	第二次 ( ) %		
	第三次 ( ) %		
	第四次 ( ) %		
	.....		
图形	图形包括模具和坯料三位实体图形 (要求和工件接触部分是光滑接触面, 即无尖棱或不搭边情况)。		
CAD 软件	列出需要制图和调整图的软件。		
模拟中出现的问题			

工艺模拟结果记录:	

“工艺模拟卡”是指导开展模拟工作的重要文件，也是重要的技术文件，应该与模拟结果和模拟判断，以及锻件图、工艺卡等一起存档。

建议：如果时间允许，宜开展锻造工艺过程的全流程模拟，充分再现工艺过程；如时间不允许，可仅收集出问题工序，开展针对性的模拟工作。

## 四、工艺模拟的主要输出内容及结果分析与判断准则

### 工艺模拟的主要输出内容

工艺模拟可以预测出工件变形的详细过程，并定量地给出工程师们所关心的与变形有关的各种物理量在工件或模具上的空间分布以及随时间的变化。通常包括：工件与模具的几何外形、位移、速度、（弹性和塑性）应变、应变率、应力、载荷和工件变形流线等。对于热锻，还包括温度以及微观组织（如再结晶体积分数和晶粒度）。如果工件为多孔材料，还另外包括材料密度。即锻造工艺模拟可以在不做任何成形试验的情况下就能使技术人员知道他所设计的工艺、模具和锻件坯料是否合理，如果不合理，可以修改设计重新输入数据再模拟一次直到设计满意为止。应用这项技术可以最大限度地减少试验次数，使工艺优化和新产品试制降低成本，缩短周期。

一般情况下，工艺模拟输出的内容包含下表内容，主要分为：模具（一般为刚形体）和工件（变形体）。但依据模拟软件的不同，输出内容和格式有所不同，为此在订购软件时，必须考虑是否包含了企业需要的输出结果和格式，以合同的形式予以明确和确认。

输出对象	输出内容	结果分析与判断准则
变形体	应力	后处理工件的应力应变遵循材料应力应变曲线，符合基本的塑性变形基本原理；温度变化符合常识；速度及位移、应变速率应与压力机类型相匹配；金属成形过程组织成形流线，损伤及破坏要考虑到材料模型。
	应变	
	温度	
	速度	
	位移	
	接触区	
	应变速率	
	损伤及破坏	
	流线	
	温度	温度变化要符合常识；成形载荷与理论计算成形载荷应在

	成形力载荷	同一数量级。速度、运动行程、力矩、角速度、角位移变化应考虑成形压力机类型；成形需要的能量应小于成形设备能提供的最大能量
	速度	
	运动行程	
	力矩	
	角速度	
	角位移	
	能量	

另外，依据使用模拟软件的模块不同，比如特殊工艺模拟，或者锻前工艺模拟和锻后工艺模拟，以及机械和物理性能模拟，输出的结果有所不同，因此需要企业依据需要和要求咨询软件销售商或开发商。

### 结果分析与判断准则

**几何外形结果：**通过分析模拟结果中工件/模具的几何外形和精确尺寸可以判断产品是否符合实际产品情况，以及对模具寿命进行预测。

**载荷结果：**通过模拟的载荷结果可以指导产品的设备选择。

**位移、速度结果：**通过模拟的位移、速度结果可以分析锻造工艺中的材料流动，以指导工艺和模具的优化设计。

**应力应变结果：**通过模拟的应力应变结果可以分析材料的变形程度以及模具的受力状况，以控制锻件质量、优化模具结构以及优化锻造工艺。

**温度场结果：**通过模拟的温度场结果可以了解工件/模具在成形过程中的温度演变情况，结合应力应变结果，可以分析其组织演变、缺陷产生趋势等，以指导工艺和模具的优化设计。

**其他结果：**根据模拟得到的其他特定结果，如微观组织、材料密度变化等都对实际生产有着直观的指导意义。

依据国外使用模拟技术的经验，工艺模拟必须有锻造工程师参与，工艺模拟软件是工程师工作的一种工具，模拟软件本身不能判断其模拟结果的正确性和适应性。因此工艺模拟软件在使用中必须坚持三个原则：

一个是模拟次数必须足够的多，对于一个从来没有锻造过的零件，在使用工艺模拟技术协助工艺设计、模具设计和设备选型时，必须要进行多次模拟，一般应该在修正各种参数的情况下，进行不少于 27-33 次的模拟。对于一个类似与以前生产过的零件的锻件进行模拟，模拟次数也不应少于 10 次。第二是使用工艺模拟技术必须对现有产品进行反复模拟，并进行验证，积累经验，建立企业需要的数据库。这不但有利于

原来锻件工艺的改进，也是模拟技术经验的积累，推进新产品开发成功的重要途径。第三是工艺模拟是一门技术，需要的知识面比较广。工艺模拟选择参数必须尽可能地靠近实际生产情况，取值必须科学合理，不可过分理想化和人为化，必须听取和参考老技术人员的经验，否则可能会严重影响工艺模拟的效果。

## 五、工艺模拟软件常见故障或显著错误判断原则

模拟中发生模拟故障，犹如使用机器锻造发生故障一样，非常正常，也需要及时修正，尽力避免非法和非理性操作。

既然工艺模拟是一门独特的工程技术，因此从事模拟的人员必须要进行必要的培训和训练，特别是要反复用已有的成功锻件事例进行训练，否则工艺模拟无法正常使用，也很难起到应有的效果。

模拟常见问题	原因分析及解决办法
运算停止	网格畸变严重；材料模型数据错误；变形体温度初始条件设定错误；硬盘空间不足
保持运算状态，运算时间步长时间未变化	网格划分尺寸太小；材料模型数据错误
成形力模拟与理论偏差大	材料模型数据不准确；摩擦系数设定偏大；模具设计不合理
模拟运算时间太长	关注区域局部细化网格，其它区域网格粗化；
工件出现折叠	模具几何造型设计不合理
材料库中新材料模型少	通过材料实验获得新材料数据，拟合后导入仿真软件
几何模型错误	几何模型不连续或二维几何模型法向设置错误导致无法生成网格。
网格错误	网格尺寸设计不当导致实体特征丢失或不能生成网格。
条件不足	前处理输入条件不足，或者有违锻造工艺实际，导致模拟不能开始。
计算崩溃	网格尺寸不当或网格再划分方式不当导致模拟提交一段时间后崩溃。
模拟控制错误	输入的计算核数大于能够调用的计算核数导致不能提交。
后处理数据量过大	后处理计算量过大导致程序闪退。

文件路径错误	文件路径错误导致模拟结果丢失，或软件不支持中文路径导致模拟无法提交。
模拟运行中修改导致错误	模拟运行过程中使用前处理修改条件可能导致模拟结果丢失等错误。
不可预见和不可执行解决的问题	必须联系软件供应商。
电脑故障与电脑操作系统故障	需要更换电脑与操作系统
软件与电脑软件冲突	必须联系软件供应商，或整理模拟电脑。

需要特别指出的是，不同的模拟软件所发生的故障千差万别，难以琢磨，因此发生故障并不可怕，可怕的是总发生故障，如果相同故障重复发生，而非使用者问题，必须要协商软件销售商或开发者进行解决。

在大多数情况下，会发生模拟硬件、工作平台和使用的配套软件与模拟软件不兼容，这就需要严格按照模拟软件的需要做好硬件、工作平台和软件的准备。

## 六、工艺模拟软件的验证方法

工艺模拟软件的结果一般采用实验或生产试验来验证。

1. 通过工艺试验进行验证：按照最优化的工艺模具造型和软件模拟中选用压力机类型，加工工艺模具和选择合适的压力机。工艺试验的边界条件严格遵照模拟中设定的边界条件，进行工艺试验。将实际成形力、成形能量、成形力变化曲线、工件最终成形形状与仿真结果进行对比分析，验证专业金属成形模拟软件的准确性。

2. 企业不应该仅有一种模拟软件，为了能让工艺模拟起到应有的作用，企业至少应该拥有两套不同种的工艺模拟软件，通过多种有限元模拟软件进行仿真计算，对比分析结果的准确性。在实际应用中，也可以采用通用的有限元模拟仿真软件进行更为详细的前处理设定，结果与专业金属成形软件模拟结果进行对照，进一步对比分析专业金属模拟软件的准确度。

3. 采用理论计算和模拟仿真结果进行对照。金属成形过程中材料流动、成形力可以通过理论方法或经验公式进行计算，将计算结果和模拟结果进行对照分析，验证专业金属成形模拟软件的准确性。

4. 模拟计算结果一般分为定性分析、定量分析、定性+定量综合分析。

5. 善于利用统计学知识对模拟结果加以分析。

6. 合理利用正交实验准则，选取不同维度输入工艺参数类型，研究同类锻件模拟的输出结果，可以有效的校验模拟软件的工艺适用范围、计算偏差等。

## **第四篇 模拟工程建设注意事项**

### **一、模拟工程建设特点和行业应用现状**

从第二篇工艺模拟所需资源以及第三篇工艺模拟技术应用的步骤与流程来看，锻造工艺模拟工程建设具备以下特点：

#### **1. 基础投资费用高**

模拟分为前处理、模拟、后处理等过程。三个步骤均依赖于配置不低的计算机硬件、价格不菲的大型专业软件、以及要求较高的运维保障环境。

#### **2. 人员的技术要求门槛高**

应用模拟技术需要较高的人员技术素养。一个工程技术人员，要想达到熟练地、有价值地使用模拟软件，不仅要懂得锻造工艺的基础理论，还要懂得模拟所需的理论知识，如塑性成形原理、有限元分析基础理论知识等，而且还要具有一定年限的工艺、模具设计的经验，现场调试、工艺质量处理、锻件缺陷分析的实操经验。具备这样水平人员的培训，在企业内部，一是需要较长的培养时间（平均 5-8 年），二是培训的代价也很高。

#### **3. 模拟结果的应用容易受到制约**

一个企业所生产的锻件产品在整个锻造行业产品分类中占据一个较窄的幅度，所以企业花大力气投资、进行人员培养，也仅仅用在一个较窄的产品类别、工艺种类上，经济性值得思考。另外，模拟的结果可分为定性的、定量的、或者定性定量相结合的，在企业实际应用中，很容易导致：工艺简易的零件，不需要模拟，凭借技术人员的丰富经验即可掌握；工艺复杂的零件，模拟的结果采用度有限，感觉结果不可用。这是因为技术人员在复杂零件和复杂工艺之间，没有建立起有效的定向分析的联系模式，模拟技术受到应用制约的另一个因素。

#### **4. 工程系统闲置率高**

如果把一个模拟工程系统的使用效率用一个时间指标来衡量，即时间利用率，就是将模拟准备时间、模拟计算运行时间、包括后台计算等时间总和加以统计，除以系统可开动的总时间，即得到利用的效率。从行业总体来看，这个系统的时间效率平均值是一个较低的水平，闲置明显。

正是由于模拟技术的应用具备以上的特点，所以制约了行业工艺模拟工程建设的发展。现阶段，行业的模拟工程建设大致有以下两种模式：

第一种模式，单项、局部应用模式。

这种模式是在中大型企业中加以应用。首先，中大型企业有能力进行投资；第二，企业有一定的生产规模、零件和工艺品类较多，技术人员和技术储备较广，有一定应用基础；第三，企业具备模拟分析的内在需求。

这种模式下，一般按用户终端计算的节点数在个位数，模拟软件单一，人员技术面较窄，模拟应用局限于本企业内特定的一些工艺类别。

第二种模式，工艺模拟联合模式。

这种模式主要应用于：一种是大型、特大型企业的技术中心，还有一种是数个企业、高校等联合起来的模拟应用阵地。

这种模式下，按用户终端计算的节点数有的多达数十个，模拟软件品种较多，工艺和产品类别涵盖较广，技术支持较为全面。例如，一些大型联合平台，将技术人员分为前端造型人员、前端数据处理人员、模拟技术人员、后端数据处理人员、系统基础研究人员、系统维保人员等。分工细化，一方面能有效地降低模拟人员的技术门槛，同时也提高了联合平台系统的使用效率。

## 二、模拟工程未来建设模式

基于以上的原因，锻造行业应用模拟技术的企业数量并不是很广。因此，前节所述第一、第二类应用模式，也仅局限在较小比例的锻造企业中应用。更多的企业，依然还没有开展模拟技术的应用。原因：用不起（企业规模小）；没啥用（几十年就生产三五个零件，没啥问题不清楚）；用了也白用（好不容易有了复杂零件需要用到模拟，但是由于经验欠缺，得不到所需的结果）。

但是现在，由于新的技术出现，锻造行业的模拟技术发展，又迎来了新的契机。分析如下：

主要的新技术是通讯方面 5G 技术、计算机技术和人工智能技术。计算机技术主要体现在：新一代物联网（将取代现有互联网或者说是现有互联网的升级，其基础设施建设已布局完成并开始应用）；云存储和云计算（含大数据应用、新型数据库系统等）。5G 通讯技术的主要特点：高带宽、低时延、多点接入性等。人工智能技术，虽然仍处于高速发展的起步阶段，但其应用面的扩张速度、对传统行业的冲击已经有所

体现。为了能适应这种新技术的发展，也有人提出一种模拟软件新的应用理念，也就是第三种应用模式，被称为“云端智能模拟模式”。其核心含义如下：

一是将模拟的主计算放置在云端。现有的云技术发展已很成熟了。锻造工艺所需的云计算算力已经不是问题。现有云计算成本性价比较高。而且我国现阶段冗余算力对于锻造行业仅用于模拟的算力覆盖也是绰绰有余。主计算放置在云端，极大节省终端用户投资。

二是终端用户只需要解决简单的 I/O 问题。终端用户不需要投资昂贵的硬件；不需要投资大型的专用软件。即使是轻量级的 I/O 软件，将来随着行业应用规模扩大，也可以做到免费。终端用户只需要描述问题即可。特别需要指出的是未来终端用户不再需要复杂高端技术人才。（这个不仅取决于系统，还需要体系的建设做出改变）

三是，5G 的高带宽、低时延特点正好解决了模拟所需的海量数据传输。就现有的模拟数据包在网络传输，可能缩短到秒级、分钟级。

四是，智能技术+新型数据库技术，可以做模拟条件、模拟过程、模拟结果、模拟环境等优化工作。

综上所述，如果用一句通俗的话来概括这种未来的应用模式，就是：全国的锻造行业，都在共用一个模拟软件（锻造云端智能模拟），不需要懂很复杂的理论，只需要描述需求，输入并上传需求，很快就得到想要的结果。

有理由相信，第三种工艺模拟建设模式，可以实现多方共赢：

1. 首先终端用户实现模拟的“白菜价”和低技术门槛；
2. 现有软件提供商由销售成套软件赢利转变为提供云计算工时服务赢利。

由于现有锻造企业数、已实施（购买）模拟软件企业数处于相对平衡状态，软件提供商的利益获取已到瓶颈或发展空间有限；而由于模拟成本降低带来用户群体扩大、导致行业模拟产业规模的增长，软件提供商也将是长期获利。

3. 行业协会提供中间诸多资源整合、衍生服务，起到任何上、下游替代不了的作用，也必将创造应有价值。另外，本发展趋势与行业协会宗旨高度吻合。

假如按第三种模式来建设和应用模拟系统，需要做的事情：

1. 现有模拟系统上云。可能已有系统具备此功能；没有此功能的略加改造、开发、升级。

2. 创新商业运作模式、统合多方资源。传统模拟软件厂商，将不再以销售成套软件作为盈利点，将用云端计算工时获取利益；

线下终端用户，不再需要大量固定资产投资，只需按需求、按流量、按算力支付费用；

技术上，还需要整合、开发前处理输入标准、后处理输出标准、结果运用及解读等技术。

行业组织将推动整合各利益体、商业化组织及运作、中间过程服务等。

### **三、协会在新的工程建设模式中所起的作用**

依据第三种工程建设模式的设想，作为行业牵头单位和聚合平台的中国锻压协会，将推动做以下事情：

1. 整合各方资源。模拟软件选型、升级改造、上云；组织国内力量联合开发国产模拟软件；组织开发前、后端接口软件。

2. 推进商业平台的建设。运作；协调投资主体；规划运行模式；协商利益划分。

3. 推动衍生服务发展。建立模拟资源库（材料库、性能参数库、模拟作业数据库等）；聚合模拟技术人才（系统开发人才、锻造模拟理论研究、技术应用人才等）；提供造型数据输入代理服务、输出数据解读服务（各种类型应用）、云端模拟计算过程服务；相关技术培训业务。

4. 指引模拟平台创新发展。分步实施、滚动发展；协调解决平台运行过程中出现的问题（包括技术、管理、商业问题）；不断融合新技术，研究平台未来发展。

## 附注

参与本指引起草和审校的单位 and 人员有：

- (1) 重庆大学 周杰教授；
- (2) Forge 模拟软件中国代理 雷讯先生；
- (3) Qform 模拟软件中国代表 北京富京技术公司 董卓先生；
- (4) 上海交通大学 赵震教授、胡成亮教授；
- (5) 东风锻造有限公司 朱家刚高级工程师；
- (6) 江苏森威精锻有限公司 杨益工程师；
- (7) 江苏龙城精锻集团有限公司 孙伟工程师。