

**中国锻压协会
冲压与钣金制作
工艺模拟工程建设指引**

中国锻压协会编

2022年8月

目录

目录	2
前言	3
第一篇 冲压与钣金制作、冲压与钣金工艺及工艺模拟概述	3
一、 工艺模拟的意义与作用	3
二、 工艺模拟的定义	5
第二篇 工艺模拟所需资源	6
一、 工艺模拟需要的硬件、软件	6
二、 工艺模拟可以解决的问题，模拟软件的主要功能	9
三、 工艺模拟需要的人员	10
第三篇 工艺模拟技术应用	12
一、 工艺模拟分析的操作流程	12
二、 输入条件及注意事项，包括工艺模拟需要的数据	14
三、 工艺模拟需要的数据收集和获得方式	16
四、 工艺模拟的主要输出内容及结果分析与判断准则	18
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	25
三、 协会在新的模拟工程建设模式中所起的作用	26
附注:	27

中国锻压协会

冲压与钣金制作工艺模拟工程建设指引

前言

本指引适用于冲压件生产工艺，包括拉延（拉深）、冲裁、热冲压成形的板材变形工艺等，以及管材液压成形工艺等的特种成形工艺。同时也适用于钣金制作的弯曲等板材变形的工艺。

本指引适用于冲压和钣金制作企业，冲压和钣金制作模具设计制造企业，用于指引企业开展工艺模拟建设，以及工艺设计和模具设计人员进行工艺模拟分析。

本指引适用于各种冲压和钣金制作设备下的冲压和钣金制作工艺模拟，包括但不限于机械压力机、液压机、折弯机和卷板机等。

本指引不但适用于冲压和钣金制作工艺，也适用于与冲压和钣金制作相关的下料和材料热处理工艺，同时也适用于指导冲压和钣金制作件机械性能相关的组织和影响因素的模拟。

本指引在引导完善冲压和钣金制作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冲压和钣金制作过程的物理模拟技术发展与应用。

第一篇 冲压与钣金制作、冲压与钣金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。

冲压是在加压设备和工（模）具作用下，使金属板料发生塑性变形或分离，从而获得一定几何尺寸、形状冲压件的加工方法。板料冲压主要由下列工序组成：

分离工序（冲裁工序）：毛坯或零件的一部分与另一部分分离。包括剪切、落料、修边、冲裁和切口等。

成形工序：毛坯或零件改变形状。包括拉深、胀形、缩口、起伏成形和整形等。

复合工序：该类工序包含冲裁和成形等两种以上工序。主要是通过复合模或连续（级进）模来实现。

装配工序：利用模具将几个单个冲压件装配到一起，比如车门压合、轿车前后盖压合等工序都属于用冲压方法实现装配工序的实例。

钣金制作用钣金制作是用简单、通用性工具，使金属板材、管材和型材发生变形或分离，按照预期要求成为零件或结构件的加工过程。

钣金制作是一种综合冷成形工艺。钣金包括剪切、冲孔、切割、冲/切复合、折弯、铆接、拼接、滚压、辊压（渐进成形）、翻边、卷边和扭曲等工序；而制作则是指利用设备与工具对型材和管材进行切割、弯曲和打孔等加工，从而获得一定形状零部件的加工过程。钣金制作在中国传统工业体系中被纳入五金件生产工艺的范畴。

现代冲压和钣金制作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人们的共识。

随着信息技术和通信技术的发展，冲压和钣金制作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。数字化方法在冲压和钣金制作行业中最重要的作用之一是工艺模拟。

冲压和钣金制作成形时，材料特性、材料表面状态、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。金属冲压和钣金制作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，了解冲压和钣金制作成形的全过程，包括冲压和钣金制作过程中各阶段材料贴合模具的情况、材料变形趋势、材料内部的应力、表面应力、应变、应变速率、成形载荷及速度矢量场等，以此指导冲压和钣金制作成形的工艺设计、模具设计、板坯的设计、压力机的选择以及成形质量的控制等，已经成为众多冲压和钣金制作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。目前工艺模拟在冲压和钣金制作工业中取得成功的领域有：制定冲压和钣金制作工艺、分析模具应力、分析冲压和钣金制作工艺缺陷等。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，减少冲压和钣金制作生产成本。

概括地讲，工艺模拟协助制订冲压和钣金制作工艺，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。

工艺模拟的主要作用是提高产品质量，降低成本，缩短新产品开发周期，是企业实现数字化、信息化、智能发展的基础，是行业企业实现转型升级、高质量发展的必要手段。

二．工艺模拟的定义

CAE: CAE(Computer Aided Engineering) 计算机辅助工程，指用计算机辅助求解分析复杂工程和产品的结构力学性能，以及结构性能的优化设计等问题的一种近似数值分析方法。

CAE 软件: CAE 软件可以分为两类：针对特定类型的工程或产品所开发的用于产品性能分析、预测和优化的软件，称之为专用 CAE 软件；可以对多种类型的工程和产品的物理、力学性能进行分析、模拟和预测、评价和优化，以实现产品技术创新的软件，称之为通用 CAE 软件。

工艺模拟： processing simulation，是 1993 年发布的电子学名词。是对工艺过程及结果进行的模拟分析。是 CAE 内容的一部分。

冲压和钣金制作工艺模拟（板材工艺模拟）： 利用计算机和板材成形专用软件对冲压和钣金制作工艺过程进行模拟，进而不断完善产品结构和工艺参数、工艺方法的计算机辅助工程。

CAE 的作用：

a) 增加设计功能，借助计算机分析计算，确保产品设计的合理性，减少设计成本；

b) 缩短设计和分析的循环周期；

c) CAE 分析起到的“虚拟样机”作用在很大程度上替代了传统设计中资源消耗极大的“物理样机验证设计”过程，虚拟样机作用能预测产品在整个生命周期内的可靠性；

d) 采用优化设计，找出产品设计最佳方案，降低材料的消耗或成本；

e) 在产品制造或工程施工前预先发现潜在的问题；

f) 模拟各种试验方案，减少试验时间和经费；

g) 进行机械事故分析，查找事故原因。

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模拟计算机独立，不可兼用日常工作等。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，在选择 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，可能会不建议使用 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：在冲压和钣金制作成形行业里，模拟软件都注重与 CAD 软件的接

口，基本都与流行的三维设计软件 CATIA、Pro/ENGINEER 和 UG 有着良好的接口，软件的使用操作也都比较方便。通用性软件有：MSC.Marc、ABAQUS、ANSYS、LS-DYNA 系列等。

模拟软件：冲压和钣金制作 CAE 方面的软件是比较多的，板材成形的 CAE 软件多为专业软件。目前常用的专用软件有 Autoform、Dynaform、PAM-STAMP 和通用软件 ProE 和 Solidworks。

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。计算机机房应避开有害气体来源及存放腐蚀、易燃、易爆物品的地方，应避开低洼、潮湿、落雷区和地震活动频繁的地方，应避开强振动源和强噪音源，应避开电磁干扰、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^2 ，一般一套机器的占用面积按 $1.5\text{--}2\text{m}^2$ 计算；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过镀锌钢管在吊顶、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、铝塑板或环保立邦漆)；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(摩擦产生的静电可达几万伏，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，它们工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。

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 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

功能涵盖了冲压和钣金制作零件的整个开发流程。产品可行性、模面开发设计、调试、模具和工艺优化等。

- 模具设计，基于参数化的模面设计功能，代替复杂的 CAD 设计，节省模具设计人员的设计时间。(目前模具结构刚强度计算以及压机挠度计算基本还没有纳入这些专业软件中，一般采用通用软件计算。但随着高品质、轻量化的产品需求，未来模具结构刚强度计算、压机挠度计算必然会体现在专业软件中，指导模具设计开发)。
- 冲压和钣金制作件工艺辅助设计。

- 零件所需材料毛坯快速展开功能——优化排样，替代繁琐的人工展开计算。
- 冲压和钣金制作件成形工艺性分析，可以预测成形过程中板料的破裂、起皱、减薄、冲击线、滑移线等缺陷，评估板料的成形性能，从而为完善产品设计和板料成形工艺、模具设计提供帮助。
- 快速产品评估，节省产品初期开发的时间。
- 快速计算功能，针对成形件、简单拉延件、伸长类及压缩类翻边结构、胀形结构进行快速评判。
- 工艺优化功能，识别敏感因素，提高成形稳定性。
- 强大的数据管理功能。
- 结果报告功能。厚度分布、失效、可成形性、应力应变输出，成形极限图等。
- 可进行全工序模拟分析，预测回弹并进行回弹补偿。
- 进行冲压和钣金制作件刚性分析，及时修改完善产品或完善工艺方案。
- 冲压和钣金制作设备选择。
- 指导产品设计。

总之，解决冲压和钣金制作件产品的可制造性，节约材料成本和模具成本，缩短模具制造和调试时间，提高产品质量，最终提高企业的综合竞争力。

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冲压和钣金制作工艺的模拟，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，最好是理工科本科以上学历，外语为英语语种，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。

就企业而言，需要开展工艺模拟工作的人员包括产品开发设计、工艺开发设计、DL图及模具设计人员。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、铝合金等）晶体结构及性能曲线；

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，掌握冲压和钣金制作成形工艺基本知识：

①具有冲压和钣金制作技术和工艺的基本概念和知识；

②了解典型产品的冲压和钣金制作成形工艺；

③了解通用冲压和钣金制作成形设备（液压机、机械压力机、折弯机等）以及特种成形设备（液压成形机、卷板机和旋压机等）；

④了解模具材料性能（成形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、几何非线性和接触非线性；

③冲压和钣金制作成形工艺模拟软件的前处理、求解器及后处理；有限元模拟实现步骤：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

根据工艺模拟分析重点目标的不同，所进行的具体操作和输入内容有所不同，但基本流程主要包括以下几方面：

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

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

- ② 选择合适的模拟模块；
- ②输入实体描述，包括几何模型及其网格、温度、材料、工艺模面等；对产品几何数据或工艺模面数据进行处理；模具和工艺参数设置。

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，若数据库中没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，不同模拟需要，对这部分的输入内容不同。也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，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，如磨具载荷等。

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对模拟结果分析，进行工艺方案调整或对策方案制定；必要时，进行新一轮模拟分析，直到通过工艺分析要求。

二．输入条件及注意事项，包括工艺模拟需要的数据

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">● 几何模型应与实际一致，应避免尖锐边或尖锐角特征；● 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；● 几何模型边界需连续闭环，不能有间断点。
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">● 应对结构变化大、曲面曲率变化大、载荷变化大或不同材料连接的部位进行细化；● 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；● 特别关注区域的网格密度应大于普通区域的网格密度；

		<ul style="list-style-type: none"> ● 需保证总网格数量在计算能力范围内。
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；材料屈服准则的选择应合理、正确；材料性能参数的设定应与实际生产材料相一致，包括轧制方向和实际料厚(如下差料)；回弹边界约束条件需要明确。
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"> ● 对象间接触关系：各实体之间不能有互相穿透的情况； ● 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； ● 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； ● 虚拟拉延筋是否适合，是否应采用真实拉延筋； ● 压料力是否满足压边圈闭合的要求。
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

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，下表列出的是必须的一些数据，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。

必须的数据如下：

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、轧制方向和实际料厚(如下差料)、回弹边界约束条件	材料模型根据所模拟工艺结合所需要的结果数据从 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。

No. 5								
No. 6								
技术参数（列出模拟软件需要的实际工艺技术参数）								
编号	名称					数字或描述		
CAD 软件（列出需要制图和调整图的软件）								
序号	名称					作用		
模拟中出现的问题								

特别指出：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），必须是模拟软件可以识别的图形格式。

“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，以及冲压和钣金制作件图、工艺卡等一起存档。

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，载荷等。冲压和钣金制作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；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	
刚性体	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
	成形力载荷	
	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，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的情况，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、速度结果可以分析冲压和钣金制作工艺中的材料流动，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，以控制冲压和钣金制作件质量、优化模具结构以及优化冲压和钣金制作工艺。

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，本功能在热冲压中体现。

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（热冲压中）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，工艺模拟必须有冲压和钣金制作工程师参与，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，对于一个从来没有冲压和钣金制作过的零件，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冲压和钣金制作件进行模拟，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。这不但有利于原来冲压和钣金制作件工艺的改进，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。

在冲压和钣金制作工艺模拟中，可以输出并判断材料开裂风险点位置及程度判定（最大失效、成形极限图）；起皱、多料区域及程度判定；减薄率输出；开裂风险点主应变、主应力及其方向；面品风险点次应变、次应力及其方向；压边圈闭合、成形力、板料流入量、坯料排样等；到底前各时间段成形及贴模过程，以及滑移线、冲击线（外板），面品的风险预测（外板）和各工序回弹及回弹补偿方案、结果输出（参考）。

依据所用软件的不同，输出与判断格式都有不同，特别是对缺陷判断准则各软件有各软件设定的内容，需要与软件开发商和销售商予以确认。

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，犹如使用机器冲压和钣金制作发生故障一样，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冲压和钣金制作件事例进行训练，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；
工件出现流动故障，比如破裂等	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，或者有违冲压和钣金制作工艺实际，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，如果相同故障总是发生，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。

目前各企业所使用的所有软件都是国外软件商的，这基本是一大硬伤。其余都是小故障和小问题。

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，研究同类冲压和钣金制作件模拟的输出结果，可以有效的校验模拟软件的工艺适用范围、计算偏差等。

软件算法和计算过程是软件公司自己验证；材料参数以及力、位移边界条

件（含模具型面）是用户输入的，要与实际一致，但往往根本没有办法一致，就一个有平衡块的压边过程就没法正确模拟，还有拉延筋现在基本都用虚拟筋，真实拉延筋用的很少。模拟分析是否准确，不仅与软件有关，很大成度上取决于输入条件是否与实际一致。验证模拟结果与实际一致性的方法：

①现场调试要严格按照模拟分析的板料流入量控制，看成形性是否与模拟分析一致；

②利用网格仪对成形后的零件实测主应变和减薄率及 FLD 图对应安全裕度，与模拟分析比对；

③留到底前各高度工序件，验证模拟成形结果准确度；

④对比现场滑移线及冲击线高度与模拟相比对；

⑤到底及过程中褶皱状态是否与模拟一致；

⑥零件回弹尺寸是否与模拟数据一致；

⑦面品（缺陷）是否与软件预测结果一致。

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，冲压和钣金制作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，不仅要懂得冲压和冲压和钣金制作钣金制作工艺的基础理论，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、冲压和钣金制作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

一个企业所生产的冲压和钣金制作件产品在整个冲压和钣金制作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，冲压和钣金制作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，也仅局部在较小比例的冲压与钣金制作企业中应用。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，冲压和钣金制作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。冲压和钣金制作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冲压和钣金制作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：全国的冲压和钣金制作行业，都在共用一个模拟软件（冲压和钣金制作云端智能模拟），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。

由于现有冲压和钣金制作企业数、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、协会在新的模拟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、冲压和钣金制作模拟理论研究、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和人员有

- (1) 中国锻压协会 李凤华教授级高级工程师
- (2) 一汽解放汽车有限公司 富壮工程师
- (3) 重庆大学 周杰教授；