

中 文 摘 要

整体辗钢车轮以其优越的机械性能以及良好的内、外在质量，在铁路运输车辆上得到了广泛的应用。在整体辗钢车轮的生产环节中，预成形工步起着重要的作用，它不仅对初步形成火车轮形状，而且对车轮内部质量和金属流线的改善起重要作用。但是，由于火车车轮形状较为复杂，预成形过程中的成形力和摩擦系数等工艺参数都很难求得精确的理论解，目前其成形工艺和模具的设计主要依靠经验数据和简单的理论计算来完成，有时甚至要通过多次试生产才能找到较为合理的加工参数，费时、费力。

本文对预成形工艺进行了理论分析，建立了镦粗工步及预成形工步的数学模型和力学模型，在此基础上，采用 DEFORM-3D 有限元软件对预成形工步进行了数值模拟。论文分析了不同镦粗压下量对火车车轮预成形工艺的影响、预成形过程中的金属流动规律及变形区应力、应变状况；对火车车轮预成形过程中的重要工艺参数进行了数值模拟分析，获得了这些参数对车轮成形的充填情况及成形力的影响。根据模拟结果优选参数进行现场试验，将模拟结果与实际加工情况进行对比，得出了现实加工条件下火车轮预成形的最佳工艺参数，并对车轮成形过程中的常见缺陷提出了改进措施和建议。

通过本文的分析和研究，掌握了火车车轮的预成形过程的工艺规律，为其预成形工艺方案的确定、成形生产和后续工艺的研究提供了理论依据，对于改进火车轮的锻造质量和生产效率、提高成品率、降低生产成本具有重要的意义。

关键词：火车车轮；预成形；数值模拟；有限元分析

Theoretical analysis and Numerical simulation of Preforming in Railway Wheel Forming Process

Graduate Name:Song GuangXin

Directed by:Fu JianHua

Abstract

Integral rolling wheel is extensively used in vehicles of rail transporting for its excellent mechanical performances and inner and outer qualities. Preforming processe plays an important role in the forming of its preliminary shape as well as the improving of its inner material qualities and metallic streamlines. However, because the shape of the train wheel is very complex, accurate theoretical results of the forming pressure in the preforming processes are difficult to obtain, such as forming force and friction conditions. Therefore, the forming process of wheel and design of dies are always calculated based on experiential data and simple theories presently. Sometimes reasonable processing parameters have to be obtained by trial production for several times, which is a waste of time and power.

In this paper, preforming process was analyzed theoretically, the mathematical and mechanical model were established. And the process was numerically simulated with FEM software DEFORM-3D. The influnces of different upsetting reductions on the preforming process, the metal flow rule

during the preforming of train wheel and the strain and stress field of the deforming areas were also analyzed. Important parameters in the preforming process and their influences on the filling conditions and the forming pressure have been studied. Then the simulation results have been compared with that of the practical production ones, optimized parameters of train wheel forming under practical production have been attained. Measures and suggestions have been put forward based on the common problems in the preforming procedure of train wheel.

Through the study and analysis of this paper, the rules of the wheel preforming process has been mastered, which provide a theoretical basis for the determination of the preforming process design, the forming production and the subsequent process of the wheel. It is of great significance for the improvement of forging qualities and production efficiency, the increase of the rate of finished products and the decrease of the production cost.

Key words: Railway wheel; Preforming; Numerical simulation; FEM
analysis

承 诺 书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是在导师指导下独立完成的，学位论文的知识产权属于太原科技大学。如果今后以其他单位名义发表与在读期间学位论文相关的内容，将承担法律责任。除文中已经注明引用的文献资料外，本学位论文不包括任何其他个人或集体已经发表或撰写过的成果。

学位论文作者（签章）：

2008年6月5日



第一章 绪论

1.1 研究的背景及意义

铁路是我国交通运输的重要工具之一，铁路运输在国民经济发展中有着举足轻重的地位。火车车轮作为铁路交通运输车辆的重要部件，具有承载、导向、传递动力和制动等功能。随着我国铁路运输逐渐向着高速、重载方向发展，车轮在复杂的运行工况及恶劣的工作条件下，由于受到速度效应和制动方式的影响，对其强韧性、耐磨性、抗热裂性、抗剥离性、抗疲劳性等均提出了更高的要求。因此，研究车轮成型工艺，大力提升车轮产品综合质量、提高产品加工的合格率，制造优质车轮，是实现铁路运输的有力保证^[1]。

目前，机车车轮生产工艺大体分为如下几种：一是铸造车轮法；二是全模锻法；三是整体辗钢车轮生产法^[2]。铸钢车轮生产具有规模比较灵活、适应性强、建厂投资小，能耗低，机加工费用少，生产成本低，建设周期短等优点，但是铸钢车轮的质量一直制约着其适用范围。全模锻车轮具有质量好、生产工艺简洁的优点，但由于必须使用大功率的锻压设备，且生产效率低，故没有得到广泛的使用。整体辗钢车轮生产法通过模锻和轧制扩径两个步骤来完成车轮主体成形。整体辗钢车轮由于生产时经过较大塑性变形，故内在质量较铸造车轮要好，同时其生产通过预成形和轧制两个工步分配变形量，相对于全模锻生产方法来说，其生产工艺对模锻设备的要求也大大降低了。基于整体辗钢车轮在质量和生产工艺上的优点，目前已为世界各国广泛应用^[2]。

太原重型机械集团有限公司于1996年成功引进加拿大CSW公司的整体辗钢车轮生产线，是我国继马鞍山钢铁公司轮毂厂之后的第二条整体辗钢车轮生产线，该生产线于1997年6月试车成功。但是仍存在关键工艺问题：如各工步，尤其是预成形和压弯工步变形量分配、模具结构尺寸等问题均未能得到很好解决，不仅使车轮工艺及模具设计周期长、调试和修模过程复杂，而且经常出现车轮辐板裂纹、成形形状和尺寸超差等质量问题，使当前车轮产量与生产线的生产能力有较大差距。因此，增加车轮生产工艺设计的技术密度、提高其工艺技术的科学水平和材料利用率，降低生产成本成为迫切的需要。

本课题以当前我国铁路运输事业的高速发展为契机，针对车轮预成形工艺中的成形和质量控制等难点问题，采用计算机三维造型设计、数值模拟技术和试验研究

等方法对车轮 60 MN 压机预成形工艺进行分析，为预成形工艺设计提供了相关理论依据，用以提高车轮成形技术的科学性及产品质量的可控性，提高企业经济效益，及不断满足国内车轮市场的需求。

1.2 国内外研究状况

目前车轮成形工艺方法比较常用的有生产经验法、物理模拟法、数值模拟法等几种。国内外许多学者分别采用不同的方法研究了车轮成型工艺：

1、生产经验法：在科研手段比较落后的情况下，车轮的设计生产技术人员凭借生产经验，对车轮成形工艺作了大量研究改进：杨发昌等通过对车轮生产每一工序后的轮坯进行剖析，找出了车轮偏心的原因，并提出了要克服偏心，就要控制加热条件，增加高压水清除氧化皮能力，改进水压机工作台结构。章国胜通过生产实践，发现采用校偏压弯模纠正车轮的偏心问题很有成效。并通过对压痕工艺实践摸索，得出压痕时定径环内孔合理斜度为 $15^\circ \sim 18^\circ$ 时，比较容易满足金属排出比，能较好的解决成形轧制时易形成踏面折叠的问题。秦国庆等对太原重型机械集团有限公司钢轮厂分公司辊卧式车轮轧机调整参数进行了分析计算，确定了斜辊、车轮与主辊间的速度关系与斜辊中锥段处的截面曲线方程，计算了斜辊各部位、压紧辊与车轮的接触面积，以及斜辊各段的水平、垂直分力。张高萍等分析了马钢车轮轮箍分公司在车轮生产中存在的主要问题，介绍了车轮生产工艺及设备的改造情况。太原重型机械集团郭玉玺在总结生产经验的基础上，对车轮热成形各工步成形力进行估算、对模具及工艺参数的设计提出建议、并总结了各工步下金属的流动规律。

2、物理模拟法：王志诚利用铅和塑泥模拟了马钢车轮压轧成形工艺过程，找出了轮辋内、外侧外端充不满的原因：即成形环斜度大，且与压痕坯斜度方向相反时会导致轮辋外侧无法充满；成型环高度方向尺寸偏小时，金属易于沿径向流动，导致轮辋内侧外端无法充满。通过改进，开发了车轮成形的最佳工艺流程。裴兴华对火车车轮辗轧成形新工艺进行了物理模拟试验，即用铅在室温下进行热辗成形，通过对金属流动的分析，得出了金属流动合理、填充良好、变形均匀、无折叠现象的摆辗成形工艺。裘哲利用塑泥材料，以 0915C 车轮为试验对象，模拟试验验证了压痕坯分流面的理论计算结果，从而制定出镦粗定径联合工艺、压痕镦粗联合工艺等方案，它使金属变形过程更加合理^[1~3]。

3、数值模拟法：王志诚开发了二维非稳态刚粘塑性有限元计算软件 RVPEEM，分析了火车车轮锻造中预锻和终锻两个工步的成型过程，研究了车轮成型中的金属流

动规律^[4~5]。太原科技大学陈慧琴、刘建生、郭晓霞等采用刚塑性有限元模拟软件 TFORM2 模拟了 915KKD 快速车轮的预成形过程, 得出了预成形过程的塑性流动规律和镦粗压下量对预成形的影响较大的结论^[6~7]。许章泽等借助 MARC/Autoforge 对火车车轮预成型各工步进行了弹塑性有限元热力耦合数值模拟。研究了车轮预成型过程中金属流动规律、应力场、应变场、温度场以及轮坯压缩比的获得, 定量分析了摩擦因素和压痕定尺对车轮预成型过程的影响^[8~12]。B. C. Miller 用 DEFORM-3D 模拟了火车车轮压轧变形过程、对热加工过程的温度场进行了模拟, 发现高温度梯度冷却模具对金属流动产生很大影响, 并预测了表面折叠缺陷^[13]。K. Davey 等综合分析了有限元数值模拟在火车车轮成型中的应用问题^[1]。

上述研究在很大程度上丰富了车轮成形工艺理论, 这些理论可以为生产设计提供良好的指导。但是这些研究有着三个方面的不足: 第一, 这些学者大多采用理论研究结合数值模拟的方法对车轮得成形过程进行研究, 但由于试验条件的限制, 都未能与实际生产很好的结合; 第二, 许多学者在采用数值模拟对车轮成形工艺进行模拟时, 对模拟控制参数的设置采用的是理论上的建议值。这样得出的模拟结论在理论上是成立的, 但是因为各个生产单位工艺流程、设备、加工条件各不相同, 如果用这些结论来指导生产就容易出现偏差。要想得出比较符合实际情况的模拟结果并且能够用来指导生产, 就应该根据设备和实际加工条件选择合适的模拟参数。第三, 数值模拟的时间控制, 如果模拟时间过长, 势必会延长产品的设计周期, 这对提高生产效率目的是相违背的。因此, 根据车轮的加工过程、产品形状等因素, 选择合适的模拟软件以及建立合适的有限元模型都非常重要。

1.3 主要研究内容和方法

1.3.1 研究内容:

针对前文提到的诸多研究者的问题, 在理论分析的基础上以 840HDSA 车轮为例进行模拟研究, 对影响车轮预成形的加工参数进行了变参数模拟, 根据数值模拟结果优选参数进行现场加工试验。以便获得符合实际生产情况的模拟控制参数(比如摩擦因子), 在确定模拟控制参数的时候也是根据实际加工设备进行选择(比如成形速度)。这些工作将使数值模拟更符合该厂实际生产情况, 并且这些参数还能为以后的模拟研究提供依据。为了能更好的提高数值模拟的效率, 选用 DEFORM-3D 作为模拟软件, 并对车轮成形的有限元模型进行了合理的优化, 以减少模拟时间。

1.3.2 研究方法

- 1、对火车轮成形工艺（包括镦粗和预成形）进行理论分析，在适当假设的基础上对镦粗及预成形工步建立数学模型和力学模型；
- 2、以 840HDSA 车轮为典型件进行成形力的理论计算；
- 3、应用有限元分析软件 DEFORM-3D 对火车轮预成形过程进行数值模拟，计算应力、应变并分析成形过程中金属流动规律；
- 4、根据理论分析和有限元模拟结果，优选加工参数进行现场加工试验，对所选用的有限元软件、有限元模型和数值模拟结果进行验证；
- 5、对摩擦系数和成形速度进行变参数模拟，分析其对预成形过程的影响，并将模拟结果和实际生产情况进行对比，得出最符合现实加工情况的模拟控制参数，为后续工艺的研究提供依据；
- 6、为方便技术人员快速有效的对不同产品的工艺参数进行模拟，提供 AUTOCAD 二维图输出*.STL 格式三维模型的技术支持。

第二章 火车轮成形工艺及理论分析

2.1 火车车轮及车轮成形工艺简介

2.1.1 整体火车车轮简介

虽然各种火车车轮的结构随着机车工作条件、机车构造以及轮对制造条件的不同往往各不相同。但是在任何情况下，车轮都由三部分构成：轮毂、辐板和轮辋。（见图 2-1）我们通常把位于轮缘一侧的各个表面称为内侧，与此相对的一侧称之为外侧。车轮在滚动时与钢轨接触的轮辋工作面称为踏面^[13]。

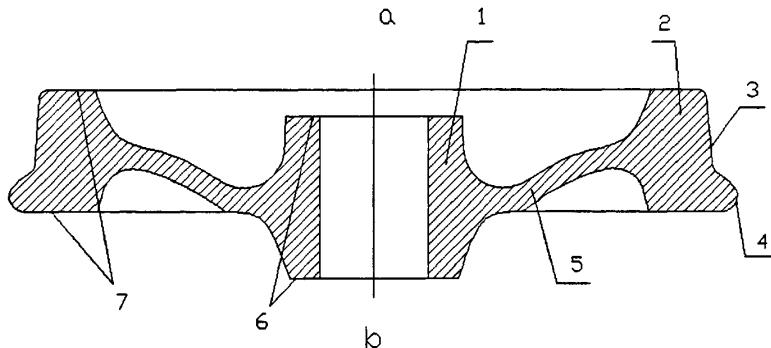


图 2-1 整体火车车轮的各部位名称

a-外侧；b-内侧；1-轮毂；2-轮辋；3-踏面
4-轮缘；5-辐板；6-轮毂端面；7-轮辋端面

2.1.2 火车车轮成形工艺简介

火车车轮成形一般采用一次加热，逐步成形技术，其热成形工艺流程为：
(见图 2-2)

- (1) 镊粗：在模锻水压机上将钢坯镦粗成一定高度的圆饼状坯料；
- (2) 预成形：在 60MN 下拉式模锻水压机上模压成形轮毂及部分辐板；
- (3) 冲孔：采用用 10MN 复动冲孔水压机冲出中心孔；
- (4) 轧制：在七辊卧式轧机上对轮辐辗轧，使轮辋的径向达到热锻件的直径，并使轮辋、踏面和法兰成形；
- (5) 压弯：用 30MN 双动拉深压弯水压机弯曲幅板，使之达到要求的形状与厚度，并使轮形得到校正。

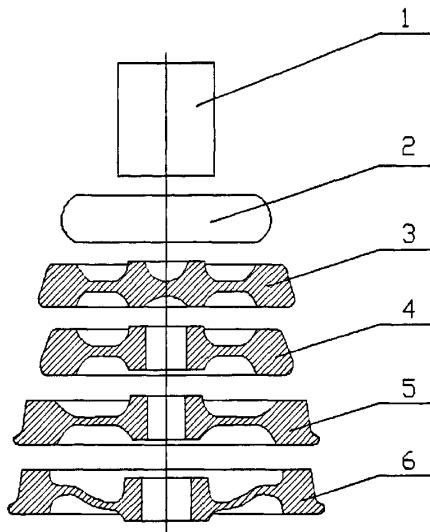


图 2-2 火车车轮成形工艺流程图

1-坯料；2-镦粗；3-预成形；4-冲孔；5-轧制；6-压弯

上述成形工艺已被太原重型机械集团轮轴公司采用，其整体辗钢车轮生产线所使用的设备也都在一定程度有利于成形精度的提高，60MN 下拉式模锻水压机重心低，稳定性好，具有良好的导向对中性，能比较有效的避免偏心；10MN 复动冲孔水压机具有可调间隙的板式导向装置，保证轮毂冲孔无偏心；七辊卧式轧机上下轧边辊和主辊各自为独立的可控硅直流伺服传动，采用恒压伺服控制和位置闭环检测，轧制后的车轮表面精度和尺寸精度都较高；30MN 双动拉深压弯水压机的独特结构和工模具，具有成形“S”形幅板车轮的优越性。可制造直径 610mm~1300mm 的各类火车车轮和工业用钢轮^[7]。

坯料通过镦粗和预成形两个工步后，将形成火车车轮的初步形状，预成形工艺的设计是整个车轮热成形工艺的重点，不仅初步形成火车轮形状，更起着改善车轮内部材质、金属流线的重要作用。预成形工艺设计的不合理将会导致车轮充填不完全、偏心、辐板破裂、成形力过大等缺陷，这些缺陷会导致后续工步加工困难甚至导致整个车轮报废。因此，针对预成形工艺的研究是十分有必要的。

2. 2 镦粗工步理论分析

2. 2. 1 镦粗变形理论分析

由于接触面上摩擦的影响，使变形体内应力不均匀分布，从而使变形也呈不均匀分布，形成变形程度不同的几个区域。如图 2-3 所示，I 区为难变形区，II 区为易变形区，III 区为小变形区。由于坯料与模具接触面上金属流动受摩擦阻力的影响，

坯料中部金属流速快于接触面上的金属流速。镦粗后外观呈鼓形^[14]。

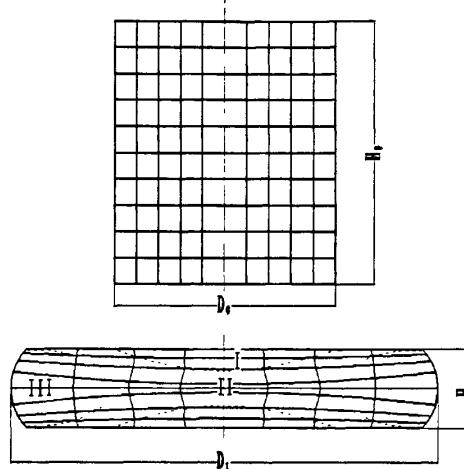


图 2-3 圆柱体坯料的镦粗变形

2.2.2 各国 840 车轮镦粗工步锻造比简介

良好的镦粗变形，不仅能得到规整的轮坯，而且内部孔隙能很好地压实，铸态组织得以充分地破碎，力学性能得以改善。研究指出：当镦粗变形超过 40%时，坯料内部的等效应变场和静水压应力分布是比较理想的。由表 1 可知，国内外所用的镦粗锻造比均大于 3^[15]。

表 2-1 各国钢坯镦粗变形值

	踏面直径 mm	H ₀ (mm)	H ₁ (mm)	变形程度(%)
加拿大	840	467~521	140~146	70~72
太重	840	440	125	72
马钢	840	377~445	120	68~73

2.2.3 镦粗数学模型建立

车轮的坯料采用圆柱形下注式钢坯，其镦粗可以简化为二维轴对称问题进行分析计算^[14]。

图 2-4 表示平行砧板间的轴对称镦粗。设 $\tau = mK$ 。对图中基元板块列平衡方程式得

$$\sum P_r = \sigma_r h r d\theta + 2\sigma_\theta h dr \sin \frac{d\theta}{2} - 2\tau r d\theta dr$$

$$-(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)hd\theta = 0$$

因为 $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{d\theta}{2}$ ，并略去二阶微量，则上式可简化成：

$$\sigma_\theta h dr - 2\tau r dr - \sigma_r h dr - r h d\sigma_r = 0$$

假定为均匀镦粗变形，故

$$d\epsilon_r = d\sigma_r ; \sigma_r = \sigma_\theta$$

最后可得：

$$d\sigma_r = -\frac{2\tau}{h} dr \quad (2-1)$$

如前所述，此处仍按绝对值列简化屈服方程，因假定 $\sigma_r = \sigma_\theta$ ，故有

$$\sigma_z - \sigma_r = Y ; d\sigma_z = d\sigma_r$$

联解后可得：

$$d\sigma_z = -\frac{2\tau}{h} dr$$

$$\sigma_z = -\frac{2\tau}{h} r + C$$

当 $r = r_e$ 时， $\sigma_z = \sigma_{ze}$ ，故有

$$C = \sigma_{ze} + \frac{2\tau}{h} r_e$$

最后得：

$$\sigma_z = \frac{2\tau}{h} (r_e - r) + \sigma_{ze} \quad (2-2)$$

$$P = \int_0^{r_e} \sigma_z dF$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^{r_e} \left[\frac{2\tau}{h} (r_e - r) + \sigma_{ze} \right] 2\pi r dr \\ &= \pi r_e^2 \left(\frac{2}{3} \frac{\tau r_e}{h} + \sigma_{ze} \right) \end{aligned} \quad (2-3)$$

接触边界条件：式 (2-3) 中的 σ_{ze} 为工件外端 ($r = re$) 处的垂直压力。因为钢

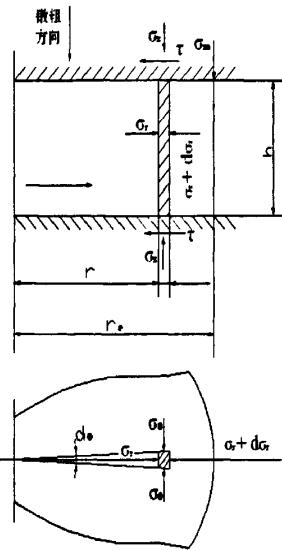


图 2-4 平行砧板间轴对称
镦粗变形及基元板块受力分析

坯锻粗为自由锻粗, $\sigma_{re} = 0$, 则 $\sigma_{ze} = Y$

根据屈雷斯加屈服准则 $\tau = mK(K = Y/2)$, 联合第(2-3)式

则可以方便的求出高度为 H, 直径为 D 的圆柱题自由锻粗时接触面上的压力公式:

$$P = pF = Y \left(1 + \frac{m}{6} \frac{D}{H}\right) \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2-4)$$

2.2.4 锻粗摩擦条件的确定

常摩擦力条件是认为接触面上的摩擦切应力 τ 与被加工金属的剪切屈服强度 K 成正比 ($\tau = mK$)。一般热塑性成形、采用上限法或有限元法分析塑性成形过程时采用常摩擦力条件。火车轮预成形锻粗时, 车轮始锻温度为 1260°C, 因此采用常摩擦力条件对锻粗摩擦力进行描述。在确定摩擦因子的时候, 对火车轮预成形锻粗过程中的以下几个方面进行综合考虑:

(1) 金属种类和化学成分: 一般来说, 材料的硬度、强度越高, 摩擦系数就越小。对于铁碳合金来说, 随着碳的质量分数的增加, 摩擦系数会有所降低。车轮材料选用 60 钢, 通过查表可知 60 钢在热加工中的摩擦系数为 0.25 到 0.35 之间。

(2) 接触面上的单位压力: 车轮预成形锻粗时接触面上的单位压力一般为 20~50MPa, 而当单位压力小于 300MPa 时对摩擦系数的影响基本不大, 所以不考虑接触面上单位压力的影响。

(3) 变形温度: 一般认为, 变形温度较低时, 摩擦系数随变形温度升高而增大, 到某一温度, 摩擦系数达到最大值, 此后, 随变形温度的升高反而有所降低。这是因为到某一温度摩擦系数达到最大值后, 随着变形温度继续升高时, 氧化皮会变软或是脱离金属基体表面, 在金属坯料和模具之间形成一个隔离层, 起到润滑的作用, 所以摩擦系数反而下降。查表可知在 1260°C 的始锻温度下, 摩擦系数在 0.2~0.25 之间。

(4) 变形速度: 许多试验研究结果表明, 摩擦系数随着变形速度的增加而有所下降, 通过查表我们可以知道当变形速度在 100mm/s 以内时, 摩擦系数在 0.15~0.25 之间。而太重钢轮公司 60MN 压机锻粗成形的速度一般在 40~60mm/s 的范围之内。

在分析锻粗工步的成形过程的条件下, 综合考虑上述几种因素对摩擦系数的影响, 在进行理论分析计算以及数值模拟时, 选取摩擦因子 $m=0.25$ 对锻粗工步进行分析^{[14] [16]}。

2.3 预成形工步理论分析

2.3.1 车轮预成形工步的成形过程

如图 2-5 所示，随着上下成形模的闭合，金属充满两个环形模膛，形成轮毂和轮辋并压出了部分辐板。这是一个无飞边开式模锻过程。在坯料体积重量和定位对中以及锻模行程能得到较准确的控制的情况下，可以使金属变形在充满模膛、产生飞边之前结束。这个过程的变形有以下几个方面的特点^[15]：

(1) 由于模膛侧壁粗糙度和模锻斜度、过渡圆角的影响、摩擦阻力和模膛内金属的充填强度有所不同。在液压机加载时，金属向外环下腔流动强度较大，因而充填情况较好。

(2) 辐板面首先接触受压，由于内层金属和中央冲头的作用力，金属首先向外膛流动，直至与成形环内壁相接触。随着阻力增大，使圆坯内金属形成一个分别向轮毂和轮辋上下空腔流动的分流面。

(3) 因模膛高度不同，所以各部分金属的变形大小各不相同。轮辋部分变形最小，辐板处变形量最大。

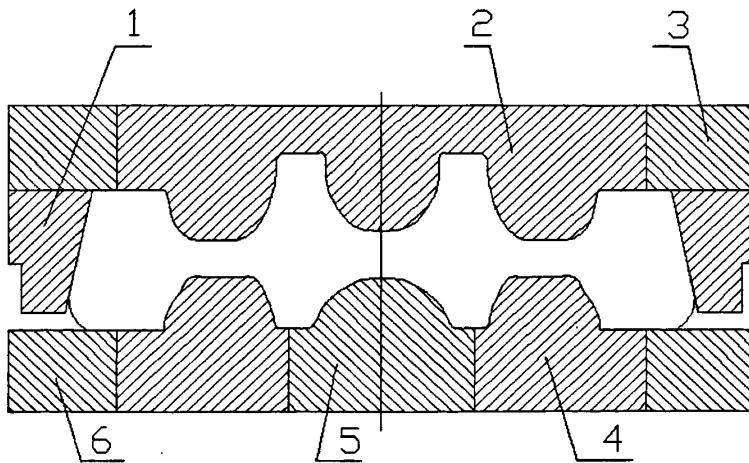


图 2-5 预成形工步变形结束时状态图

1-成形环；2-上成形模；3-上适配环
4-下成形模；5-顶出器；6-下适配环

2.3.2 轴对称挤压模型

根据火车轮预成形工步的成形过程分析，我们可以把预成形模型简化分解成两个模型：一是中央冲头和辐板处下压形成的轴对称镦粗模型；二是充填轮毂和轮辋型腔的轴对称挤压模型。在镦粗工步的分析中，已经对轴对称镦粗模型做了分析，

现在主要对轴对称挤压模型建立模型并分析。

首先对轴对称挤压型基元板块进行受力分析（如下图 2-6 所示）：

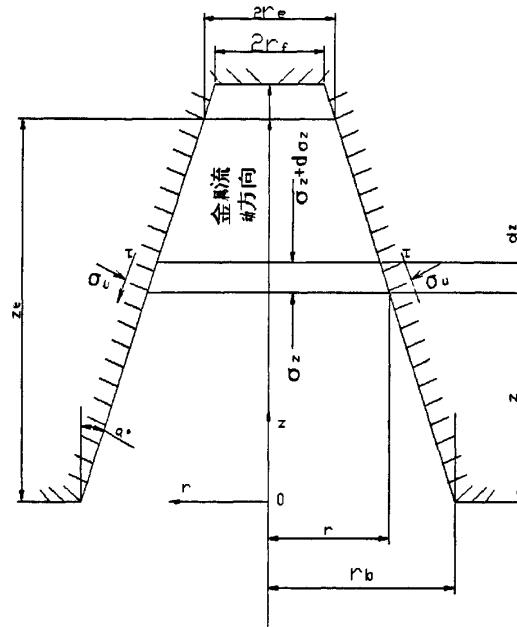


图 2-6 轴对称挤压型金属流动方向及基元板块受力分析

列基元板块的平衡方程式（参见图 2-6），并略去高阶微量得：

$$2\sigma_z r \tan \alpha dz - r^2 d\sigma_z - 2\tau rdz - 2r\sigma_u \tan \alpha dz = 0$$

又由静力平衡关系可写出

$$\sigma_u = \sigma_r + \tau \tan \alpha$$

挤压变形时， r 方向为压应变， z 方向为拉应变； σ_r 和 σ_z 虽同为压应力，前者的绝对值必大于后者，故按绝对值列出的简化屈服方程应为

$$\text{联解得 } d\sigma_z = -\frac{2[\tau(1+\tan^2 \alpha) + Y \tan \alpha]}{r} dz \quad (2-5)$$

又由几何关系可得

$$r = r_b - z \tan \alpha$$

代入上式，积分后得

$$\sigma_z = K_1 \ln(r_b - z \tan \alpha) + C \quad (2-6)$$

$$\text{式中 } K_1 = \frac{2[\tau(1+\tan^2 \alpha) + Y \tan \alpha]}{\tan \alpha} \quad (2-7)$$

当 $z = z_e$ 时, $\sigma_z = 0$, 故 $C = -K_1 \ln(r_b - z_e \tan \alpha)$

最后得

$$\sigma_z = K_1 \ln \frac{(r_b - z \tan \alpha)}{(r_b - z_e \tan \alpha)}$$

$z = 0$ 处的 σ_z , 即为挤入深度为 z_e 时所需的单位变形力

$$p = K_1 \ln \frac{r_b}{(r_b - z_e \tan \alpha)} = K_1 \ln \frac{r_b}{r_e} \quad (2-8)$$

由式 (2-7) 和 (2-8) 可知, 锻件充填圆锥形模膛所需成形力与模膛侧壁斜度、模膛的宽度与深度有关, 而充填所需的成形力又与充填情况直接挂钩, 所以对预成形工步的理论分析主要是分析金属充填模膛以及充填所需成形力的问题^[14]。

2.3.3 影响金属充填模膛的主要因素

根据火车轮预成形过程的分析, 影响金属充填模膛的主要因素有:

(1) 模膛侧壁斜度的影响

模膛设计成一定的斜度是为了获得预定的锻件形状或是为了模锻后锻件易于从模膛内取出, 但是模壁斜度对金属充填模膛是不利的。因为金属充填模膛的过程实质上是一个变截面的挤压过程, 金属处于三向压应力状态 (图 2-7)。为了使充填过程得以进行, 必须使 $|\sigma_3| \geq \sigma_s$ (在上端面 $\sigma_1 = 0$, $\sigma_3 = \sigma_s$)。为保证获得一定大小的 σ_3 , 当模壁斜度愈大时所需的挤压力 F 也愈大。在不考虑摩擦的条件下, 所需的压挤力 F 与 $\tan \alpha$ 成正比。但是如果考虑摩擦的影响, 尤其当摩擦阻力较大 (等于 τ_s) 时, 所需挤压力的大小或充填的难易程度就不与 $\tan \alpha$ 成正比关系了, 这是因为摩擦力在垂直方向的分力 $\tau \cos \alpha$ 随着 α 角增大而减小 (图 2-8)。

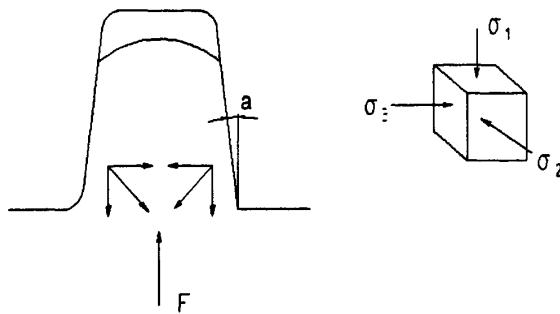


图 2-7 模膛斜度对金属充填模膛的影响

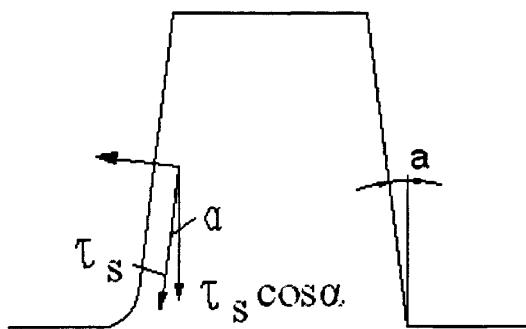


图 2-8 摩擦力对金属充填模腔的影响

(2) 孔口圆角半径的影响

模具孔口的圆角半径对金属流动的影响很大，当 R 很小时，在孔口处金属质点要拐一个很大的角度再流入空内，需消耗较多的能量，故不易充满模膛，而且 R 很小时，对某些件还可能产生折叠和切断金属纤维。同时模具此处温度升高较快，模锻时容易被压塌，结果使锻件卡在模膛内取不出来。但是孔口处 R 值太大要增加金属消耗和机械加工量。总的看来，从保证锻件质量出发，孔口的圆角半径可以适当的大一些。

(3) 型腔的宽度与深度的影响

模膛愈窄时，在其它条件相同的情况下，金属向空内流动时的阻力将愈大，孔内金属温度的降低也愈严重，故充满模膛愈困难。模膛愈深时，在其它条件相同的情况下，充填也愈困难。

(4) 变形金属与模壁的摩擦系数、模具温度的影响

一般来说，模壁的表面粗糙度低和润滑较好时，摩擦阻力小，有利于金属充满模膛。

模具温度较低时，金属流入孔部后，温度很快降低，导致变形抗力增大，使充满模膛困难，尤其当孔口窄小时更为严重。一般在锤和水压机上模锻高温合金锻件时，模具一般预热到 $200\sim300^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 设备工作速度的影响

通常情况下，设备工作速度高时，金属变形流动的速度也快，这将使摩擦系数有所降低，金属流动的惯性和变形热效应的作用也显得突出了，正确的利用这些因素的作用，有助于金属充填模膛，提高锻件质量^[14~19]。

2.3.4 预成形工步摩擦条件的确定

在上文进行了镦粗工步摩擦条件的讨论，结合预成形工步成形过程的实际情况：模具型腔较为复杂、成形温度高、单位成形压力过大以及现实加工条件可能导致的润滑分布不均匀现象，确定预成形工步摩擦因子的取值范围为 0.25~0.4 之间。为了能够确定出较为符合实际加工条件的摩擦因子，本文分别取三种不同摩擦因子（ $m=0.25$ 、 $m=0.3$ 、 $m=0.4$ ）进行数值模拟分析。采用数值模拟的方法对不同摩擦因子时的预成形过程进行了对比分析。

2.3.5 预成形工步成形速度的确定

太重火车车轮预成形工步在 60MN 模锻水压机上完成，为了使研究更符合实际生产情况。对设备的成形速度进行了实测后取预成形工步上模下行速度为 40mm/s，考虑到对设备的改造尚有可能进一步提高成形速度。在进行数值模拟分析时我们还取了成形速度为 30mm/s 和 50mm/s 的情况进行对比分析。

2.3.6 预成形力的计算

确定预成形所需的变形力是为了合理选择或设计所需的模锻设备，正确设计模具和制定工艺方案。但是火车车轮的形状复杂，不同系列车轮形状差异较大，并且车轮材料的性能、成形过程中的润滑条件各不相同。因此，要完全依靠理论计算方法来精确地求出变形力是比较困难的。在设计时一般采用经验公式进行成形力估算。

初成形在金属充满模膛，达到轮辋厚度控制尺寸后产生最大压力。采用 CN 古布金的平均单位流动压力法，先求出单位流动压力 p ，在根据车轮尺寸求得成形力。

$$p = ZVmp \quad (2-9)$$

式中：
Z——应力不均匀系数，根据成形轮参数计算并查表得；

V——变形充填影响系数， $V=1.2 \sim 1.5$ ；

m ——已成形轮坯尺寸和外部摩擦影响系数， $m = 1 + \frac{\mu d}{3h}$ ， μ 为摩擦系数；

P' ——与成形的行程速度有关的实际变形阻力， $P' = \sigma_w w$ ， w 为变形速度系数，

可根据压机不同工作速度查表得。

2.4 本章小结

本章对火车车轮及太重整体辗钢车轮生产工艺进行了简要的介绍，对整体辗钢车轮的构造及其加工工艺有了进一步的认识，通过对其中的镦粗及预成形工艺进行

了理论分析，提出了影响火车轮预成形效果的主要因素有：模具形状（包括模膛斜度、型腔深度宽度、孔口圆角半径等）、摩擦、成形速度、坯料形状（由于镦粗工步采用平砧板间自由镦粗，因此，预成形工步的坯料形状主要由镦粗压下量决定）。对锻造造成形中的摩擦系数影响因素做出了分析，结合火车轮成形的实际情况，镦粗工步摩擦系数取 0.25，预成形工步摩擦系数取 0.25~0.40。对 60MN 水压机（预成形工步采用设备）的工作速度进行了实测，实测值为 40mm/s，考虑到实际生产中因产品所需成形力有所差异导致的成形速度差异，提出了在数值模拟中对成形速度取 30mm/s、40mm/s 和 50mm/s 三个不同速度进行对比分析。这些理论分析对工艺设计和数值模拟工作都起着重要的作用。

第三章 火车车轮预成形的缺陷

金属成形缺陷的预测研究是预防缺陷、提高质量和控制成形的关键所在。金属塑性成形过程中的缺陷主要分为表面缺陷和内部缺陷两大类。常见的表面缺陷有：折叠、开裂和充不足等，这些表面缺陷的产生将导致产品的报废，从而造成很大的经济损失。内部缺陷主要表现为产品内部的开裂，由于产品的内部缺陷具有一定的隐蔽性，会给产品的工程应用带来很大的危害性。因此，通过预测研究来制定缺陷防止措施对工业生产具有重要的价值。成形缺陷的发生直接影响生产和产品质量，能够预见这些缺陷的发生，对积极推进产品设计、工艺工装设计的科学性，控制并消除缺陷的发生，具有重要意义。

从总体上看，对金属塑性成形过程的研究方法主要有理论分析法、物理模拟法以及近年来发展起来的数值模拟法。随着计算机及有限元数值模拟软件的迅速发展，数值模拟方法在进行金属塑性成形缺陷的预测上取得了较大的成功。一方面，数值模拟方法可以实时跟踪描述金属的流动、应力、应变等特征，揭示缺陷形成的机理，具有直观、形象的特点；另一方面，现代大容量、高速度的计算机客观上使得短时间系统模拟不同成形条件下的塑性成形过程成为可能，因而可以在有限的时间内得到比较全面的模拟结果。

3.1 车轮的偏心缺陷

3.1.1 车轮偏心的危害

火车车轮在高速运行过程中。如果轮对质心所在的中心惯性主轴与实际旋转中心所代表的转动轴不重合，在旋转时就会有一个离心力作用于转动轴上，这个离心力又必然会通过转动轴传递到它的支承体（轴承、轴瓦）上，从而造成轴承、轴瓦的过度磨损及疲劳损坏。若交变离心力引发的振动频率与机车的固有频率相同或具有整数倍关系时甚至会发生共振现象而产生严重后果。因此，在火车车轮的生产中，车轮的偏心率必须得到严格的控制。

3.1.2 车轮偏心的主要原因

在实际加工生产中，造成火车轮偏心的原因主要有以下几点：

- (1) 润滑不均匀；
- (2) 设备本身的精度问题；
- (3) 成形过程中的对中性问题没有很好的得到解决；

(4) 坯料本身的缺陷，材料内部组织不均匀，坯料端面不平都会导致车轮偏心的产生。

综合上述原因，在预成形加工过程中要克服偏心，就要控制加热条件、增加高压水清除氧化皮能力，改善润滑条件、提高坯料端面质量、改进水压机工作台结构。较小的偏心率要在后续工步里进行调整消除，比如在压弯工步采用校偏压弯模纠正规格车轮的偏心。

3.2 材料组织缺陷

车轮材料组织导致的缺陷主要体现在两个方面：一是由于预成形工步车轮各个部分材料变形大小不同，其中辐板部分变形量较大，由于大量金属流动和由此产生的热效应，易于使偏析、粗晶和疏松等缺陷萌生并扩展成辐板裂纹。二是车轮在预成形结束后检测到材料组织存在缩孔现象。如果缩孔发生在冲孔工步的落料区域（如下图 3-1 中剖面线所示区域）。因为该区域的材料将在下一工步中被冲掉，所以对车轮质量不会造成影响。如果缩孔发生在冲孔落料区域外，将会导致车轮缺陷。在有限元模拟中采用反向点追踪的方法可以预先确定冲孔落料区域材料对应在坯料上的位置。通过这样的预测，对于不会影响到车轮成形质量的坯料我们就可以有效的加以利用，提高坯料的有效率，降低车轮的加工成本。

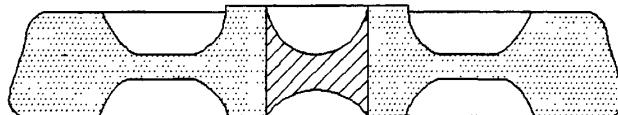


图 3-1 车轮冲孔落料区域示意图（剖面线所示）

3.3 变形力过大

锻造过程是一个极其复杂的过程。衡量锻件质量的指标有外部形状、材料消耗、变形分布以及晶粒组织等，其中，锻件的变形力是衡量锻件质量的一个重要指标，也是合理选择或设计所需的模锻设备、正确设计模具和制定工艺方案的重要依据。锻件的变形力越大，变形过程中模具承受的力就越大，锻件与模具型腔之间的磨损就会加剧，时间一长就会造成模具的型腔尺寸不符合锻件的精度和尺寸的要求，以至于成形出的锻件质量不合格。同时，由于模具承受的力大，还容易在模具的相对脆弱部分出现崩裂、塌方等破损情况，造成模具的破坏以至报废。另外，锻件的变形力过大，还会对设备造成冲击，影响设备的使用和寿命。所以，降低锻件变形力

可以提高锻模的使用寿命，降低锻件的成本，因此，开展基于锻件变形力的研究具有重要的理论意义和应用价值。

在模锻成形过程中，锻件的几何形状和尺寸、原材料的性能、变形金属与模具的温度及其热交换、变形金属与模具接触表面之间的摩擦以及变形金属在模膛中的非稳定不均匀流动等，都对模锻变形力和变形功有着直接或是间接的影响。

在前文中提到车轮预成形过程设计是一个无飞边开式模锻过程。在坯料体积重量和定位对中以及锻模行程能得到较准确的控制情况下，可使金属变形在充满模膛、产生飞边之前结束。但是坯料体积计算不合理导致飞边产生或是模具型腔设计不合理导致的金属流动困难等都会大大提高车轮成形所需的变形力，不仅难以成形工艺设计的车轮热锻件形状，还会加快模具的磨损甚至是对设备造成不良影响。本文将在后续章节中针对车轮预成形所需变形力进行重点分析，并采用数值模拟的方法对比分析不同加工参数对变形力的影响。

3.4 充填不完全

塑性体积成形时的充填问题是影响锻件成形质量的首要问题，我们通常用锻件上模膛的高宽比和过渡圆角半径大小等来衡量充填的难易程度。高宽比越大，圆角半径越小，充填越困难。要使金属较好的充填模膛，需要有足够的模压力，但是如果模膛设计不合理、加载方式不合适，模压力再大也不一定能使模膛充满，而且模压力过大时，还可能使模具损坏。因此，应当从模压时的应力、应变分析入手，研究模压时金属的变形流动规律，分析影响金属充填模膛的主要因素和可采取的措施。通过大量的生产试验和理论分析，

火车车轮的预成形过程是一个复杂的金属塑性体积成形的过程，这个成形过程有以下几个特点：（1）大量的金属流动；（2）各部分金属的变形程度不同，以轮辋部位金属变形量最小，辐板部位最大，并且两个部位的变形量差距较大；（3）变形过程可以分为自由镦粗和约束镦挤两个阶段：变形初期，辐板处材料首先被镦粗；随着变形的继续，坯料外侧与定径环接触，变形进入约束镦挤阶段；

在现实加工过程中，车轮充填不完全主要是在轮辋上部以及轮毂的角隙部位充填不完全（见图 3-2）。根据对成形过程的分析，影响预成形充填过程的主要有以下几方面的因素：

- (1) 车轮预成形模具型腔的形状，如倾斜角度、过渡圆角的直径等；
- (2) 摩擦状况：接触摩擦对端部角隙充填有很大的影响；

(3) 应变速率: 应变速率在金属塑性成形过程中有着很重要的影响, 不仅会对材料的变形抗力产生影响, 还会对变形过程的热效应、摩擦等产生影响;

(4) 车轮镦粗工步的镦后高度, 镦后高度决定约束镦挤过程的长短, 而约束镦挤对成形过程中的金属流动、型腔充填有着很重要的影响。

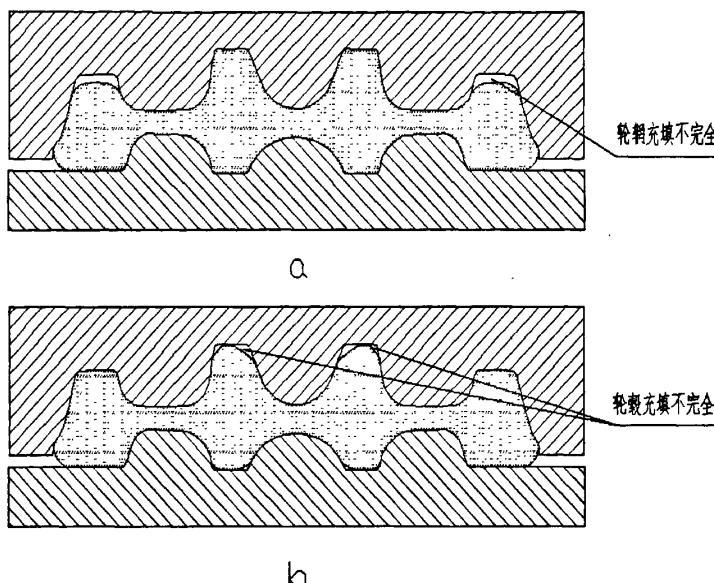


图 3-2 车轮成形两种充填不完全状态
a-轮辋充填不完全; b-轮毂充填不完全

针对以上影响因素, 为了得到较好的成形充填效果, 工艺参数的选择是至关重要的。为了分析摩擦、镦粗压下量和成形速度对预成形充填的影响, 采用数值模拟的方法对取不同参数时对预成形过程进行分析。

3.5 本章小结

在本章中介绍了车轮预成形过程中得几种主要缺陷: 车轮偏心、材料组织缺陷、变形力过大、充填不完全。对缺陷的危害, 产生原因进行了分析, 并对缺陷的预防提出了相关建议。考虑到车轮的成形过程是一个综合复杂的过程, 对变形力过大和充填不完全这两个缺陷提出了采用数值模拟的方法进行分析。

第四章 火车车轮预成形的数值模拟

由于火车车轮的形状较为复杂，因此对成形力、成形过程中的摩擦状况都很难求得其精确的理论解。目前火车轮成形工艺和模具的设计主要依据经验数据和简单的理论计算。车轮的生产工艺往往要通过多次试生产才能找到较为合理的加工参数，费时费力。因此，需要采用有效的研究方法和手段对火车车轮生产工艺进行系统和准确的分析。近年来，随着计算机软硬件的迅猛发展，有限元模拟软件也应运而生，其中比较优秀的有限元模拟软件有：MARC、DEFORM-3D、ANSYS、ABAQUS 等。这为我们通过数值模拟的方法解决理论上和实际生产中难以解决的问题提供了强有力的工具。可以对一些难以确定的工艺参数进行数值模拟，来代替生产试验，减少时间和材料的浪费。

4.1 有限元模拟软件的选择

根据金属材料非线性本构关系式的不同，三维有限元在金属成形过程模拟中的应用主要分为两大类：弹—（粘）塑性和刚—（粘）塑性有限元。

(1) 弹—(粘) 塑性有限元法：这一方法考虑了金属变形过程中的弹性效应，其理论基础是 Prand It-Mises 本构方程。它可分为小变形弹塑性有限元法和大变形弹塑性有限元法，前者主要分析金属成形过程中的初期情况，后者应用于变形量发生大变化的后期阶段。它们适用于弹性变形量无法忽略的成形过程模拟，广泛应用于板料成形问题分析。在分析金属锻造成形时，不仅能按照变形的路径得到塑性区的发展状况，工件中的应力应变、温度分布规律及几何形状的变化，而且还能有效地处理卸载等问题，计算残余应力及残余应变，从而可预知并避免产品缺陷。但是，弹塑性有限元法要采用增量方式加载，为了保证计算精度和迭代的收敛性，增量步长不可能太大，所以在计算变形问题时，计算量大，且需要较长的时间和较多的费用，效率较低。金属成形过程模拟分析中常用到的基于弹—(粘) 塑性本构关系的三维有限元分析软件主要有 MARC、ANSYS 等。

(2) 刚—(粘) 塑性有限元法：这一方法忽略了金属成形过程中的弹性变形，其基本理论是 Markov 变分原理。刚—(粘) 塑性有限元法适用于锻造、挤压以及轧制等塑性成形问题的分析中。由于刚—(粘) 塑性有限元法是一种基于变分原理的有限元方法，使计算的增量步长可以取得大一些，并且该方法可以用小变形的计算方法处理大变形问题，所以刚—(粘) 塑性有限元法克服了弹—(粘) 塑性有限元

法中计算量大运算时间长、效率低等不足，使计算程序大大简化，达到了较高的计算效率。但该法由于忽略了金属成形中的弹性效应，所以该方法不适合求解弹性问题，也不能进行残余应力计算。目前，刚一（粘）塑性有限元法已成为金属体积成形的主要数值模拟方法。采用刚一（粘）塑性本构关系的有限元分析软件有：ALPID、DEFORM-3D 等。

DEFORM-3D 具有简单易用的操作，完善的、直观的前、后处理系统。用户可以直观的在屏幕上观察材料变形和金属流动的过程，了解成形过程中的应力，应变分布，破裂、折叠等成形缺陷的形成过程以及成型后的残余应力分布。因此，我们选用了 DEFORM-3D 对火车车轮成形的成形进行数值模拟。

4. 2 模拟的步骤及基本假设

4. 2. 1 利用 DEFORM-3D 进行数值模拟的基本步骤：

1) 建立有限元模型：有限元模型建立的正确与否是数值模拟精确度的关键所在。DEFORM-3D 是采用 STL 格式描述模具的几何信息，STL 格式采用三角面片来逼近模具型腔的工作表面，计算效率很高。但是 DEFORM-3D 本身不具备建模功能，需要借助其他 CAD 软件造型并输出成 STL 格式文件，然后在前处理中导入几何模型，对工件采用 4 节点的三维四面体单元划分网格，建立有限元模型。

2) 生成坯件和模具的接触条件以及坯件和模具的约束、载荷、运动条件。前处理工作准备就绪后，生成数据库文件，用来存储计算过程中生成的结果。

3) 进入 DEFORM-3D 软件的运算处理模块对数据进行运算。

4) 进入 DEFORM-3D 软件的后处理模块，根据模拟生成的应力、应变情况对模拟结果进行分析。

4. 2. 2 模型的简化假设

金属成像过程中，材料塑性变形的物理过程极其复杂。因此，必须通过一些必要的假设，把变形过程中的某些过程理想化，以便于数学上的处理，本课题在模拟时做基本假设如下：

1) 在实际的成形过程中，工件和模具间的摩擦力是随着各种条件的变化而变化的。在模拟中，我们假设摩擦系数为一固定值；

2) 车轮成形过程是在高温下进行，锻坯在高温下因散热温度必然降低，但是锻造变形过程中，近 90%以上的变形功转化为热能，使锻坯和模具温度升高，为了简化计算，假设变形热效应与热散失基本平衡，即在变形过程中，锻件的温度保持不变；

- 3) 假设模具为完全刚性体。工件为完全塑性体，没有弹性变形；
- 4) 不考虑体积力（重力、惯性力、磁力和离心力等）的影响；
- 5) 材料是均匀且各向同性，体积不可压缩；
- 6) 材料的变形流动服从 Levy-Mises 流动理论。

4.3 镗粗工步的数值模拟

4.3.1 有限元模型的建立

车轮的坯料采用圆柱形下注式钢坯，坯料直径 406mm，高度为 440mm。由于车轮坯料为轴对称形状，为简化模型，取工件 1/2 体进行模拟运算。对工件和模具采用 PRO/E 进行三维造型并导出 STL 格式。在前处理模块中导入坯料、模具，模拟初始时刻为模具刚刚接触到工件时。

工件网格划分：采用四节点四面体单元对工件划分网格，网格数量为 75000，节点 16908，单元 75698。在计算过程中单元和节点的数目随网格自动重划分会有所变化。镗粗工步有限元模型及工件初始网格划分如下图所示：

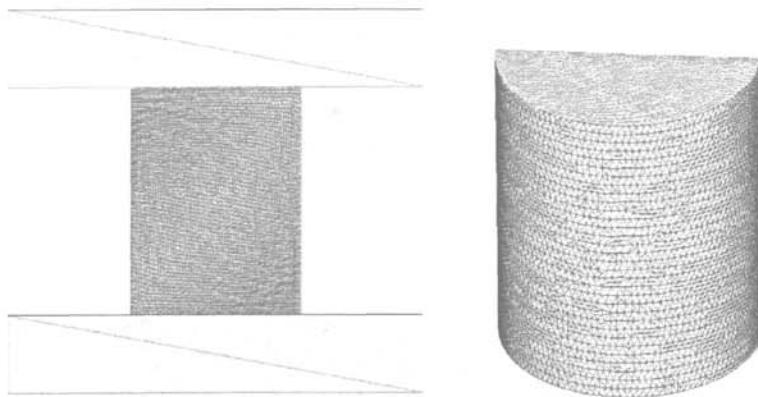


图 4-1a 镗粗有限元模型

图 4-1b 镗粗初始时刻工件网格划分

图 4-1 镗粗有限元模型及工件网格划分图

4.3.2 模拟方案及模拟参数设置

模拟参数设置如下：

工件材料为 AISI-1060 钢；

模拟温度：取坯料为 1200℃，模具为 300℃；

摩擦系数：采用常剪切摩擦模型，镗粗采用的是平板镗粗，接触面简单，润滑条件良好，摩擦因子取 0.25；

运动关系：设上模为主动模，速度为 50mm/s，下面速度为 0mm/s。方向为沿着轴

向向下，无径向运动；

增量步长：设置各参数并取增量步长为 2mm；

模拟方案：对坯料取三组不同压下量： $\Delta H_1=300\text{mm}$ ， $\Delta H_2=315\text{mm}$ ， $\Delta H_3=320\text{mm}$ 进行对比分析。

4.3.3 铸粗模拟结果分析：

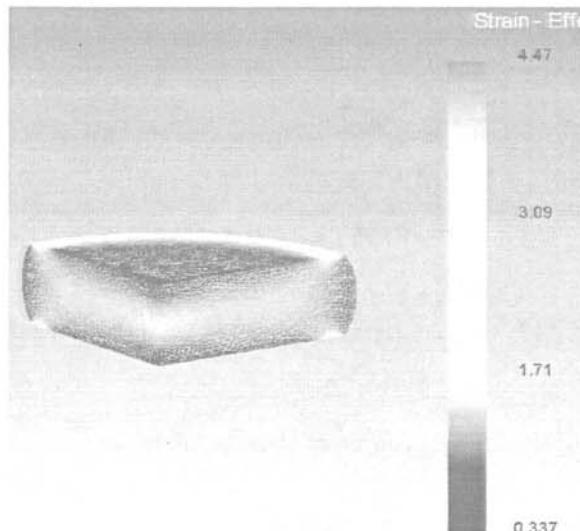


图 4-2 压下量为 $\Delta H_1=300\text{mm}$ 时等效应变云图

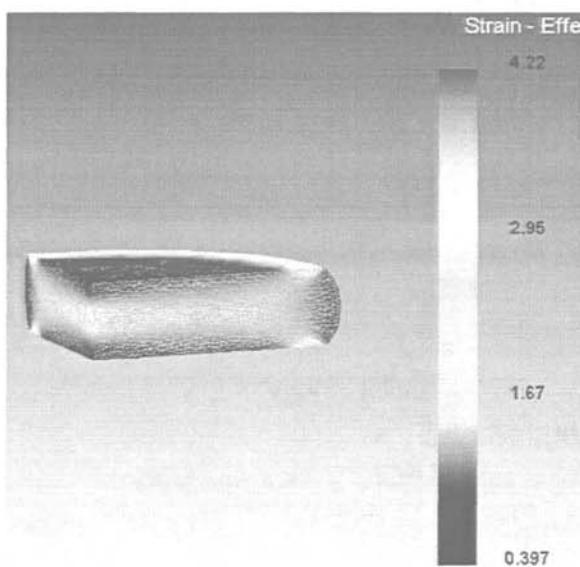
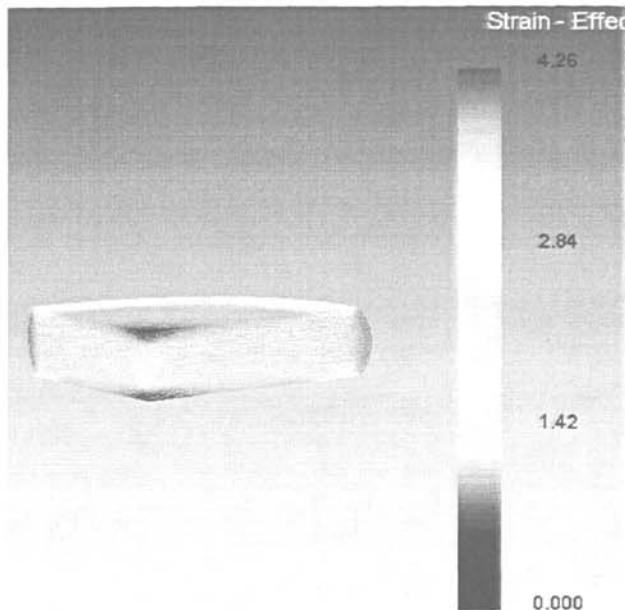


图 4-3 压下量为 $\Delta H_2=315\text{mm}$ 时等效应变云图

图 4-4 压下量为 $\Delta H_3=320\text{mm}$ 时等效应变云图

在上文中提到因为接触面上摩擦的存在，使镦粗变形分为难变形区、小变形区和易变形区三个变形程度不同的区域（见图 2-3）。从上面镦粗模拟的等效应变云图我们可以得出以下规律：镦粗变形首先在两个部位开始塑性变形，即坯料的心部和模具下方坯料对角线的最外端，如图 4-2 所示，这两个区域的等效应变值最大，称为易变形区；随着模具压下量的增加，塑性区逐渐向坯料对角线附近区域扩展，使得这两个地方的塑性区很快连接起来，并逐渐向模具下方的难变形区金属扩展，使得难变形区面积逐渐减小（图 4-2、图 4-3、图 4-4）；在整个变形过程中，坯料心部及对角线附近等效应变速率较大，该区域内的单元始终保持进一步塑性变形的势头，由于该区域的金属流速快于接触面上的金属流速，镦粗后外观呈鼓形。

4.4 预成形工步的数值模拟

4.4.1 有限元模型的建立

预成形工步有限元模型工件初始网格及场量信息为镦粗模拟结束时的状态，预成形初始时刻工件网格划分如图 4-5b 所示，同样取工件 1/2 体进行模拟计算。为简化运算，节约运算时间，按照装配关系，对上成形模、上适配环及成形环进行整体造型生成上模；对下成形模、下适配环和顶出器进行整体造型生产下模。建立有限元模型如图 4-5a 所示，

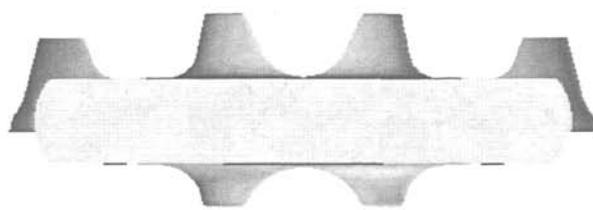


图 4-5a 预成形有限元模型

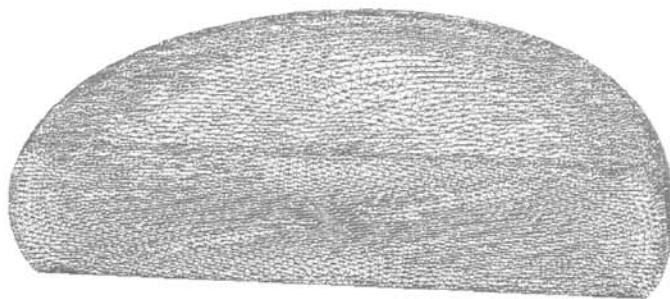


图 4-5b 预成形初始时刻工件 1/2 体网格划分

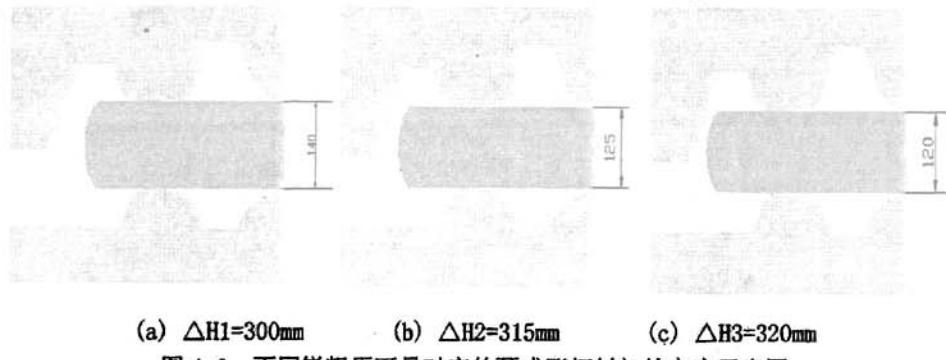
图 4-5 预成形有限元模型及工件网格划分图

4.4.2 模拟方案及模拟参数设置

表 4-1 预成形模拟方案设置

模拟方案	镦粗压下量 ΔH	摩擦因子 m	上模运动速度 v	上模下压距离 d	备注
第一组 不同镦 粗压下量	300mm	0.30	40mm/s	102 mm	模拟增量步长为 2mm 下模运动速度为 0
	315mm	0.30	40mm/s	87 mm	
	320mm	0.30	40mm/s	82 mm	
第二组 不同摩 擦系数	315mm	0.25	40mm/s	87 mm	模拟增量步长为 2mm 下模运动速度为 0
	315mm	0.30	40mm/s	87 mm	
	315mm	0.40	40mm/s	87 mm	
第三组 不同成 形速度	315mm	0.30	30mm/s	87 mm	模拟增量步长为 2mm 下模运动速度为 0
	315mm	0.30	40mm/s	87 mm	
	315mm	0.30	50mm/s	87 mm	

预成形工步初始时刻坯料高度是以镦粗工步结束后的镦后高度为基础进行的。根据三组不同的镦粗模拟方案，预成形工步初始时刻坯料高度也分为 140mm、125mm、120mm 三个不同高度。考虑到两个工步的联系，在下文中将以不同镦粗压下量进行分析，下面以不同镦粗压下量时对应的预成形初始时刻坯料高度示意图进行说明。



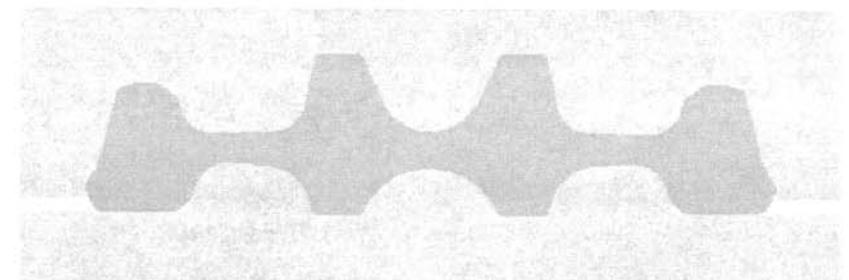
(a) $\Delta H_1=300\text{mm}$ (b) $\Delta H_2=315\text{mm}$ (c) $\Delta H_3=320\text{mm}$

图 4-6 不同镦粗压下量对应的预成形坯料初始高度示意图

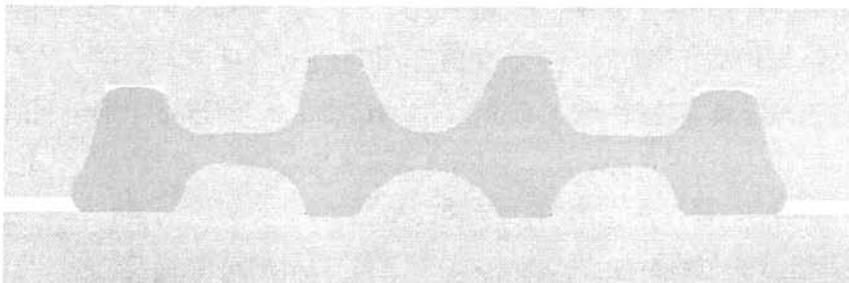
4.4.3 预成形工步模拟结果

对预成形结果的考察主要体现在两个方面：一是充填情况；二是预成形力的大小。因此，在对预成形工步进行数值模拟分析时，主要分析了不同镦粗压下量、不同摩擦因子以及不同成形速度对成形充填和成形力的影响。

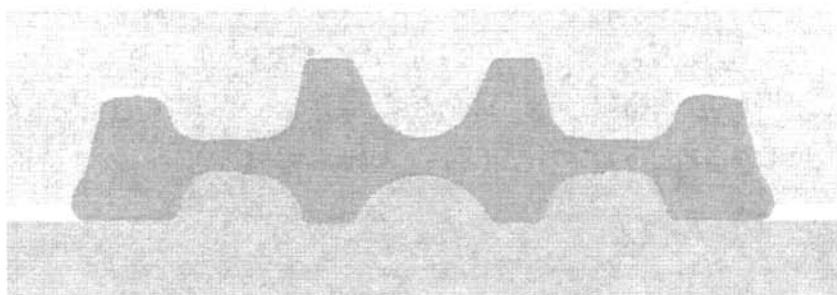
4.4.3.1 坯料初始高度对预成形充填的影响



(a) 镦粗压下量为 300mm 时预成形的充填情况



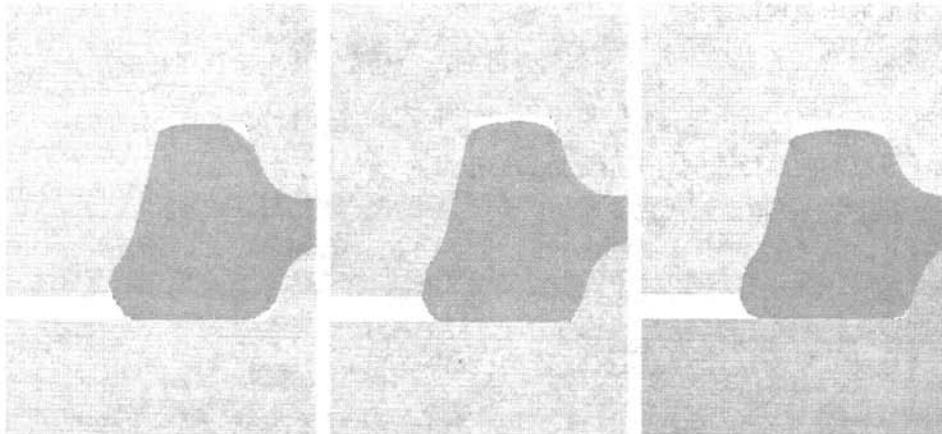
(b) 镦粗压下量为 315mm 时预成形的充填情况



(c) 镗粗压下量为 320mm 时预成形的充填情况

图 4-7 不同镦粗压下量时预成形结束时的充填情况

从图 4-7 可以看出, 轮毂部分充填效果都比较好, 充填不完全部位主要是轮辋上部和轮辋下部靠近轮毂一侧。为了更好的现实充填情况, 对轮缘部位放大显示, 如图 4-8 所示。



(a) 压下量 300mm

(b) 压下量 315mm

(c) 压下量 320mm

图 4-8 不同压下量时轮缘部位充填效果

轮辋区的充填情况主要分三个部位的充填, 轮辋下部靠轮毂一侧、踏面和轮缘部位以及轮辋上部。下面针对不同部位的充填情况进行分析。

(1) 轮辋下部靠轮毂一侧的充填情况: 对比图 4-8a 与图 4-b、图 4-8c 的效果可以看出, 随着镦粗压下量的增大(预成形工步坯料直径增大, 高度减小), 轮辋下部靠轮毂一侧的角隙部分充填情况有很大的改善;

(2) 踏面和轮缘部位的充填情况: 工件与成形环接触的踏面及轮缘部位的充填情况均较为良好, 但是对比图 4-8 三种不同的成形情况, 可以明显的看出, 随着镦粗压下量的增大, 金属与成形环的接触面积也逐渐增大, 金属向轮辋下部和轮辋外侧

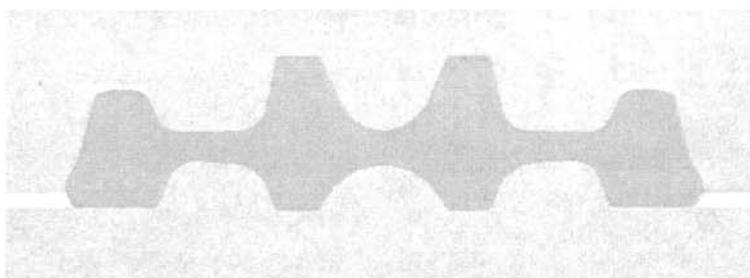
流动的趋势随之增大。这对车轮的成形是不利的，如果这种趋势进一步扩大就会形成飞边。

(3) 轮辋上部的充填情况：图 4-8a 中，轮辋部位充填最高点已经和上模成形面接触，但两侧角隙部位充填不完全，尤其是靠轮毂一侧的角部未充填量比较大。图 4-8b 中，轮辋上部未充填面积较大但未充填体积较小，但从整体上来看，工件轮辋上部较为平整，与图 4-8a 相比，靠轮毂一侧角部的充填情况也有了明显的改善。图 4-8c 中，轮辋上部未充填面积较大，与图 4-8b 相比，轮辋上部未充填部分的体积也有所增加，这主要是因为变形金属向轮辋下部和外侧流动较大造成的。

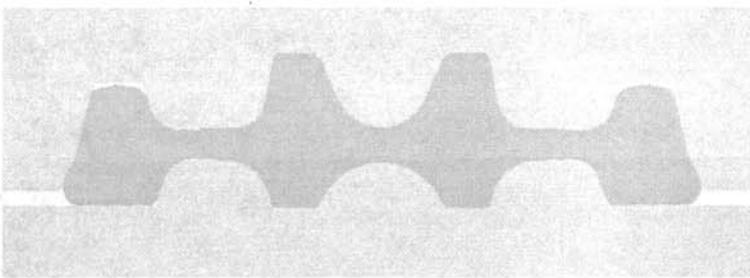
通过上面的分析，可以看出，当镦粗压下量为 315mm 时的预成形充填效果良好，只有轮辋上部有少许未充填，但是未充填端部较为平整，在设计余量范围之内。因此，在分析摩擦以及成形速度对预成形充填的影响时，以镦粗压下量 $\Delta H_2=315\text{mm}$ 为基础进行分析。

4.4.3.2 不同摩擦系数对预成形充填效果的影响

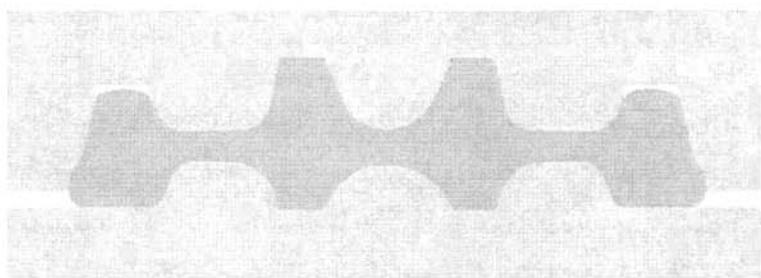
在前文中，根据摩擦系数的影响因素并结合火车轮预成形实际生产情况确定了车轮成形时摩擦系数在 0.25~0.4 之间。取镦粗压下量为 315mm，上模下行速度为 40mm/s 时，分别取摩擦系数为 0.25, 0.3, 0.4 进行模拟，分析取不同摩擦系数的情况下，预成形工步结束时成形的充填效果。



(a) 取摩擦系数为 0.25 时的充填情况



(b) 取摩擦系数为 0.30 时的充填情况



(c) 取摩擦系数为 0.40 时的充填情况

图 4-9 取不同摩擦系数时预成形的充填情况

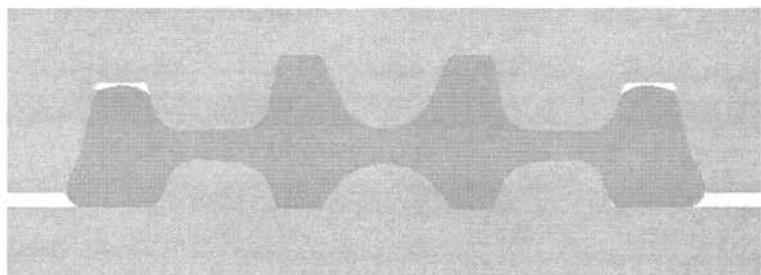
从上图可以看出，在镦粗压下量 $\Delta H_2=315\text{mm}$ 、成形速度为 40mm/s 时，以摩擦 $m=0.3$ 时的轮辋上部未充填量最小，但是充填情况差别不大，说明在成形速度为 40mm/s 时，摩擦系数的不同对预成形充填效果有影响但是不大。

4.4.3.3 不同成形速度对预成形充填效果的影响

根据上面的模拟结果可知，在成形速度为 40 mm/s 、镦粗压下量 $\Delta H_2=315\text{mm}$ 、摩擦 $m=0.3$ 时的充填情况最好。考虑到成形速度可能会对预成形充填效果产生影响，分别取成形速度（上模下行速度）为 30mm/s , 40 mm/s , 50 mm/s 三种不同情况进行模拟，分析改变成形速度的情况下，预成形工步结束时的充填效果。



(a) 成形速度为 30mm/s 时的充填情况



(b) 成形速度为 40mm/s 时的充填情况



(c) 成形速度为 50mm/s 时的充填情况

图 4-10 不同成形速度时预成形的充填情况

通过对上面的分析，成形速度为 30mm/s 时未充填量略大，而成形速度为 40mm/s 和 50mm/s 时充填效果相差不大。由此可知，当成形速度大于 40 mm/s 时，成形速度对预成形的充填情况影响较小，但成形速度过低对成形充填不利。

4.4.3.2 不同模拟方案所需的预成形力

因为是车轮为轴对称形状，在进行数值模拟时为了简化模型，取车轮的一半进行模拟。DEFORM-3D 后处理模块在计算模具载荷时是按 1/2 体计算的，所以实际所需成形力是下面截图中所显示成形力的两倍。将在第五章对比分析时将数据进行还原处理。

根据上述预成形充填情况的分析，在分析预成形力时，从以下三个方面取部分模拟方案所需的预成形力进行对比分析：

(1) 不同镦粗压下量对预成形力的影响 ($m=0.3$, $v=40\text{mm/s}$):

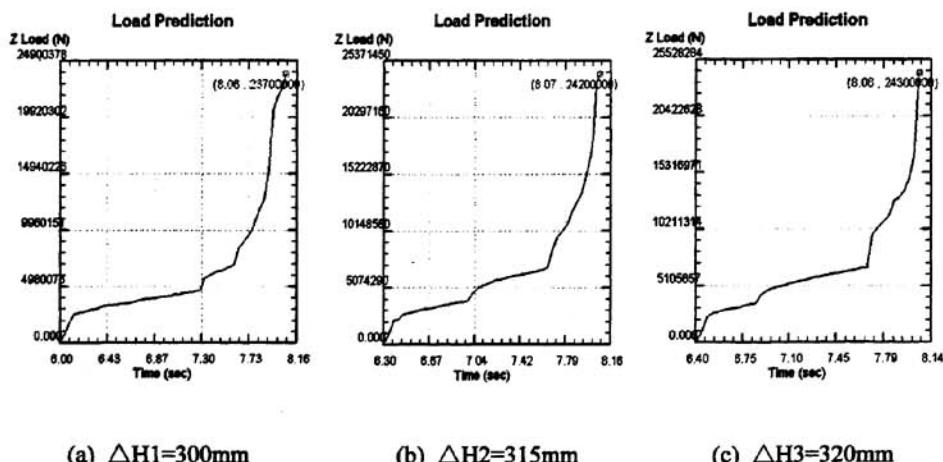


图 4-11 不同镦粗压下量的预成形力截图

上图中所显示数据为实际成形力的 1/2，采集数据并对成形力进行处理（乘 2），

用 origin 数据处理软件对不同镦粗压下量的预成形力绘制曲线图如下所示：

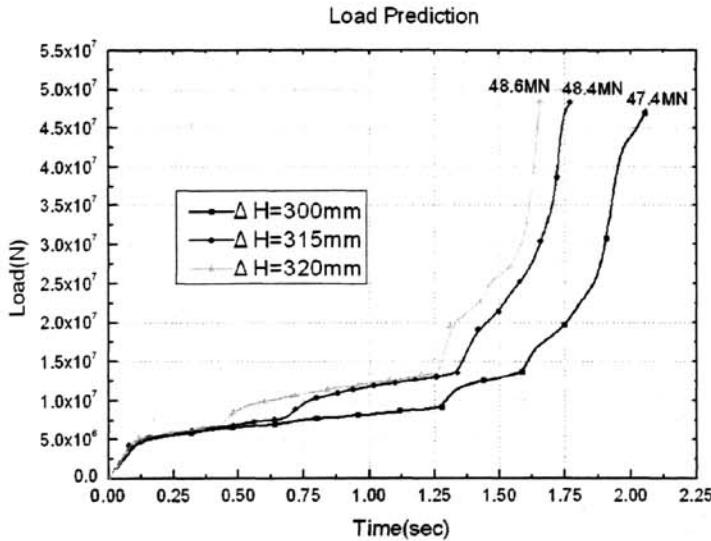
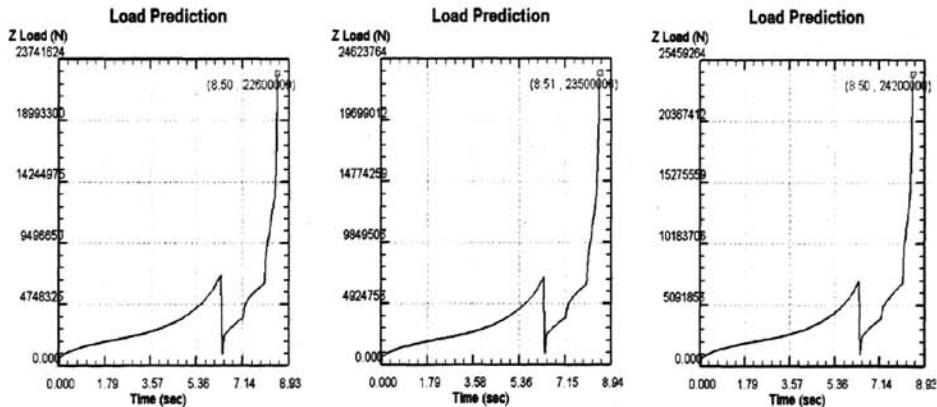


图 4-12 不同镦粗压下量的预成形力对比图

从图 4-12 我们可以看出，当镦粗压下量不同时，预成形过程中成形力的变化规律大致相同，但峰值有所不同，且镦粗压下量越大，预成形力越大。

(2) 不同摩擦系数对预成形力的影响 ($\Delta H_2=315\text{mm}$, $v=40\text{mm/s}$)：



(a) $m=0.25$ 时的预成形载荷 (b) $m=0.3$ 时的预成形载荷 (c) $m=0.4$ 时的预成形载荷

图 4-13 不同摩擦系数时的预成形力截图

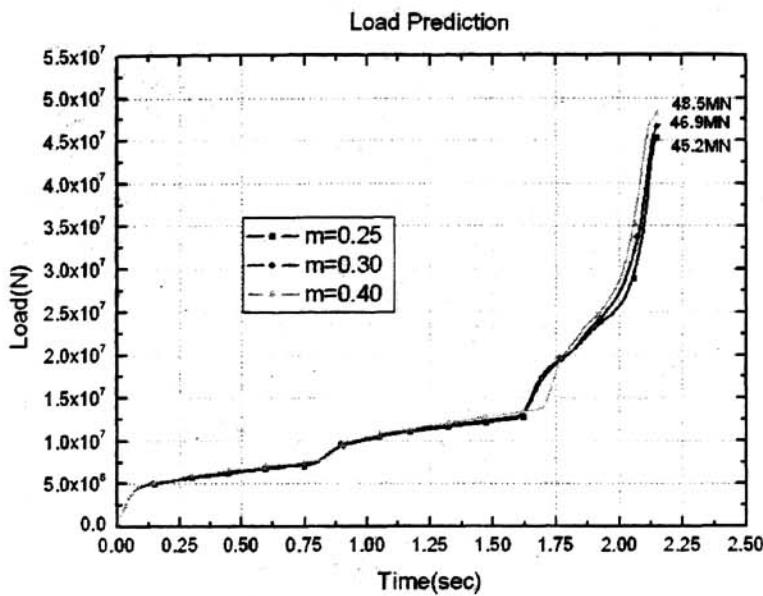


图 4-14 取不同摩擦系数的预成形力对比图

对比分析图 4-14 中取不同摩擦系数时的成形力曲线，可以发现当摩擦系数设置不同时，预成形过程中成形力虽然变化规律大致相同，但预成形力峰值随着摩擦系数的增大而增大。

(3) 不同成形速度对预成形力的影响 ($\Delta H_2=315\text{mm}$, $m=0.3$):

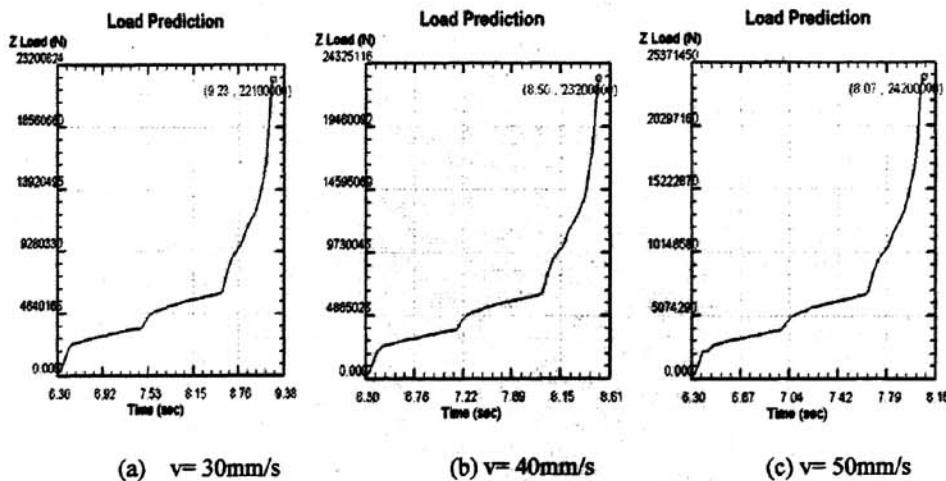


图 4-15 不同成形速度时的预成形力截图

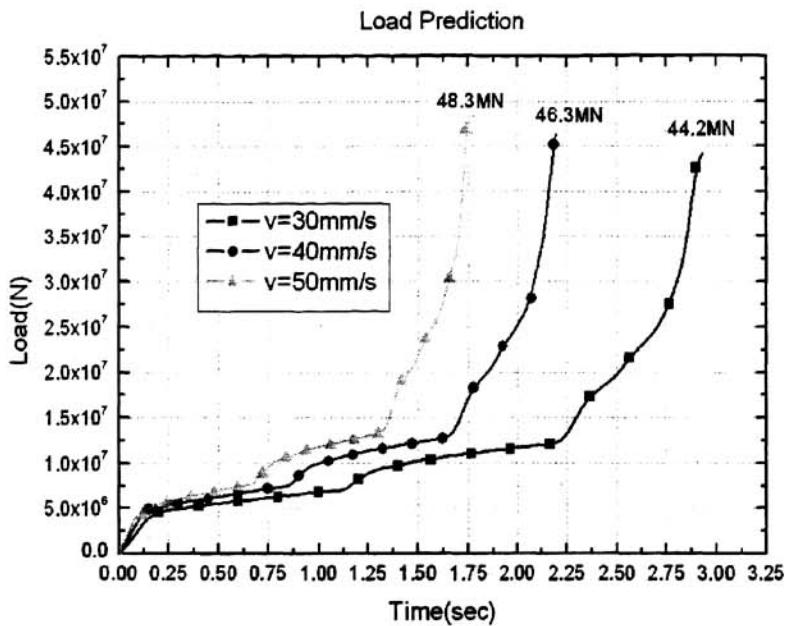
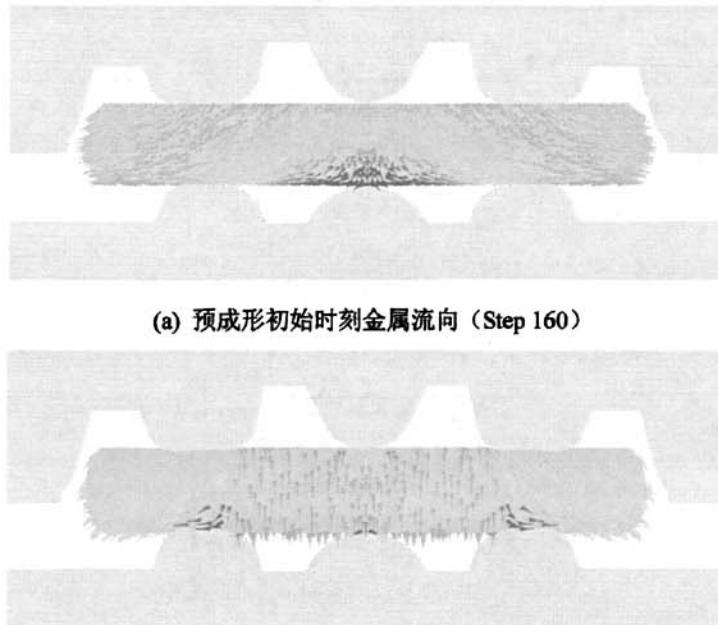
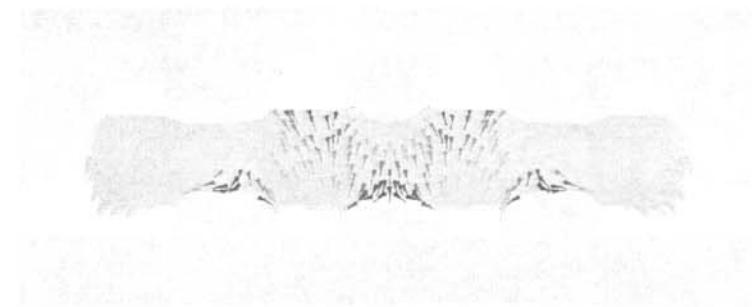


图 4-16 取不同成形速度时的预成形力对比图

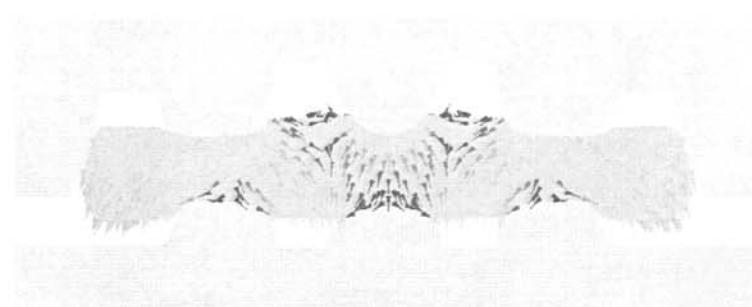
在图 4-16 中, 可以看出当成形速度设置不同时, 随着成形速度的增加预成形力增大。

4. 4. 3. 3 金属流动规律

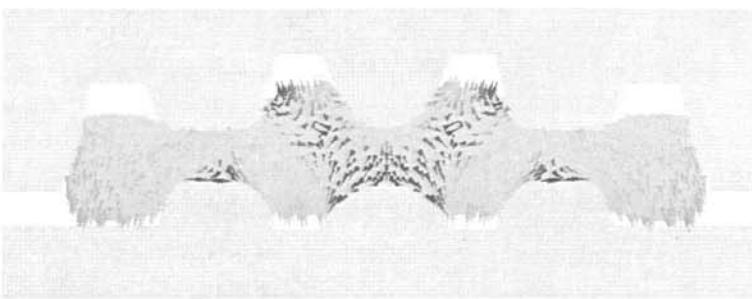




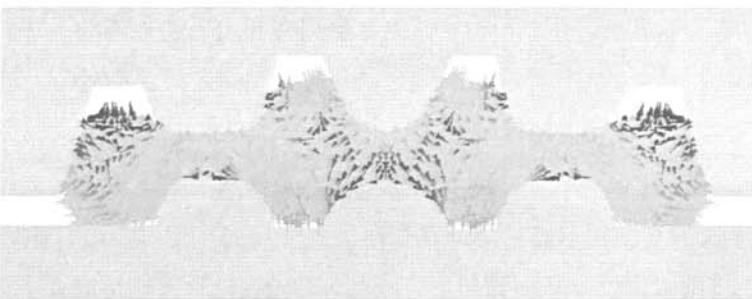
(c) 坯料外径和成形环接触时金属流向 (Step 177)



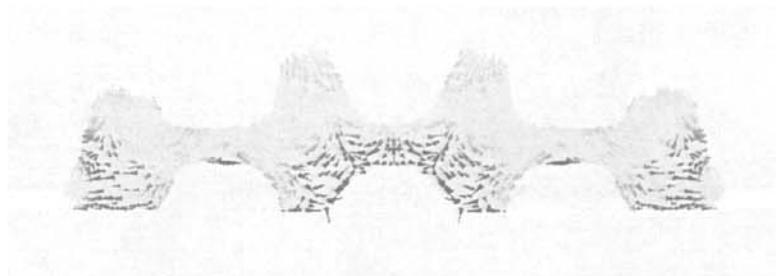
(d) 上模中央冲头处金属开始向上流动 (Step 180)



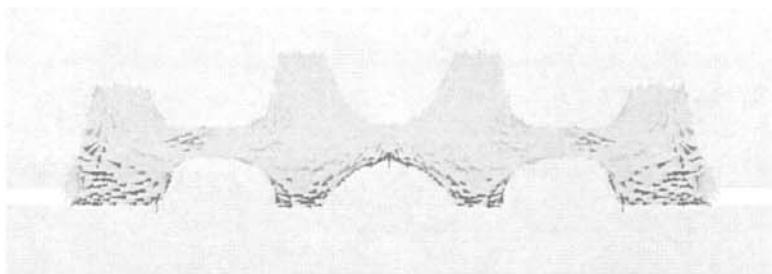
(e) 轮毂位置金属出现上下分流现象 (Step 195)



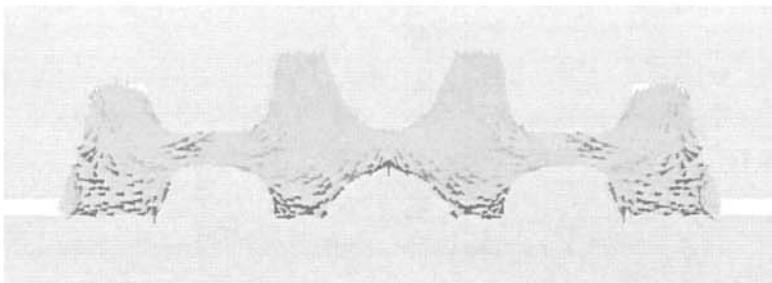
(f) 轮辋位置金属出现上下分流现象 (Step 198)



(g) 轮毂下部充填完全，金属向上流动趋势增大（Step 201）



(h) 轮毂部位充填完全时金属流向 (Step 204)



(i) 预成形结束时金属流向 (Step 205)

图 4-17 预成形典型时刻金属流向图

从图 4-17 可以看出，在成形初始时刻，金属在径向上往外流动，轴向上向下流动（见图 a、图 b），当工件外端接触到定径环时，金属向外流动受阻，当这个阻力增大到一定程度时，金属在辐板处形成一个内外分流的现象，分流金属分别充填轮毂部和轮辋部（见图 c、图 d），因为液压机通过上模从上往下加载，金属向下流动趋势明显，下腔的充填较上腔要好，只有在下腔充填到一定程度时，金属向下流动受到型腔侧壁的阻力增大，才转而向上腔流动，首先在轮毂部位形成上下分流层（见图 e），接着轮辋部位也会形成上下分流层（见图 f），随着上成形模下行，轮毂下腔

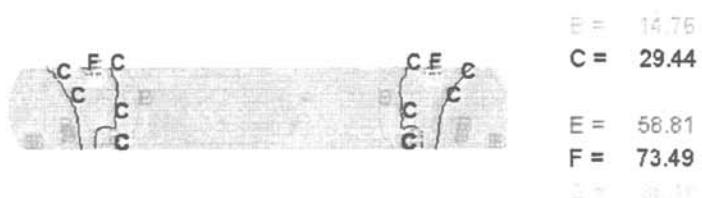
首先被充满，金属向上、向外流动趋势增大，从而充填满轮毂上腔和轮辋下腔（见图 g、图 h），轮辋下腔充填结束后，金属转而向上流动，充填轮辋上腔至到预成形结束（见图 i）。

从宏观上看，预成形过程主要分为自由镦粗和约束镦挤两个阶段。在变形初期，辐板处材料首先被镦粗；随着变形的继续，坯料外侧与成形环相接触，变形进入约束镦挤阶段。且随着约束力的增大，在辐板区出现明显的分流层，分流层内侧材料向轮毂区流动，外侧材料向相反方向的轮辋区流动。在这个过程中，还会出现金属上下分流的现象，上下分流现象首先发生在轮毂位置，在轮辋区坯料接触到下模后，金属向下的流动受阻，转而充填轮辋上腔，在轮辋位置形成上下分流层。由此可见，坯料外侧与成形环的接触是形成金属内外分流的关键，而金属的内外分流决定着轮毂部和轮辋部的金属分配，从而影响预成形的充填效果。

4.4.3.4 应力、应变场

Step 160

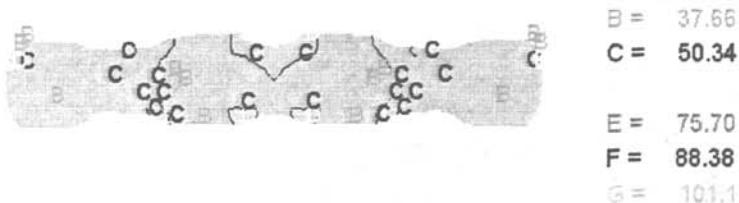
Stress - Effel



(a) 预成形初始时刻等效应力图

Step 177

Stress - Effel



(b) 坯料接触定径环时等效应力图

Step 195

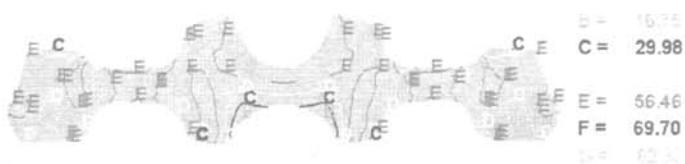
Stress - Effe



(c) 轮毂部位金属出现分流时等效应力图

Step 198

Stress - Effe



(d) 轮辋部位金属出现分流时等效应力图

Step 201

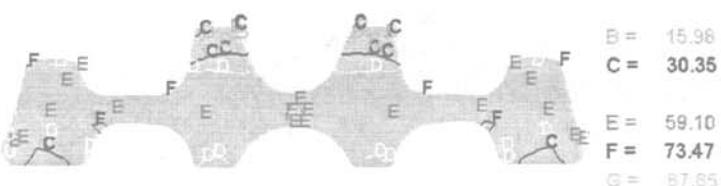
Stress - Effe



(e) 轮毂下部充填完全时等效应力图

Step 204

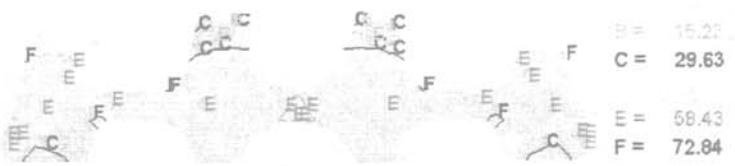
Stress - Effe



(f) 轮毂充填完全时等效应力图

Step 205

Stress - Effect

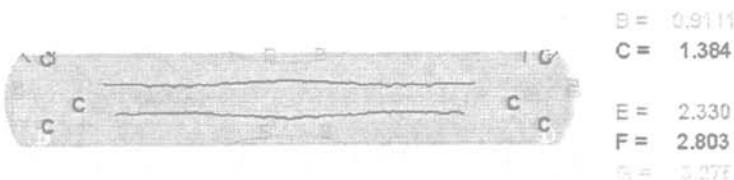


(g) 预成形结束时等效应力图

图 4-18 预成形过程中典型时刻等效应力图

Step 160

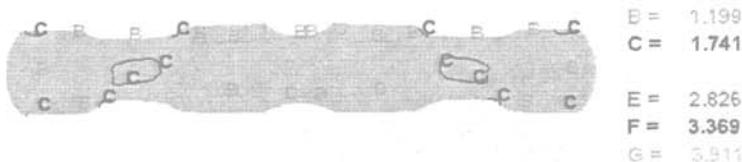
Strain - Effect



(a) 预成形初始时刻等效应变图

Step 177

Strain - Effect



(b) 坯料接触定径环时等效应变图

Step 195

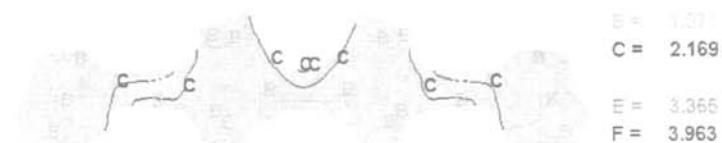
Strain - Effect



(c) 轮毂部位金属出现分流时等效应变图

Step 198

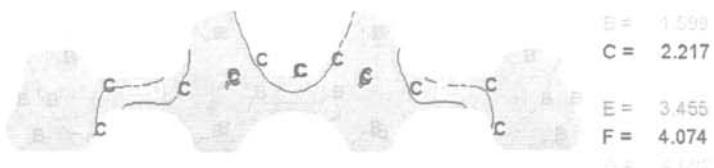
Strain - Effe



(d) 轮辋部位金属出现分流时等效应变图

Step 201

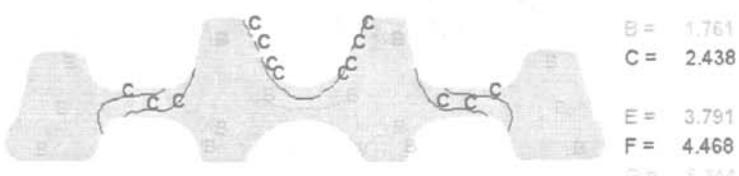
Strain - Effe



(e) 轮毂下部充填完全时等效应变图

Step 204

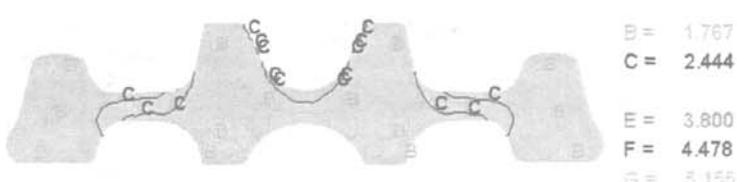
Strain - Effe



(f) 轮毂充填完全时等效应变图

Step 205

Strain - Effe



(g) 预成形结束时等效应变图

图 4-19 预成形过程中典型时刻等效应变图

4.5 本章小结

在本章中首先对有限元软件的选用进行了论述，结合火车轮预成形过程的变形情况选用 DEFORM-3D 进行了本课题数值模拟。对有限元模型进行了合理的优化和简化假设，这些工作大大提高了数值模拟的效率。以第二章工艺参数的理论分析为基础，对镦粗工步及预成形工步进行了数值模拟，得出了在预成形过程镦粗压下量、摩擦系数、成形速度对成形充填效果和成形力的影响，对预成形各个时刻的应力、应变场以及金属的流动规律都有了进一步的认识。这些工作对改善车轮预成形工艺的设计是有意义的。

第五章 模拟结果分析与验证

5.1 成形力理论分析与数值模拟对比

5.1.1 镗粗工步成形力的对比

表 5-1 镗粗成形力的理论计算值和数值模拟值

镦粗压下量 (mm)	理论计算值 (MN)	数值模拟值 (MN)	误差 (%)
$\Delta H_1=300$	12.21	11.78	3.5%
$\Delta H_2=315$	14.13	14.02	0.8%
$\Delta H_3=320$	14.76	14.90	0.9%

通过对镦粗成形力的理论计算值和数值模拟值的对比分析可以看出，在镦粗压下量为 300mm 时，数值模拟值较理论计算值要小，这是因为镦粗成形力计算公式的推导是以二维轴对称简化模型为基础的，但是在实际成形过程中，因为坯料中部金属流动速度比模具接触面上的金属流动速度快，镦粗后坯料成鼓形，在数值模拟时成形接触面积较理论计算值小，所以成形力也要小。随着压下量的增加，因为镦粗变形不均匀引起的成形力差异有所缩小，因此，镦粗压下量为 315mm 和 320mm 时成形力的理论计算值和数值模拟值已经非常接近，误差范围在 1% 以内。

5.1.2 预成形工步成形力的对比

理论计算所采用的经验公式为第二章式 (2-9)，采用 CN 古布金的平均单位流动压力法，先求出单位流动压力 p ，再根据车轮尺寸求得成形力。考虑到火车车轮的形状较为复杂，应力不均匀系数在 1.30~1.35 之间，初步取充填影响系数 $V=1.4$ 。查表可得 $w=1.2$ 在 1200℃ 变形温度时 $\sigma_s=25$ MPa。

求得单位流动压力为：

$$p = 1.32 \times 1.4 \times \left(1 + \frac{0.3}{3} \times \frac{800}{165} \right) \times 25 \times 1.2$$

$$= 82.32 \text{ MPa}$$

$$\text{成形压力: } P = p \cdot F = 82.32 \times \frac{\pi}{4} \times 0.8^2 \\ = 41.4 \text{ MN}$$

数值模拟值为：46.9MN，与数值模拟结果相比，经验公式估算成形力要略小一些。这主要是经验公式估算时一些参数的选择范围较大，应当根据实际情况选取合理的参数使估算结果更加准确。

5.2 预成形充填效果的影响因素分析

由 2.3.3 影响金属充填模膛的主要因素可知，影响预成形充填效果的主要因素有：模具形状、摩擦系数、成形速度、镦粗压下量。在第四章中对摩擦系数、成形速度、镦粗压下量分别取不同值进行了变参数数值模拟，下面就各因素对预成形充填结果的影响进行分析。

5.2.1 镦粗压下量对预成形充填影响的分析

在第四章模拟了不同镦粗压下量的预成形充填效果，结合预成形过程的金属流动规律分析，镦粗压下量的不同影响充填效果主要是因为不同的镦粗压下量导致预成形工步中坯料外端接触成形环的时间不一致，坯料越早接触成形环，预成形约束镦挤的过程就越长，这样金属在充填轮辋区型腔的时候是一个相对均匀的充填过程，充填结束后轮辋上端面是一个较为平整的面。而镦粗压下量较小时（ $\Delta H=300\text{mm}$ ）预成形轮辋上部的充填是中间部位充填好，而轮辋两侧充填不完全（如图 4-8a）。这是因为在成形过程中受约束镦挤的时间要短，在坯料未接触到成形环时，随着上模下压，没有向下流动的金属就已经在充填轮辋上部型腔了，这样虽然上腔个别部位充填好，但是因为转角处有较大的未充填区，对后续成形不利，同时，金属向下的流动趋势相对来说有所减小，所以在轮辋下部靠轮毂一侧转角处也未得到较好的充填。但是，如果镦粗压下量过大，成形过程中约束镦挤的时间长，金属向轮辋上部的流动受到成形环内壁的阻碍有所减小，这样不仅会使轮辋上部金属充填不佳，甚至会因为金属向下流动过大导致飞边的形成。综合上述分析，合理的镦粗压下量对预成形的充填起着重要的作用。同时，在实际加工生产中，镦粗压下量也是比较容易控制的一个工艺参数。因此，在预成形工艺设计中镦粗压下量的设计非常重要。

5.2.2 摩擦和成形速度对预成形充填影响的分析

从图 4-9 模拟结果可以看出，在成形速度大于 40mm/s 的情况下，摩擦系数和成形速度对充填效果的影响并不大，只是在镦粗压下量为 315mm 时略有影响。由此可知，虽然摩擦在金属成形过程中起着重要的作用，但是火车车轮的预成形过程是一个综合复杂的过程，这其中包括材料本身性能、模具结构、成形速度等多方面的因素。（有学者通过数值模拟的方法对不同速度下摩擦的影响进行了模拟，得出了在速度大于 50mm/s 的情况下可以很大程度抵消摩擦条件不同带来的充填影响。）在实际生产中，良好的摩擦条件不仅能获得较好的锻件形状，也能很大程度提高模具寿命。为了获得良好的摩擦条件，必须使模具表面粗糙度适宜、磨损后及时修复；采用良

好的耐压、耐热、抗氧化性能的润滑剂等。从图 4-10 可以看出，成形速度对预成形充填效果的影响也不是很大。

5.3 预成形力的影响因素分析

在第四章中对摩擦系数、成形速度、镦粗压下分别取不同值进行了变参数数值模拟，模拟结果显示，在摩擦系数、成形速度、镦粗压下分别取不同值的情况下，预成形所需的成形力各不相同，下面就各因素对预成形力的影响进行分析。

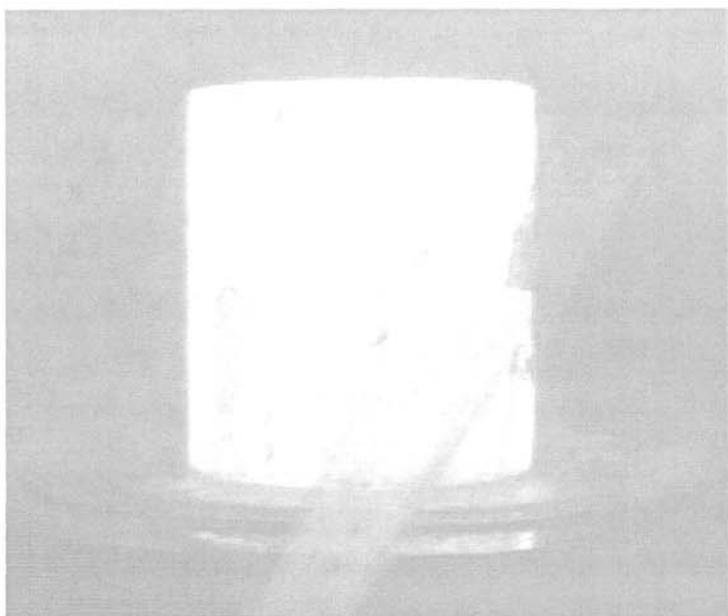
(1) 镦粗压下量的影响：从图 4-12 可以看到，虽然三种不同镦粗压下量下成形力的变化规律极为相近，但是它们的变形力峰值略有差别，且镦粗压下量的增大预成形力越大。结合预成形过程中金属的流动规律进行分析，镦粗压下量小时，即镦粗后的毛坯较高、外径较小，这样进入预成形后毛坯外径与成形环接触较晚，所以成形环对轮辋区材料流动的作用时间相对要短，所以其预成形力相对来说也要低一些。与之相反，当镦粗压下量较大时，预成形过程中成形环对坯料约束作用时间长、强度大，其预成形力也就相对的要高些。

(2) 摩擦系数的影响：摩擦系数对预成形过程的影响主要体现在阻碍金属的流动，摩擦越大，阻碍也就越大。这种阻碍势必会增加完成预成形过程所需的成形力。从理论分析、经验公式、对比图 4-14 中不同摩擦系数的预成形力曲线，我们都很难发现，摩擦越大，预成形力越大。这也说明数值模拟结果和理论是相符合的。

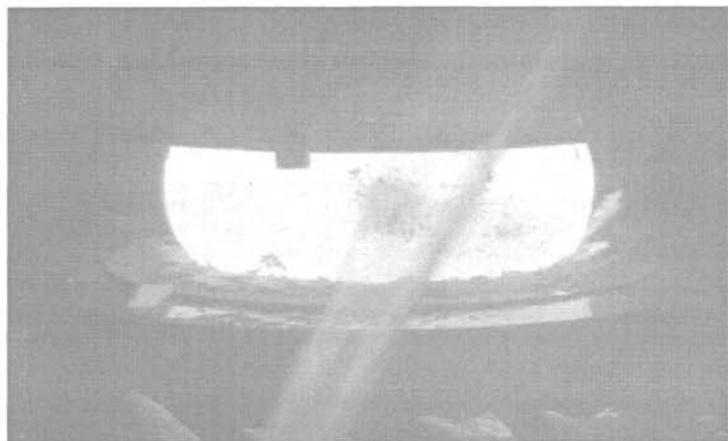
(3) 成形速度的影响：从理论分析上我们知道，应变速率越大，变形抗力及单位体积的变形功也就越大；增加应变速率也会使金属的真实应力升高；增加应变速率，由于没有足够的时间进行回复或再结晶，因而软化过程不充分使金属的塑性降低，但是增大应变速率也会使温度效应增大导致金属温度的升高，这又会促进回复和再结晶，有利于金属塑性的提高。这些影响是一个综合的过程，根据火车轮预成形的成形条件来看，由于预成形是在 1260℃的始锻温度下进行的，温度效应和温度升高对金属塑性的影响会有所减弱，总的来说，成形速度越快会导致预成形力的增大，从图 4-16 中不同成形速度的预成形力对比分析我们也可以看出，成形速度越大，预成形力越大，但是速度的增大对预成形力的影响不大，综合考虑成形速度对预成形充填的影响，建议实际生产过程中，在设备负载允许的情况下提高成形速度能较大的提高生产效率，提高设备利用率，降低成本。

5.4 840HDSA 车轮的生产试验

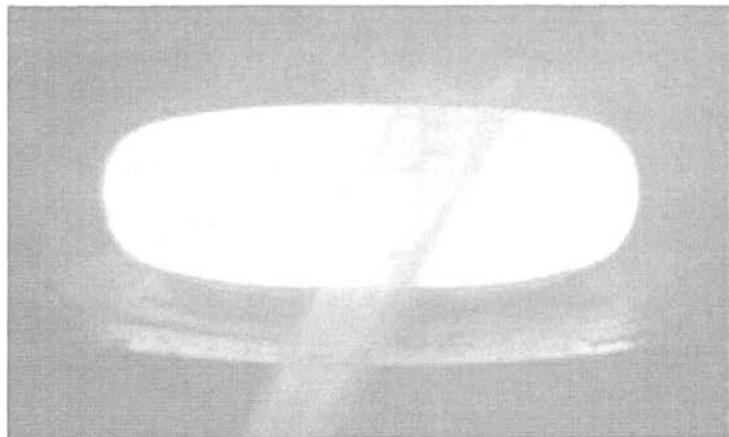
根据第四章中预成形的模拟结果优选参数进行现场试验，试验采用坯料小端直径为 406mm，大端直径 407.5mm，高度为 440mm。设置试验方案为：(1) 镗粗压下量为 315mm；(2) 成形速度为水压机正常加载情况下的成形速度（现实生产过程中，水压机成形速度随负载的不同会有所变化，数值模拟中取平均值进行分析）；(3) 成形过程中采用石墨润滑，始锻温度为 1260℃。



(a) 坯料初始时刻



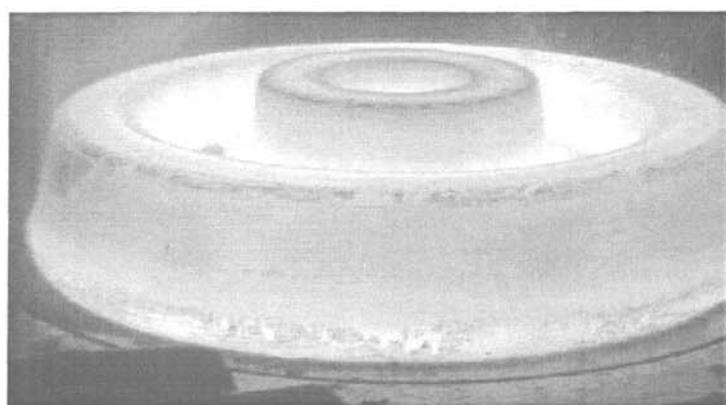
(b) 镗粗过程中



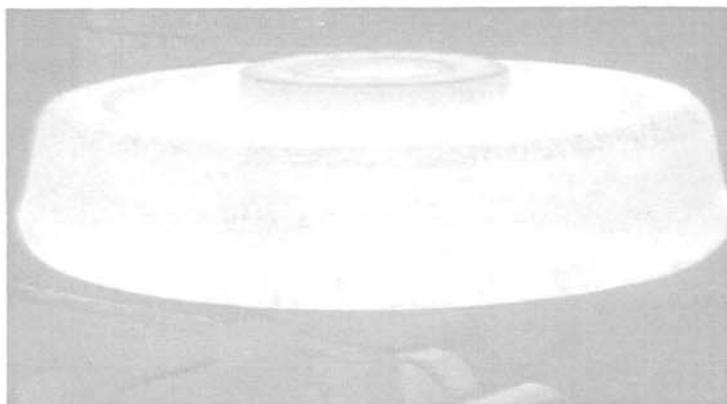
(c) 镗粗结束坯料转入预成形工作台



(d) 预成形结束，下一步镗粗开始



(e) 第一件预成形结束后的轮坯



(f) 第二件预成形结束后的轮坯

图 5-1 火车轮预成形现场试验图

从上面现场试验的结果可以看出，轮毂端面平整，圆角过渡处充填饱满，轮毂部位充填效果良好，轮辋部内侧圆角和外侧圆角处呈斜面状，说明充填不足。用专用样板进行检测，未充填量不大（由于测量是在热态下，对测量位置没有较好的拍摄角度，未能拍照），从充填情况来看，现场试验结果是和模拟结果是符合的。遗憾的是现场试验时，设备的压力传感器还在检修中，没有能获得成形力的现场试验数据，后续的研究工作可以采用理论分析、数值模拟和试验数据相结合的方法对预成形力进行研究。

5.5 840HDSA 模拟结果对其他车轮适用性的探讨

根据对 840HDSA 车轮的变参数模拟，得出了对车轮成形最为有利的镦粗压下量 $\Delta H=315\text{mm}$ 时成形效果最好，镦粗压下量和坯料原始高度的比值为镦粗压下率，即 $\Delta H / H_0$ 的值。根据 840HDSA 的模拟情况，镦粗压下率为 71.6%，经过现场试验效果良好，说明数值模拟结果和生产加工的情况是基本吻合的，为了对后续工艺设计提供指导，以镦粗压下率为 71.6% 对 KM920 车轮进行了模拟分析。

5.5.1 KM920 车轮简介：

KM920 车轮采用 650kg 钢坯，直径 $D=462\text{mm}$ ，高度 $H=497\text{mm}$ 。该车轮与 840HDSA 车轮相比，有以下几个方面的特点：

- (1) 外径尺寸较 840HDSA 车轮要大；
- (2) 轮毂位置不一样，840HDSA 车轮轮毂相对与轮辋来说往车轮外侧有所偏移，而 KM920 车轮的轮毂则是向车轮内侧下沉；
- (3) 相对来说 KM920 车轮辐板部位较薄，这会加大金属的流动量。

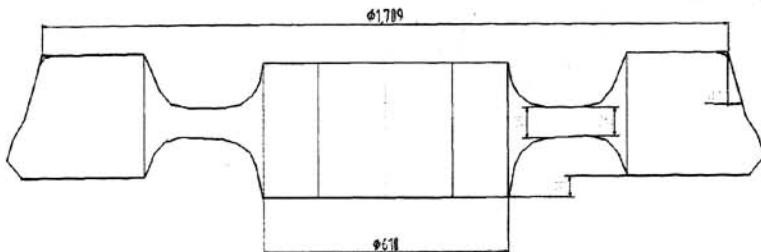


图 5-2 KM920 车轮热锻件示意图

5.5.2 KM920 车轮的预成形模拟结果

模拟参数设置如下：

工件温度设为 1200°C，并假定预成形过程中温度不变；

摩擦系数 $m=0.3$ ；上模速度设为 40mm/s；

预成形结束时的模拟结果为：



图 5-3 KM920 车轮预成形结果

从 KM920 车轮的预成形模拟效果来看，轮毂部位的充填饱满，轮辋上部转角处有未充填，但是在未充填允许范围内，车轮没有出现飞边。说明镦粗压下量为 71.6% 时对车轮的预成形充填是有利的。但是考虑到车轮形状复杂，现场加工条件、工人操作等因素的差异，对有的车轮来说，可能需要在镦粗压下量为 71.6% 的基础上进行一些调整才能获得最佳的充填效果。

5.6 本章小结

本章对镦粗及预成形力的理论计算值和数值模拟值进行了对比分析，对误差产生的原因进行了分析，总的来说误差不大，说明数值模拟值和理论计算值是基本吻合的，可以用来指导工艺设计。分析了镦粗压下量、摩擦系数和成形速度对预成形充填以及预成形力产生影响的原因，进一步加深了对预成形过程的理解。现场试验结果和数值模拟的结果基本吻合，在第 5 节中 840HDSA 模拟结果对其它车轮适用性的探讨，说明虽然车轮的形状差异较大，但是其模拟结论对别的产品的工艺设计还

是有指导意义的。综上所述，根据 840HDSA 车轮的模拟结果优选参数对生产的指导是有效的，以 DEFORM-3D 对火车轮的预成形工艺设计进行指导是可行的。

第六章 结论

本论文通过对火车轮预成形工艺的理论分析及成形过程的有限元模拟分析可以得出以下结论：

1、结合火车轮预成形过程数值模拟结果和实际生产情况，可以说明采用 DEFORM-3D 有限元模拟软件可以快速有效的模拟火车轮预成形加工过程。

2、镦粗压下量是影响预成形最终充填结果的重要因素：对 840HDSA 车轮来说，镦粗压下量为 315mm（71.6%）对预成形工步最为合适。对 KM920 车轮的数值模拟说明镦粗压下量为 71.6%时对预成形充填是有利的。

3、摩擦系数的设置会对预成形过程产生影响，摩擦因子的大小和预成形力成正比。在成形速度大于 40mm/s 的情况下摩擦对预成形的充填情况影响不大。以太原重工钢轮公司的实际生产条件来说，在进行数值模拟时，预成形过程中摩擦因子取 0.3~0.35 比较符合实际情况。

4、成形速度对火车轮预成形的充填情况影响不大，因此为了缩短成形时间，减少热效应对模具的影响，可以在设备许可的情况下可以适当增大成形速度，以提高生产效率。

5、车轮的预成形过程可以分为自由镦粗和约束镦挤两个变形阶段，这两个变形阶段内毛坯的塑性流动规律差异较大。在自由镦粗阶段，金属分别向轮毂区和轮辋区流动形成左右分流面。在约束镦挤阶段随着约束力的增大，会先后在轮毂型腔和轮辋型腔位置形成上下分流面。

参 考 文 献

- [1] 李翔, 许章泽, 安涛, 李小宇, 李胜祇, 阎军, 孙中建. 火车车轮成形工艺现状与展望[J]. CMET. 锻压装备与制造技术, 2004, (01): 14~16.
- [2] 泰国庆, 韩静涛. 车轮不同生产方式及特性分析. 锻压技术, 1999, (6): 31~34.
杨慧, 刘建生. 基于ObjectARX的有限元系统集成及其在车轮成形中的应用[J]. 锻压技术, 2003, (06): 1~5.
- [3] 王祖唐, 王志诚. 火车车轮制造优化新工艺的试验研究[J]. 钢铁, 1995, (02): 45~47.
- [4] [8] 王祖唐, 王志诚. 火车车轮制造新工艺的开发研究[J]. 机车车辆工艺, 1995, (02): 1~3.
- [5] 王志诚, 王祖唐, 胡忠. 火车车轮制造优化新工艺数值模拟[J]. 塑性工程学报, 1995, (04): 3~11.
- [6] 陈慧琴, 郭晓霞, 刘建生, 张平. 快速车轮成形过程的刚塑性有限元数值模拟[J]. 太原重型机械学院学报, 2003, (04): 312~315.
- [7] 郭晓霞. 火车车轮成形工艺研究及有限元模拟[J]. 锻压技术, 2003, (05): 1~4.
- [8] 许章泽, 李翔, 安涛, 李小宇, 李胜祇, 阎军, 孙中建. 火车轮预成形压缩比数值模拟[J]. 热加工工艺, 2004, (04): 28~29.
- [9] 许章泽, 李胜祇, 阎军, 孙中建. 火车车轮预成形过程的有限元分析. 重型机械, 2002, 6 (1): 35~37.
- [10] 许章泽, 李胜祇, 阎军, 孙中建. 火车车轮压痕工艺数值模拟. 安徽工业大学学报, 2002 (4): 281~283.
- [11] 许章泽, 李翔, 安涛, 李胜祇, 阎军. 火车车轮S形辐板成形研究. 热加工工艺, 2006 (13): 74~76.
- [12] 沈晓辉, 安涛, 阎军, 章静, 李翔. 840车轮预成形过程的有限元分析. 钢铁研究学报, 2005 (2): 30~33.
- [13] Г.А. 比比克, 苏星译. 火车车轮的制造 M. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
C.A. Koponeb, 宋忠明, 张孝仁. 减少车轮生产中表面缺陷的数量[J]. 国外机车车辆工艺, 2000, (01): 13~16.

- [14] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理. 机械工业出版社. 2003
- [15] 郭玉玺. 试论车轮的逐步成形技术 [J]. 大型铸锻件 1998 (4) :38~45.
- 郭晓霞, 孙卫和. 四边形有限元网格生成方法关键技术 [J] 深圳职业技术学院学报, 2004, (03) : 26~29.
- [16] 苏 M. B. 斯德洛日夫等. 金属压力加工原理. 机械工业出版社. 1980.
- [17] 吕炎. 精密塑性体积成形技术. 国防工业出版社. 2003.
- [18] 曼弗雷德. 林登布拉特. 火车车轮生产的现代化设备和工艺技术 [J]. 锻压技术, 1998, (06) : 47~50.
- [19] 郭玉玺, 杜国器, 张平. 中国第二条辗钢整体车轮生产线及其工艺技术水平分析 [J] 铁道车辆, 1998, (09) :12~15.
- [20] 郭玉玺. 辗钢车轮的低应力设计 [J]. 机车车辆工艺, 1999, (05) : 8~10.
- [21] 锻压手册. 第 1 卷. 锻造. 机械工业出版社 1996.
- [22] 曲宗实. 火车轮轴的材料与工艺发展情况. 大型铸锻件. 1995 (1): 40~43.
- [23] 侯沛云. 小型车轮模锻一次成形工艺与模具设计. 锻压装备与制造技术. 2007. (5): 55~58.
- [24] 王成立, 罗上银. 重工科技. 哈尔滨工业大学学报. 1998. 30 (1): 24~27.
- [25] М. Ю. ШИФРИН (俄罗斯), 吴兴方. 整体辗钢轮制造工艺的改进. 国外机车车辆工艺, 1997, (05)): 13~18.
- [26] 王成立, 罗上银. 对引进的 6000 吨车轮成型液压机技术改造的实施方案. 重工科技. 2000. (1): 82~84.
- [27] МЮ. 席夫林等著, 关克强等译校, 车轮和轮箍轧制. 中国工业出版社, 1965 年.
- [28] 吕日松, 董万鹏, 陈军. 金属塑性成形缺陷的数值模拟预测研究. 模具技术. 2003(3):3~4, 18.
- [29] 王本一, 石伟, 刘庄. 数值模拟技术在大型锻件生产中的应用. 大型铸锻件, 1999. (01): 15~20.
- [30] 黄毅, 韩静涛, 贺毓辛. 整体火车车轮的生产 [J]. 重型机械, 1997, (03): 9~12.
- [31] 王强. 国际精密锻造技术的新进展 [J]. CMET. 锻压装备与制造技术, 2004, (02) : 15~19.

参考文献

- [33] D GUY, F G WILSON. Forging Developments for Railway and Ring Rolled Products[A]. C M SELLARS, G J DAVIES eds. Hot working and Forging Processes[C], Lond:The Metals Society, 1997:204~208.
- [34] B C Miller, M J Ward, K Davey. The Numerical Simulation of Potential Forming Problems in Railway Wheel and Tyre Manufacturing Process. The International Conference on Forging and Related Tech. bermingham U. K. April. 1998:201~216.
- [35] 郑伟生. 国外轮轴技术发展综述(一)[J]. 国外铁道车辆 , 1998, (04): 1~5.
- [36] 郑伟生. 国外轮轴技术发展综述(二)[J]. 国外铁道车辆 , 1998, (05): 7~13.
- [37] 郑伟生. 我国 S 形系列辗钢车轮的研制与开发[J]. 铁道车辆 , 1998, (05): 15~18.
- [38] 郑伟生, 刘会英. 我国大圆弧辐板系列高速辗钢车轮的研制和开发[J]. 铁道车辆 , 2000, (03): 15~18.
- [39] 孙慕荣, 胡立平, 倪利勇, 于锁清, 张莉萍. 大型锻件锻造加工中有限元软件技术进展. 锻压装备与制造技术. 2004. (4): 83~86.
- [40] M J Ward, B C Miler, K Davey. Simulation of a Multistage Railway Wheel and Tyre Forming Process. Journal of Materials Processing Technology, 1998: 206~212.
- [41] K Davey, B C Miler, M J Ward. Efficient strategies for the simulation of railway wheel forming. Journal of Materials Processing Technology, 2001: 389~396.
- [42] 马思群, 孙彦彬, 李茹. 金属挤压成形的数值模拟技术研究. 大连铁道学院学报. 2002. (2): 8~11.
- [43] 钟斌, 吴勇中, 陈刚. 国内外车轮生产工艺的对比分析. 江西冶金. 2003. 23(4): 12~15.
- [44] 李园春, 崔 健, 颜鸣皋. 加压方式及坯料高径比对 FGH95 盘件等温锻造过程影响的模拟分析. 材料工程. 1999. (6): 7~9.
- [45] 马思群, 孙彦彬, 李茹. 金属挤压成型的数值模拟技术研究. 大连铁道学院学报. 2002. 23 (2): 8~11.

- [46] 顾煜基. 全模锻火车车轮的制造. 重型机械. 1998. (2): 7~9.
- [47] 董海涛, 张治民, 宋志海. 数值模拟技术在大锻造成形中的应用. 大型铸锻件. 2007. (1): 45~47.
- [48] 斐兴华, 王广春, 张辉, 刘继强, 周国良, 方东, 于霞. 火车车轮摆辗成形模拟试验研究. 锻压技术. 1995. (3): 33~36.
- [49] 王凤喜. 铁路机车的发展与主要锻件需求. 锻压机械. 1998. (1): 34
- [50] 范鼎东. 马钢车轮钢与国际车轮用钢标准的比较研究. 中国冶金. 2001. (1): 25~26.
- [51] 陈军, 彭颖红, 阮雪榆. 锻造预成形工艺三维塑性有限元模拟. 锻压机械. 1997. (6): 41~44.
- [52] 詹艳然, 张中元, 王仲仁. 对圆柱体镦粗过程中塑性变形发生和发展的探讨. 塑性工程学报. 1999. (2): 82~85.
- [53] 谢水生. 冠型齿坯锻造过程的数值模拟. 塑性工程学报. 1994. (3): 54~58.
- [54] 赵新海, 陈国军, 李剑峰, 赵国群, 程联军. 基于有限元的锻件变形力优化设计. 中国机械工程. 2006. (17): 122~124.

攻读硕士学位期间参加的项目和发表的论文

1、参加的项目：

车轮成形工艺分析及质量控制技术研究，部分内容承担者

2、发表的论文

- [1] 宋光鑫，付建华，曹建新.《火车车轮镦粗工艺理论分析及数值模拟》锻压装备与制造技术 08 年第 2 期：52~54.

致 谢

经过近三年的艰辛努力，硕士学位论文终于成稿了。想起过去的日日夜夜，看着自己的心血结晶，心里有几分欣喜，但在论文即将付梓之时，我也多了一份失落，并感到了一种无形的压力。在论文写作的过程中，我充分地认识到自己知识的缺乏，体会到自己对论题认识的不足。因此，可以肯定地说，论文中存在着种种缺陷和不足，恳请各位师友批评指正。我也会在以后的学习工作中继续关注这个问题，并做进一步的思考。

本文是在太原科技大学付建华教授、曹建新讲师的悉心指导下完成的。在三年的硕士研究生学习期间，导师渊博的学识，科学严谨的治学态度和一丝不苟、实事求是的工作作风使我受益匪浅。在研究工作中，学生缺乏实际的科研实战经验，付老师不厌其烦地传道授业解惑，从思考问题的方法和解决问题的途径等各方面给予我启发和教导，使我的论文得以顺利完成。同时导师为人师表的作风为我树立了榜样，使我在做学问的同时也学会了做人。无论从学习上，还是从生活上导师都给予我无微不至的指导和帮助。在此向付老师表示衷心的感谢。

在课题研究和撰写期间，在数值模拟方面的知识得到了曹老师细致的讲解，对于课题中遇到的相关问题曹老师也总是提出多方面的建议。曹老师平易近人的风范和在生活上对我无私、细致的关怀给予我莫大的鼓励和支持。在本论文完成之际，向曹老师表以衷心的感谢。

同时，还得到了李永堂教授、雷步芳教授、宋建丽副教授、刘志奇老师、齐会萍老师的热情指教和帮助。在此一并表示诚挚的谢意。

另外，太原科技大学锻压教研室的各位老师和同学们也给予本人大力的支持和热情的帮助。在此向他们表示衷心的感谢。