

文章编号: 1000-582X(2012)03-067-07

## 某重型卡车前轴成形辊锻工艺设计与优化

周 杰<sup>1</sup>, 柳 豪<sup>1</sup>, 刘旭光<sup>1</sup>, 万煦义<sup>2</sup>, 余科能<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044;

2. 中国南车集团资阳机车有限公司, 四川 资阳 641205)

**摘 要:** 针对某牌号重型卡车前轴锻件成形辊锻、模锻工艺调试中遇到的典型缺陷——工字梁充填不满开展研究, 基于前期某锻造公司大量的生产调试数据和有限元分析软件, 建立了前轴成形辊锻、模锻有限元分析模型; 在此基础上, 研究了工字梁充填不饱满缺陷的产生机理, 重点分析了第 3 道次模具工字梁型腔部位的 3 个关键参数宽度  $B_3$ 、圆角  $R_3$ 、斜度  $A_3$  对成形质量的影响规律, 重新设计了前 3 道次辊锻模具工字梁部位孔型和尺寸, 并完成了辊锻模具制造。生产结果表明, 工字梁部位充填饱满, 产品尺寸合格。基于数值模拟的设计方法有效增加了模具设计的准确程度, 减少了模具修改次数, 缩短了调试周期, 保证了最终产品的质量。

**关键词:** 重型卡车前轴; 成形辊锻; 有限元分析模型; 充填不满

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

## Design and optimization of the precision roll forging on a heavy truck front axle

ZHOU Jie<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, LIU Xu-guang<sup>1</sup>, WAN Xu-yi<sup>2</sup>, SHE Ke-neng<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. CSR Ziyang Locomotive Co. Ltd., Ziyang, Sichuan 621405, P. R. China)

**Abstract:** The under-filling defect of I-beam in a heavy truck front axle which occurs in the process debugging of the precision roll-forging and die-forging is studied. Finite element models of precision roll-forging and die-forging are established based on FEM software and the previous productive results. Then, the mechanism of the under-filing defect in I-beam is studied. And the effects of the three variables including width  $B$ , radius  $R$  and slope  $A$  of I-beam in the third step on the forging quality are investigated. In addition, the roll-forging die constructions for I-beam in previous three steps are redesigned and manufactured. The productive results show that I-beam can be fully filled, the debugging cycle is reduced significantly and the products quality is guaranteed.

**Key words:** heavy truck front axle; the precision roll forging; finite element models; under-filling

前轴是重型卡车上承受载荷较大的保安件之一, 要求具有较高的强度和疲劳寿命, 特别是在重型卡车上坡急刹车时, 前轴将承受卡车负荷的 2/3 以上。近 10 年来, 由于中国高速公路的发展和西部开

发等基础建设因素, 载重卡车产量迅速增长, 2007 年重型、中重型载货卡车年产量达到 42 万辆, 市场对前轴的需求超过 100 万根/年, 中重型卡车前轴锻件出现了供不应求的局面。

**收稿日期:** 2011-10-10

**基金项目:** 国家重大专项资助项目(G09003.8-1)

**作者简介:** 周杰(1965-), 男, 重庆大学教授、博士生导师, 主要从事塑性成形工艺及模具技术研究, (E-mail) zhoujie@cqu.edu.cn。

目前,大型前轴的锻造工艺主要有以下 3 种方式:

1) 自由锻出坯,16 t 模锻锤整体成形,但缺点是材料利用率低、产品质量差、工作环境恶劣;

2) 电加热→辊锻机出坯→压力机整体模锻;

3) 电加热→成形辊锻→压力机整形及局部成形,是国内全新的、符合国情的、适合于大批量生产的大型前轴锻造工艺。

成形辊锻工艺的特点是:材料利用率高达 85% 以上,所用设备吨位小,锻件精度高,锻件表面质量好,生产效率高<sup>[1-2]</sup>。但是由于前轴本身结构复杂和成形辊锻的工艺特点,目前的成形辊锻理论研究还不够深入,无法保证成形辊锻模具的准确设计,需要进行现场调试才能达到锻件图纸要求,在生产调试中模具需要反复修改,调试周期长,目前国内很多前轴生产企业采用补焊和打磨的方式来保证产品的最终尺寸<sup>[3-6]</sup>。

前轴成形辊锻-模锻整体成形工艺特点是中部工字梁区段和两个弹簧座由辊锻成形至锻件最终尺寸,其余部位由模锻成形<sup>[7-8]</sup>。2003 年中国某公司从国外引进了一台 50 000 kN 高能螺旋压力机,并在国内配套了一台规格 1 m 的自动辊锻机以及切边、校正和相关热处理、加工设备,拥有一条比较标准的大型前轴生产线。但是该牌号重型卡车前轴成形辊锻的工艺难度大,不允许补焊和打磨。由于模具设计的不合理,同时没有科学的分析手段,调试工作具有很大的盲目性,已投入了大量的时间以及人力、物力,反复修改后的模具精度大幅下降,基本报废。

笔者针对该公司在实际调试中锻件出现的典型缺陷——工字梁充填不满开展研究,基于前期大量的生产试验结果和有限元分析软件,建立了精确和有效的前轴成形辊锻-模锻有限元分析模型,在此基础上,研究工字梁充填饱满缺陷的产生机理,对各道次辊锻模具工字梁部位孔型进行了重新设计,完成了辊锻模具制造、安装以及生产验证。该计算机辅助设计方法大幅度地增加了模具设计的准确程度,缩短了成形辊锻工艺开发周期,并且此成形辊锻-模锻有限元分析模型可应用于其他相似零件,为同类前轴的生产以及新型号前轴成形辊锻工艺的开发提供有效的技术支持。

## 1 重型卡车前轴的工艺设计

### 1.1 前轴的工艺参数和方案选取

图 1 为该重型卡车前轴零件的三维造型图。其材质为 45 钢,锻件重 101.5 kg,两拳头中心距  $M_1$

为 1 752.6 mm,两弹簧板中心距  $M_2$  为 850 mm,单个弹簧板宽度  $D$  为 220 mm,高度  $W_1$  为 170 mm,工字梁高度  $W_2$  为 92 mm,锻件在长度方向上截面变化大,表面质量要求高,错移 $\leq 1.5$  mm,表面脱碳深度 $\leq 0.51$  mm,而且在多个轴向上都有型面,因此需在几个轴向上分别成形,质量要求高,成形难度大。

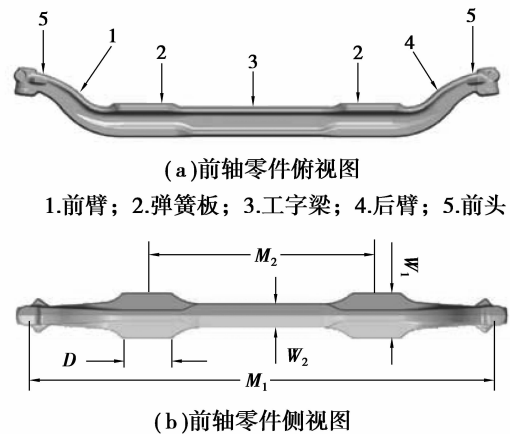


图 1 前轴零件三维造型图

锻件最大投影面积  $A$  (包括飞边) 为 5 422 cm<sup>2</sup>; 根据打击力计算公式:

$F = (17.5 \sim 28) \cdot k \cdot A$ ,  $k$  为经验系数,取 1.1; 得到打击力  $F$  为 104 373~166 997 kN。

所需的成形载荷超过了已有热模锻压力设备所能提供的打击力,由于设备吨位的限制,因此采取先整体成形辊锻再局部模锻方案。在成形辊锻工序完成前轴 70% 部位的成形,大大降低了终锻时的成形载荷,降低了对热模锻设备的要求,同时成形辊锻工艺又大幅度地提高了材料利用率。其工艺方案如下:下料→中频感应炉加热→成形辊锻→高能压力机整形及两拳头成形→10 000 kN 油压机切边、校正。

### 1.2 最初成形辊锻工艺设计

成形辊锻工艺需把锻件的一端设计成料头,作为辊锻机械手夹持部分,另一端预留坯料用于拳头的成形,辊锻过程分为 4 个道次成形:

1) 如图 2(a) 与 3(a) 所示,第 1 道次辊锻型腔一般设计成为半闭式箱式孔型,采用辊锻正压的方式轴向分料,这种方法变形量较小,主要作用是将后一步成形弹簧板和工字梁的预留坯料体积进行轴向分开。

2) 第 2 道次将坯料侧向翻转 90°,弹簧板区段成形采用礼帽孔型(图 2(b)),以解决辊锻过程中产生不均匀变形和展宽不够问题,锻件的变形量比较大,

辊锻模具将圆形截面的棒料强制展宽从而形成弹簧板的锥形,是弹簧板的预成形,工字梁与前后臂部位采用对称箱式孔型(图3(b))。

3)第3道次坯料继续翻转 $90^\circ$ ,型腔采用上下对称式孔型(图2(c)和图3(c)),锻件变形量最大,在辊锻工序完成前轴的前端、尾端和弹簧板的终成形,同时对前轴工字梁部分进行预成形并出现了飞边。

4)第4道次中只有工字梁部分参与变形(图3(d)),是工字梁部位的终成形。

辊锻变形时,毛坯横截面面积减小,长度增加,为保证充填能力,设计各道次截面面积时需为下一道次相应部位预留变形量,上一道次与下一道次孔型面积比值 $\lambda$ 一般按经验取值约为 $1.2^{[9-10]}$ 。

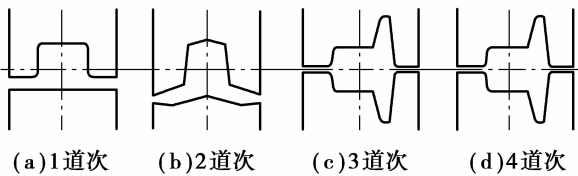


图2 弹簧板部位孔型

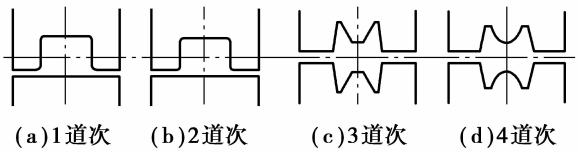


图3 工字梁部位孔型

### 1.3 最初工艺调试出现的缺陷

在该锻造公司对这种牌号重型卡车前轴锻件成形辊锻、模锻工艺的前期调试过程中,辊锻件出现了较多缺陷,其中又以工字梁部位充不满最为普遍,严重地影响了外观以及零件的承载能力,是造成前轴锻件报废的主要原因之一。图4所示为工字梁部位未充满的前轴锻件以及工字梁部位横截面图。

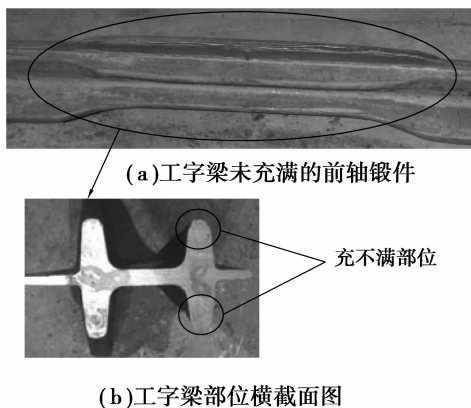


图4 工字梁未充满的第4道次辊锻工序件

最初模具工字梁部位各道次孔型尺寸参数设计如下:

1)第1道次模具工字梁部位采用半闭式箱式孔型如图3(a)所示,方形孔型宽为142 mm、高为108 mm。

2)第2道次模具工字梁部位也采用半闭式箱式孔型如图3(b)所示,方形孔型宽为125 mm、高为98 mm。

3)第3道次模具工字梁部位孔型结构见图5(a),孔型口部宽度 $L_3$ 为112 mm、深度 $H_3$ 为53.5 mm、凸台圆角 $R_3$ 为25 mm、凸台斜度 $A_3$ 为 $12^\circ$ 和径部宽度 $B_3$ 为16 mm。

4)第4道次模具工字梁部位孔型结构如图5(b)所示,孔型口部宽度 $L_4$ 为112 mm、深度 $H_4$ 为48.5 mm、凸台圆角 $R_4$ 为12.7 mm、凸台斜度 $A_4$ 为 $7^\circ$ 和径部宽度 $B_4$ 为14 mm。

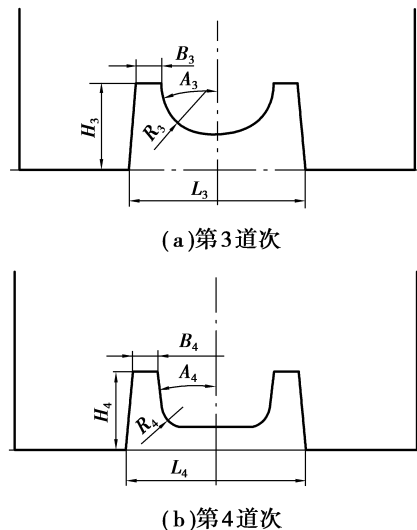


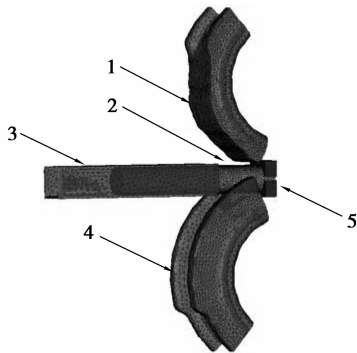
图5 第3、4道次工字梁部位孔型

## 2 重型卡车前轴成形辊锻仿真

该牌号重型卡车前轴对外形尺寸精度的要求较国内更为严格,实际生产过程中有较多因素的干扰,对现场分析缺陷产生的原因以及寻求相应的改进措施带来了相当大的困难。因此引入数值模拟仿真技术用于分析前轴生产过程中缺陷产生机理以及寻求相应的解决措施带来了相当大的便利<sup>[11-16]</sup>。为了保证数值模拟仿真结果具有实际意义,首先调研了该公司前期的调试结果以及进行了大量的数值模拟仿真计算,建立了该牌号重型卡车前轴成形辊锻、模锻有限元分析模型,保证了模拟结果与实际调试情况一致。

## 2.1 有限模型的建立

为了提高模拟效率,设置坯料为塑性体,模具为刚性体(忽略模具变形)。坯料材料 AISI-1045;采用软件自带的刚黏塑性流动应力模型  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, \theta)$ , 式中,  $\bar{\epsilon}$  为等效应变,  $\dot{\bar{\epsilon}}$  为等效应变速率,  $\theta$  为变形温度。采用剪切摩擦模型  $\tau_f = mk = m\bar{\sigma}/\sqrt{3}$  ( $m$  为摩擦剪切因子,  $k$  为剪切屈服强度)。采用四面体网格,模拟过程总的成形时间  $T=9.56$  s。图 7 为成形辊锻中的数值模拟简化模型。



1. 辊锻上模;2. 坯料;3. 导向槽;  
4. 辊锻下模;5. 机械手

图 7 重型卡车前轴成形辊锻有限元模型

为了保证有限元分析模型分析结果的准确性,首先调研了该公司前期调试的各项数据,如坯料始锻温度、辊锻机转速、试制锻件尺寸等。通过模拟分析结果与实际锻件尺寸的比对,在模拟时设置坯料始锻温度为  $1180$  °C、辊锻机转速  $2$  rad/s、摩擦剪切因子  $m$  为  $0.7$  时的分析结果与实际情况十分吻合。图 8 所示为该公司前期调试试制的第四道次辊锻工序件与模拟结果的对比图,模拟结果的仿真度较高。



(a) 试制锻件



(b) 模拟结果

图 8 前期调试试制的第 4 道次辊锻件与模拟结果的对比图

## 2.2 缺陷产生机理

通过建立的有限元分析模型重点分析前轴锻件工字梁部位充填不满缺陷的产生机理,从而获得各道次协调变形的规律。图 9 是对该公司最初辊锻模具设计的数值模拟仿真工字梁部位的成形结果。由

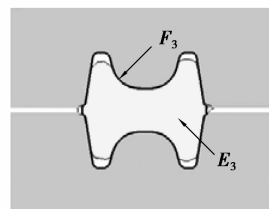
图 9 可知,在第 3 道次以及第 4 道次工字梁部位分别出现了充不满缺陷,与现场工艺调试中出现的情况一致。工字梁部位形状窄而高,成形比较困难。由于模锻设备的能力限制,必须在辊锻部分完成工字梁部位的终成形。通过采用建立的有限元分析模型对该公司最初的辊锻模具设计方案进行了数值模拟仿真,基于模拟仿真结果发现导致工字梁部位充不满的主要原因有以下两个方面:

1) 在辊锻第 1 道次与第 2 道次工字梁部位模具型腔孔型设计不合理,导致在第 3 道次变形时无法充满相应部位型腔。除此之外,轴向预留料的体积不够也导致了第三道次工字梁部位以及其过渡区域无法充满。

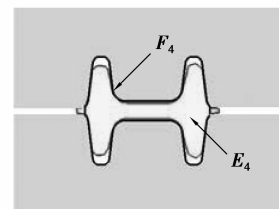
2) 第 3 道次工字梁型腔与第四道次工字梁部位型腔不匹配。第 3 道次辊锻是工字梁部位的预成形,第 4 道次辊锻是工字梁部位的终成形,因此第 4 道次成形工字梁部位的型腔结构是不允许修改的。第 3 道次工字梁部位的充填程度直接影响工字梁最后的成形质量。如果第 3 道次成形工字梁部位型腔结构与第 4 道次不匹配,就算第 3 道次型腔充填饱满,也无法保证 4 道次型腔能够充满,因此在成形辊锻中,若只是单独的解决某一道次是否充满是不能确保终成形质量的,只有研究工字梁部位在各道次协调变形的规律,优化第 1、2 道次工字梁部位截面和轴向上料的分配,在第 3 道次工字梁预成形获得与第 4 道次终成形匹配的截面结构形式,才能从根本上解决工字梁充不满问题。



(a) 工字梁未充满的第 3 道次工件



(b) 第 3 道次工字梁成形截面图



(c) 第 4 道次工字梁成形截面图



(d) 工字梁未充满的第 4 道次工件

图 9 基于该公司最初辊锻模具设计的数值模拟仿真工字梁部位的成形结果

### 3 工艺方案优化

笔者为定量分析工字梁部位的充填效果,见图9(b)、(c),设 $C$ 为工字梁部位的充填率, $C=E/F \times 100\%$ 。其中 $E$ 代表该截面坯料充填的面积, $E_3$ 和 $E_4$ 分别代表第3道次和第4道次工字梁部位成形截面坯料充填的面积;线框区域 $F$ 为成形工字梁部位的模具型腔截面面积, $F_3$ 和 $F_4$ 分别代表第3道次和第4道次工字梁部位模具型腔截面面积。因此 $C$ 的值越大,表明工字梁部位的充填效果越好。用UG/CAD软件拟合 $E$ 和 $F$ 区域的面积<sup>[17]</sup>。经拟合,对该公司最初调试工艺的模拟结果显示,第四道次辊锻件工字梁的填充率 $C_4$ 为90%,工字梁部位存在明显的充不满现象。而第4道次是工字梁部位的终成形,不允许修改孔型结构,要解决工字梁充不满的问题,只能在不增加原始坯料截面面积的前提下,优化前3道次模具工字梁部位型腔结构,使坯料材料流动更加合理,保证锻件工字梁部位的充填饱满。

#### 3.1 第1、2道次工字梁部位模具结构的优化

在2.2节具体分析了工字梁部位充不满缺陷的产生机理,针对第1、2道次工字梁部位模具型腔结构的具体优化措施实施如下:

1)增加第1、2道次工字梁部位的轴向金属配料体积,保证预留足够的金属用于后续工序充填工字梁部位以及其过渡区域。

2)优化第1、2道次模具成形工字梁部位的截面结构形式。图10为该公司最初设计第1、2道次模具结构有限元模拟结果的工字梁部位的成形截面图。该模具结构设计的主要缺点是第2道次辊锻以后没有获得足够的展宽,如图10(b)所示,坯料上端未充满,呈现大圆角。翻转90°后,进入第3道次辊锻工序后,就表现在该截面的高度不够、一侧圆角较大,不利于充填第3道次该部位模具型腔。笔者针对以上设计中存在的问题,优化了第1、2道次模具工字梁部位型腔截面结构如图11所示。图11(a)为第1道次模具工字梁部位孔型结构,在1.3节中介绍的原设计参数的基础上减小了压下量,优化后的方形孔型宽为142 mm、高115 mm,相当于增加了该部位截面面积,并且第1道次上下模具工字梁部位型腔增加了凸台,上下凸台顶点间距108 mm,该结构便于变形时向两侧分料,翻转90°后进行第2道次成形时,受到高度方向的压力,该截面形式更利于充填模具上端圆角部位;在第2道次增加了该部位型腔的压下量,同时增加模具型腔宽度,方形孔型宽

128 mm、高为84 mm。如此,便在第2道次获得了较大的展宽如图11(b)所示。翻转90°后,相当增加了毛坯高度,同时这种截面结构形式比较接近第3道次工字梁部位型腔结构,相当于在第1、2道次进行了第3道次的预变形,这种截面结构形式更利于后续工序的填充。

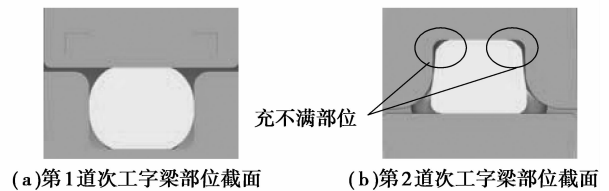


图10 最初模具结构第1、2道次工字梁部位模拟结果

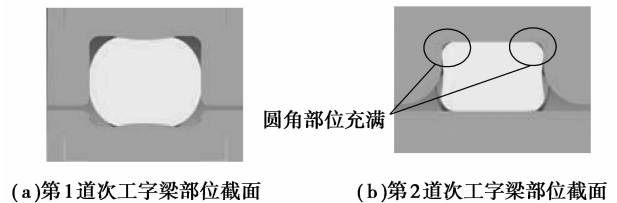


图11 模具结构优化后第1、2道次工字梁部位模拟结果

#### 3.2 第3道次模具工字梁部位型腔工艺参数优化

第3道次辊锻是保证工字梁成形质量的关键工序,需要得到能够充满第4道次工字梁部位型腔的截面形式。图12是第3道次工字梁部位实物图与剖面图,开口宽度 $L_3$ 和高度 $H_3$ 是固定的2个参数,凸台圆角 $R_3$ 、凸台斜度 $A_3$ 和径部宽度 $B_3$ 是设计第3道次成形工字梁部位模具型腔结构形式的3个关键参数,对第3道次工字梁部位预成形及第4道次终成形的成形效果有着重要的影响,该公司最初设计的第3道模具工字梁部位型腔关键参数 $R_3$ 、 $A_3$ 、 $B_3$ 分别为25.4 mm、12°、16 mm。但第4道次辊锻工序件成形质量并不理想,工字梁部位未充满,明显缺料。

在分析第3道次模具成形工字梁部位型腔结构中 $R_3$ 、 $A_3$ 和 $B_3$ 3种参数对锻件工字梁部位充填效果的影响时,引入正交试验方法,即保持其中2种参数和工作条件不变的情况下。通过在允许范围内调整另一个参数,得出一系列与之所对应的充填率 $C$ 值,找出影响规律,得到最佳结果。

##### 3.2.1 第3道次模具工字梁部位型腔参数 $R_3$ 对

工字梁充填率 $C$ 的影响

保持型腔参数 $A_3$ 为14°、 $B_3$ 为17 mm不变,取型腔参数 $R_3$ 分别为:5,10,15,20,25,30,35 mm进

行数值模拟,得到型腔参数  $R_3$  对充填率  $C$  的影响曲线,如图 13 所示。

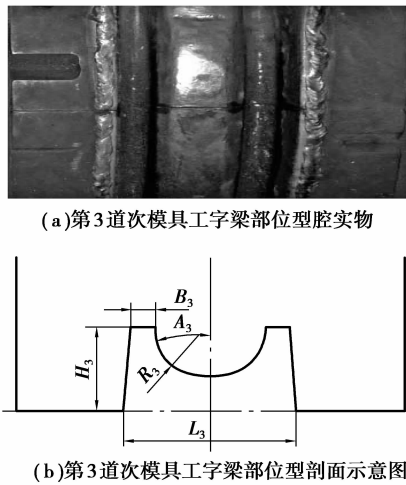


图 12 模具第 3 道次工字梁部位实物图与剖面示意图

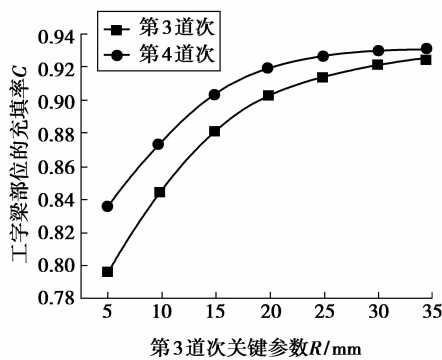


图 13 参数  $R_3$  对  $C$  的影响规律

由图 13 可知,最初第 3 道次、第 4 道次工字梁部位的充填率  $C$  都随着参数  $R_3$  的增大有较大幅度的提高,但是  $R_3$  对工字梁部位的充填率  $C$  的影响能力随着它的继续增加变得越来越弱,当  $R_3$  达到 28 mm 后,  $R_3$  继续增大,充填率  $C$  也不会继续增加。

### 3.2.2 第 3 道次模具工字梁部位型腔参数 $A$ 对工字梁充填率 $C$ 的影响

保持型腔参数  $R_3$  为 20 mm、 $B_3$  为 17 mm 为不变,取型腔参数  $A_3$  分别为:  $10^\circ$ 、 $12^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $16^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $22^\circ$  进行数值模拟,得到型腔参数  $A_3$  对充填率  $C$  的影响曲线如图 14 所示。

由图 14 可知,  $A_3$  由  $10^\circ$  变化到  $18^\circ$  时,第 3 道次与第 4 道次的工字梁部位的充填率  $C$  随着参数  $A_3$  的增大而增加,但当  $A_3$  超过  $18^\circ$  后,  $A_3$  值继续增加,尽管第 3 道次工字梁部位的充填率会略微增加,但由于参数  $A_3$  过大,坯料进入第 4 道次型腔更加困难,反而导致第 4 道次的充填率下降。

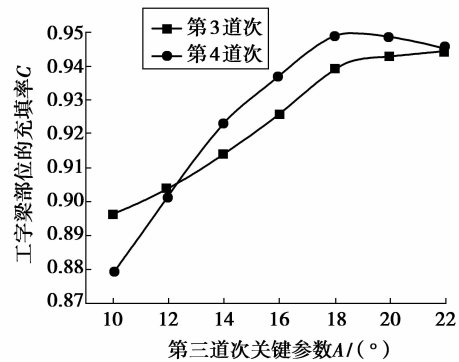


图 14 参数  $A_3$  对  $C$  的影响规律

### 3.2.3 第 3 道次模具工字梁部位型腔参数 $B_3$ 对工字梁充填率 $C$ 的影响

保持型腔参数  $R_3$  为 20 mm、 $A_3$  为  $14^\circ$  不变,取型腔参数  $B_3$  分别为: 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27 mm 进行数值模拟,得到型腔参数  $B_3$  对充填率  $C$  的影响曲线,如图 15 所示。

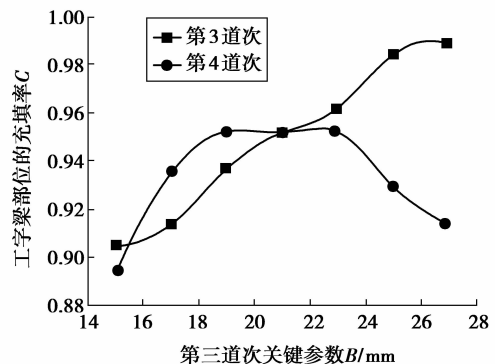


图 15 参数  $B_3$  对  $C$  的影响规律

由图 15 可知,随着关键参数  $B_3$  的增大,第 3 道次的充填率是持续增加的。但是,当  $B_3$  达到 23 mm 后继续增大,第 4 道次工字梁部位的充填率反而急剧下降,这主要是由于  $B_3$  值选取过大,坯料难以进入第 4 道次工字梁部位型腔,导致充填能力下降。

## 4 优化结果

笔者在 3.1 节中对第 1、2 道次辊锻模具工字梁部位孔型结构和尺寸进行了优化;根据正交试验发现了第 3 道次模具工字梁部位型腔结构凸台圆角  $R_3$ 、凸台斜度  $A_3$ 、径部宽度  $B_3$  3 个关键参数对工字梁部位填充率的影响规律,找到了比较合理的参数值,它们分别为  $R_3 = 28$  mm、 $A_3 = 18^\circ$ 、 $B_3 = 23$  mm,此时模拟结果显示:终锻件工字梁充

填率  $C$  为 99.63%, 满足锻件尺寸要求。按照优化后的三维模型完进行了模具加工, 生产试制结果表明, 终锻件工字梁部位成形饱满, 满足终锻件图纸要求。生产试制锻件与模拟结果十分吻合, 如图 16 所示。

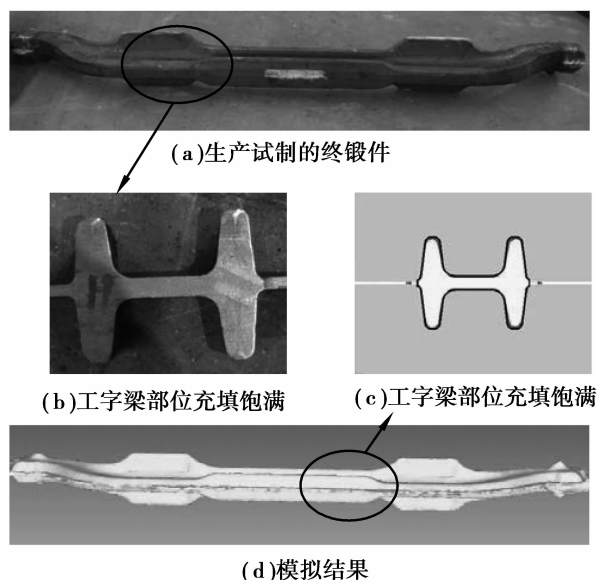


图 16 优化后生产试制的终锻件与模拟结果对比图

## 5 结论

基于前期该锻造公司对国外某牌号重型卡车前轴成形辊锻工艺大量的调试数据和有限元分析软件, 建立了重型卡车前轴成形辊锻、模锻有限元分析模型。在此基础上, 分析了其典型成形缺陷—工字梁部位充不满的成因, 得到如下结论:

1) 基于有限元分析软件, 通过对比该公司最初工艺方案调试数据建立了刚黏塑性流动应力模型, 利用该模型对重型卡车前轴成形辊锻、模锻工艺的优化结果与实际试制情况一致, 该模型可用于其他相似零件的成形辊锻模具设计, 可以保证成形辊锻模具设计的准确度, 减少修模次数, 大幅度地缩短了调试周期, 为同类前轴的生产以及新型号前轴成形辊锻工艺的开发提供了有效的技术支持。

2) 对第 1、2 道次辊锻模具工字梁部位常用孔型结构和尺寸进行了优化, 减小了第 1 道次工字梁部位孔型的压下量并设计了凸台, 优化的方形孔型宽为 142 mm、高为 115 mm; 在第 2 道次增加了工字梁部位孔型的压下量, 同时增加了孔型的宽度, 优化后的方形孔型宽 128 mm、高为 84 mm。找到了对重型卡车前轴工字梁部位充填质量有着重要影响的第 3 道次工字梁部位模具型腔工艺参数凸台圆角  $R_3$ 、

凸台斜度  $A_3$ 、径部宽度  $B_3$ , 通过正交试验分析了其对工字梁部位充填质量的影响规律, 找到比较合理的参数值, 它们分别为  $R_3 = 28 \text{ mm}$ 、 $A_3 = 18^\circ$ 、 $B_3 = 23 \text{ mm}$ 。按照该组参数实际试制的锻件工字梁充填饱满, 满足尺寸要求。为优化成形辊锻模具工字梁部位结构提供了一定的指导依据。

## 参考文献:

- [1] 郑森, 苟建华. A680 前轴精密辊锻工艺及辊锻工装的设计与改进[J]. 机械工人: 热加工, 2007(7): 72-74.  
ZHENG MIAO, GOU JIAN-HUA. Design and improvement of precision roll-forging technology and its fixture for A680 automotive front axle[J]. Machinist: Metal Forming, 2007(7): 72-74.
- [2] 柳豪, 周杰, 万煦义, 等. 某重型卡车前轴成形辊锻质量因素分析[J]. 热加工工艺, 2007, 39(21): 72-74.  
LIU HAO, ZHOU JIE, WAN XU-YI, et al. Analysis on quality factors of precision roll-forging of a heavy truck's front axle[J]. Hot Working Technology, 2007, 39(21): 72-74.
- [3] WANG J H, PIAO F Y, YU Y C, et al. Industrial production process of unquenched steel front axle for heavy automobile[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(1): 105-109.
- [4] 宋玉泉, 王明辉, 宋家旺, 等. 精成形辊锻机[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(1): 72-75.  
SONG YU-QUAN, WANG MING-HUI, SONG JIA-WANG, et al. Precision forming roll-forging machine[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(1): 72-75.
- [5] 李之文, 黄鹰, 刘才正. 前轴精锻—模锻工艺应用体会[J]. 锻压技术, 1999, 24(6): 35-37.  
LI ZHI-WEN, HUANG YING, LIU CAI-ZHENG. Application of precise rolling forging and die forging technology of automobile front axle[J]. Forging & Stamping Technology, 1999, 24(6): 35-37.
- [6] 宋玉泉. 连续局部塑性成形的发展前景[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1): 65-66.  
SONG YU-QUAN. The prospect of successive partial plastic forming [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1): 65-66.
- [7] 张承鉴. 辊锻技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 32-36.
- [8] 周大隽. 锻压技术数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [9] 夏巨谟, 韩凤麟, 赵一平. 中国模具设计大典: 第 4 卷[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2003.

- [S. l.]: IEEE Press, 2000,3:1247-1252.
- [11] LAZAR J F, MARTINELLI R. Steady-state analysis of the LLC series resonant converter[C] // Proceedings of the 2001 Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 4-8, 2001, Anaheim, California, USA. [S. l.]: IEEE Press, 2001,2:728-735.
- [12] 黄志武,秦惠. SABER 仿真在 LLC 谐振变换器开发与设计中的应用[J]. 通信电源技术, 2008, 25(2): 74-77.
- HUANG ZHI-WU, QIN HUI. Application of SABER in designing LLC resonant converter [J]. Telecom Power Technologies, 2008, 25(2): 74-77.
- [13] JUNG J H, KWON J G. Theoretical analysis and optimal design of LLC resonant converter [C] // Proceedings of the 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Sept. 2-5, 2007, Aalborg, Denmark. [S. l.]: IEEE Press, 2007:1-10.
- [14] 马皓,祁丰. 一种改进的 LLC 变换器谐振网络参数设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33):6-11.
- MA HAO, QI FENG. An improved design method for resonant tank parameters of LLC resonant converter[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(33):6-11.
- [15] 方宇,徐德鸿,张艳军. 高功率密度 LLC 谐振变换器研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(8):16-18.
- FANG YU, XU DE-HONG, ZHANG YAN-JUN. Design of high power density LLC resonant converter with extra wide input range [J]. Power Electronics, 2007, 41(8):16-18.
- [16] HSIEH G C, TSAI C Y, HSIEH S H. Design considerations for LLC series resonant converter in two-resonant regions [C] // Proceedings of the 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, Florida, USA. [S. l.]: IEEE Press, 2007:731-736.

(编辑 王维朗)

~~~~~

(上接第 73 页)

- [10] TANG J P, WU W T, WALTERS J. Recent development and applications of finite element method in metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 46(2): 120-121.
- [11] WANG H, LI G Y, ZHONG Z H. Optimization of sheet metal forming processes by adaptive response surface based on intelligent sampling method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1/3):707-716.
- [12] SATHIYA P, ARAVINDAN S, NOORUL HAQ A, et al. Optimization of friction welding parameters using evolutionary computational techniques [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2576-2584.
- [13] LIU W, YANG Y Y. Multi-objective optimization of sheet metal forming process using pareto-based genetic algorithm [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1/3):499-506.
- [14] BEHRENS B A. Finite element analysis of die wear in hot forging process [J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2008, 57(1): 305-308.
- [15] KLEIJNEN J P C. An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(2):287-300.
- [16] KLEIJNEN J P C. Kriging metamodeling in simulation: a review [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(3):707-716.
- [17] 周杰,朱若岭,徐戊矫,等. 大型全纤维曲轴 TR 锻成形典型缺陷分析及优化[J]. 内燃机工程, 2010, 31(6): 76-80.
- ZHOU JIE, ZHU RUO-LING, XU WU-JIAO, et al. Typical defect analysis and forming optimization of TR upsetting-bending process for heavy crankshaft with continuous grain flow [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(6):76-80.

(编辑 王维朗)