

锻造

基于 Deform 二次开发的连杆折叠缺陷预测及优化

武 欢, 陈 康, 代先东, 黄斯韬, 孙 阳, 张金梁, 曹建国

(四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:为解决某厂船用连杆生产过程中产生的折叠缺陷,借助 Deform 软件进行优化分析,由于 Deform 自带的折叠角不能准确地预测连杆折叠缺陷,故将折叠概率指数通过二次开发嵌入 Deform 软件从而对折叠缺陷进行预测,预测结果与实际情况相符,并利用材料流动分析确定了圆角过渡区产生折叠缺陷的原因。探究了坯料圆角过渡区的圆角半径、终锻温度、模具加压速度对折叠概率指数的影响,结合正交实验找到优化工艺参数组合,并在二次开发后的 Deform 软件中进行模拟,模拟结果显示折叠状况大大改善。最后进行了工厂试生产,所得锻件形状精整,折叠报废率由 20.97% 降至 0.91%,且微观组织和晶粒度均达到了生产要求,验证了工艺优化的有效性,为类似的折叠缺陷优化工作提供了参考。

关键词: 折叠缺陷; 连杆; 折叠概率指数; 二次开发; Deform

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.002

中图分类号: TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0012-07

Prediction and optimization on folding defect for connecting rod based on secondary development of Deform

Wu Huan, Chen Kang, Dai Xiandong, Huang Sitao, Sun Yang, Zhang Jinliang, Cao Jianguo

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to solve the folding defect in the production process of marine connecting rod in a certain factory, the optimization analysis was conducted by software Deform. Since the folding defect of connecting rod was not accurately predicted by the folding angle that comes with the software Deform, the folding probability index was embedded in the software Deform by secondary development to predict the folding defect, and the prediction result was consistent with the actual situation. Then the cause of the folding defect in the fillet transition zone was found by material flow analysis. The influences of fillet radius in blank fillet transition zone, final forging temperature and die pressing speed on the folding probability index were explored, and combined with orthogonal experiments, the optimal process parameters were found and simulated in the software Deform after the secondary development. The simulation result shows that the folding condition is greatly improved. Finally, the factory trial production was carried out. And the shapes of obtained forgings are refined, the folding rejection rate is reduced from 20.97% to 0.91%, and the microstructures and grain sizes reach the production requirements, which verifies the effectiveness of the process optimization and provides a reference for the optimization of similar folding defects.

Key words: folding defects; connecting rod; folding probability index; secondary development; Deform

连杆是发动机的重要零件之一,也是典型的复杂系数较高的模锻件,连杆生产的精度和关键性能指标都将直接影响发动机的整机性能和使用寿

命^[1]。连杆在工作时承受着零件质量产生的惯性力和经活塞传递过来的气体压力^[2],其在工作中的可靠性很大程度上决定了发动机的可靠性。随着我国工业的快速发展,发动机的生产规模也在不断扩大,对于连杆的性能要求亦在提高^[3]。锻件折叠是锻造工艺中十分常见的一种非断裂缺陷,折叠作为一种内患,不仅会减小零件承受载荷的面积,而且在工作时容易产生应力集中,随后发展成疲劳断裂,对工件寿命的影响非常大,因此,对锻造折叠缺陷的优化和预测研究是十分重要的^[4-5]。锻造中产生折叠的原因主要包括:毛刺回流、存在凹模难成形区

收稿日期: 2021-01-13; 修订日期: 2021-04-12

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目 (2019YFG0454); 川大-泸州校地合作重点项目 (2021CDLZ-3); 四川大学校地战略合作科技创新研发项目 (2018CDPZH-26、2019CDLZ-16)

作者简介: 武 欢 (1996-), 女, 硕士研究生

E-mail: 13408472434@163.com

通信作者: 曹建国 (1971-), 男, 博士, 副教授

E-mail: cjgkl@sina.com

和坯料尺寸不合适^[6-8]。

本文针对某厂船用连杆生产过程中产生的折叠缺陷进行优化分析，其零件图如图 1 所示。在原有工艺的锻造过程中，折叠缺陷导致该连杆的报废率高达 20.97%，造成了很大程度的材料浪费，严重影响了企业的生产效益。连杆折叠缺陷位于连杆头部和杆部之间的圆角过渡区，如图 2 所示。若通过机加工去除折叠缺陷，则锻件的外周整个截面都需要机加工，但由于锻件的加工余量不足，会使机加工之后的零件尺寸达不到出厂要求，因此，综合考虑需要从工艺优化的角度来降低折叠缺陷导致的连杆报废率，提升产品效益。本文首先使用 Deform 有限元模拟软件对该船用连杆的成形工艺进行有限元

仿真，之后将折叠概率指数通过二次开发嵌入 Deform 软件，分析折叠缺陷的形成原因，并结合正交实验对该船用连杆的折叠缺陷进行优化，在获得理想的模拟结果后进行生产验证，校验优化成果。

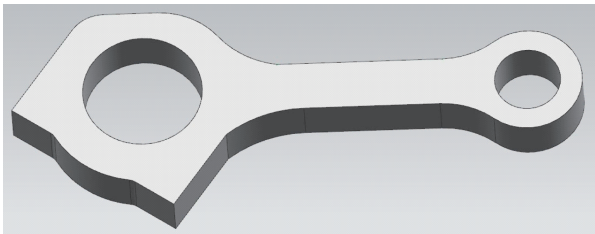


图 1 连杆零件示意图
Fig. 1 Schematic diagram of connecting rod part

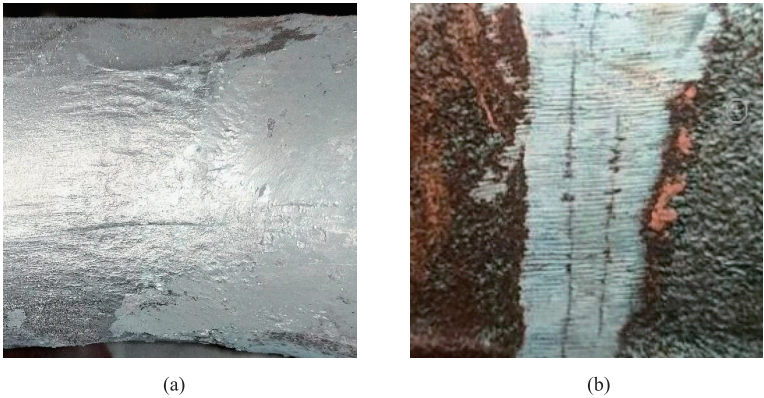


图 2 连杆折叠缺陷
(a) 圆角过渡区折叠缺陷 (b) 折叠缺陷细节
Fig. 2 Folding defect of connecting rod
(a) Folding defect in fillet transition zone (b) Details of folding defect

1 有限元模型建立与分析

Deform 是基于有限元方法（FEM）的过程仿真系统，广泛应用于金属成形和热处理过程分析^[9-11]。使用 Deform 软件对连杆终锻工艺进行有限元分析，连杆所用材料为 42CrMo4 合金钢，在有限元分析中模具不变形，因此，无需设置模具材料。模拟时设置的主要参数如表 1 所示。

表 1 Deform 模拟参数设置
Table 1 Setting of simulation parameters in Deform

参数	数值
锻件材料	42CrMo4 合金钢
终锻温度/℃	950
模具初始温度/℃	200
摩擦因数	0.3
对流换热系数/(N·(s·mm·℃) ⁻¹)	5
上模速度/(mm·s ⁻¹)	100

为了更加清楚地看到缺陷部位的成形状况，在后处理模块中将锻件进行剖分，选取实际生产中出现折叠缺陷的连杆头部进行分析，有限元模拟结束时的折叠角情况如图 3 所示，图 3 中圆圈标记部位为实际生产中存在折叠缺陷的圆角过渡区。在 Deform 软件中，折叠角大于 270°时预示锻件可能产生折叠缺陷，而图 3 中最大折叠角仅为 226°，与实际

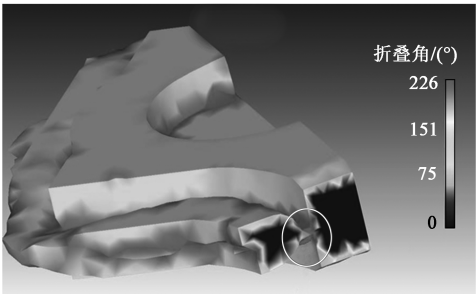


图 3 有限元分析折叠角云图
Fig. 3 Nephogram of folding angle for finite element analysis

生产状况不符, 因此, 仅通过折叠角无法准确地预测锻件的折叠缺陷, 需使用其他手段来预测和优化。

2 Deform 二次开发

2.1 折叠概率指数

利用 Deform 自带的折叠角不能完全准确地预测折叠缺陷, 因此, 需要采取其他方法进行预测。有学者提出了要利用基于网格表面积变化的折叠概率指数来预测折叠缺陷^[12], 如图 4 所示, 其中, N_1^{t-1} 、 N_2^{t-1} 、 N_3^{t-1} 表示变化前的节点位置, N_1^t 、 N_2^t 、 N_3^t 表示变化后的节点位置, t 为模拟步, $(t-1)$ 为 t 的前

一模拟步。图 4a 表示单元节点向外运动, 图 4b 表示单元节点向内运动。模拟过程中材料网格的体积保持不变, 当材料网格未发生折叠时, 单元网格的表面积会增大或者保持不变, 当单元网格的表面积较前一模拟步减小时, 说明其周围节点的速度场在此处聚集, 该局部网格很有可能产生了折叠缺陷, 且折叠一旦形成, 即使网格的表面积再次扩大, 折叠缺陷也不会消失。因此, 网格的折叠缺陷产生概率可以表示为:

$$FI_t = \begin{cases} FI_{t-1} + (S_{t-1}/S_t - 1) & S_{t-1} > S_t \\ FI_{t-1} & S_{t-1} \leq S_t \end{cases}$$

式中: FI_t 为第 t 步时折叠概率指数; S_t 为第 t 步时网格单元的表面积。

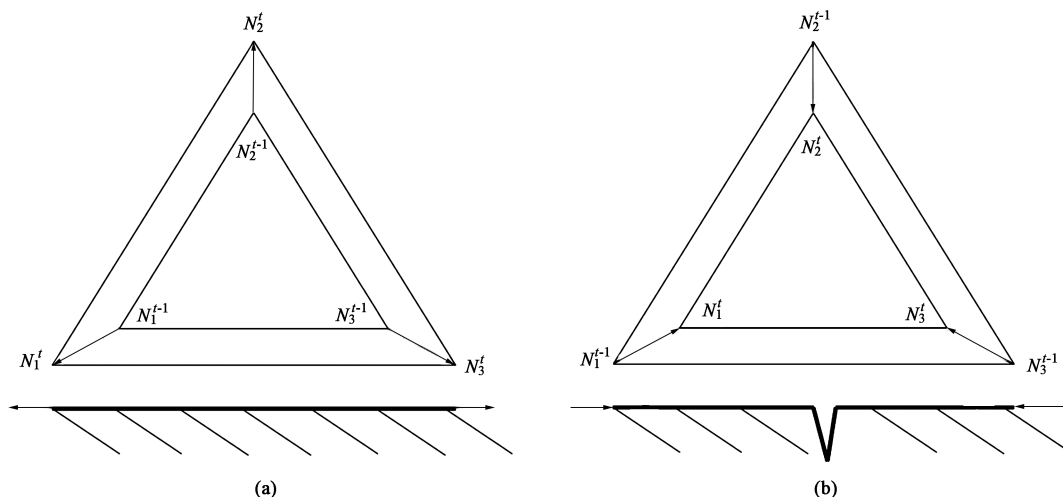


图 4 折叠形成概率示意图

(a) 表面积增大 (b) 表面积减小

Fig. 4 Schematic diagrams of fold formation probability

(a) Increase of surface area (b) Decrease of surface area

当某模拟步中网格表面积小于上一步中网格的表面积时, 就将减小的量累加到 FI_t 中; 如果网格表面积大于或等于上一步中网格的表面积时, FI_t 值不变, 继续进行下一步的解算。为了在 Deform 中计算折叠概率指数 FI , 需要通过二次开发的方法编写子程序。

2.2 二次开发的流程

Deform 的用户子程序的二次开发主要是基于 Fortran 编写程序, 然后将编写好的程序嵌入 FEM 解算引擎。Deform 二次开发的主要步骤如图 5 所示。

在 Windows 操作环境下, 使用 AbsoftProFortran 对需要修改的子程序进行针对性的二次开发。本文选择 USRUPD 子程序进行二次开发, 在后处理中对折叠概率指数 FI 进行解算。后处理子程序仅对存储

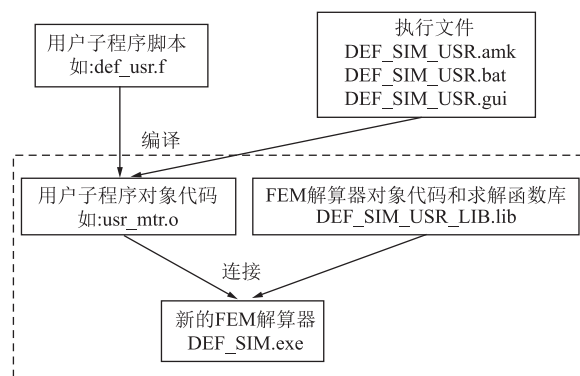


图 5 二次开发流程图

Fig. 5 Flow chart of secondary development

的计算结果进行解算, 通常选择每模拟 2 步或者 5 步时存储一次以节约磁盘空间, 但如果不能对计算结果中未存储的步数进行解算, 可能会增大计算结

果的误差,而 USRUPD 子程序在每个模拟步的开始和结束时都会调用一次,因此,使用 USRUPD 子程序进行二次开发,解算折叠概率指数更加准确。将二次开发后的子程序嵌入 FEM 解算引擎,即可在 Deform 中调用二次开发的子程序。

2.3 二次开发结果分析

经过二次开发之后再次进行有限元分析,仍然选取成形结束时的第 107 步进行分析,折叠概率指数云图如图 6 所示。可以看到,圆角过渡区界面处的折叠概率指数较大,折叠概率指数反映的是成形过程中锻件局部产生折叠缺陷的概率,因此,可以证明开发的子程序能够预测实际生产中可能产生的折叠缺陷,并且折叠概率指数是一个量化的指标,减小折叠概率指数意味着锻件局部产生折叠的概率减小。

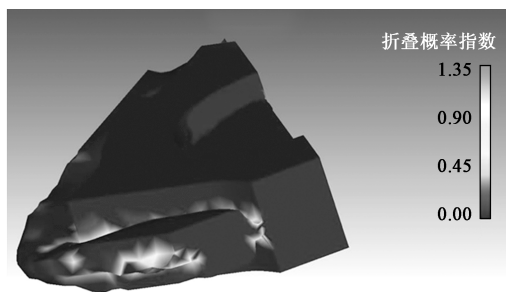
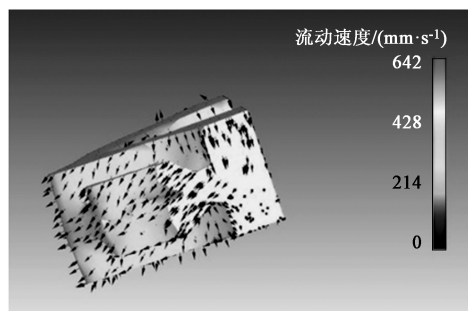


图 6 折叠概率指数云图

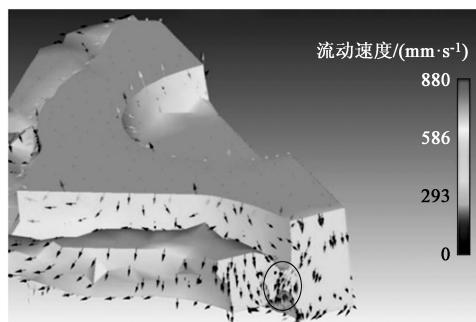
Fig. 6 Nephogram of folding probability index

2.4 折叠缺陷原因分析

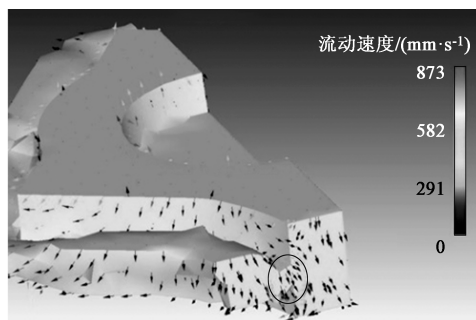
锻件的速度场可以直观地展现各区域的金属流动速度,金属流线可以很好地反应金属的流动规律,分析金属变形行为。本文选取连杆充填中期和后期的 3 个计算步进行分析,如图 7 所示。从图 7 可以看出:在第 50 步时锻件仍处于快速充填模具型腔的阶段,由于受到模具的挤压,在不断充填型腔的同时有大量材料流向飞边区;在第 105 步时连杆头部材料一部分流向了飞边槽,而另一部分继续向下充填模具型腔,此时连杆的侧型壁在模具的不断挤压下出现了轻微的鼓形,这是由于坯料和模具的接触面存在摩擦,受断面摩擦影响较大的难变形区和在坯料终锻时大变形区的变形难度不同造成的;在第 107 步时发现飞边槽的材料不断地向模具型腔回流,在靠近连杆型壁的部位产生材料堆叠,此时圆角过渡区的型壁基本没有鼓形,说明型腔已充分充填,而产生堆积的局部材料受到飞边区和锻件两方面的流动阻力,堆积在这两个区域的相交部分,进而在



(a)



(b)



(c)

图 7 锻造过程材料流动示意图

(a) 第 50 步 (b) 第 105 步 (c) 第 107 步

Fig. 7 Schematic diagrams of material flow during forging process

(a) Step 50 (b) Step 105 (c) Step 107

连杆的圆角过渡区闭合产生折叠。

3 工艺优化

3.1 工艺参数或结构参数对折叠概率指数的影响

3.1.1 坯料圆角过渡区的圆角半径对折叠概率指数的影响

以上分析可知,折叠是终锻时连杆飞边区材料向圆角过渡区流动造成材料堆积,同时受到模具挤压产生的。为减小坯料和终锻件的形状差异、改善材料在模具中的流动情况,考虑优化坯料头部的圆角过渡区的圆角半径,设置圆角半径分别为 150、175 和 200 mm,对此 3 组数值进行有限元分析,其

余参数保持不变,模拟结束时圆角过渡区的折叠概率指数如图 8 所示。从图 8 可知,圆角半径越大,折叠概率指数越小,说明增大圆角过渡区的圆角半径可以降低该区域折叠缺陷发生的概率,使坯料的头部和杆部过渡更加平滑,使圆角过渡区更加顺畅地充填型腔,充满型腔之后该区域附近飞边区材料回流减少,有利于折叠缺陷的改善。但若圆角过渡区的圆角半径增大至 200 mm 后继续增大,会导致坯料还未充填型腔就直接进入飞边区,造成材料浪费。

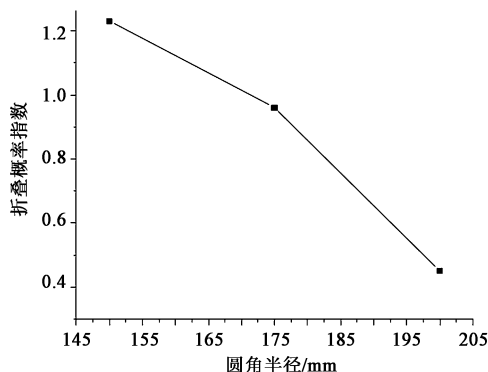


图 8 圆角过渡区的圆角半径对折叠概率指数的影响曲线

Fig. 8 Influence curve of fillet radius for fillet transition zone on folding probability index

3.1.2 终锻温度对折叠概率指数的影响

终锻温度对折叠概率指数的影响如图 9 所示。分析图 9 可知,随着终锻温度的上升,连杆的折叠概率指数减小。这是由于终锻温度升高时,模具在材料中的充型性能变好,金属材料在迅速充满型腔之后会阻碍飞边区域材料向型腔流动,降低了折叠产生的概率。而终锻温度降低时,在成形过程中变形抗力增加,材料充满型腔的难度增加,在飞边槽还未充满时材料会向阻力更小的飞边区域流动,飞边槽容纳材料

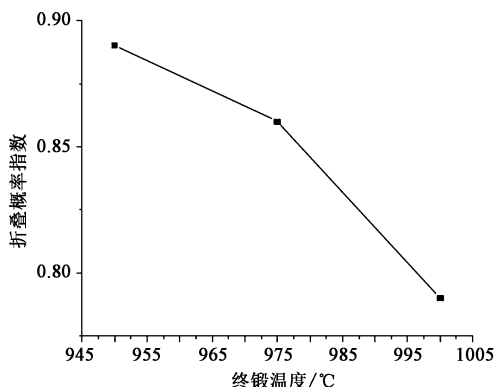


图 9 终锻温度对折叠概率指数的影响曲线

Fig. 9 Influence curve of final forging temperature on folding probability index

的空间有限,而模具型腔未充满,容易产生飞边材料的回流,增加圆角过渡区产生折叠缺陷的概率。

3.1.3 模具加压速度对折叠概率指数的影响

原工艺中模具加压速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,过慢的模具加压速度会降低生产效率,而过快的模具加压速度会导致模具的磨损增加,因此,增加 75 和 $125 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的模具加压速度进行有限元实验对比,结果如图 10 所示。随着模具加压速度的增加,折叠概率指数呈现上升趋势。当模具加压速度过大时,材料来不及充填即受到模具型腔较大的充型压力,使得材料流向流动阻力小的飞边区域,飞边受到模具挤压的充型压力,导致飞边区和模具型腔的材料均流向两区域相交的部分,造成材料堆叠,增加产生折叠缺陷的概率。

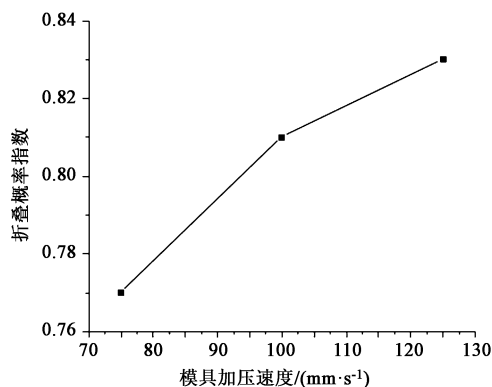


图 10 模具加压速度对折叠概率指数的影响曲线

Fig. 10 Influence curve of mold pressing speed on folding probability index

3.2 正交实验

针对选定的 3 个工艺参数的优化范围设计正交实验来优化工艺,每个工艺参数有 3 个水平值,即 3 水平 3 因素的正交优化实验。在选择正交表时要求每个因素的水平数与正交表一致,而因素数可以小于或等于正交表的列数,因此,选取 $L_9(3^4)$ 为标准正交实验表,根据正交表安排相关实验,并调用开发好的折叠概率指数子程序进行分析,获得的圆角过渡区的折叠概率指数结果如表 2 所示。表 2 中的 k_1 、 k_2 、 k_3 分别表示该列因素在水平 1、2、3 下折叠概率指数的均值。据此判断,优化的工艺参数组合为:圆角过渡区的圆角半径为 200 mm,终锻温度为 1000°C ,模具加压速度为 $75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而极差则是每个因素的最大 k 值减去该因素的最小 k 值,即 $\max\{k_1, k_2, k_3\} - \min\{k_1, k_2, k_3\}$,极差可以反映该因素与目标值的关联程度,可以看出,圆角过渡区的圆角半径对折叠概率指数的影响最大,终锻温度对折叠概率指数的影响比模具加压速度大,模具加压速度对折叠概率指数的影响很小。

表 2 正交实验安排和计算结果

Table 2 Arrangement and calculation results of orthogonal experiment

实验	圆角半径/ mm	终锻温度/ ℃	模具加压速度/ (mm·s ⁻¹)	折叠概率 指数
1	150	950	75	1.26
2	150	975	100	1.04
3	150	1000	125	0.95
4	175	950	100	0.89
5	175	975	125	0.62
6	175	1000	75	0.65
7	200	950	125	0.98
8	200	975	75	0.45
9	200	1000	100	0.49
<i>k</i> ₁	1.083	1.043	0.787	—
<i>k</i> ₂	0.720	0.703	0.807	—
<i>k</i> ₃	0.640	0.697	0.850	—
极差	0.443	0.346	0.063	—

3.3 优化工艺仿真验证

选用优化的工艺参数组合进行有限元模拟，得到折叠概率指数的分析结果如图 11 所示。可以看出，锻件的棱角轮廓清晰，圆角过渡区的型壁充填完整，圆角过渡区和飞边相交的区域也很平整，没有材料堆积，产生折叠缺陷的圆角过渡区在经过优化之后折叠概率指数近于 0，较优化前明显减小，表明该区域产生折叠缺陷的概率大大降低，从有限元层面验证了优化工艺的可行性。

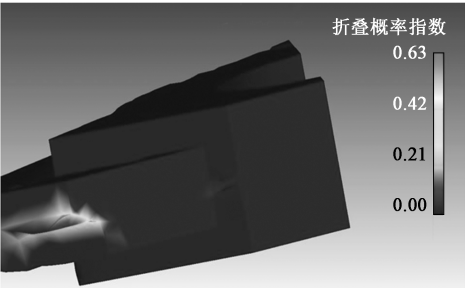


图 11 优化后的折叠概率指数云图

Fig. 11 Nephogram of folding probability index after optimization

图 12 为第 107 步时锻件的材料流动速度云图，可以看出，各区域材料流动均匀，圆角过渡区的型壁未产生原工艺中的倾斜现象，其他区域的材料也均在向靠近飞边区域流动，说明材料充填型腔的情况良好。充满型腔之后多余的金属材料向飞边区流动，未产生飞边区回流及飞边区和型壁材料堆积的情况，连杆的圆角过渡区和飞边相交的区域没有明显的折叠，锻件折叠缺陷得到了改善。

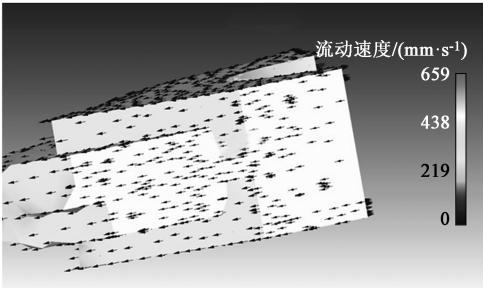


图 12 优化后锻件的材料流动速度云图

Fig. 12 Nephogram of material flow relocity for forgings after optimization

4 生产验证

经过前述折叠缺陷分析和优化工作，采用指定的优化方案进行试生产，生产的锻件如图 13 所示，可以看到，切边后的锻件表面平整，无明显可见的折叠缺陷。



图 13 试生产的完整锻件

Fig. 13 Complete forgings for trial production

锻件冷却后即可再进行后续的机加工等工序，经过机加工和打磨后生产的合格零件如图 14 所示。在进行工艺优化前单批次生产 310 件，其中因折叠缺陷报废的零件共 65 件，报废率达 20.97%。工艺优化后试生产 220 件，因折叠缺陷报废的锻件仅 2 件，报废率为 0.91%，工艺优化后报废率大幅下降，达到了工艺优化的预期目标。



图 14 零件成品

Fig. 14 Finished parts

对锻件取样进行金相分析, 金相组织图如图 15 所示, 锻件组织主要是回火索氏体和少量铁素体,

为正常组织, 晶粒度评级为 8 级, 锻件的微观结构满足生产要求。

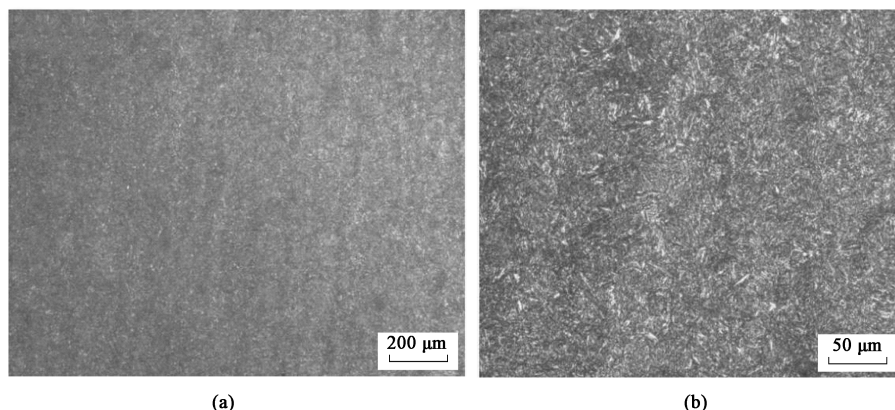


图 15 成品锻件金相组织图

(a) 高倍图 (b) 低倍图

Fig. 15 Metallographic structure diagrams of finished forgings

(a) High power diagram (b) Low power diagram

5 结论

(1) 本文将折叠概率指数通过二次开发嵌入 Deform 软件, 对连杆的折叠缺陷进行预测, 预测结果与实际生产情况相符。

(2) 通过对连杆锻件的材料流动情况进行分析, 发现圆角过渡区域的折叠缺陷主要是飞边区材料回流, 造成飞边区和该圆角过渡区的材料堆积, 再受到模具挤压之后产生的。

(3) 本文探究了坯料圆角过渡区圆角半径、终锻温度、模具加压速度对折叠概率指数的影响, 并结合正交实验选定优化方案。有限元仿真结果表明, 折叠状况大大改善, 试生产的锻件表面平整, 报废率从 20.97% 降低至 0.91%, 达到了工艺优化的目标。金相组织图显示, 锻件组织主要是回火索氏体和少量铁素体, 晶粒度为 8 级, 满足锻件的生产要求。

参考文献:

- [1] 韩文干. 盘点发动机连杆市场 [J]. 汽车与配件, 2012, (35): 44-47.
Han W G. Inventory of the engine connecting rod market [J]. Automobile & Parts, 2012, (35): 44-47.
- [2] 荣忠义. 发动机连杆的检查与校正 [J]. 农机使用与维修, 2012, (1): 69.
Rong Z Y. Inspection and correction of engine connecting rod [J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2012, (1): 69.
- [3] 黄河. 发动机连杆盖锻造上模使用寿命 [J]. 锻压技术, 2012, 46 (11): 68-73.
Huang H. Service life of forging upper die for engine connecting rod cap [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 46 (11): 68-73.
- [4] 魏冠义, 杨峰, 齐晓华. 基于 QForm 的 6082 铝合金吊耳锻造工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (17): 113-116.
Wei G Y, Yang F, Qi X H. Forging process optimization of 6082 aluminum alloy lifting lugs based on QForm [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (17): 113-116.
- [5] 李志广, 范玉树, 王东军. 连杆复合型锻造折叠缺陷分析及质量控制研究 [J]. 模具制造, 2021, 21 (9): 56-61, 70.
Li Z G, Fan Y S, Wang D J. Analysis and quality control research of compound forging folding defect of connecting rod [J]. Die & Mould Manufacture, 2021, 21 (9): 56-61, 70.
- [6] Zhang Y Q, Jiang S Y, Zhao Y N, et al. Isothermal precision forging of aluminum alloy ring seats with different preforms using FEM and experimental investigation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72 (9-12): 1693-1703.
- [7] Petrov P, Perfilov V, Stebunov S. Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of aluminium alloy A92618 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177 (1-3): 218-223.
- [8] Chan W L, Fu M W, Lu J, et al. Simulation-enabled study of folding defect formation and avoidance in axisymmetrical flanged components [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (11): 5077-5086.
- [9] 岳鹏. 基于 Deform 软件的减压阀壳体模锻工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 167-169.
Yue P. Optimization of die forging process of pressure relief valve shell based on Deform software [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (3): 167-169.
- [10] 王睿. 基于 Deform 软件的四通管道阀热锻过程模拟及模具优化设计 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (13): 177-180.
Wang R. Hot forging process simulation and die optimization design of four way pipeline valve based on Deform software [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (13): 177-180.
- [11] 方秀梅, 荆志杰, 龚毅. 基于 DEFORM-3D 的 2024 铝合金锻造变形过程晶粒度分析 [J]. 世界有色金属, 2021, (15): 120-121.
Fang X M, Jing Z J, Gong Y. Grain size analysis of 2024 aluminum alloy steel after forging deformation based on DEFORM-3D [J]. World Nonferrous Metals, 2021, (15): 120-121.
- [12] Gao P F, Fei M Y, Yan X G, et al. Prediction of the folding defect in die forging: A versatile approach for three typical types of folding defects [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 181-191.