

## 19英寸TBM盘形滚刀刀圈模锻成形研究

张旭辉<sup>1</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>, 谭涛<sup>1</sup>, 李密<sup>1</sup>, 温东旭<sup>2</sup>

(1. 湖南师范大学工程与设计学院, 湖南长沙 410081;

2. 华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 为了研究19英寸TBM盘形滚刀刀圈模锻成形过程的变化规律, 采用DEFORM有限元分析软件, 分析了在始锻温度为1150℃、成形速度为25 mm·s<sup>-1</sup>的成形条件下盘形滚刀刀圈模锻成形过程中成形载荷、刀圈形状、金属流线等的变化情况。结果表明: 滚刀刀圈模锻成形过程由模锻初期、模锻中期、模锻后期3个阶段构成; 金属坯料对于模具的填充过程上下并不对称, 上模和下模型腔的填充速度不同, 上模型腔先于下模型腔被填满; 模锻成形过程中刀圈的整体温度均有所降低, 其中, 刀刃处的温度下降最少, 较始锻温度下降了7.8%, 刀圈圆弧过渡区的温度下降最多, 较始锻温度下降了34.78%; 刀圈应力由内向外逐步增大, 其中刀刃处的等效应力最大, 较平均等效应力高13.54%。

**关键词:** 盘形滚刀刀圈; 模锻成形; 金属流线; 温度场; 应力场; 应变场

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.003

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0017-09

## Study on die forging for 19-inch TBM disc hob ring

Zhang Xuhui<sup>1</sup>, Liu Xin<sup>1</sup>, Tan Tao<sup>1</sup>, Li Mi<sup>1</sup>, Wen Dongxu<sup>2</sup>

(1. College of Engineering and Design, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to study the change laws of die forging process for 19-inch TBM disc hob ring, the changes of forming load, hob ring shape and metal streamline in the die forging process for disc hob ring under the forming conditions of initial forging temperature of 1150℃ and forming speed of 25 mm·s<sup>-1</sup> were analyzed by finite element analysis software DEFORM. The results show that the die forging process of hob ring is composed of three stages: initial stage, middle stage and final stage. The metal blank does not fill the mold symmetrically up and down, the filling speeds of upper and lower mold cavities are different, and the upper mold cavity is filled before the lower mold cavity. During the die forging process, the overall temperature of hob ring decreases. And the temperature at blade decreases the least by 7.8% compared with the initial forging temperature. However, the temperature at arc transition zone of hob ring decreases the most by 34.78% compared with the initial forging temperature. Furthermore, the stress of hob ring increases gradually from inside to outside, and the equivalent stress at blade is the largest, which is 13.54% higher than average equivalent stress.

**Key words:** disc hob ring; die forging; metal streamline; temperature field; stress field; strain field

随着我国经济飞速发展, 城市化进程不断加快, 国内的城市地铁隧道、水工隧道、铁路隧道等隧道工程将被大量开发<sup>[1-2]</sup>, 全断面隧道岩石掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)集施工速度快、适

应地层广、安全、可靠等诸多优点于一身, 在世界各国的隧道施工中表现出了非凡的优势。基于TBM开挖的成熟技术和我国基建交通领域快速发展的良好机遇, 中国作为世界上最大的隧道及地下工程施工市场, 对TBM具有迫切的需求<sup>[3-4]</sup>。

TBM破岩主要利用盘形滚刀滚压破岩, 如图1a所示, 使得掌子面表面的岩石碎块掉落<sup>[5]</sup>。滚刀主要由刀圈、刀体、轴承等零件组成。盘形滚刀破岩过程中, 刀圈直接与岩石接触, 如图1b所示, 承受巨大载荷, 极易发生失效, 影响施工效率。刀圈一般采用H13钢塑性成形得到, 其成形过程和成形机理直接影响刀圈的最终工作品质,

收稿日期: 2021-05-19; 修订日期: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52005179); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5365); 湖南省教育厅科学研究项目(20C1153); 大学生创新训练项目(S202010542022)

作者简介: 张旭辉(1989-), 男, 博士, 讲师

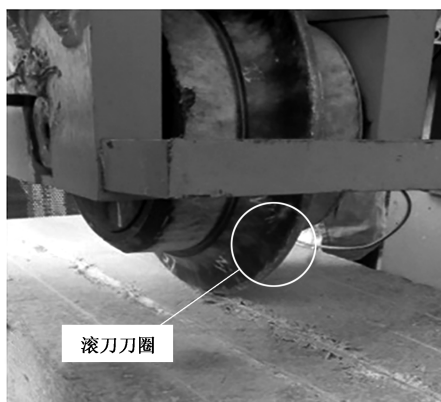
E-mail: xuhui@hunnu.edu.cn

通信作者: 李密(1989-), 男, 博士研究生

E-mail: limi\_gsy@hunnu.edu.cn



(a)



(b)

图 1 TBM 破岩过程

(a) 滚刀现场切割岩石 (b) 滚刀室内切割破岩

Fig. 1 Rock breaking process of TBM

(a) Cutting rock by hob on-site (b) Cutting rock by hob indoors

因此,研究盘形滚刀刀圈的塑性成形工艺极为重要。

目前,盘形滚刀刀圈主要通过轧制或锻造工艺成形,相关学者已开展了一定的研究。夏毅敏等<sup>[6]</sup>通过实验对比滚刀刀圈在轧制和模锻两种成形工艺下的性能,发现轧制成形的刀圈的力学性能较好但微观组织不均匀,模锻成形的刀圈的力学性能较差但微观组织分布均匀,平均晶粒度为 9.0 级;李增良<sup>[7]</sup>通过分析盘形滚刀刀圈的失效形式,提出刀圈的塑性成形工艺方法为预锻制坯和轧制复合成形工艺。在轧制成形工艺方面,王辉平<sup>[8]</sup>对盘形滚刀刀圈轧制过程进行了数值分析,发现主辊转速及芯辊的进给速度越大,刀圈成形的等效应力越小,越有利于金属塑性提高;夏毅敏等<sup>[9]</sup>利用有限元法建立了盘形滚刀刀圈轧制模型,分析了初始轧制温度、主辊摩擦因数、主辊转速等对于刀圈成形件质量的影响规律,认为主辊摩擦因数及转速过大会使得刀

圈的变形不均匀性增加,导致成形件的质量下降;张小云等<sup>[10]</sup>以 17 英寸盘形滚刀刀圈为研究对象,分析了刀圈轧制成形过程中温度、应变、轧制力的变化规律,结果表明,刀圈轧制件的整体温度由刀圈的心部到外表面呈梯度递增,等效应变最大值为 14.4,径向轧制力约为轴向轧制力的 303 倍,成形效果好,尺寸误差最大为 6.53%。在模锻成形工艺方面,王辉平<sup>[11]</sup>对刀圈锻件在锻造过程的金属流线进行了研究,结果表明,始锻高度、摩擦因数以及镦粗变形程度等因素对刀圈的金属流线的分布影响较大;谭青等<sup>[12]</sup>以 TBM 盘形滚刀作为研究对象,选择 H13 钢作为仿真材料,利用 DEFORM 软件对滚刀刀圈的模锻成形工艺进行了有限元分析,通过对比不同的模具结构、毛坯类型及成形方式,发现圆环状毛坯采用开式模锻的结果最优。

上述研究对滚刀刀圈的成形分析以及实际生产有很好的指导作用,但目前相关研究主要集中于滚刀刀圈轧制成形或模锻成形参数优化等方面,而关于滚刀刀圈成形过程及成形机理的相关研究较少,因此,对其成形过程的认识仍有待提高。随着滚刀刀圈结构的发展,目前 TBM 工程中滚刀的主流尺寸逐渐演化为 19 英寸<sup>[13]</sup>,为此本文基于 DEFORM 有限元分析软件,开展了 19 英寸滚刀刀圈模锻成形工艺研究,分析刀圈在模锻过程中刀圈形状、金属流线、锻件温度及等效应力等的变化情况,为滚刀刀圈实际生产提供参考。

## 1 19 英寸滚刀刀圈模锻成形仿真模型

在三维建模软件 Solidworks 中,建立模具和毛坯的三维模型,本次成形仿真采用的是环状毛坯开式模锻,其桥口的尺寸为 4 mm×3 mm,飞边仓的尺寸为 6 mm×4 mm,并保存为 STL 格式,通过 DEFORM 的接口将 STL 格式的文件导入到 DEFORM 中<sup>[14]</sup>,建立如图 2 所示的滚刀刀圈模锻成形有限元模型。在模拟控制中,将单位设置为 SI 国际单位制,增量形式为拉格朗日增量,模拟步数为 120,主要模具为 Top Die,解答步数选择 Die dsplacement,步数增量控制中选择常数,为每步 0.65 mm,采用 Sparse 求解器和 Direct Iteration 迭代算法;刀圈与模具之间的热传导类型为 Forming,系数为 11 N·(s·mm·℃)<sup>-1</sup>,摩擦类型选择剪切模型 (Shear),摩擦因数为 0.3,毛坯与空气热对流系数为 0.02 N·(s·mm·℃)<sup>-1</sup>,环境温度为 20℃<sup>[7]</sup>。刀圈模锻成形的模具结构较复杂,

为了模拟方便，采用简化的结构模型，并将其设置为刚体，忽略弹性变形的影响，模具预热至300℃。上模锻造速度为 $25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，下模固定不动。

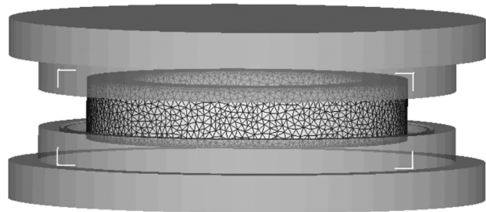


图2 滚刀刀圈模锻成形有限元模型  
Fig. 2 Finite element model for die forging of hob ring

刀圈毛坯材料选择材料库 Steel 类别中的 AI-SIH13(Machining) 钢，H13 钢的性能参数如表 1 所示。将坯料设置为塑性体，始锻温度设置为 1150℃。毛坯网格类型为四面体网格，划分形式采用绝对值划分，尺寸比为 3.6，最小元素尺寸为 2.5 mm，启动热膨胀，选择 FEM+网格主动。

表 1 H13 钢性能参数

Table 1 Performance parameters of H13 steel

参数	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸长 率/%	冲击韧性/ ( $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	硬度/ HRC
数值	1464	1085	11.3	40	56

2 TBM 滚刀刀圈成形过程分析

为了便于对刀圈进行分析，现对刀圈各部分进行命名，如图 3a 所示，其中： $P1$  点所在区域为刀圈上端面， $P2$  点所在区域为刀圈圆弧过渡区， $P3$  点所在区域为刀刃侧边， $P4$  点所在区域为刀圈内部， $P5$  点所在区域为刀圈内径， $P6$  点所在区域为刀圈下端面， $P7$  点所在区域为刀刃飞边。在刀圈模锻成形过程中，刀刃及刀圈圆弧过渡区为最大等效应变及最大等效应力分布区域，刀圈内径及刀圈圆弧过渡区为锻件温度变化较大的区域，刀圈上、下端面承受模锻成形过程中的主要载荷。因此，在对滚刀刀圈模锻成形过程进行分析时，选择刀刃两侧边、刀圈圆弧过渡区、刀圈上下两端面、刀圈内径作为主要分析部位。刀圈最终成品件的截面形状如图 3b 所示。

2.1 成形载荷变化分析

根据滚刀刀圈模锻成形过程中成形载荷变化

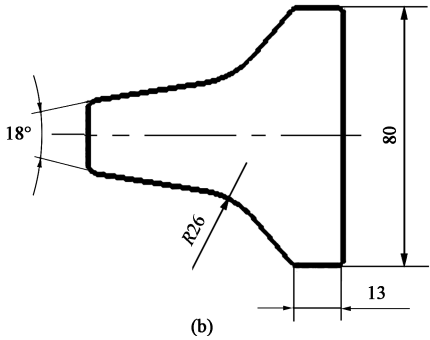
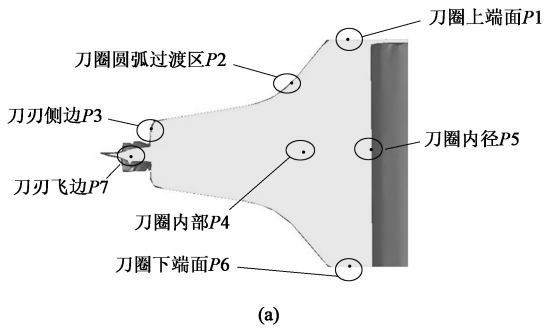


图3 滚刀刀圈截面示意图  
(a) 刀圈取点 (b) 刀圈截面尺寸  
Fig. 3 Schematic diagrams of section for hob ring  
(a) Selected points on hob ring (b) Section dimensions of hob ring

情况，可将成形过程划分为 3 个阶段，如图 4 所示。

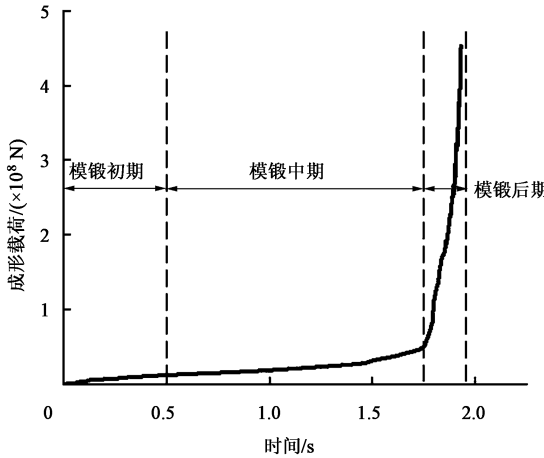


图4 滚刀刀圈模锻成形过程载荷变化曲线  
Fig. 4 Variation curve of load during die forging process for hob ring

第 1 阶段：模锻初期。在模锻初期阶段，坯料放在下模上，随后上模开始与坯料相接触，该接触区域的金属发生塑性变形和轴向流动，成形载荷开始增大，持续时间短。

第 2 阶段：模锻中期。随着模锻的继续进行，刀圈开始成形，锻件墩粗变形停止，金属轴向流动

减小,越来越多的金属转向径向流动,此时金属在型腔内的填充变得越来越困难,成形载荷不断增大,持续时间较长。

第3阶段:模锻后期。模锻后期包括合模阶段,即模锻即将结束的时间段。刀圈整体轮廓已经基本成形,此时只剩下少量角隅需要填充,这是模锻过程中充填最为困难的部分,成形载荷增长迅速,这一过程的持续时间最短,但是成形载荷最大,最终成形载荷达到  $4.53 \times 10^8 \text{ N}$ 。

## 2.2 形状变化分析

图5为模锻成形过程中锻件整体形状的变化过程。在模锻初期,锻件主要发生镦粗变形,轴向尺寸变化较大,坯料进行轴向填充,如图5a和图5b所示;模锻中期,锻件的变形方向由轴向变为径向,坯料开始向刀刃以及刀圈内圈填充,如图5c和图5d所示;模锻后期,由于上模的挤压作用,锻件变形由径向变为轴向,同时金属开始压缩气孔、填充空隙,产生飞边,如图5e和图5f所示。

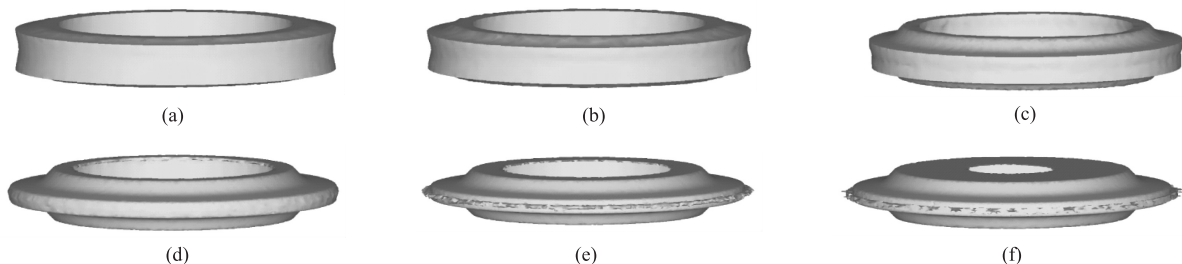


图5 锻件整体形状变化

(a) 成形时间为 0.52 s (b) 成形时间为 0.78 s (c) 成形时间为 1.20 s (d) 成形时间为 1.79 s  
(e) 成形时间为 1.86 s (f) 成形时间为 1.93 s

Fig. 5 Change of overall shape for forgings

(a) Forming time of 0.52 s (b) Forming time of 0.78 s (c) Forming time of 1.20 s (d) Forming time of 1.79 s  
(e) Forming time of 1.86 s (f) Forming time of 1.93 s

为了进一步了解金属坯料在模具型腔内的流动过程,现对模具及坯料进行剖分处理。图6为模锻过程中锻件在模具内截面形状的变化过程。在模锻初期,如图6a和图6b所示,锻件外径处最先与模具接触,金属开始向刀刃处流动,发生镦粗变

形,外径处的轴向尺寸变化较大,锻件内径处的轴向尺寸基本不变;在模锻中期,锻件尺寸变化由轴向变为径向,从图6c和图6d中可以看出,锻件对于模具的填充过程上下并不对称,上模和下模型腔的填充速度不同,上模型腔先于下模型腔被

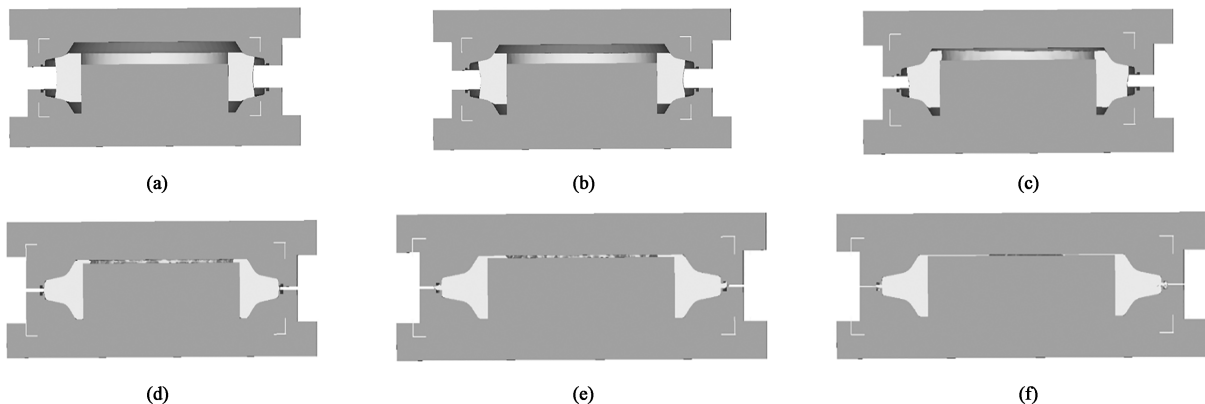


图6 锻件截面形状变化

(a) 成形时间为 0.52 s (b) 成形时间为 0.78 s (c) 成形时间为 1.20 s (d) 成形时间为 1.79 s  
(e) 成形时间为 1.86 s (f) 成形时间为 1.93 s

Fig. 6 Change of section shape for forgings

(a) Forming time of 0.52 s (b) Forming time of 0.78 s (c) Forming time of 1.20 s (d) Forming time of 1.79 s  
(e) Forming time of 1.86 s (f) Forming time of 1.93 s



填满;在模锻后期,此时模具的型腔已基本填充完成,为了减少锻件与模具之间的间隙,上模继续挤压,锻件变形由径向变为轴向,如图 6e 和图 6f 所示。

### 2.3 金属流线分析

锻件金属流线方向在模锻过程中的变化情况如图 7 所示。在模锻初期,如图 7a 所示,金属流线流向分为两大部分,一部分在刀圈内圈处沿轴向流动,另一部分在刀圈刀刃处沿径向流动。在模锻中期,如图 7b 所示,金属流线分为 3 个部分,一部分在刀

圈内圈沿轴向流动,一部分在刀圈刀刃处沿径向流动,一部分往飞边槽流动形成飞边。在模锻后期,如图 7c 和图 7d 所示,刀圈已基本成形,金属开始填充角隅、气孔。图 8 为模锻过程中金属流线分布情况,可以看出,在整个模锻过程中锻件的金属流线分布较为均匀,刀圈圆弧过渡区、刀刃侧边等应力集中区域的金属流线分布较为密集,有利于刀圈的力学性能,且刀圈最终锻件成品的金属流线与锻件的外形轮廓基本相符,刀圈刃部沿径向分布的金属流线较为均匀。

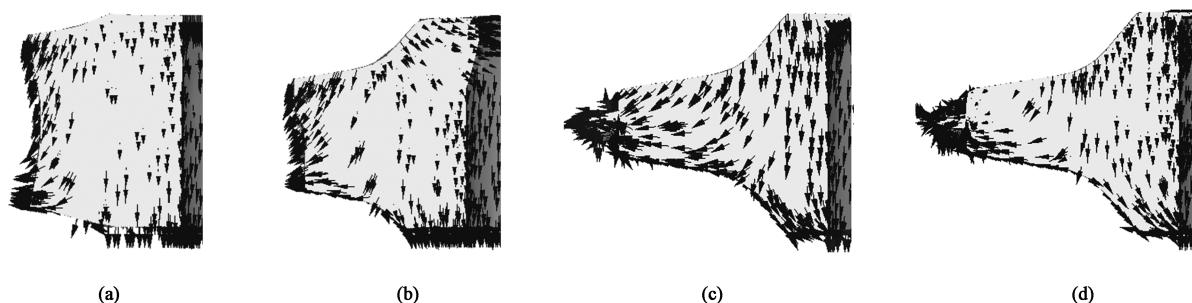


图 7 金属流线流向变化

(a) 成形时间为 0.52 s (b) 成形时间为 1.20 s (c) 成形时间为 1.86 s (d) 成形时间为 1.93 s

Fig. 7 Change of metal streamline flow direction

(a) Forming time of 0.52 s (b) Forming time of 1.20 s (c) Forming time of 1.86 s (d) Forming time of 1.93 s

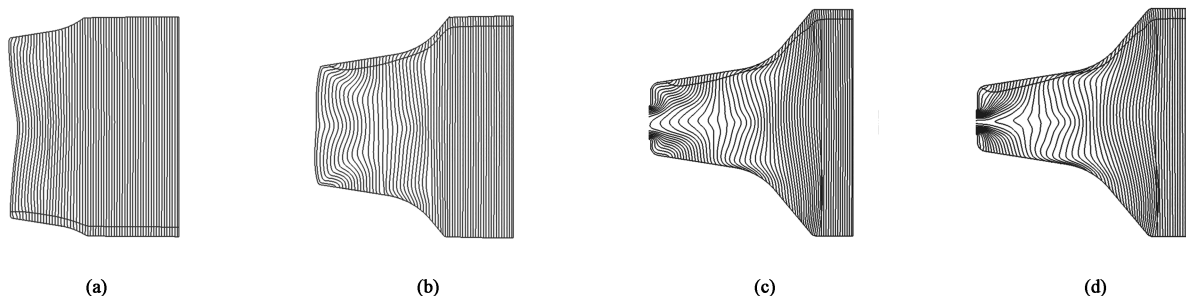


图 8 金属流线分布情况

(a) 成形时间为 0.52 s (b) 成形时间为 1.20 s (c) 成形时间为 1.86 s (d) 成形时间为 1.93 s

Fig. 8 Distribution of metal streamline

(a) Forming time of 0.52 s (b) Forming time of 1.20 s (c) Forming time of 1.86 s (d) Forming time of 1.93 s

### 2.4 温度变化分析

图 9 为模锻结束时刀圈横截面的温度分布图,在该面上截取 7 个特征点 ( $P1 \sim P7$ ) 来分析刀圈不同位置的温度变化规律。图 10 为 7 个特征点在模锻过程中的温度变化情况。由图 9 可知,刀圈模锻结束后,高温区域主要分布在刀刃、飞边以及刀圈内部,整体温度变化趋势为由内部至表面温度逐渐降低。由图 10 可知:在模锻开始时,刀圈上端面的特征点  $P1$  及下端面特征点  $P6$  既未与上、下模相接触,也未发生剧烈变形,温度变化不大;在模锻中

后期,刀圈上端面特征点  $P1$  最先与上模接触,温度下降较快,下端面特征点  $P6$  要填充下模型腔,变形较大,温度快速升高;模锻结束时, $P1$  处的温度约为  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P6$  处的温度约为  $1025\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。刀圈圆弧过渡区特征点  $P2$ ,在模锻开始时发生剧烈变形,温度提升较大;在模锻中期,其与上模型腔相接触,温度快速下降;模锻结束时, $P2$  处的温度约为  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于刀刃侧边特征点  $P3$  以及刀刃飞边特征点  $P7$ ,在模锻开始时,刀圈的刃部最先发生变形,这种变形使得特征点  $P3$  和  $P7$  处的温度迅速上升,

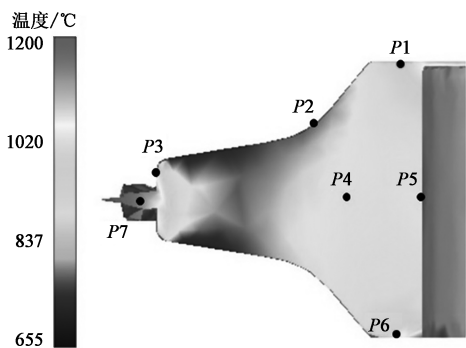


图 9 模锻结束时刀圈横截面温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of cross section for hob ring at end of die forging

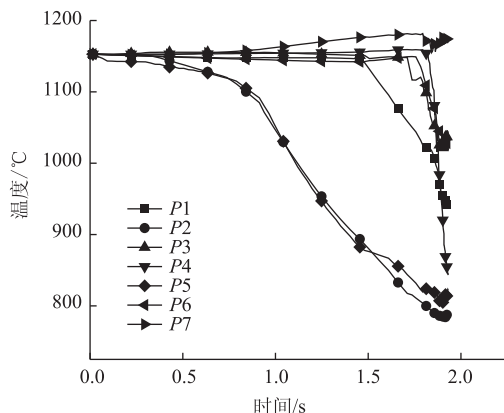


图 10 特征点在模锻成形过程中的温度变化曲线

Fig. 10 Temperature change curves of feature points during die forging process

而这种温度升高又使得等效应力减小,材料的塑性提高,有利于刀圈的成形;在模锻结束时,  $P7$  处的温度约为  $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P3$  处的温度约为  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于刀圈内部的特征点  $P4$ ,在模锻开始阶段,由于其变形量较少,并且未与模具直接接触,温度变化不大;直到模锻中期,刀圈内部开始发生变形,此时温度缓慢上升;在模锻结束时,  $P4$  处的温度略高于始锻温度。刀圈内径的特征点  $P5$ ,在模锻开始时由于直接和下模相接触,温度快速下降;在模锻中期,刀圈内部发生变形,使得  $P5$  处的温度升高;模锻结束时,  $P5$  处的温度约为  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 11 为模锻结束时刀圈整体温度分布云图,图 12 为刀圈整体温度分布等值线。由图 11 可知,在模锻结束时,温度最低的区域主要分布在刀圈内圈以及刀圈圆弧过渡区,高温区域主要分布在刀刃及飞边处。由图 12 可知,刀圈刀部的温度等值线  $G$  代表温度  $1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,刀圈圆弧过渡区的温度等值线  $C$  代表温度  $791\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,刀圈端面的温度等值线  $E$  代表温

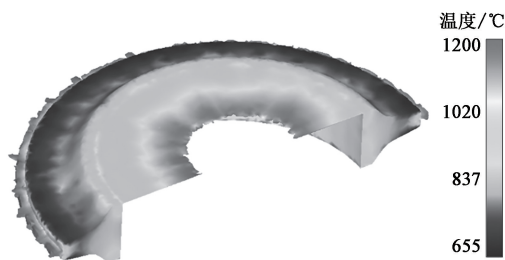


图 11 模锻结束时刀圈整体温度分布云图

Fig. 11 Cloud map of overall temperature distribution for hob ring at end of die forging

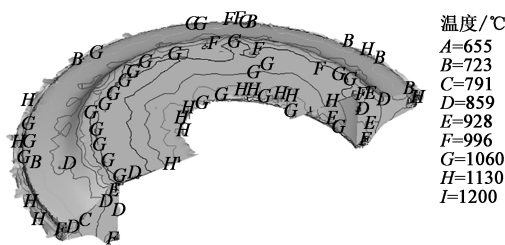


图 12 刀圈整体温度分布等值线

Fig. 12 Isolines of overall temperature distribution for hob ring

度  $928\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,刀圈整体温度区间的跨度较小,分布较为均匀。

综上所述,刀圈模锻结束时,刀刃处的温度为  $1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较始锻温度  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降了  $7.8\%$ ,温度较高,金属原子活跃,塑性较好,易于成形;刀圈端面的温度为  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较始锻温度下降了  $21.74\%$ ,温度较低,但其变形量较小,影响不大;刀圈圆弧过渡区的温度为  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较始锻温度下降了  $34.78\%$ ,由于刀圈圆弧过渡区的成形速度较慢,与上、下模具的接触时间较长,散热较快,使得其终锻温度略低于 H13 钢的终锻温度,且此处的变形量较大,在成形过程中应该提高此处的温度,减小温差过大所产生的应力。

## 2.5 等效应力变化分析

如图 13 所示,在刀圈截面上选取 7 个特征点 ( $P1\sim P7$ ),图 14 为 7 个特征点在模锻成形过程中的等效应力变化曲线。由图 13 可知:模锻开始时,锻件发生镦粗变形,特征点  $P3$  与  $P7$  的变形较大,等效应力迅速增加,随后特征点  $P1$ 、 $P2$ 、 $P4$ 、 $P5$  和  $P6$  处的应力迅速增大;模锻中期,刀圈径向变形开始,  $P1$  处由于上模的挤压作用,应力增大,  $P2$  处开始形成圆弧区,变形较大,应力再次升高,特征点  $P4$  和  $P5$  在刀圈中部,基本不发生变形,等效应力变化不大,  $P6$  处不与下模接触,变形小,等效应力不大;模锻后期,  $P2$  处的圆弧区域基本成形,

变形较小, 应力变化不大,  $P3$  和  $P6$  处的金属开始填充间隙和气孔, 等效应力增加,  $P7$  处的飞边开始形成, 变形较大, 等效应力提升。

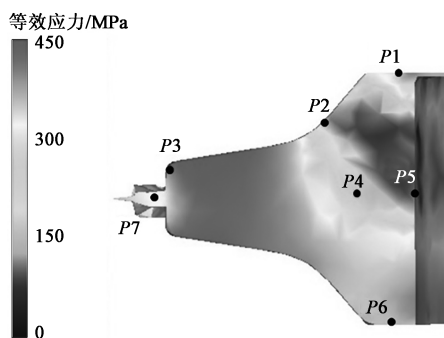


图 13 模锻成形过程中特征点的等效应力分布

Fig. 13 Distribution of equivalent stress for feature points during die forging process

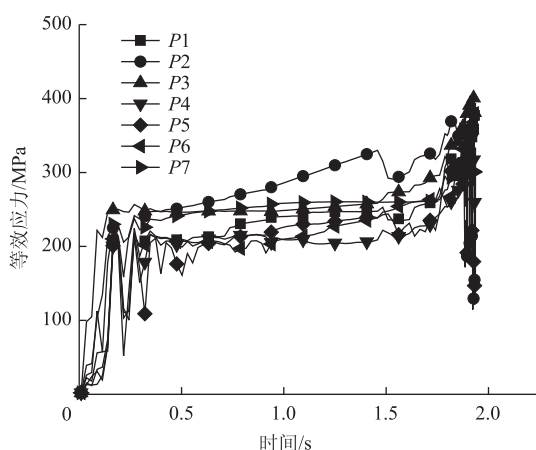


图 14 模锻成形过程中特征点的等效应力变化曲线

Fig. 14 Change curves of equivalent stress for feature points during die forging process

图 15 为模锻结束时刀圈整体等效应力分布云图, 图 16 为刀圈整体等效应力分布等值线。由图 15 可知, 模锻过程完成后, 刀刃处等效应力最大, 等效应力由内向外逐渐增大。由图 16 可知, 刀刃处等值线为  $H$  (394 MPa), 圆弧过渡区中心区域的等值线为  $C$  (113 MPa) 和  $D$  (169 MPa), 靠近刀圈端面处等值线为  $E$  (225 MPa) 和  $F$  (281 MPa), 变形较大的区域, 其等效应力小, 利于模锻成形, 同时等效应力过渡较为均匀, 跨度不大。

由图 17 所示等效应力分布直方图可知, 锻件的等效应力主要集中在 312~416 MPa 之间, 最大等效应力为 499 MPa, 平均等效应力为 347 MPa。结合前文所述刀圈各部分的等效应力分布情况, 发现刀圈刀刃处的等效应力最大 (394 MPa), 较平均等效应力提高了 13.54%, 在模锻过程中需特

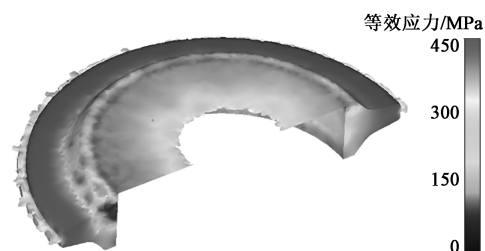


图 15 模锻结束时刀圈整体等效应力分布

Fig. 15 Distribution of overall equivalent stress for hob ring at end of die forging

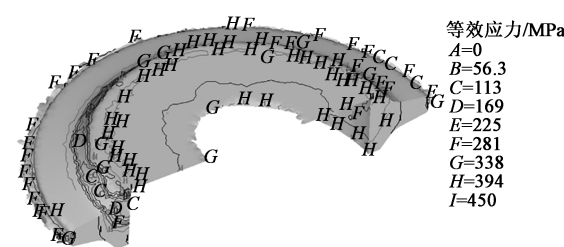


图 16 刀圈整体等效应力分布等值线

Fig. 16 Isolines of overall equivalent stress distribution for hob ring

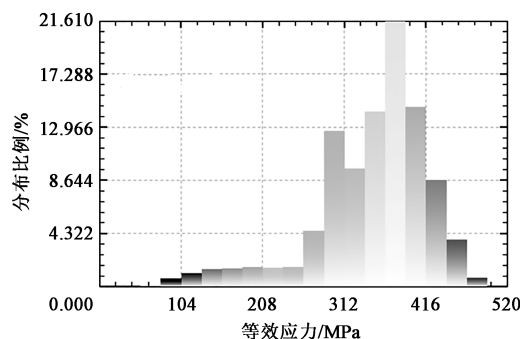


图 17 锻件的等效应力分布直方图

Fig. 17 Histogram of equivalent stress distribution for forgings

别注意。

## 2.6 等效应变变化分析

如图 18 所示, 在刀圈截面上选取 7 个特征点 ( $P1 \sim P7$ ), 图 19 为 7 个特征点在模锻成形过程中的等效应变变化曲线。在模锻初始阶段, 各点处发生变形, 刀圈材料的晶界发生迁移, 各点的等效应变增加; 模锻中期, 刀刃侧边  $P3$  处与刀圈圆弧过渡区  $P2$  处发生剧烈变形, 等效应变迅速增大, 此处金属流动剧烈; 模锻后期, 刀刃飞边  $P7$  与刀圈上端面  $P1$  处发生剧烈变形, 等效应变增大, 刀圈内部  $P4$ 、刀圈下端面  $P6$  处的等效应变开始增大, 刀圈内径  $P5$  处没有较多的金属流动, 等效应变变化较小。在整个模锻过程中, 刀圈的等

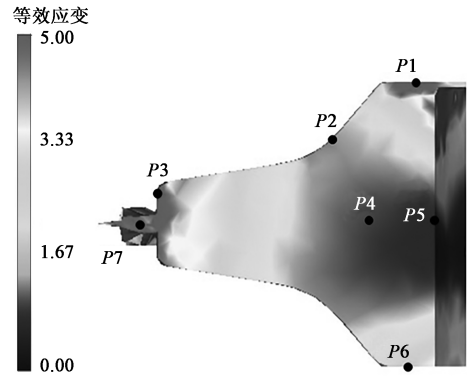


图 18 模锻成形过程中特征点的等效应变分布图  
Fig. 18 Distribution diagram of equivalent strain for feature points during die forging process

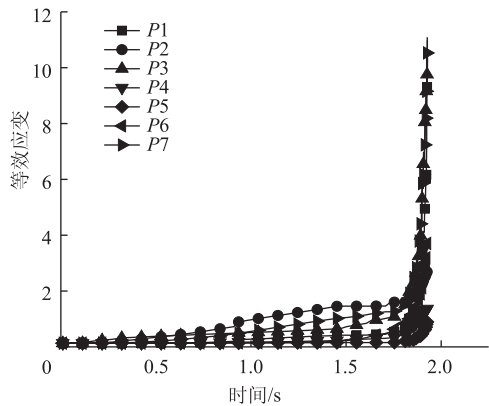


图 19 模锻成形过程中特征点的等效应变变化曲线  
Fig. 19 Change curves of equivalent strain for feature points during die forging process

效应应变由刀刃部至内圈逐渐减小，靠近刀刃及飞边处的应变最大。

3 TBM 滚刀刀圈成形实验观测

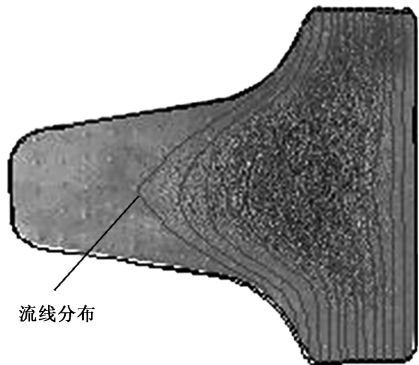
为了验证仿真的合理性，对实际盘形滚刀刀圈的模锻成形进行了实验观测。采用 H13 钢锻造成形的 19 英寸滚刀刀圈如图 20 所示，刀圈外形与所模拟的最终成形结果基本一致，且在刀圈最外圈存在飞边现象，与仿真中产生的飞边情况基本一致（图 5f、图 6f 及图 7d），这主要是锻造过程中模锻后期塑性流动的金属向上模和下模之间的间隙流动所导致的。因此，后续刀圈在精加工过程中要进一步将飞边去除，形成所需的刀圈刀刃部外形。

为了进一步证实仿真的可靠性，对比模锻成形刀圈内部的金属流线实验观测结果和仿真结

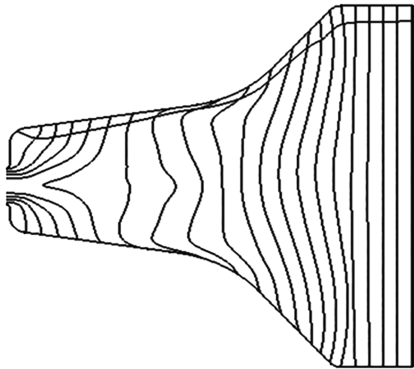


图 20 实际锻造成形的滚刀刀圈  
Fig. 20 Actual forged hob ring

果。实验观测中，刀圈剖面采用打磨、腐蚀等手段获得其金属流线形态，为增加辨识度，将金属流线形态及其变化趋势用线描绘出来，如图 21a 所示。对仿真中刀圈内部金属流线形态进行疏化



(a)



(b)

图 21 实验 (a) 和仿真 (b) 得到的刀圈内部金属流线分布对比

Fig. 21 Comparison of internal metal streamline distributions for hob ring obtained by experiment (a) and simulation (b)

得到图 21b。对比可知，刀圈靠近刀刃部的金属流线存在露头趋势，主要是飞边所导致的，刀圈靠



近心部的金属流线呈现向刀刃部方向外凸的特征。仿真和实验观测的金属流线形态的整体变化趋势一致。

## 4 结论

(1) 依据滚刀刀圈成形载荷的变化特点, 将滚刀刀圈模锻成形过程划分为模锻初期、模锻中期以及模锻后期3个阶段。金属坯料对于模具的填充过程上下并不对称, 上模和下模型腔的填充速度不同, 上模型腔先于下模型腔被填满。

(2) 滚刀刀圈最终成品件的内部金属流线在刀刃处沿径向分布较为均匀, 圆弧过渡区分布密集。模锻结束时, 刀圈整体温度均有所降低, 其中刀刃处的温度下降最少, 较始锻温度下降了7.8%, 刀圈圆弧过渡区的温度下降最多, 较始锻温度下降了34.78%。

(3) 滚刀刀圈的应力由内向外逐步增大, 其中刀刃处的等效应力最大, 较平均等效应力高13.54%, 对比刀圈锻件的温度和应力情况, 发现在锻件温度越高的部位, 其成形应力越低。

### 参考文献:

- [1] 苗圩巍, 颜世钊, 李纪强, 等. 我国全断面隧道掘进机的发展现状及发展趋势 [J]. 内燃机与配件, 2021, (2): 203-205.  
Miao W W, Yan S D, Li J Q, et al. Development status and trend of full face tunnel boring machine in China [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021, (2): 203-205.
- [2] Lin L, Xia Y, Wu D. A hybrid fuzzy multiple criteria decision-making approach for comprehensive performance evaluation of tunnel boring machine disc cutter [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 149: 106793.
- [3] Deng M. Challenges and thoughts on risk management and control for the group construction of a super-long tunnel by TBM [J]. Engineering, 2018, 4 (1): 112-122.
- [4] 陈馈. 盾构刀具关键技术及其最新发展 [J]. 隧道建设, 2015, 35 (3): 197-203.  
Chen K. Key technologies for cutting tools of shield and their latest development [J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (3): 197-203.
- [5] Zhang X, Hu D, Li J, et al. Investigation of rock breaking mechanism with TBM hob under traditional and free-face condition [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 242: 107432.
- [6] 夏毅敏, 丛国强, 陈雷, 等. 成形工艺对刀圈组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (1): 120-122.  
Xia Y M, Cong G Q, Chen L, et al. Effect of forming process on structure and properties of cutter ring [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (1): 120-122.
- [7] 李增良. 盘形滚刀刀圈失效原因及成形方法研究 [J]. 低碳世界, 2017, (1): 79-81.  
Li Z L. Research on failure reason and forming method of disc hob ring [J]. Low Carbon World, 2017, (1): 79-81.
- [8] 王辉平. 盘形滚刀刀圈轧制数值模拟研究 [J]. 隧道建设, 2017, 37 (11): 1483-1487.  
Wang H P. Numerical simulation of disc hob ring rolling [J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (11): 1483-1487.
- [9] 夏毅敏, 张小云, 曾桂英, 等. TBM滚刀刀圈轧制成形特性及其变化规律 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40 (2): 374-379.  
Xia Y M, Zhang X Y, Zeng G Y, et al. Rolling forming characteristics and variation law of TBM hob ring [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40 (2): 374-379.
- [10] 张小云, 夏婧怡, 全磊, 等. TBM盘形滚刀刀圈轧制成形数值模拟和试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 53-58.  
Zhang X Y, Xia J Y, Tong L, et al. Numerical simulation and experimental study on rolling forming of TBM disc hob [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 53-58.
- [11] 王辉平. 盘形滚刀刀圈锻造金属流线数值模拟研究 [J]. 硬质合金, 2017, 34 (4): 249-253, 273.  
Wang H P. Numerical simulation of forging metal streamline of disc hob ring [J]. Cemented Carbides, 2017, 34 (4): 249-253, 273.
- [12] 谭青, 黎子兵, 夏毅敏, 等. 盘形滚刀刀圈轧制过程的数值模拟和试验验证 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (15): 129-133, 136.  
Tan Q, Li Z B, Xia Y M, et al. Numerical simulation and test verification of the rolling process of the disc hob [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (15): 129-133, 136.
- [13] 张宁川, 王豪, 张双亚. 17in与19in滚刀破岩效率及耐磨度的初步比较研究 [J]. 隧道建设, 2009, 29 (1): 123-126.  
Zhang N C, Wang H, Zhang S Y. Comparative analysis of rock breaking efficient and wearing between 17in disc cutter and 19in disc cutter [J]. Tunnel Construction, 2009, 29 (1): 123-126.
- [14] 王琪, 赵耀, 陶丽佳, 等. 基于Deform的剥皮齿热锻过程仿真及工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 14-21.  
Wang Q, Zhao Y, Tao L J, et al. Simulation of hot forging process and optimization on process parameters for peeling tooth based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 14-21.