

文章编号:1008-1542(2021)01-0082-09

超大高径比棒料平锻成形钢拉杆 U 型头 预制坯工艺分析及模拟

孟致安¹, 鲁素玲^{1,2}, 闫华军^{1,2}, 韩鹏彪^{1,2}, 胡希磊³, 王同会⁴, 王浩⁴

(1.河北科技大学材料科学与工程学院,河北石家庄 050018;2.河北省材料近净成形技术重点实验室,河北石家庄 050018;3.河冶科技股份有限公司,河北石家庄 050031;4.巨力索具股份有限公司,河北保定 072550)

摘要:为了解决传统 U 型钢拉杆存在的生产工艺落后、加工周期长、材料利用率低等问题,提出一体式钢拉杆成形工艺。以 35 型钢拉杆 U 型头预制坯的成形为研究对象,设计了 3 道次加热镦粗方法,采用 DEFORM-3D 有限元软件分析了不同工艺条件下镦粗后温度场、应力场的模拟结果,探讨了成形效果较佳的热成形工艺参数,并通过实验验证成形的可行性。结果表明,各道次较佳的热成形工艺参数如下:第 1 道次始锻温度为 1 150 °C、冲头速度为 20 mm/s,第 2 道次始锻温度为 1 150 °C、冲头速度为 30 mm/s,第 3 道次始锻温度为 1 100 °C、冲头速度为 20 mm/s;在该热成形工艺参数下,各道次的成形力分别为 1 520,2 090,5 290 kN,各道次的胀模力分别为 5 870,6 710,8 830 kN;镦粗后金属流线分布合理,没有出现交叉、折叠等现象,成形效果较好。采用 3 道次热镦粗方法制备预制坯,制件内部的等效应力分布都比较均匀,可以形成质量良好的制件,研究结果可为 35 型钢拉杆 U 型头预制坯的镦粗聚料工艺设计以及设备选择提供参考。

关键词:塑性加工工艺与设备;大高径比;镦粗聚料;数值模拟;预制坯

中图分类号:TG376.2

文献标识码:A

doi:10.7535/hbkd.2021yx01011

Process analysis and simulation of flat forging and forming steel tie rod U-shaped head preforms with super large height-diameter ratio bars

MENG Zhian¹, LU Suling^{1,2}, YAN Huajun^{1,2}, HAN Pengbiao^{1,2}, HU Xilei³, WANG Tonghui⁴, WANG Hao⁴

(1.School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2.Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018,China; 3.Heye Spe-

收稿日期:2020-10-05;修回日期:2020-11-25;责任编辑:张士莹

基金项目:河北省科技计划重点项目(15211804D);河北科技大学教育教学改革研究重点项目(2019-ZDA01)

第一作者简介:孟致安(1995—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事金属塑性加工方面的研究。

通讯作者:韩鹏彪教授。E-mail: hpb68@163.com

孟致安,鲁素玲,闫华军,等.超大高径比棒料平锻成形钢拉杆 U 型头预制坯工艺分析及模拟[J].河北科技大学学报,2021,42(1):82-90.

MENG Zhian, LU Suling, YAN Huajun, et al.Process analysis and simulation of flat forging and forming steel tie rod U-shaped head preforms with super large height-diameter ratio bars[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2021,42(1):82-90.

cial Steel Company Limited, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 4.Juli Sling Company Limited, Baoding, Hebei 072550, China)

Abstract: In order to solve the problems of backward production technology, long processing cycle and low material utilization rate in traditional U-shaped steel tie rods, an integrated steel tie rod forming process was proposed. Taking the preform forming of 35 steel tie rod U-shaped head as the research object, a three-pass heating upsetting method was designed. The DEFORM-3D finite element software was used to analyze the simulation results of the temperature field and stress field after upsetting under different process conditions. The hot forming process parameters with better forming effect were discussed, and the feasibility of forming was verified through experiments. The results show that the optimum hot forming process parameters of each pass are as follows: the initial forging temperature of the first pass is 1 150 °C, while the punch speed is 20 mm/s; the initial forging temperature of the second pass is 1 150 °C, while the punch speed is 30 mm/s; the initial forging temperature of the third pass is 1 100 °C, while the punch speed is 20 mm/s. Under the hot forming process parameters, the forming forces of each pass are 1 520, 2 090, 5 290 kN, and the expansion forces of each pass are 5 870, 6 710, 8 830 kN, respectively. After upsetting, the metal streamline distribution is reasonable, there is no crossover and folding phenomenon, and the forming effect is good. The equivalent stress distribution inside the part is relatively uniform while preparing the preform in the three-pass hot upsetting method, which can form a good quality part. It provides a certain reference for the upsetting aggregate process design and equipment selection of the U-shaped head perform of 35 steel tie rod.

Keywords: plastic forming processing and equipment; large height-diameter ratio; upsetting aggregate; numerical simulation; preforms

随着中国经济的飞速发展,钢拉杆在船坞、桥梁、场馆、机场、铁路等^[1-4]大型建筑工程中得到广泛应用。钢拉杆按接头形式分为 UU 型钢拉杆、UO 型钢拉杆、OO 型钢拉杆。钢拉杆 U 型接头传统成形方式采用机械加工或铸造,之后再 用螺纹连接或焊接的方式将 U 型头和杆体相连。传统高强度钢拉杆的结构示意图如图 1 所示。这些传统方法存在加工成形工艺落后、加工周期长、材料利用率低、产品性能较差等缺点^[5],同时 U 型接头在结构形态上类似于枝杈类零件,但又比普通的枝杈类零件开槽更深,双耳板较薄且成镜面对称,成形难度更大。

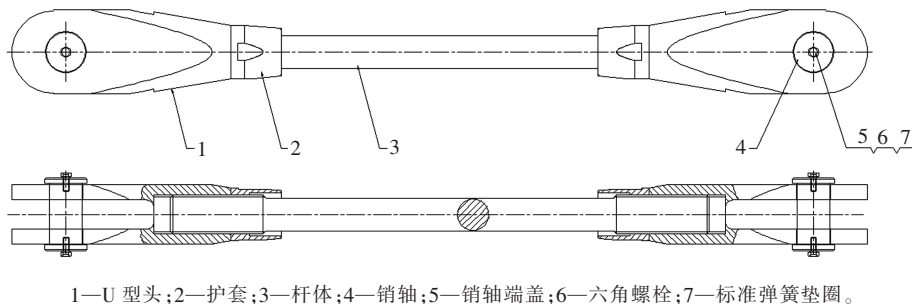


图 1 传统高强度钢拉杆结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of traditional high-strength steel tie rod structure

基于此背景,钢拉杆的一体式成形工艺应运而生。一体式钢拉杆能够很好地克服传统钢拉杆的缺点,并且可以形成生产线进行连续生产。采用一体式成形工艺所用坯料的直径通常要与杆部直径相同。一体式 U 型钢拉杆成形工艺中,U 型头的成形采用反挤压工艺,工艺所储备的坯料称为预制坯。以 35 型钢拉杆 U 型头预制坯为例,按照体积不变原理将其换算成 $\phi 35$ mm 的棒料,棒料尺寸为 $\phi 35$ mm \times 817 mm,高径比达到 23.3,使预制坯成形成为一种大高径比镦粗成形,这也是一个成形难点问题。

对于大高径比棒料的镦粗工艺,许多学者开展了相关研究。冯文杰等^[6]采用缩径-冷镦成形工艺,对大高径比凸台成形进行了探索;梁秀春^[7]提出了一种镦粗大高径比锻件方法,可对棒料进行局部头部镦粗;陈卫铭^[8]提出了大长径比杆件的平锻成形工艺,采用多道次镦粗方式对棒料进行了局部成形;陈孝学等^[9]提出超大高径比棒料连续镦粗的成形工艺,设计带有锥度的可拆卸凸凹模对坯料进行镦粗。

本文基于一体式 U 型钢拉杆成形工艺,针对 35 型钢拉杆 U 型头预制坯,在前人研究的基础上,提出了预制坯成形工艺方案。运用 DEFORM-3D 数值模拟软件,对坯料采用 3 道次加热镦粗聚料方式制备 35 型钢拉杆 U 型头预制坯的工艺进行了数值模拟,分析了温度场、应力场、载荷以及金属流线分布情况,以期 35 型钢拉杆 U 型头预制坯的镦粗聚料工艺设计以及设备选择提供参考^[10]。

1 零件工艺分析

35 型钢拉杆 U 型接头预制坯所用材料为 35CrMo 钢,杆体直径 $\phi 35$ mm,需要制备的预制坯如图 2 所示。根据体积不变原理计算出所需坯料的尺寸为 $\phi 35$ mm \times 817 mm,如图 3 所示,其高径比为 23.3,需要进行多次镦粗成形。根据顶镦第二规则^[11]分析计算成形道次。顶镦第二规则指的是坯料在凹模中聚料时,当 $D_{凹} = 1.5D_0$ 时,伸到模具外面的棒料长度 $A \leq D_0$,或者 $D_{凹} = 1.25D_0, A \leq 1.25D_0$,如图 4 所示,其中 A 为伸出模具的长度, $D_{凹}$ 为凹模的直径^[11]。通常情况下,当 $l_0/D_0 < 10$ 时, $D_{凹} = 1.5D_0$; $l_0/D_0 > 10$ 时, $D_{凹} = 1.25D_0$ ^[11]。经计算,对各道次相关数据进行了汇总,见表 1。

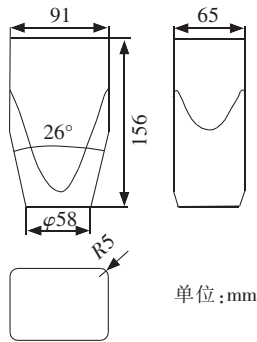


图 2 35 型钢拉杆 U 型头预制坯尺寸
Fig.2 U-shaped head preform size of 35 steel rod

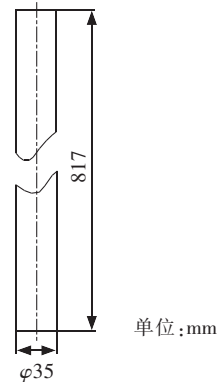


图 3 预制坯所需坯料尺寸
Fig.3 Blank size required for preforms

表 1 各成形道次相关数据汇总(基于顶镦第二规则)

Tab.1 Summary of relevant data for each forming pass(Based on the second upsetting rule)

道次	坯料尺寸	$D_{凹}/\text{mm}$	A/mm	l/mm	镦粗后坯料尺寸	镦粗后坯料高径比
第 1 道次	$\phi 35$ mm \times 817 mm	44	43.5	773.5	$\phi 44$ mm \times 517 mm	11.7
第 2 道次	$\phi 44$ mm \times 517 mm	55	55	462	$\phi 55$ mm \times 331 mm	6
第 3 道次	$\phi 55$ mm \times 331 mm	82.5	55	276	$\phi 82.5$ mm \times 145 mm	1.7

需要说明的是:按照顶镦第二规则,第 3 道次坯料尺寸是从 $\phi 55$ mm \times 331 mm 到 $\phi 82.5$ mm \times 145 mm。但实际预制坯外形如图 2 所示,其为非等直径圆柱体,从宽厚比及最大宽度与根据顶镦第二规则计算出的第 3 道次 $\phi 82.5$ mm 进行分析,根据有限元成形性模拟及实验结果可知,此道次可以实现成形。

为了后续模拟方便,在原坯料的基础上延长 40 mm,延长的部分作为定位端,该定位端不参与变形,起到定位的作用,同时也可以将这部分视为钢拉杆的杆体部分。预制坯生产工艺流程如下:下料 \rightarrow 加热 \rightarrow 第 1 道次镦粗聚料 \rightarrow 加热 \rightarrow 第 2 道次镦粗聚料 \rightarrow 加热 \rightarrow 第 3 道次镦粗聚料 \rightarrow 预制坯。

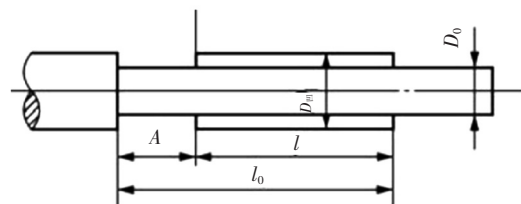


图 4 顶镦第二规则^[11]
Fig.4 Second rule of upsetting^[11]

2 有限元模型的建立及模拟参数的设置

2.1 有限元模型的建立

采用 3 道次加热镦粗聚料方式制备预制坯,为了尽可能模拟实际成形过程,将凹模设计成 2 个半模,并在凹模底端增加了一个垫板,防止坯料发生窜动,各道次的模具及坯料的有限元几何模型如图 5 所示。

2.2 模拟参数的设置

为了验证预制坯成形的可行性,根据工艺实验条件,将坯料材料设置为 35CrMo 钢,定义为塑性体,采用相对网格划分方式将坯料划分为 32 000 个单元,由于 DEFORM-3D 软件自带的材料库中没有 35CrMo 钢材料,因此需要将 35CrMo 的材料模型(本构方程)导入 DEFORM 软件中^[12]。

上模和下模设置为材料库中的 AISI-H-13,定义为刚性体^[13]。将坯料的始锻温度分别设置为 1 050, 1 100, 1 150 °C,定位端不参与变形,温度设置为 20 °C,将冲头速度分别设置为 10, 20, 30 mm/s 进行模拟。镦粗前需要对模具进行预热,模具温度设置为 250 °C,垫板温度设置为 20 °C。坯料与模具的摩擦方式定义为剪切摩擦,摩擦系数为 0.3。考虑到坯料和模具中存在传热现象,设置坯料与模具间的热交换系数为 11 N/(mm·s·°C)^[14]。

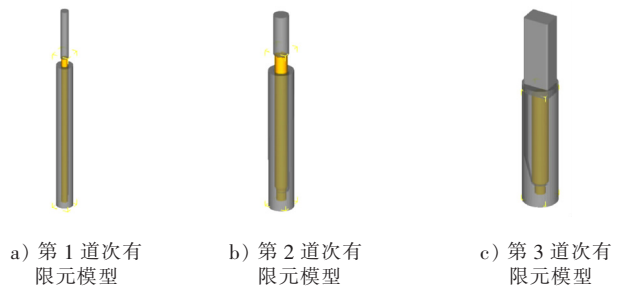


图 5 各道次有限元模型

Fig.5 Finite element model for each pass

3 数值模拟结果及分析

3.1 温度场分析

对于通过加热镦粗成形的零件来说,合适的温度和冲头速度有利于成形的顺利进行。在不同工艺条件下镦粗后制件的温度最大值如图 6 所示。由图 6 可以看出:在一些工艺条件下,镦粗后制件的温度最大值会升高,这是因为在坯料镦粗聚料过程中,坯料存在比较强烈的塑性变形且变形时间较短,产生大量变形热,而且坯料会和模具发生摩擦,使坯料的温度升高^[15];还可以看出温度最大值的变化情况,在同一始锻温度下,随着冲头速度的增加,第 1 道次温度最大值上升最快,第 3 道次次之,第 2 道次最慢,其中第 1 道次变形量最大,与其他道次相比用时最长,热量散失较多。因此,当冲头速度增加时,镦粗所用时间减少,散失热量减少,制件温度升高。

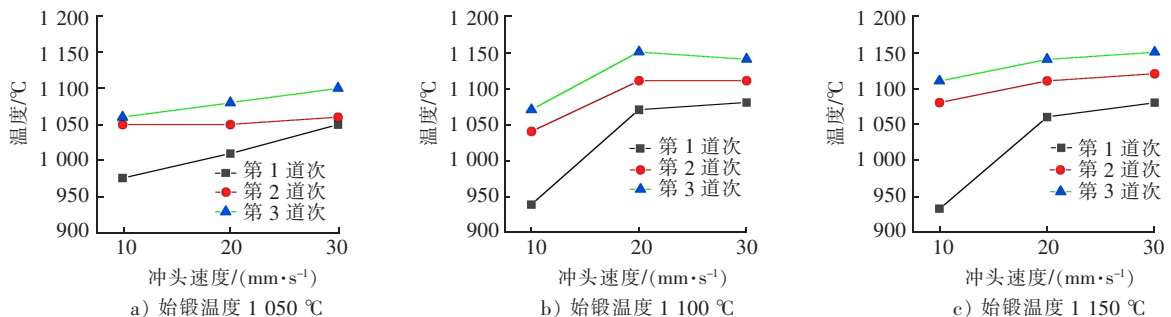


图 6 在不同工艺条件下各道次镦粗时的温度最大值

Fig.6 Maximum temperature of each pass of upsetting under different process conditions

通过对不同工艺条件下的温度场进行观察,发现温度场模拟结果大致相同,以始锻温度为 1 150 °C、冲头速度为 20 mm/s 温度场为例进行展示,如图 7 所示。从图 7 观察到制件内部温度的分布情况,第 1 道次镦粗结束后,制件内部温度由上而下逐渐升高,最高温度出现在制件的靠下部分。这是由于在变形过程中坯料上端首先完成变形,坯料与模具接触,坯料和模具存在温度差,发生了热传递,传递走了一部分热量,使温度降低,而坯料下端成形后与模具接触时间短,传递走的热量少,温度降低不明显。在第 2、第 3 道次镦粗结

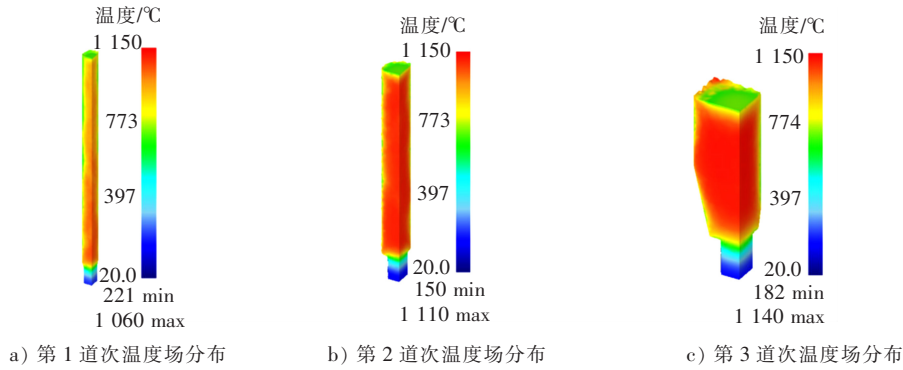


图7 各道次墩粗聚料结束时温度场模拟结果

Fig.7 Simulation results of the temperature field at the end of upsetting aggregate in each pass

束后,制件内部温度分布均匀,与模具接触的部分温度降低。这是由于坯料和模具存在温度差,发生了热传递,使温度降低。通过对温度场的分析,了解到温度的变化情况,可以为实际生产提供参考。

3.2 应力场分析

在不同工艺条件下,坯料墩粗聚料时的应力是不同的。图8是不同工艺条件下制件的最大等效应力情况。由图8可以看出:第1道次的最大等效应力值保持在550 MPa左右;第2道次最大等效应力值变化幅度较大,最小值为766 MPa,最大值为1250 MPa;第3道次最大等效应力值在同一始锻温度下,随着冲头速度的增加而升高,最大等效应力值为1390 MPa。通过对不同工艺条件下的应力场进行观察,发现应力场模拟结果大致相同,以始锻温度为1150 °C、冲头速度为30 mm/s条件下每道次墩粗结束时等效应力场分布情况进行说明,如图9所示。结合图8和图9可以看出,制件上最大等效应力出现在定位端,墩粗后制件内部的等效应力分布都比较均匀。分析最大等效应力出现的原因是坯料将型腔填满后,制件底部仍受到冲头带来的挤压力,使得定位端等效应力增大。从整体来看,每道次墩粗后的等效应力分布比较均匀,可以制备出质量良好的制件。

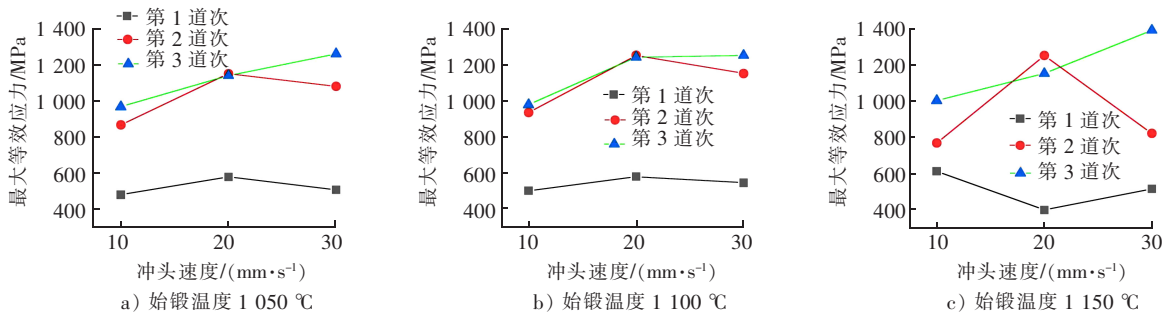


图8 在不同工艺条件下各道次墩粗时制件的最大等效应力

Fig.8 Maximum equivalent stress of the part during upsetting of each pass under different process conditions

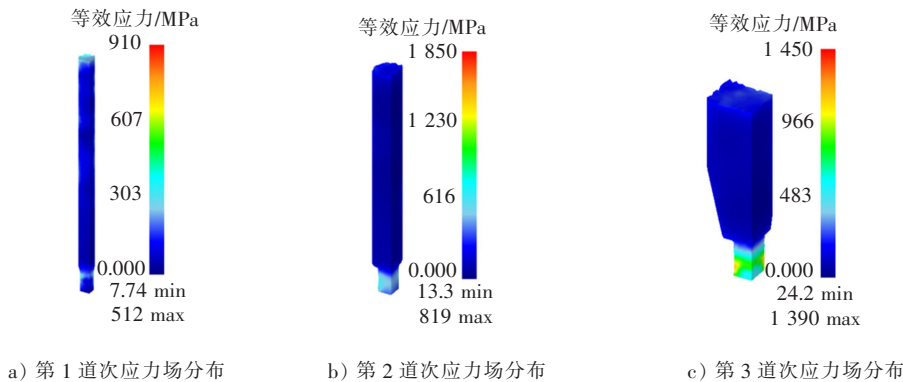


图9 各道次墩粗聚料结束时的等效应力场

Fig.9 Equivalent stress field at the end of each pass of upsetting aggregate

3.3 载荷分析

成形力是选择成形设备的主要考虑依据,对不同工艺条件下的成形载荷进行了分析。图 10 是在不同工艺条件下每道次墩粗时冲头的最大载荷情况。由图 10 可以看出,在每道次墩粗时冲头的最大载荷在不同工艺条件下不同,选择冲头载荷最小时的工艺条件作为各道次较佳的热成形工艺参数。由图 10 还可知,在始锻温度为 1 150 ℃、冲头速度为 20 mm/s 工艺条件下,第 1 道次冲头载荷最小,为 1 520 kN,故选择该工艺参数作为第 1 道次的热成形工艺参数。由图 10 b)和图 10 c)可以看出,第 2 道次墩粗时冲头的最大载荷随冲头速度的增加而下降。在图 10 a)中最大载荷值在冲头速度为 20 mm/s 时最大,为 2 990 kN,分析其原因是当挤压速度超过某一数值时,墩粗产生的加工硬化大于软化作用,材料变形困难,载荷增大^[16],在 1 150 ℃、30 mm/s 条件下载荷最大值仅为 2 090 kN,故选择该工艺条件作为第 2 道次的热成形工艺参数。由图 10 还可知,在不同始锻温度下,第 3 道次墩粗时冲头的最大载荷随着冲头速度的增加而下降,在 1 100 ℃、20 mm/s 下最大载荷值最小,为 5 290 kN,故选择该工艺条件作为第 3 道次的热成形工艺参数。对比不同工艺条件下的载荷,得到了较佳的热成形工艺参数:第 1 道次始锻温度为 1 150 ℃、冲头速度为 20 mm/s,第 2 道次始锻温度为 1 150 ℃、冲头速度为 30 mm/s,第 3 道次始锻温度为 1 100 ℃、冲头速度为 20 mm/s。图 11 是在较佳热成形工艺参数下各道次冲头的载荷情况,通过观察发现,随着冲头向下运动,载荷逐渐增大,呈现上升的趋势,在结束时达到最大值。通过对各道次墩粗时的载荷情况进行分析,可以为各道次成形设备的选择提供参考。

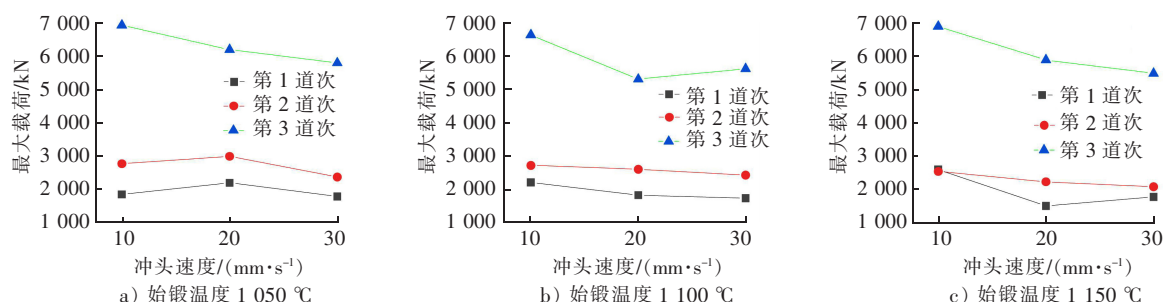


图 10 在不同工艺条件下各道次墩粗时冲头的最大载荷

Fig.10 Maximum load of the punch in each pass of upsetting under different process conditions

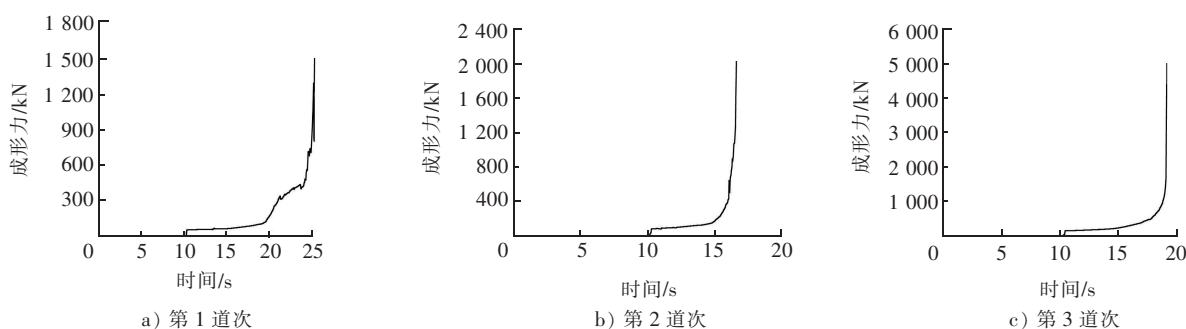


图 11 在较佳工艺条件下各道次墩粗的冲头载荷

Fig.11 Punch load for each pass of upsetting under better process conditions

3.4 胀模力分析

在坯料墩粗聚料过程中,坯料发生塑性变形时会对凹模型腔产生一定的胀模力。在墩粗开始时,坯料和凹模型腔接触少,随着坯料的变形,与凹模型腔的接触面积逐渐增大,胀模力也随之增大,在变形的最后阶段胀模力达到最大^[17]。为了避免出现胀模现象,需要合模力大于胀模力,若合模力小于胀模力,则会出现胀模,且墩粗后的制件会带有飞边,影响制件质量。图 12 是在较佳的热成形工艺参数下各道次凹模受到的胀模力,凹模结构为 2 个可分开的半模,2 个半模受到的胀模力大小及变化趋势基本一致,以其中一个半模受到的胀模力为例进行分析。由图 12 可以看出,各道次凹模受到的最大胀模力分别为 15 800,11 300,11 500 kN。由最大胀模力数据可知,最大胀模力过大,对成形设备要求高,因此提出如下解决方法:坯料在凹模中

处于即将填满的状态时镦粗结束,可以大大减小凹模受到的胀模力,同时确保不影响后续工序。图 13 是采用该方法模拟得到的各道次凹模受到的胀模力曲线图,可以得到各道次凹模受到的最大胀模力分别为 5 870,6 710,8 830 kN,胀模力大大减小,更便于选择每道次所用的成形设备。

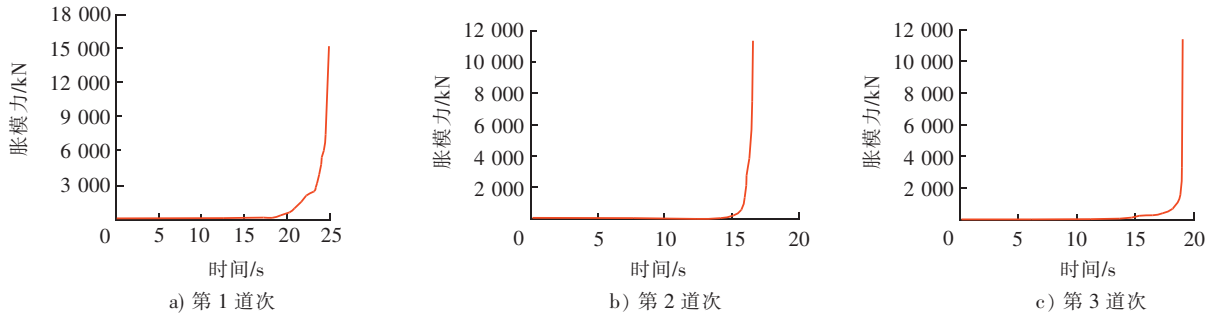


图 12 较佳工艺条件下各道次凹模受到的胀模力

Fig.12 Die expansion force of each pass under better process conditions

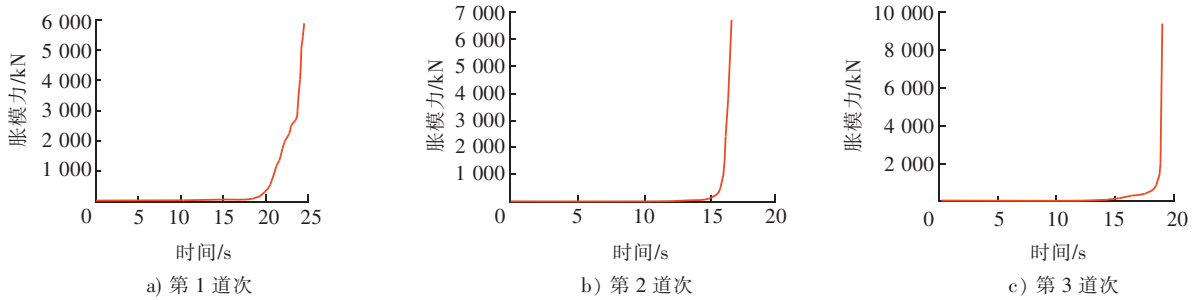


图 13 改进后各道次最大胀模力

Fig.13 Maximum expansion force of each pass after improvement

3.5 金属流线分析

将加热后的金属材料进行镦粗或挤压时,金属材料会存在塑性流动,金属材料内部的组织会呈现方向性,称之为金属流线^[18]。通过观察金属流线的情况,对采用 3 道次加热镦粗聚料方式制备预制坯的成形性进行了分析。图 14 是在较佳的热成形工艺参数条件下,各道次镦粗前后金属流线的分布情况。为了使镦粗件具有良好的力学性能,应保证金属流线分布合理,无交叉、断裂、急剧弯折等情况^[19-21]。图 14 a)和图 14 b)为第 1 道次、第 2 道次镦粗前后的金属流线分布情况。通过观察可以看到,当镦粗完成后,变形部分的金属流线没有出现交叉、断裂等情况。由图 14 c)可以看出,在第 3 道次镦粗聚料结束后,坯料的金属流线发生了弯曲,但并未出现交叉、断裂等缺陷。总体来看,各道次镦粗聚料后金属流线分布合理,满足了镦粗件良好的力学性能要求。

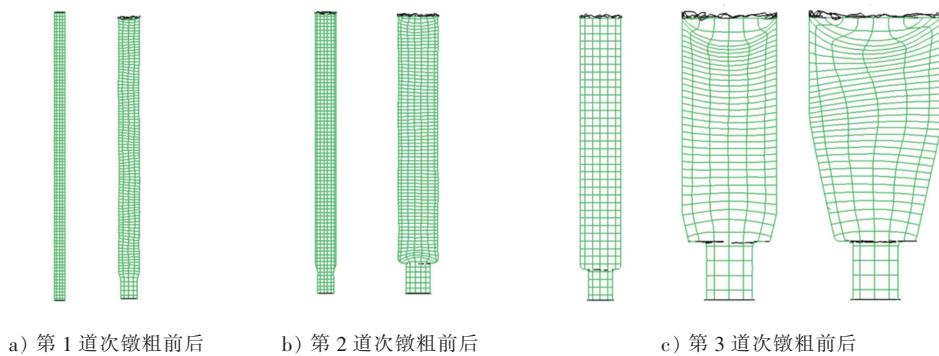


图 14 各道次镦粗前后金属流线分布

Fig.14 Metal streamline distribution before and after upsetting

4 实验验证

在 900T 垂直分模平锻机上对第 3 道次墩粗聚料进行了验证。第 3 道次墩粗所用坯料为 $\phi 55$ mm 的棒料,采用中频加热炉对棒料进行加热,将棒料加热到 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$,模具预热温度为 $250\ ^\circ\text{C}$,在凹模内腔及冲头均喷涂脱模剂,第 3 道次墩粗聚料后的产品如图 15 所示。由图 15 可以看出,预制坯的成形效果较好,验证了第 3 道次墩粗聚料的可行性,但其边角填充不饱满,这是由于实验所用的平锻机合模力不足,导致聚料过程中胀模,并且挤压力较大,坯料向后窜动。因此,需要调整设备精度,为后面的实验做准备。



图 15 第 3 道次墩粗聚料后的产品
Fig.15 Product after the third rough upsetting

5 结 论

1) 针对 35 型钢拉杆 U 型头预制坯,设计了 3 道次加热墩粗方法,分析了 DEFORM-3D 有限元软件对不同工艺条件下墩粗后的温度场、应力场的模拟结果:在同一始锻温度下,随着冲头速度的增加,第 1 道次墩粗后温度最大值上升得最快、第 3 道次次之、第 2 道次最慢,且第 1 道次墩粗后制件内部温度由上而下逐渐升高,第 2、第 3 道次温度分布比较均匀;各道次墩粗后,制件内部的等效应力分布都比较均匀,可以形成质量良好的制件。

2) 对比不同工艺条件下的载荷,获得了各道次较佳的热成形工艺参数:第 1 道次始锻温度为 $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 、冲头速度为 $20\ \text{mm/s}$;第 2 道次始锻温度为 $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 、冲头速度为 $30\ \text{mm/s}$;第 3 道次始锻温度为 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 、冲头速度为 $20\ \text{mm/s}$ 。在该热成形工艺参数下,各道次的成形力分别为 $1\ 520, 2\ 090, 5\ 290\ \text{kN}$,各道次的胀模力分别为 $5\ 870, 6\ 710, 8\ 830\ \text{kN}$ 。

3) 分析了 DEFORM-3D 有限元软件对较佳热成形工艺参数下各道次墩粗后金属流线分布的模拟结果,发现墩粗后的金属流线分布合理,没有出现交叉、折叠等现象,成形效果较好。

4) 在 900T 垂直分模平锻机上进行了第 3 道次墩粗聚料实验,预制坯成形效果较好,验证了第 3 道次墩粗聚料的可行性。

5) 本研究还需开展第 1、第 2 道次的相关实验工作,进一步验证第 1、第 2 道次数值模拟的相关数值分析结论;同时,在有限元模拟分析计算胀模力的基础之上,进一步完善设备工装夹具的相关设计工作。

参考文献/References:

- [1] 祁海坤,叶建国.上海浦东国际机场二期航站楼高强度钢拉杆的制作与施工[J].建筑钢结构进展,2007,9(2):51-55.
QI Haishen, YE Jianguo. Fabrication and erection of the high-strength steel tension rods for Shanghai Pudong International Airport Phase II Terminal Building[J].Progress in Steel Building Structures, 2007,9(2):51-55.
- [2] 郭昆峰.墩粗钢拉杆在板桩码头的应用[J].港工技术,2018,55(sup1):70-72.
GUO Kunfeng. Application of upset steel rod in sheet-piled berth structure [J]. Port Engineering Technology, 2018,55(sup1):70-72.
- [3] 周袁凯,刘建飞,张林振.六盘水凉都人民医院结构设计[J].建筑结构,2018,48(sup1):200-204.
ZHOU Yuankai, LIU Jianfei, ZHANG Linzhen. Structural design of Liupanshui City People's Hospital [J]. Building Structure, 2018,48 (sup1):200-204.
- [4] 杨建国,叶建国,祁海坤,等.高强度建筑钢拉杆的应用与研究[J].钢结构,2005,20(5):26-28.
YANG Jianguo YE Jianguo QI Haishen, et al. Technical application and investigation of the high strength constructional steel the rod [J]. Steel Construction, 2005,20(5):26-28.
- [5] 孟玲丽.金属材料焊接成型中的主要缺陷及控制措施探讨[J].世界有色金属,2019(22):267-268.
MENG Lingli. Discussion on main defects and control measures in welding forming of metal materials[J]. World Nonferrous Metals, 2019 (22):267-268.
- [6] 冯文杰,梁强,陈莹莹,等.大高径比凸台缩径-冷墩成形工艺方案研究[J].热加工工艺,2013,42(1):17-19.
FENG Wenjie, LIANG Qiang, CHEN Yingying, et al. Research on necking and cold upsetting process for large ratio of height to diameter boss[J]. Hot Working Technology, 2013,42(1):17-19.
- [7] 梁秀春.一种墩粗大高径比锻件的方法[J].山西机械,1999(sup1):131-132.

- LIANG Xiuchun. An upsetting method for forgings with large height-to-diameter ratio [J]. Shanxi Machinery, 1999(sup1): 131-132.
- [8] 陈卫铭. 大长径比杆件的平锻成形工艺[J]. 锻压机械, 1999(2): 3-5.
CHEN Weiming. Machine forging process of bars with large L/D [J]. Metal Forming Machinery, 1999(2): 3-5.
- [9] 陈孝学, 程仁策, 吕正风, 等. 超大高径比棒料连续微粗工艺及材料变形规律[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 148-153.
CHEN Xiaoxue, CHENG Rence, LYU Zhengfeng, et al. Continuous upsetting process and material deformation rule of large height-diameter ratio bars [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5): 148-153.
- [10] 田娇, 徐新成, 赵中华, 等. 基于 Deform 的石油钻杆接头精密塑性成形工艺研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(21): 131-134.
TIAN Jiao, XU Xincheng, ZHAO Zhonghua, et al. Study on precision plastic forming process of petroleum drilling stem joint based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(21): 131-134.
- [11] 胡亚民, 华林. 锻造工艺过程及模具设计[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [12] 胡希磊, 韩鹏彪, 鲁素玲, 等. 35CrMo 钢高温流变行为及其本构方程[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(4): 351-358.
HU Xilei, HAN Pengbiao, LU Suling, et al. High temperature flow behavior and constitutive model of 35CrMo steel [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(4): 351-358.
- [13] 蒋晓英, 马力, 陈刚. 轴盖温挤压成形工艺及坯料结构优化数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(5): 87-88, 92.
JIANG Xiaoying, MA Li, CHEN Gang. Numerical simulation on optimized warm extrusion process of shaft cover and billet structure [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(5): 87-88, 92.
- [14] 张佳敏. 高铁车轮连续成形仿真与模具设计研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2018.
ZHANG Jiamin. Research on Continuous Forming Simulation and Die Design of High-speed Railway Wheels [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2018.
- [15] 冀晓磊, 韩鹏彪, 鲁素玲, 等. 基于 DEFORM 的索具接头内孔反挤压成形数值模拟[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(4): 383-388.
JI Xiaolei, HAN Pengbiao, LU Suling, et al. Numerical simulation for inverse extrusion forming of the hole of a rigging joint based on DEFORM [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(4): 383-388.
- [16] 肖良红, 易沛林, 龙涛, 等. 基于 DEFORM 的钎头温挤压成形有限元模拟[J]. 热加工工艺, 2013, 42(21): 88-91.
XIAO Lianghong, YI Peilin, LONG Tao, et al. Finite element simulation of warm extrusion for rock drill head based on DEFORM [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(21): 88-91.
- [17] 严健鸣. 十字轴零件冷径向挤压关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
YAN Jianming. Research on Key Technologies of Joint Pin Cold Forming Based on Radial Extrusion [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [18] 叶星辉, 郑光文, 白凤梅, 等. 基于 DEFORM-3D 的压料油缸闭塞成形工艺可行性研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(5): 131-136.
YE Xinghui, ZHENG Guangwen, BAI Fengmei, et al. Feasibility study on the forming technology of press cylinder block based on DEFORM-3D [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(5): 131-136.
- [19] 杜金龙. 高精度扁钢轧制金属流动规律的数值模拟研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.
DU Jinlong. Numerical Simulation Research on Metal Flow Law of Flat Steel Rolling with High Precision [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016.
- [20] 谭利广, 肖小亭, 温华典, 等. 带预制孔筒形件拉深成形金属流动规律的研究[J]. 锻压技术, 2011, 36(6): 114-119.
TAN Liguang, XIAO Xiaoting, WEN Huadian, et al. Numerical simulation on optimized warm extrusion process of shaft cover and billet structure [J]. Forging & Stamping Technology, 2011, 36(6): 114-119.
- [21] 郭成, 秦莹, 王长林, 等. 套筒零件挤压成形金属流动规律研究[J]. 锻压技术, 2008, 33(4): 43-47.
GUO Cheng, QIN Ying, WANG Changlin, et al. Study of flowing law of metal in extrusion forming process for tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2008, 33(4): 43-47.