第12卷 第2期

2018年6月

**文章编号:**1673-9981(2018)02-0107-06

# GH4169 弯头热推扩成形有限元模拟及验证

## 洪 宇

广东省半导体产业技术研究院,广东 广州 510650

摘 要:为了获得比较理想的热推加工参数,采用有限元法对变形高温合金 GH4169 热推扩成形过程中金 属流动及变形特点进行了分析,揭示了选用恰当的工艺参数是热推扩成形获得等壁厚弯头的关键,并研究 了扩径比 K、弯曲角α、温度及推制速度的影响规律.结果表明:利用模拟分析可得出优化后的参数,即K= 1.3 及α=40°、推制速度 v=3 mm/s、加热温度 800 ℃;通过网格法分析计算,经热推扩成形后 GH4169 合 金壁厚偏差可控制在 6%以内.说明利用优化的成形参数可制备出等壁厚 GH4169 合金弯头,为批量生产 工艺制定提供了依据.

关键词:GH4169合金;环形管;有限元;热推扩

**中图分类号:** TG 379 文献标识码: A

镍基高温合金以 Fe,Ni,Co 为基体,具有较好 的高温强度、良好的抗氧化和抗热腐蚀性能及良好 的疲劳性和断裂韧性等综合性能,可在 600 ℃以上 高温及一定应力工况下长期工作<sup>[1-2]</sup>.随着镍基高温 合金应用的不断拓展,GH4169 合金等壁厚弯头已 得到越来越广泛的应用.传统的弯头生产方法,如滚 压弯制法、轨道弯制法、模压弯制法、隧道法、板坯压 片法等均有各自的缺点,不能完全满足需求.热推扩 成形技术可避免传统弯管工艺成形时弯管凸边受拉 减薄、凹边受压增厚而造成的管壁不均匀现象,具有 变形均匀、生产效率高等优点,是制备等壁厚弯头的 有效方法<sup>[3-7]</sup>.

## 1 实验部分

首先采用有限元法对 GH4169 合金管材推制成 形过程进行了模拟,分析各种工艺参数如扩径比、芯 棒弯曲角、推制速度及温度等对管材推制成形效果 的影响规律,并优选出相应的参数.为验证模拟结 果,在中频感应加热弯管推制机上进行了 GH4169 合金环形管推制实验.

试验用原料为镍基高温合金 GH4169,其成分 列于表 1.图 1 为热推扩成形工艺过程示意图.

| 表 1 | 镍基高温 | 合金 GH4169 | 组成成分 |
|-----|------|-----------|------|
|-----|------|-----------|------|

| Table I Composition of nickel alloy GH410 | Table 1 | Com | osition | of nickel | alloy | GH416 | 69 |
|---|---------|-----|---------|-----------|-------|-------|----|
|---|---------|-----|---------|-----------|-------|-------|----|

| 成分     | Ni        | Cr        | Nb        | Мо        | Al        | Ti        | Fe |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|
| 含量 w/% | 50.0~55.0 | 17.0~21.0 | 4.75~5.50 | 0.80~3.30 | 0.20~0.60 | 0.15~0.65 | 余量 |

## 2 结果分析与讨论

#### 2.1 有限元模拟

为了获得理想的热推制工艺参数,首先对加工

过程进行有限元模拟分析.采用弹塑性大变形有限 元法,在 MARC 有限元软件平台上进行二次开发, 建立电流控制局部加热的三维耦合计算机模拟系 统.在 CAD Interface 模块中用 CATIA 造型软件以

收稿日期:2017-12-07 作者简介:洪宇(1971-),男,安徽黄山人,本科,工程师.





图 1 热推扩成形生产过程示意图 Fig.1 Sketch map of hot push-expanding forming process

IGS 格式读入模具几何尺寸,假定模具为理想的刚 塑性 热 传 导 材 料,选 用 8 节 点 六 面 体 单 元 (ELEMENT 43)进行模拟.管坯采用 8 节 点六面体 单元(ELEMENT 7),同时进行变形和传热的热力 耦合分析.模具和坯料之间采用 Flux 接触传热,模 具和坯料与周围环境之间分别采用 FLIM 方式和 Radia 方式辐射传热. 热推扩成形采用中频感应加 热,通过调控用户子程序实现宽度为 20 mm 的感应 线圈加热过程.

本试验所模拟的管材初始直径  $D_0 = 65 \text{ mm}$ 、壁 厚 t=2.3 mm,制备的环形管外径 D=85 mm、壁厚 t=2.3 mm、环中径 R=150 mm.管材的加热温度控 制在  $800 \sim 850 \ \mathbb{C}$ 之间,推制速度为  $2 \sim 5 \text{ mm/s}$ ,工 件和模具间的摩察系数为 0.15.利用该模型分别选 取不同的加工参数,包括扩径比 K、芯棒的弯曲角、 推制速度及温度等,模拟不同条件下的成形效果,为 制定实际加工参数提供依据.图 2 为环形管热推扩 成形有限元模型.



Fig. 2 Finite element model of tube billet

#### 2.1.1 扩径比优化分析

扩径比 K 是成形羊角芯棒设计的重要参数,K=  $(D-t)/(D_0-t)$ .根据以往加工经验,K 值一般取 1.2~1.5,本实验模拟计算时 K 值分别取 1 和 1.33.图 3 为扩径作用对壁厚的影响.从图 3 可见: 在纯弯曲没有扩径变形作用时,即 K=1 时,环管壁 厚极不均匀,从外弧到内弧环管内弧壁增厚明显(0 °对应环管外弧位置,180 °对应环管内弧位置);当在 扩径变形作用下,即 K=1.33 时,环形管壁厚的均 匀性得到明显改善.





图 4 为不同 K 值下环向壁厚的变化曲线. 从图 4 可见:随着 K 值的增加,壁厚均匀性明显改善;当 K=1.3 时,推制成形的管材壁厚比较均匀,表明扩 径比 K 对壁厚有着明显的影响,尤其是内弧壁厚. 理论上,K 值增大能减小弯曲变形带来的内弧壁增 厚问题,但 K 值过大会使内弧壁厚变薄,而且 K 值 越大,扩径力增大,摩擦力也会增大,造成端口截面 畸变严重,甚至导致推扩成形失败.此外,内弧金属 受力复杂,壁厚变化大.因此,将 K=1.3 作为实际 加工的优选参数.



图 4 不同 K 值时的环向壁厚



#### 2.1.2 芯棒弯曲角度对壁厚的影响

羊角芯棒的弯曲角度 α 是指模具弯曲扩径变形 段中心线上起点与终点法线方向之间的夹角. 以弯 管中心线顶端为起始点,位置节点为弯管中心线标 注点至起始点之间的轴向距离. 选定扩径比 K= 1.30 进行优化分析,图 5 和图 6 分别为不同弯曲角 时环形管内外侧壁厚的分布情况.从图 5 可以看出: 当弯曲角较小时(a=30°),环管内弧壁厚不均匀程 度增加,这是因为扩径弯曲变形速度过快,金属流动 剧烈;弯曲角度过大(a=50°),壁厚减薄比较严重, 这是因为延缓了变形速度,但增加了坯料与羊角模 的接触长度,造成摩擦力加大,引起起皱等缺陷;当 芯棒弯曲角为 40°时,管材经推制成形后可获得均匀 一致的壁厚.从图 6 可以看出,在各种不同芯棒弯曲 角条件下,外侧壁厚的变化不是很明显.因此,将内测 壁厚比较均匀所对应的  $\alpha = 40$  °作为实际加工参数. 2.1.3 推制速度及温度的影响

图 7 为温度对壁厚的影响曲线. 从图 7 可以看 出:当推制温度在 800 ℃左右时,壁厚变化率较低; 当温度过高时,则会造成管壁堆积,引起壁厚的大幅 度增加. 因此,应将推制加工温度控制在 800 ℃ 左右.



#### 图 5 弯曲角对环形管内侧壁厚的影响





#### 图 6 弯曲角对环形管外侧壁厚的影响





Fig. 7 Influence of temperature on the wall thickness

对于推制速度,分别选取了 v=2.0,2.5,3.0, 3.5,4.0,4.5 和 5.0 mm/s 进行模拟试验.结果如图 8 所示.



图 8 为不同速度下的温度分布情况. 从图 8 可 以看出:速度慢时( $v=2\sim2.5 \text{ mm/s}$ ),管坯单位长 度内加热时间长,局部温度大大超过 850 °C,此时会 造成壁厚的大幅度增加;当推制速度过快( $v=4\sim5$ mm/s),则管坯加热时间太短,低于 750°C,达不到 成形所需的温度;当 v=3 mm/s时,推制速度比较 适中,既可以保证管坯达到适宜的加工温度(约 800 °C),又可以控制成形过程中壁厚的均匀性. 因此,可 采用 v=3 mm/s 作为实际加工参数.

#### 2.2 推制实验验证

推扩成形在中频感应加热弯管推制机上进行, 工艺参数为有限元模拟分析所确定的优选数值,即 扩径比 K=1.3、芯棒弯曲角  $\alpha=40$ °、推制速度 v=3 mm/s、加热温度 800 °C.实际加工的 GH4169 合 金管材尺寸与有限元模拟分析时所设定的相同,即 推制前直管直径 65 mm、壁厚 2.3 mm,经推扩加工 后直径 85 mm、壁厚 2.3 mm、环中径 R=150 mm 的 90 ℃弯头.推扩前在直管坯表面划出边长 L=5 mm 的正方形 网格,首先在管坯圆周刻划间距 5 mm、相互平行的回转刻线(经线),再沿管坯轴线方 向刻画间距 5 mm、相互平行的直线(纬线),通过比 较推扩前后网格尺寸的变化量,就可以计算出不同 部位的变形量.

推扩成形前后网格变化情况如图 9 所示.从图 9 可见:变形后的网格线同原规则整齐的网格线相 比较有着明显地变化,原来的正方形网格变形后呈 等腰梯形;全部纬线均由原来的直线变为弯曲的弧 线,其中处于中心截面以上的纬线长度基本没有变 化,而处于中心截面以下的内弧缩短,处于中心截面 以上的外弧伸长;从经线的变化情况可以看出,原先 直管坯上相互平行的各回转经线,已不再平行,变成 以弯管的弯曲中心为原点,沿弯管的弯曲半径方向 放射状分布,观察其中任意一条经线都会发现,处于 内弧面弧顶附近的经线伸长量最大,沿经线由内弧 面至外弧面,这种伸长量呈递减趋势.

热推扩成形实际是弯曲变形与偏心扩径变形的 叠加,弯曲变形使内弧管壁在弯曲压应力的作用下 增厚,偏心扩径发生在弯管内弧一侧,它使内弧金属 在环向拉应力作用下向外弧流动,使得管壁减薄,因 此只要弯曲变形量与偏心扩径量在环形管成形过程 中保持一定的比例,就可以保证推制出壁厚均匀的 环形管.在成形过程中,环形管内弧金属在环向扩径 力和轴向弯曲压应力的作用下,从内弧沿两侧向外 弧对称流动,为保证环形管内弧金属塑性流动过程 和外弧金属弯曲变形过程的协调性和连续性,环形 管内外弧之间的金属网格必呈等腰梯形.



为了定量分析推制成形的效果,在成形后的 90° 弯管的变形均匀区(避开推制初始及末尾段),确定 一圈处于同一经度位置的网格进行 L,和 L<sub>0</sub>的测量 (L,为网格径向边长,L<sub>0</sub>为网格轴向边长).测量节点 分别为从外侧至内侧径向所对应的网格单元.测量 结果列于表 2.

表 2 网格尺寸测量结果 Table 2 The result of mesh size measurement

| 测点    | $L_r/mm$ | $L_{	heta}/\mathrm{mm}$ | ε <sub>r</sub> 1) | $\varepsilon_{\theta^{2}}$ | ε <sub>t</sub> <sup>3)</sup> |
|-------|----------|-------------------------|-------------------|----------------------------|------------------------------|
| 180 ° | 7.56     | 3.13                    | 0.413             | -0.468                     | -0.055                       |
| 135 ° | 7.09     | 3.24                    | 0.391             | -0.434                     | -0.043                       |
| 90 °  | 5.38     | 4.38                    | 0.073             | -0.132                     | -0.059                       |
| 45 °  | 5.13     | 4.88                    | 0.026             | -0.024                     | 0.002                        |
| 0     | 5        | 5                       | 0                 | 0                          | 0                            |

注:1) $\epsilon_r$ 为径向应变, $\epsilon_r = \ln(L_r/L)$ ;

2)ε<sub>θ</sub>为轴向应变,ε<sub>θ</sub>=ln(L<sub>θ</sub>/L);

3) $\epsilon_t$ 为壁厚方向应变, $\epsilon_t = -(\epsilon_r + \epsilon_{\theta})$ .

由表 2 可知:内弧的网格变化最大,这是由于轴向产生压缩变形使网格缩短,而径向产生拉伸变形 使网格伸长,表明金属从外侧到内侧变形程度逐步 加剧;ε,≠0,表明环形管各部位的壁厚并不相等.

由厚度方向的应变  $\epsilon_t$ 可以求得环形管的实际壁 厚  $t=2.3e^{\epsilon_t}$ ,以检测壁厚减薄量.当  $\epsilon_t$ 最小时,即环 形管的壁最薄,将  $\epsilon_t = -0.059$ 代人上式中得 t = 2.17 mm,环形管壁的最大减薄量 $\Delta t = 2.3 - 2.17 = 0.13$  mm.壁厚偏差可控制在 6%以内,表明壁厚均 匀,通过有限元模拟分析所确定的加工参数科学合 理,在实际推制成形过程中效果良好.

## 3 结 论

通过有限元模拟分析及实际推制成形加工验 证,表明良好的成形条件包括两个主要方面:一是由 扩径比 K 和芯棒弯曲角 α 两个参数所决定的模具 外形条件;另一个是推制速度及加热温度所决定的 成形条件.如果这两方面参数处于适宜的区间,且各 参数之间匹配关系正确,就可以保证推制出的弯管 产品外形良好、壁厚均匀.同时对实际推制成形的 GH4169 合金弯管产品的尺寸的实测分析,获得以 下结论:

(1)适宜的扩径比 K 和芯棒弯曲角  $\alpha$  是决定模 具外形尺寸的重要参数,经有限元分析,在本产品加 工条件下应选取 K=1.3 和  $\alpha$ =40 °;

(2)推制速度与加热温度共同构成了推制加工的成形条件,经有限元分析,在本产品加工条件下应选取 v=3 mm/s、加热温度 800 ℃;

(3)利用模拟分析所优化后的参数可推制成形 出 GH4169 合金弯头,利用网格法对其形变量进行 分析计算,壁厚偏差可以控制在 6%以内,表明壁厚 均匀.

## 参考文献:

- [1] 师昌绪,陆达,荣科.中国高温合金 40 年[M].北京:中国 科学技术出版社,1996:145.
- [2] 陈国良. 高温合金学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1998:177.
- [3] 李林涛,曾卫东,殷京瓯.中频感应加热纯钛弯管成形过 程中的有限元模拟[J].锻压机械,2006(6)130-133.
- [4] 陈军,杨海瑛,段文森.扩径推弯弯头的重要工艺参数 [J].中国有色金属学报,2010,20(特刊):704-708.
- [5] 苏航标,曾卫东,赵永庆,等. 阿基米得螺线系数选择对 模拟钛弯管推扩成形的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008,37(5):775-778.
- [6] 池强,刘腾跃,燕铸,等.油气管道用弯管感应加热工艺 研究[J].热加工工艺,2012,41(13):113-115.
- [7] 鹿晓阳,史宝军,徐秉业,等. 热推弯管成形过程材料本 构模型[J]. 锻压机械,1998(4):19-22.

(下转第133页)

optimized in the research, such as feeding pressure and feeding density of hydrocyclone, ball mount and regrinding density of vertical mill. Compared with the indexes before optimization, the grinding technical efficiency increased by 14. 47%, the copper distribution rate difference of the qualified particle between hydrocyclone overflow and copper rough concentrate increased by 1. 57%. While the raw ore assayed 0. 70% Cu on average, the grade of copper concentrate and its copper recovery increased by 1. 40 and 2. 51 percentage points respectively.

Key words; copper-sulfur ore; copper rough concentrate; regrinding process

(上接第 111 页)

## Finite element simulation of hot-push forming and confirmation on GH4169 ring pipe

#### HONG Yu

Guangdong Institute of Semiconductor Industrial Technology, Guangzhou 510650, China

Abstract: In order to obtain ideal thermal processing parameters and deformation of high temperature alloy GH4169 was investigated using finite element software to thermal expanding forming process of the metal flow and deformation characteristics are analyzed, and reveals the implementation of appropriate process parameters such as thermal expanding forming the wall thickness bend the key. The influence law of expanding diameter ratio, bending angle, temperature and pushing speed on forming process was studied. The results show that optimized parameters obtained by simulation analysis are following: K=1. 3,  $\alpha = 40^{\circ}$ , v=3 mm/s, T=800 °C. Analysis and calculation by grid method, the thickness deviation of GH4169 alloy wall thickness can be controlled within 6% after the hot push and expansion. It is shown that the forming optimized parameters can be used to prepare the wall thickness elbow of GH4169 alloy, and provide the basis for the batch production process.

Key words: alloy GH4169; annular tube; finite element; thermal expanding