

楔横轧成形 GH4169 合金的热力耦合数值模拟

张 宁 王宝雨[✉] 胡正寰

北京科技大学机械工程学院,北京 100083

[✉]通信作者, E-mail: bywang@ustb.edu.cn

摘 要 采用有限元软件 DEFORM-3D 对 GH4169 合金的楔横轧成形进行了热力耦合数值模拟,得到了 GH4169 合金轧件的金属流动情况、温度场的分布规律以及轧件与轧辊间的轧制力和力矩,并与 45#钢进行了对比分析。结果表明:在楔横轧成形中, GH4169 合金轧件的轴向金属流动规律不同于 45#钢,其外层金属的轴向流动大幅度滞后于心部;各力能参数都要大于 45#钢,且最高为 45#钢的 2.15 倍;变形温度始终高于 45#钢,最高温升比 45#钢多 6.21%。

关键词 高温合金; 楔横轧; 热力耦合分析; 有限元法

分类号 TG 335.19

Thermomechanical coupled numerical simulation of GH4169 alloy for cross wedge rolling

ZHANG Ning, WANG Bao-yu[✉], HU Zheng-huan

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉] Corresponding author, E-mail: bywang@ustb.edu.cn

ABSTRACT Thermal-mechanical coupled numerical simulation of GH4169 alloy during cross wedge rolling (CWR) was carried out using the finite element software DEFORM-3D. The metal flowing and temperature distribution of rolled pieces, and the rolling force and torque between the rolled piece and the roller were obtained and comparatively analyzed with 45# steel. The results show that the axial metal flowing of GH4169 during CWR is different from that of 45# steel, and the axial metal flowing at the surface substantially lags behind that at the center. All the energetic parameters are much greater than 45# steel's, and the maximum value is 2.15 times that of 45# steel. Meantime the deformation temperature is always higher than 45# steel's, and the maximum temperature rise is 6.21% more than that of 45# steel.

KEY WORDS superalloys; cross wedge rolling; thermomechanical coupling analysis; finite element methods

楔横轧是一种高效清洁的近净轴类零件成形技术,被公认为当今先进制造技术的主要组成部分^[1],现已广泛应用于汽车、拖拉机和摩托车等轴类零件毛坯的生产。目前,对轴类件用钢的楔横轧成形已进行了大量的相关研究,但对高温合金的楔横轧成形研究却较少。高温合金在航空领域应用广泛,其锻造性能有以下特点^[2-6]:工艺塑性差;高温下的变形抗力大;在低温区导热性差;锻造温度范围窄等。因此高温合金的楔横轧成形工艺需要进一步的补充和完善,使其具有更广的适用性,同时又可为高温合金的塑性热成形提供一种新的高效的生产工艺。

为了解和掌握高温合金材料的楔横轧成形特点,本文选取最具代表性的高温合金 GH4169 和轴类用钢 45#钢进行对比分析。通过 DEFORM-3D 有限元软件分别对这两种材料进行楔横轧热力耦合数值模拟,得到了轧件的金属流动情况、轧件与轧辊间的轧制力和力矩以及温度场的分布规律。

1 有限元模型的建立

1.1 材料本构关系的确定

对于一定化学成分和组织状态的金属材料来说,变形程度、速度、温度和变形时间等因素构成了

收稿日期: 2010-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975023); 国家科技重大专项(2009ZX04014-074); 北京市自然科学基金资助项目(3082013)

综合的变形条件^[7]. 对金属变形行为的研究最终体现在对金属流动规律的描述上,本构方程是表达这种关系的具体形式,它反映了流动应力和应变速率、温度、应变和材料初始条件之间的变化关系. 因此,准确确定材料的本构关系对于研究金属的变形至关重要.

热变形中,对于给定的材料,材料的初始条件是不变的,那么流动应力是应变、应变速率和温度等热变形参数的函数^[8-9].

1.1.1 GH4169 合金的本构方程

GH4169 合金在变形过程中对变形温度和应变速率都很敏感,且楔横轧的轧制过程属于大变形问题,因此本文采用了 Kumar 模型描述其本构关系^[10]:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(a\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中, A 、 a 和 n 为材料常数或应变的函数, Q 为变形激活能, R 为气体常数 ($R = 8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), σ 为流动应力, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, T 为变形温度.

将棒材 GH4169 合金加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱试样,在 Gleeble1500 试验机上进行热模拟压缩实验,变形温度分别为 950、1000、1050 和 1100 °C,应变速率分别为 0.1、1 和 20 s^{-1} ,得到材料的真应力-应变曲线,通过对其线性回归得到 GH4169 合金的本构方程:

$$\dot{\varepsilon} = 7.2333 \times 10^{15} [\sinh(0.0012 \times \sigma)]^{6.7551} \cdot \exp\left(-\frac{313620}{8.314 \times T}\right) \quad (2)$$

表 1 主要工艺参数

Table 1 Main technological parameters

成形角/(°)	展宽角/(°)	轧件直径/mm	断面收缩率/%	展宽长度/mm	轧件初始温度/°C	轧辊转速/(r·min ⁻¹)	轧辊初始温度/°C	轧辊直径/mm
25	7	40	60.9	80	1050	8	20	630

本文建立的是热力耦合模型,因此充分考虑了热传导、对流换热、热辐射、塑性功及摩擦生热等因素的影响, GH4169 合金^[11]和 45#钢^[13]的主要换热系数如表 2 所示.

表 2 换热系数

Table 2 Main heat transfer coefficients

材料	接触热传导系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	对流换热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	热功转换系数
GH4169	2.5×10^4	200	0.9
45#钢	2.9×10^4	200	0.9

2 轴向金属流动特点

在轧制过程中轧件的金属流动规律可通过有限

元软件 Deform-3D 后处理中跟踪点的位移来描述. 本文通过对比分析两种材料轧件轧后的轴向位移,得出楔横轧成形高温合金过程中金属的流动特点和规律.

1.1.2 45#钢的流动应力-应变曲线

Deform-3D 软件带有材料库,提供了各种常用材料的流动应力-应变曲线,其中 AISI-1045 相当于中国牌号 45#钢. 45#钢的弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,密度 $\rho = 7.82 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比 $\nu = 0.3$ ^[12].

1.2 有限元几何模型及边界条件的建立

采用三维设计软件 Pro/E 建立楔横轧成形的几何模型,如图 1 所示. 该模型由带有模具的轧辊、轧件和导板组成. 考虑到模型的对称性,为节约计算时间,只取模型的一半进行计算,同时对轧件施加对称面约束.

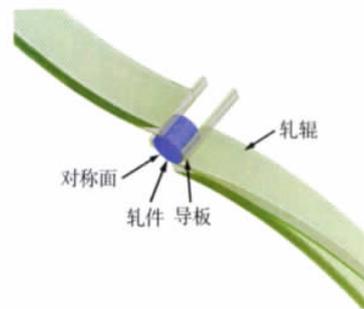


图 1 楔横轧模型

Fig. 1 Cross wedge rolling model

元软件 Deform-3D 后处理中跟踪点的位移来描述. 本文通过对比分析两种材料轧件轧后的轴向位移,得出楔横轧成形高温合金过程中金属的流动特点和规律.

楔横轧轧制成形模拟的主要工艺参数如表 1 所示,轧辊与轧件之间的摩擦采用剪切摩擦模型,同时忽略导板与轧件之间的摩擦.

跟踪点的选取如图 2(a) 所示,对轧件截取了距轴向对称中心不同位置 (0、3、8、15、25 mm) 的五个截面 (I、II、III、IV 和 V),同时,在每个截面上选取 21 个跟踪点,从心部到表面沿半径方向均匀分布. 图 2(b) 和图 2(c) 分别是 GH4169 合金和 45#钢轧件轧后各跟踪点的分布情况. 从图中可明显的看出,两种材料的轧件在楔横轧成形后各跟踪点轴向和周向的分布情况是不同的.

跟踪点的选取如图 2(a) 所示,对轧件截取了距轴向对称中心不同位置 (0、3、8、15、25 mm) 的五个截面 (I、II、III、IV 和 V),同时,在每个截面上选取 21 个跟踪点,从心部到表面沿半径方向均匀分布. 图 2(b) 和图 2(c) 分别是 GH4169 合金和 45#钢轧件轧后各跟踪点的分布情况. 从图中可明显的看出,两种材料的轧件在楔横轧成形后各跟踪点轴向和周向的分布情况是不同的.

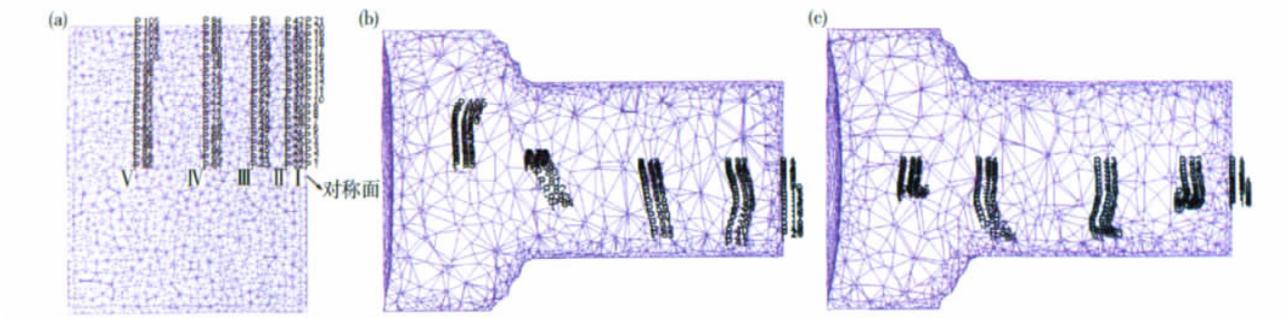


图 2 跟踪点分布. (a) 轧前; (b) 轧后的 GH4169 合金; (c) 轧后的 45# 钢

Fig. 2 Location of tracking points: (a) before rolling; (b) GH4169 alloy after rolling; (c) 45# steel after rolling

如图 3 所示是轧制结束后 GH4169 合金和 45# 钢轧件各跟踪点的轴向位移图。由图可知,两种材料在轧制过程中各截面跟踪点的变化趋势相同: (1) 各截面各节点的轴向位移不等; (2) 不同截面的轴向位移也不等,离轧件对称中心位置越远,轴向位移越大。

对于各截面的轴向位移: 第 I 截面处于轧件的对称中心,各跟踪点的位移为零; 处于展宽段的第 II、III 截面, GH4169 合金轧件的各跟踪点的轴向位移大于 45# 钢; 第 IV 截面在精整段, GH4169 合金轧件中靠近表面的跟踪点要比 45# 钢中相同点的位移小,其余点的位移相差不大; 第 V 截面中各点的轴向位移量几乎相等,是由于其在非轧制区,整体随轧件的轴向延伸而延伸。

为了更好地对比分析,将各跟踪点轴向位移减去相同起始横截面中心点的轴向位移,得到 GH4169 合金和 45# 钢轧件各跟踪点的相对轴向位移,如图 4 所示。

对比图 4 (a) 与 4 (b) 可看出: (1) 对于轧件各跟踪点, GH4169 合金轧件各跟踪点轴向相对位移的最大正值为 0.17 mm,最小的负值为 -2.98 mm,而对于 45# 钢轧件的最大正值为 0.71 mm,最小的负值为 -2.30 mm,可见在 GH4169 合金轧件中各跟踪

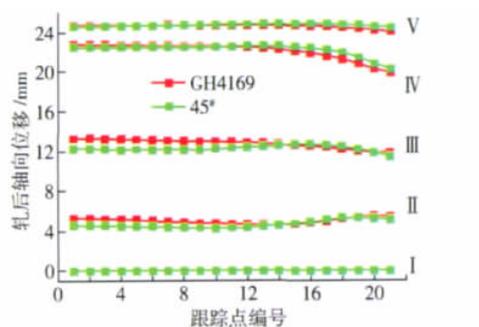


图 3 轧件各跟踪点的轴向位移

Fig. 3 Axial displacement of tracking points in rolled pieces

点的轴向流动滞后于中心点较多,而超前较少,同时轴向变形的不均匀程度大于 45# 钢。(2) 对于轧件的各个截面, 45# 钢轧件各截面跟踪点的轴向相对位移的变化趋势相同,都是先为负值再转为正再为负,而 GH4169 合金轧件中只有第 II 截面的变化趋势与 45# 钢相同,其余截面各跟踪点的相对位移始终为负值,可见 GH4169 合金轧件各截面(除靠近中心的截面外)外层金属的轴向流动始终滞后于心部。

在楔横轧成形缺陷中,端面凹心的出现主要是由于轧件外层金属轴向位移大幅度超前于心部所致,因此从上述分析可知,楔横轧成形 GH4169 合金轧件出现端面凹心的程度比 45# 钢小。

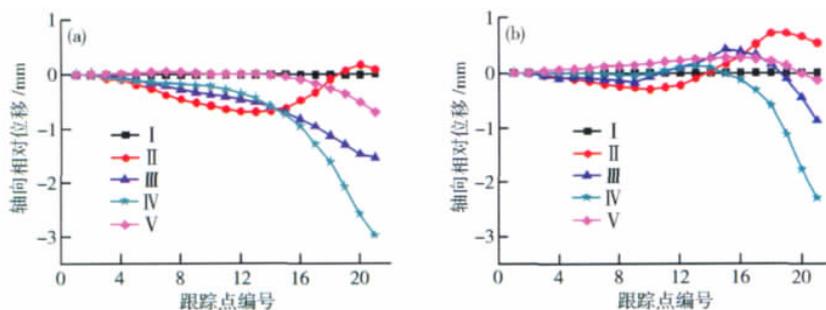


图 4 轧件各跟踪点的相对轴向位移. (a) GH4169 合金; (b) 45# 钢

Fig. 4 Relative axial displacement of tracking points in rolled pieces: (a) GH4169 alloy; (b) 45# steel

3 轧制力能参数

楔横轧成形过程中的轧制压力、轧制力矩的确定是十分重要的。轧制压力是轧机机座中主要零部件强度与刚度计算的主要依据之一,而轧制力矩又是电动机功率计算的主要依据之一^[1]。此外,高温合金的变形抗力高,与一般合金结构钢同样几何尺寸的锻件,需要更大的能量或载荷的设备来进行锻

造^[2]。因此有必要对轧制过程中的各力能参数进行分析。

如图 5 所示是 GH4169 合金和 45# 钢轧件在轧制过程中径向力、切向力、轴向力以及轧制力矩的变化曲线图。从图中可以看出,两种材料同种力能参数的变化趋势是一致的:在楔入段,各力能参数急剧增加,在楔入段结束时,达到最大值;在展宽段,各力能参数比较稳定。

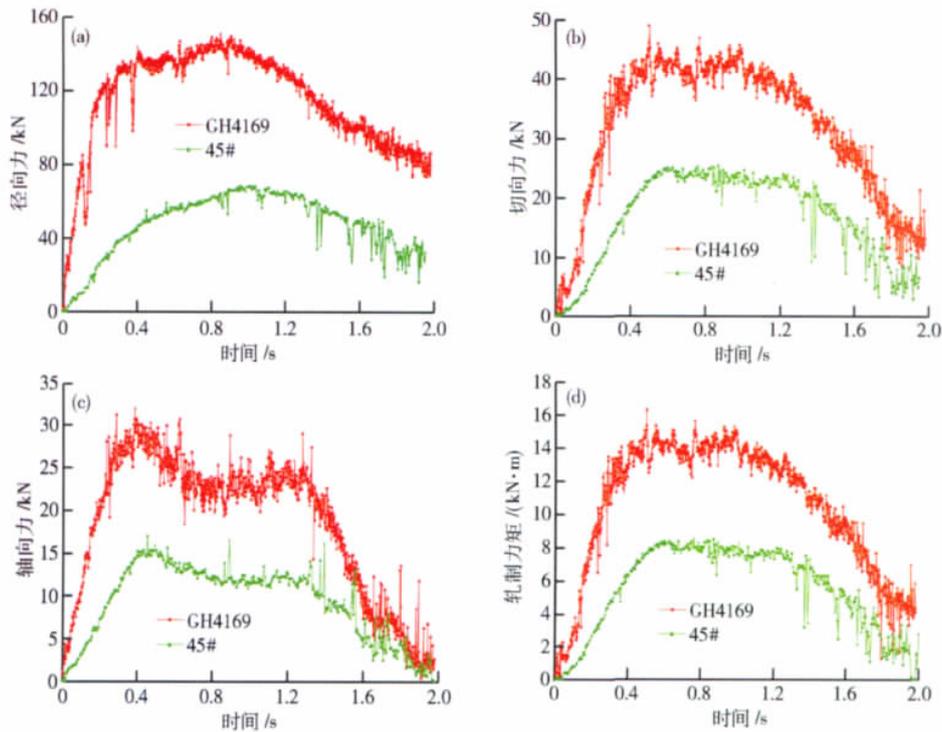


图 5 力能参数变化曲线。(a) 径向力; (b) 切向力; (c) 轴向力; (d) 轧制力矩

Fig. 5 Change curves of energetic parameters: (a) radial force; (b) tangential force; (c) axial force; (d) rolling torque

从图 5 可知: ①45# 钢轧件的径向力最大为 68 kN, 而 GH4169 合金轧件最大可达到 146 kN, 是 45# 钢的 2.15 倍(图 5(a)); ②对于切向力(图 5(b)), 数值比径向力小, 45# 钢轧件最大为 24 kN, 而 GH4169 合金轧件为 46 kN, 是 45# 钢的 1.92 倍; ③轧制力中数值最小的是轴向力(图 5(c)), 45# 钢轧件最大为 15 kN, 而 GH4169 合金轧件最大为 30 kN, 是 45# 钢的 2 倍; ④对于轧制力矩(图 5(d)), 45# 钢轧件最大为 8 kN·m, 而 GH4169 合金轧件最大可达到 15 kN·m, 是 45# 钢的 1.89 倍。

可见, GH4169 合金轧件各力能参数的值都要大于 45# 钢, 且最高可达到 45# 钢的 2.15 倍。这是因为在相同温度下 GH4169 合金的变形抗力比 45# 钢大, 相应地, 变形需要施加的力和力矩也要多。因此, 楔横轧成形 GH4169 合金时要选择能量较大的设备。同时, 提高应变速率和降低变形温度都将导

致变形抗力增大, 因此可选择较低的速度和较高的温度来实现 GH4169 合金轧件的楔横轧成形。

4 温度的分布特点

在楔横轧轧制过程中, 轧件变形生热导致温度升高, 而与轧辊及周围介质的热交换又使其温度下降。为了更好地对轧件的温度变化进行分析, 对轧件选取了如图 2 所示的五个截面, 但在每个截面上只取从心部到表面沿半径方向均匀分布的五个点(P1 到 P5)进行分析。图 6 是 GH4169 合金和 45# 钢轧件在楔横轧轧制过程中不同截面的温度变化曲线图。

对于从心部(P1)到表面(P5)的五个跟踪点, 在 GH4169 合金和 45# 钢轧件中温度的分布情况不完全相同。

(1) 靠近中心的 1、2 和 3 点在两种材料中温度

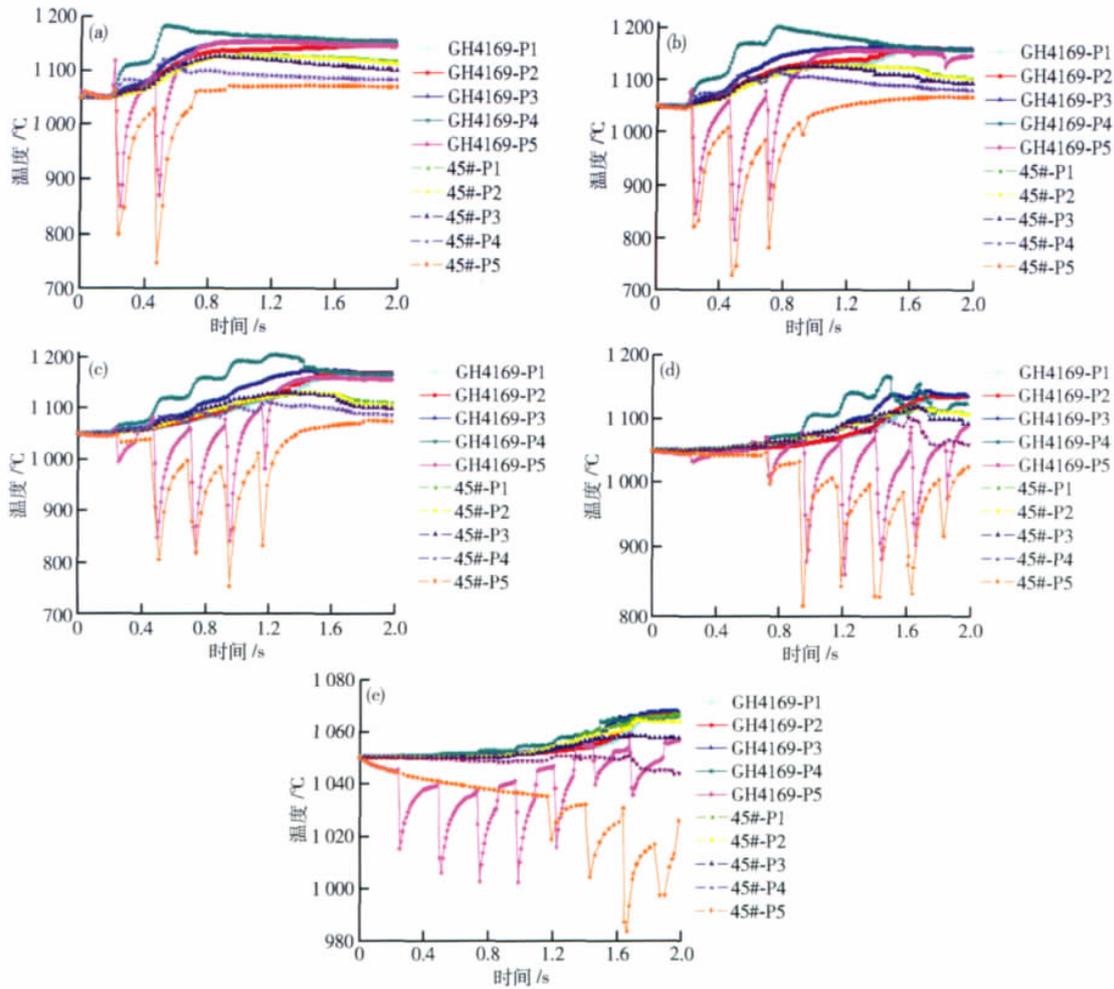


图6 不同截面的温度变化曲线。(a) 第I截面; (b) 第II截面; (c) 第III截面; (d) 第IV截面; (e) 第V截面

Fig. 6 Change curves of temperature on different cross-sections: (a) No. I; (b) No. II; (c) No. III; (d) No. IV; (e) No. V

的变化趋势是不同的。在GH4169合金轧件中温度逐渐上升。这是因为变形热始终存在,而且GH4169合金较低的导热率(表3)使轧件内部只能传递较少的热量,另外,中心处的散热条件差,这些都会造成

温度的缓慢上升。但是在45#钢中温度却是缓慢下降的,这是由于轧件内的热传导,轧件与轧辊、轧件与空气之间的热交换量,与变形热相比占主导,致使温度降低。

表3 GH4169合金和45#钢的导热率

Table 3 Thermal conductivity of GH4169 alloy and 45# steel

温度/°C	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200
GH4169合金的导热率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	11.9	13.6	15.2	16.7	18.5	20.9	24.1	26.1	26.3	30.9
45#钢的导热率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	50.7	48.1	45.7	41.7	38.3	33.9	30.1	24.7	32.9	29.8

(2) 靠近表面的4、5点在两种材料中温度的变化趋势是相同的。4点的温度先上升后下降,这是因为变形生热导致的温升大于导热的温降,温度上升;而在变形间隔内,表面散热又使温度下降。表面处5点的温度变化剧烈,轧件与轧辊模具瞬时接触,模具的激冷作用使表面温度急剧下降,在脱离接触后,轧件表面与内部高温进行热传递又使温度逐渐上升,因此轧件与模具的反复接触导致5点温度先

上升后下降循环变化。另外4点温度上升时5点温度下降,这是因为轧件与轧辊的接触传热导致5点温度下降,而变形生热又使4点温度上升。值得注意的是,GH4169合金轧件中4点的瞬时最高温度可达1200℃,因此轧件靠近表面的区域会产生过热或过烧等缺陷;而5点的瞬时最低温度为750℃,因此轧件的外层金属容易产生裂纹或混晶等现象。

由图6可知, GH4169合金轧件的温升(最高为

150 ℃) 大于 45#钢(最高为 80 ℃) ,而温降(最多为 300 ℃) 又小于 45#钢(最多为 350 ℃) . 这是因为在相同的工艺条件下 ,GH4169 合金变形抗力大 ,在成形过程中塑性功转化的热能较多 ,而且导热性差、与轧辊接触换热量又少 ,因此在整个变形过程中 GH4169 合金轧件的温度总是高于 45#钢. 此外 ,在轧制的精整段 ,GH4169 合金轧件的温度分布在 1 090 ~ 1 165 ℃ 的区间内 ,而其轧制温度范围为 927 ~ 1 120 ℃ ,可见楔横轧成形 GH4169 合金轧件时温度略微偏高 ,但还是较为理想.

5 结论

(1) 通过对 GH4169 合金和 45#钢轧件在楔横轧成形后轴向位移的变化曲线进行对比分析 ,发现 GH4169 合金轧件的金属流动规律不同于 45#钢 ,轧件外层金属的轴向流动大幅度滞后于心部. 因此采用楔横轧成形后 ,GH4169 合金轧件出现端面凹心的程度比 45#钢小.

(2) GH4169 合金轧件在楔横轧轧制过程中径向力、切向力、轴向力以及轧制力矩的数值都要大于 45#钢 ,且最高为 45#钢的 2.15 倍. 由于应变速率的降低和变形温度的升高使变形抗力减小 ,从而使轧制力降低 ,因此在楔横轧轧制范围内 ,选择较低的速度和较高的温度将有利于实现 GH4169 合金轧件的楔横轧成形.

(3) 通过对两种材料的温度分布进行对比分析可知: GH4169 合金轧件在楔横轧成形过程中温升多而温降少 ,温度始终要高于 45#钢; GH4169 合金轧件的瞬时高温会导致轧件局部出现过热或过烧现象 ,而瞬时的低温则容易产生裂纹或混晶现象. 因此 楔横轧成形 GH4169 合金时 ,要选择合适的工艺参数来减少轧件的温升和温降使温度保持在 GH4169 合金的轧制范围内 ,避免缺陷的产生.

参 考 文 献

- [1] Hu Z H , Zhang K S , Wang B Y , et al. *The Forming Technology and Simulation of Shafts with Cross Wedge Rolling*. Beijing: Metallurgical Industry Press , 2004
(胡正襄 , 张康生 , 王宝雨 , 等. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真. 北京: 冶金工业出版社 , 2004)
- [2] Wang L A. *Manufacturing Engineering for Hard Wrought Alloy Forgings*. Beijing: National Defense Industry Press , 2005
(王乐安. 难变形合金锻件生产技术. 北京: 国防工业出版社 , 2005)
- [3] He T , Wang B Y , Hu Z H. Thermal-mechanical coupled simulation of Inconel718 alloy cross wedge rolling. *J Plast Eng* , 2008 , 15(3) : 157
(何涛 , 王宝雨 , 胡正襄. Inconel718 合金楔横轧成形热力耦合模拟. 塑性工程学报 , 2008 , 15(3) : 157)
- [4] Li C , Li M Q , Wang K. Deformation behavior of nickel based superalloy GH4169 through solution treatment. *Acta Aeronaut Astronaut Sin* , 2010 , 31(2) : 368
(李晨 , 李森泉 , 王柯. 固溶处理 GH4169 合金的高温变形行为. 航空学报 , 2010 , 31(2) : 368)
- [5] Chen Z X , Qi G X , Ren L M , et al. Numerical simulation and experimental analysis on microstructural changes during heading of high-temperature alloy bolt. *J Plast Eng* , 2003 , 10(5) : 68
(陈兆祥 , 齐广霞 , 任丽梅 , 等. 高温合金螺栓镦挤过程的微观组织演变模拟及试验研究. 塑性工程学报 , 2003 , 10(5) : 68)
- [6] Li M Q , Wang X J , Su S B , et al. Deformation behavior and processing map of the nickel-based superalloy GH4169 in the isothermal compression. *China Mech Eng* , 2008 , 19(15) : 1867
(李森泉 , 王小津 , 苏少博 , 等. GH4169 合金塑性变形行为及加工图. 中国机械工程 , 2008 , 19(15) : 1867)
- [7] Yang C. *Study on Precipitation Dissolution Behavior of δ phase and High Temperature Deformation Behavior of GH4169 Alloy* [Dissertation]. Harbin: Harbin Institute of Technology , 2007
(杨超. GH4169 合金 δ 相析出溶解及高温变形行为研究 [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 , 2007)
- [8] Srinivasan R , Ramnarayan V , Deshpande U , et al. Computer simulation of the forging of fine grain size IN718//Superalloy718 , 625 , 706 and various derivatives. Warrendale , PA: The Minerals , Metals & Materials Society , 1993 , 175
- [9] Srinivasan R , Ramnarayan V , Deshpande U , et al. Computer simulation of the forging of fine grain IN-718 alloy. *Metall Trans A* , 1993 , 24(9) : 2061
- [10] Zhang H Y , Zhang S H , Zhang W H , et al. The research on the optimization of the hot die forging of GH4169 turbine discs. *J Plast Eng* , 2007 , 14(4) : 69
(张海燕 , 张士宏 , 张伟红 , 等. GH4169 合金涡轮盘热锻工艺的优化研究. 塑性工程学报 , 2007 , 14(4) : 69)
- [11] Wang J , Dong J X , Zhang M C , et al. Numerical simulation for optimization of the extrusion process of GH4169 tubes. *J Univ Sci Technol Beijing* , 2010 , 32(1) : 83
(王珏 , 董建新 , 张麦仓 , 等. GH4169 合金管材正挤压工艺优化的数值模拟. 北京科技大学学报 , 2010 , 32(1) : 83)
- [12] Ding W. *Thermal-Mechanical Coupled Numerical Simulation on Cross Wedge Rolling of Hollow Shafts with Equal Inner Diameter* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing , 2010
(丁韪. 楔横轧等内径空心轴热力耦合数值模拟 [学位论文]. 北京: 北京科技大学 , 2010)
- [13] Ding W , Yang C P , Zhang K S , et al. Thermomechanical coupled numerical simulation on cross wedge rolling of hollow shaft parts with equal inner diameter. *J Univ Sci Technol Beijing* , 2010 , 32(4) : 525
(丁韪 , 杨翠苹 , 张康生 , 等. 楔横轧等内径空心轴的热力耦合数值模拟. 北京科技大学学报 , 2010 , 32(4) : 525)