

文章编号:1000-6893(2007)05-1276-05

GH4169 合金矩形截面环轧制曲线的实验研究

刘东¹, 付明杰¹, 万自永¹, 杨勇², 张华²

(1. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072)

(2. 贵州安大航空锻造责任有限公司, 贵州 安顺 561005)

Rolling Strategies in the Rolling Process of GH4169 Alloy with Rectangle Cross-section Ring

Liu Dong¹, Fu Mingjie¹, Wan Ziyong¹, Yang Yong², Zhang Hua²

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Guizhou Anda Aviation Forging Co, Ltd, Anshun 561005, China)

摘要: 轧制曲线是环件轧制工艺设计的核心问题,尤其对钛合金和高温合金这类难变形材料环件,它是影响显微组织和尺寸精度的关键因素。采用不同类型的轧制曲线对相同尺寸 GH4169 合金矩形截面环进行了双向轧制实验研究,主要分析了轧制曲线类型对环件温度、环件径向增长速率、双向轧制力的影响。结果表明,“上凸型”轧制曲线有利于控制环件温升,“下凹型”轧制曲线则能较好地降低轧制力能和提高环件尺寸精度。另外,为了能更有效地控制环件截面角部的温升,保证截面组织均匀,提出了 GH4169 合金这类难变形材料矩形截面环轧制的特殊轧制曲线。

关键词: GH4169 合金; 矩形截面环; 轧制曲线; 径/轴双向轧制

中图分类号: TG335.1 **文献标识码:** A

Abstract: Rolling strategy is the key problem in the designation of ring rolling technology, especially for the difficult to deformation materials, such as titanium alloy and superalloy, and it is also the crucial factor that influences the microstructure and dimensional accuracy of the ring. In this paper, three types of rolling strategies are designed and the corresponding radial/axial ring rolling experiments are performed employing these rolling strategies on GH4169 billets with the same dimensions. The surface temperature, radial growth rate, radial and axial rolling forces are tested and recorded during the procedure. The data are compared and the effects of rolling strategies on thermomechanical parameters and rolling kinematics of GH4169 ring are analyzed. The results indicate that the “convex rolling strategies” can control the rolling temperature rise well and the “concave rolling strategies” is in favor of reducing rolling the force and ensuring the dimensional accuracy of the ring. In addition, another special kind of ring rolling strategy has been mentioned in order to avoid the temperature in the corner of ring rising too much and to get a uniform microstructure.

Key words: GH4169 alloy; rectangle cross-section ring; rolling strategy; radial/axial ring rolling

环件轧制是利用轧辊驱动环件转动,通过轧制孔型的连续轧制变形,使环件直径不断增大,壁厚减小,截面逐渐成形的特殊塑性加工过程。环件轧制技术是目前生产高性能无缝环件最为有效的手段之一^[1]。在航空、航天、能源、交通等诸多领域获得广泛应用。迄今为止,矩形截面环件的生产多以径向轧制方式进行,环件与坯料采用等高设计,锥辊仅起到防止环件攀升和限制环件高度增加的作用,轴向变形量很小。对于高温合金、钛合金等难变形材料,均匀充分的变形是保证锻件冶金质量的重要基础。实际上,径-轴双向轧制

可以在径向和轴向两个方向上实施轧制变形,不仅可以获得更复杂的环件截面形状和更高的尺寸精度,而且可以获得更加均匀充分的变形,因而对于航空、航天用难变形材料环件,径/轴双向轧制技术的应用日益受到人们关注。径/轴双向轧制技术的核心问题之一是科学地确定轧制曲线。所谓轧制曲线,是指轧制过程中环件截面轮廓的实时变化轨迹,它反映了轧制过程中双向变形量的瞬时分配关系。轧制曲线不仅影响环件的尺寸精度和环件截面的填充过程,而且直接影响环件内部的热力参数(指等效应变、温度、应变速率)分布情况。GH4169 合金是目前航空航天领域广泛应用的沉淀硬化型镍基高温合金,主要用于制造机匣、火焰筒等环件和盘、轴等转动部件。由于该合

收稿日期:2006-10-18; 修订日期:2007-04-03
基金项目:国防基础科研项目
通讯作者:刘东 E-mail: liudong@nwpu.edu.cn

金的组织性能对热加工历史和热力参数十分敏感^[2-3],因此GH4169合金环件生产中,必须精心制定轧制曲线才能使双向轧制过程中环件内部的热力参数控制在要求的范围。然而,目前的文献资料中关于径/轴双向轧制过程中轧制曲线研究方面的报道很少,1988年P. Boucly等人曾提到轧制曲线的设计原则^[4],但对有关轧制曲线对双向轧制过程的影响未做系统研究。因此,本文以GH4169合金矩形环件轧制过程为研究对象,通过双向轧制实验研究了3种典型类型的轧制曲线对轧制过程中环件尺寸、力能参数和环件内热力参数(主要是温度)的影响。为科学地设计难变形材料环件的轧制工艺奠定了基础。

1 轧制曲线的设计

双向轧制过程中的轧制曲线一般分3个阶段,如图1所示。阶段I为预整圆阶段。由于制坯过程中坯料不可避免地会存在一定的椭圆度、壁厚不均匀、偏心等缺陷,所以,轧制初始阶段要对坯料进行整圆,消除制坯缺陷以保证随后的径-轴双向组合轧制过程的平稳进行。这一阶段的长短主要取决于坯料制备质量。阶段II为径/轴双向组合轧制阶段,即主轧制阶段。这一阶段中,环件在主辊与芯辊间的径向轧制和锥辊间的轴向轧制共同作用下直径不断增大、高度不断减小、截面轮廓逐渐成形。第III阶段为抬辊精整阶段。当环件接近要求的尺寸时要抬起锥辊使环件在轻微的径向变形作用下进行精整,以消除因回弹导致的尺寸误差和椭圆度。

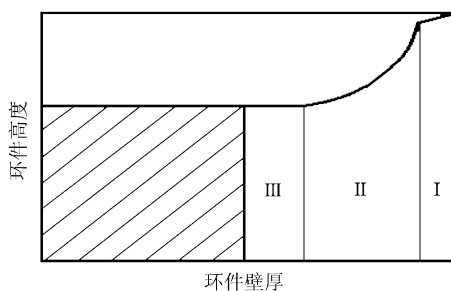


图1 轧制曲线的组成部分

Fig.1 Composition of rolling strategy

从以上分析可知,主轧制阶段是双向轧制的关键部分,环件的绝大部分变形均在这一阶段完成。因此,本文主要研究主轧制阶段对双向轧制过程的影响。为此设计了3种不同类型轧制曲线,如图2所示。

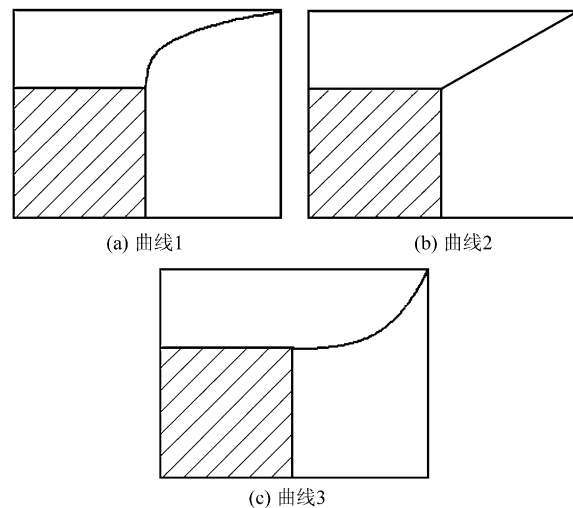


图2 轧制曲线的设计

Fig.2 Design of rolling strategy

图2中,轧制曲线1初始有较大的径向变形,后期以轴向进给为主;曲线2的轧制过程中径/轴向变形分配按固定的比例进行;曲线3则首先进行较大的轴向变形,后期以径向轧制为主。图2中的各种轧制曲线可用幂函数 $y=mx^n$ 统一表示,其中的指数 n 决定了轧制曲线的形式。当 $n=1.00$ 时轧制曲线为直线,即图2(b)。当 $n>1.00$ 和 $n<1$ 时,轧制曲线分别为“下凹型”和“上凸型”,即图2(c)和图2(a)。为了揭示不同类型轧制曲线的影响,分别采用3种轧制曲线对相同尺寸的坯进行了双向轧制实验。图2中3种轧制曲线的 n 值分别为0.35,1.00,2.50。

2 实验方法

GH4169合金矩形环件的双向辗轧实验在Wagner Banning公司生产的 $\varnothing 3\ 000$ mm数控环轧机上进行。实验材料为上海钢铁五厂生产的GH4169合金 $\varnothing 220$ mm棒材,原材料经下料、镟粗、冲孔、机械加工后制成尺寸为 $\varnothing 446.6$ mm \times $\varnothing 270$ mm \times 200 mm(外径 \times 内径 \times 高度)的坯,初始轧制温度为1 030 $^{\circ}$ C。分别采用图2所示的3种轧制曲线轧制成最终尺寸为 $\varnothing 718$ mm \times $\varnothing 624$ mm \times 164 mm环件。轧制过程中利用轧机数控系统实时测定与记录环件尺寸、双向轧制力和环件表面温度。

3 实验结果与分析

(1) 测试参数的影响

为了揭示轧制曲线的类型对轧制过程中环件的热力参数、尺寸变化和轧制力能参数的影响,定

量测量了轧制过程中环件的表面温度、环件径向增长速率、径/轴向轧制力等参数。

图3所示为3种轧制曲线下的环件温度-时间曲线。从图看出,3种轧制曲线情况下的环件温度在轧制过程中均呈上升趋势。轧制曲线不同,温度上升的幅度有所不同。从温升数值看,轧制曲线1最小,曲线2次之,曲线3最大,三者的温升数值分别为 $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $22.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。一般认为,环轧过程中,工件大部分表面和大部分时间内仅与环境接触,温度损失相对较小。同时,轧制变形以较高的应变速率进行,变形热效应产生的温升补偿了工件的温度损失,从而使轧制过程中的环件温度基本保持稳定^[5]。然而对于GH4169合金这类难变形材料,轧制过程中环件的温升不可忽视,在进行轧制工艺设计时需要精心选择轧制曲线和进给速率,以避免轧制后期环件温度过高而影响环件组织性能。

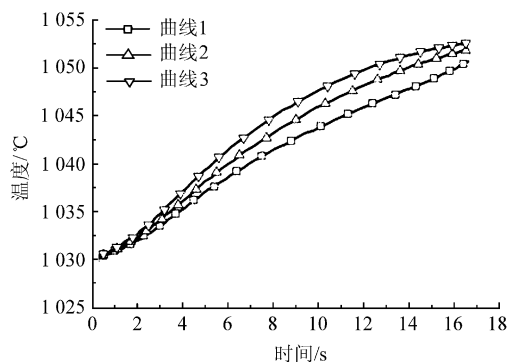


图3 轧制曲线对环件温度的影响

Fig. 3 Effects of rolling strategy on ring temperature

图4所示为3种轧制曲线情况下环件的径向增长速率随时间的变化曲线。图中前3s为咬入阶段,随后为主轧制阶段。从图看出,在咬入阶段,环件的径向增长速率迅速增大,进入随后的主轧制阶段后,径向增长速率基本保持稳定,并在一定范围内逐渐变化。此时环件的直径稳定增长,高度尺寸减小,最后逐渐达到要求的环件尺寸。主轧制阶段环件径向增长速率的变化规律主要由双向进给速度的匹配关系决定。曲线1开始时以径向轧制为主,因而在主轧制开始阶段环件径向增长速率最大,而在主轧制后期,曲线1逐渐变为轴向轧制,所以其径向增长速率逐渐下降。主轧制阶段结束时,曲线1主要表现为轴向轧制,此时环件的径向尺寸已基本达到最终尺寸,所以其环件径向增长速率是3种情况中最小的。与之相

反,曲线3开始以轴向轧制为主,后期主要进行径向轧制,因而整个主轧制阶段环件径向增长速率逐渐增大,主轧制阶段结束时其径向增长速率最大,此时环件的高度尺寸已基本达到要求,而环件直径仍在迅速增加并逐渐达到最终尺寸。与曲线1和曲线3情况相比,曲线2的径/轴向进给速度始终保持一定,因而整个主轧制过程中其环件径向增长速率基本保持恒定,并居于曲线1和曲线3之间。

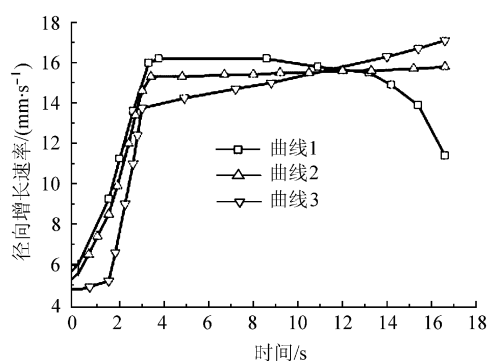


图4 轧制曲线对环件径向增长速率的影响

Fig. 4 Effects of rolling strategy on radial growth rate

图5和图6分别为3种情况下的径向和轴向轧制力。3种情况下径向轧制力的变化规律基本一致。咬入阶段径向轧制力迅速增大,随后进给量减小进入平稳轧制阶段,导致径向轧制力逐渐降低。由于曲线1的径向进给量分配较曲线2和曲线3大,所以曲线1的径向轧制力较高。3种曲线最大径向轧制力在 $3\ 300\sim 3\ 400\text{ kN}$ 范围内。从图6看出,3种轧制曲线中,曲线3和曲线2的轴向轧制力变化趋势基本一致,并表现出与相应条件下径向轧制力类似的变化规律。而曲线1在主轧制后期轴向轧制力急剧上升。这是由于主轧制后期轧制曲线1以轴向变形为主,此时轴向进给速度较大,所以曲线1的轴向轧制力在主轧制阶段后期呈较大的上升趋势。3种情况下的最大轴向轧制力在 $1\ 000\sim 1\ 300\text{ kN}$ 范围内。另外,对比图5和图6还可以看出,径向轧制力比轴向轧制力要大很多。一般情况下,双向轧制过程中的轴向轧制力约为径向轧制力的 $1/3\sim 1/4$,这一关系对于合理选择轧制力能参数具有普遍的指导意义。

为了具体说明各个测试参数的变化范围,表1给出了4个参数在整个轧制过程的初值、终值和最大值。其中初值是环坯咬入时的数值,终值是主轧制过程结束时的数值。

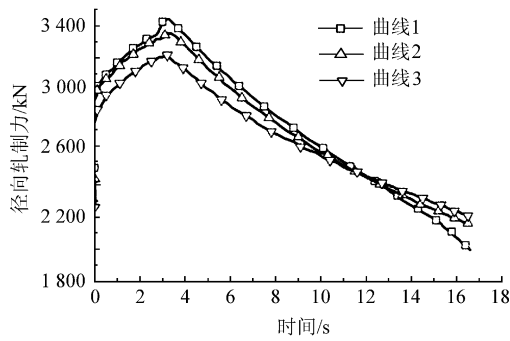


图 5 不同轧制曲线下环件径向轧制力的比较
Fig. 5 Comparison of radial rolling forces for different rolling strategies

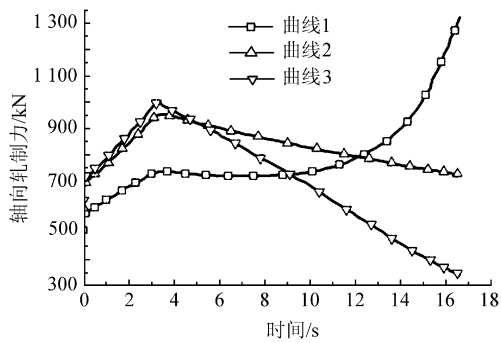


图 6 不同轧制曲线下环件轴向轧制力的比较
Fig. 6 Comparison of axial rolling forces for different rolling strategies

表 1 3 种情况下测试参数的数值变化

Table 1 Numerical variations of testing parameters with three kinds of rolling strategies

参 数	曲 线	初 值	终 值	最大 值
温度/℃	1	1 030.0	1 050.7	1 050.7
	2	1 030.0	1 051.9	1 051.9
	3	1 030.0	1 052.6	1 052.6
径向增长速 率/(mm · s ⁻¹)	1	5.7	11.4	16.2
	2	5.3	15.8	15.8
	3	4.7	17.1	17.1
径向轧制 力/kN	1	2 057	1 993	3 444
	2	2 438	2 155	3 355
	3	2 261	2 204	3 215
轴向轧制 力/kN	1	511	1 324	1 324
	2	596	722	940
	3	626	341	1 003

(2) 分析讨论

由上述测试参数的变化规律可以发现,轧制曲线的类型对轧制过程中环件尺寸变化规律、轧制力能参数和环件内的热力分布均有影响。3 种轧制曲线情况下的主轧制过程所用时间基本相同,约为 14 s;从实验结果来看,各种轧制曲线下的轧制过程中环件温度均有明显上升。其中“上

凸型”轧制曲线(即曲线 1)轧制过程中环件的温升最小。对于 GH4169 合金这类组织性能对热力参数和热加工历史十分敏感的难变形材料,这种类型的轧制曲线有利于精确控制轧制过程中环件内的热力参数;但同时也应该指出,“上凸型”曲线轧制初期以径向轧制为主,而后期主要进行轴向轧制,因而所需的径向和轴向轧制力是各种类型轧制曲线中最大的。这一方面对轧机的设备吨位和机构刚度提出了更高要求;另一方面,也会在一定程度上影响环件尺寸精度。因为一般情况下,因回弹导致的环件尺寸和形状误差与轧制力有直接关系,轧制力越大,相应的误差也越大。另外,由于实验条件的限制,实验中测量装置仅能够记录环件外表面中部的温度,实际上,环件轧制过程中,由于变形协调性和最小阻力原理的约束,环件截面的转角部位(图 7 中阴影部分的 4 个方框处)是变形最剧烈、温升最高的位置。因此,为了更加有效地控制环件内的热力参数分布,对于 GH4169 合金这类难变形材料应该采用如图 7 所示的特殊轧制曲线,以避免环件内出现局部过热而导致的冶金缺陷。

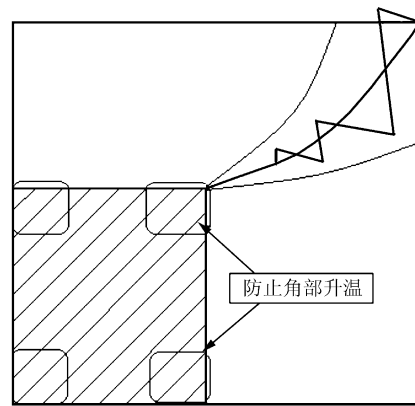


图 7 特殊轧制曲线
Fig. 7 Special rolling strategy

图 7 所示特殊轧制曲线的最大特点是将普通轧制曲线中径向和轴向分成若干个阶段,每个阶段则以径向或轴向轧制为主进行。通过各阶段大小的不同组合实现要求的双向轧制变形,从而避免环件截面出现角部温升过大而影响组织和性能均匀性。目前,国际上先进精密数控环轧机(如 Wagner 公司生产的 RAW 系列)已经具备实现上述特殊轧制曲线,国内也曾采用类似的特殊轧制曲线进行过 TC4 合金环件的尝试,实验结果表明上述特殊轧制曲线能有效控制环件截面的角部温升。由于采用特殊轧制曲线进行轧制时的径向和

轴向进给量以及轧辊转速与普通轧制曲线相比没有明显区别,所以生产效率与采用普通轧制曲线时相同。

在实验涉及的各类轧制曲线中,“下凹型”曲线(即曲线3)所需的径向和轴向轧制力最小。这种特性使得“下凹型”轧制曲线更有利于提高环件的尺寸精度。除了前已述及的回弹引起的尺寸和形状误差较小外,“下凹型”曲线的主轧制后期一般以径向轧制为主,此时环件截面的高度已基本达到要求尺寸,因而轴向轧制力很小,当进入精整阶段,锥辊抬起时,环件截面高度尺寸不再变化,而径向尺寸可以在精整阶段通过少量径向轧制得到精确控制。所以对于高宽比较大的薄壁环轧制而言,采用“下凹型”轧制曲线更为合适。另外,对于加工窗口狭窄的难变形材料环件,在采用“下凹型”轧制曲线的同时,还可以通过合理确定坯料尺寸,适当减小径/轴向进给速率等措施控制环件温度,从而既有益于提高环件尺寸精度,又保证了环件的热力参数分布在要求范围。

3 结论

(1) 利用3种不同类型的轧制曲线对同一尺寸的GH4169合金矩形截面环进行了双向轧制实验。实验结果表明:轧制曲线类型对环件的热力参数、尺寸变化规律和轧制过程力能参数均有影响。

(2) GH4169合金这类难变形材料环件轧制中的温升明显。其中,“上凸型”轧制曲线的环件温升较小,有利于精确控制环件温度,但需要更大的径向和轴向轧制力。

(3) “下凹型”轧制曲线所需的径向和轴向轧制力较小,轴向轧制力约为径向轧制力的 $1/3 \sim 1/4$ 。这种类型的轧制曲线有利于提高环件尺寸精度。

参 考 文 献

- [1] 华林,黄兴高,朱春东. 环件轧制理论和技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001:10.
Hua Lin, Huang Xinggao, Zhu Chungong. Theory and technology of ring rolling process[M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 10. (in Chinese)
- [2] 刘东. 难变形材料锻造过程的有限元变形-传热-组织演化耦合分析[D]. 西安:西北工业大学,1998.
Liu Dong. Deformation/heat transfer/microstructure evolution coupled analysis for forging processes of difficult to deformation materials[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1998. (in Chinese)
- [3] 刘东,罗子健. GH4169合金的锻造热力参数[J]. 航空学报,1996,17(3):317-323.
Liu Dong, Luo Zijian. Thermomechanical parameters of the GH4169 alloy forging processes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996,17(3):317-323. (in Chinese)
- [4] Boucly P, Oudin J, Ravalard Y. Simulation of ring rolling with new wax-based model materials on a flexible experimental machine[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1988, 16: 119-143.
- [5] Song J L, Dowson A L, Jacobs M H, et al. Coupled thermo-mechanical finite-element modelling of hot ring rolling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121: 332-340.

作者简介:

刘东(1969—) 男,博士,教授。主要研究方向:高温结构材料成型与仿真技术。

Tel:029-88460545

E-mail: liudong@nwpu.edu.cn

(责任编辑:蔡斐)