

# 微观组织对 GH4720Li 合金力学性能的影响

阚志<sup>1,2</sup>, 杜林秀<sup>1</sup>, 胡军<sup>1</sup>, 翁镭<sup>1</sup>  
(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 抚顺特殊钢股份有限公司, 辽宁 抚顺 113001)

**摘 要:** 对 GH4720Li 合金锻制棒坯进行热处理前后的微观组织观察,对一次  $\gamma'$  相进行能谱分析,并对其进行 20,650 ℃ 拉伸力学性能检测. 结果表明,合金中一次  $\gamma'$  相的数量由棒坯边缘向中心逐渐减少,但其尺寸逐渐增大;热处理对一次  $\gamma'$  相的数量和分布的影响不显著,但对二次  $\gamma'$  相的影响十分显著;合金强度由棒坯边缘向中心先升高再降低,其塑性则是逐渐升高,一次  $\gamma'$  相的数量和塑性是影响合金塑性的主要因素;一次  $\gamma'$  相与基体的相界是拉伸断裂的主要裂纹源;随着析出温度升高,一次  $\gamma'$  相的塑性增加,其 Al, Ti 元素含量下降,而 Cr, Co, Mo 和 W 元素含量升高.

**关 键 词:** GH4720Li; 微观组织; 力学性能;  $\gamma'$  相; 裂纹; 成分偏析

**中图分类号:** TG 113.25; TG 132.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)01-0046-05

## Influence of Microstructure on Mechanical Property of GH4720Li Alloy

KAN Zhi<sup>1,2</sup>, DU Lin-xiu<sup>1</sup>, HU Jun<sup>1</sup>, WENG Lei<sup>1</sup>  
(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. Fushun Special Steel Shares Co., Ltd., Fushun 113001, China. Corresponding author: KAN Zhi, E-mail: kanzhi\_77@163.com)

**Abstract:** The microstructures of GH4720Li alloy samples which were cut from GH4720Li alloy bar including forging and heat treatment states were observed, and the phase compositions of primary  $\gamma'$  was measured via energy spectrum analysis. The tensile properties of the samples through heat treatment were tested at 20 and 650 ℃. The results indicated that the quantity of primary  $\gamma'$  of GH4720Li alloy decreases from the edge to the center of the bar while the size of primary  $\gamma'$  increases gradually. The influence of heat treatment on the quantity and distribution of primary  $\gamma'$  is not noticeable, but the influence of heat treatment on the quantity and distribution of secondary  $\gamma'$  is noticeable. The tensile strength of GH4720Li alloy increases at the first and decreases in the end from the edge to the center of the bar, but the plasticity of alloy increases gradually. The quantity and plasticity of primary  $\gamma'$  are the chief factors influencing the alloy plasticity. The phase boundary of primary  $\gamma'$ - $\gamma$  is the crack source in the tensile tests. As the precipitation temperature rises, the plasticity of primary  $\gamma'$  increase, the element contents of aluminum and titanium in the primary  $\gamma'$  decrease, but the element contents of chromium, cobalt, molybdenum and tungsten in the primary  $\gamma'$  increase.

**Key words:** GH4720Li; microstructure; mechanical property;  $\gamma'$  phase; crack; composition segregation

GH4720Li 合金是一种新型的镍基时效强化型高温合金,合金中 Al 和 Ti 元素质量分数之和高达 7.5%,主要强化相  $\gamma'$  相的数量高达 45% 以上;主要用于制造使用温度在 650 ~ 750 ℃ 之间的高性能压气机盘和涡轮盘<sup>[1-3]</sup>. 合金的力学性能是微观组织的客观反映,对 GH4720Li 合金组织

与性能的相关研究表明:合金在连续冷却过程可形成多种形态的  $\gamma'$  相<sup>[4]</sup>,高温下形成的  $\gamma'$  相存在分解现象<sup>[5]</sup>. 依据尺寸和分布情况,合金中的  $\gamma'$  相分为三种:一次  $\gamma'$  相分布在晶界,尺寸大;二次和三次  $\gamma'$  相分布在晶内,二次  $\gamma'$  相的尺寸比三次  $\gamma'$  相的尺寸大,且两者呈现双峰分布;三次  $\gamma'$  相在时效处理过程中发生溶解和长大,并对力学性能产生显著的影响;一次和二次  $\gamma'$  相在时效处理过程几乎不发生变化<sup>[6-7]</sup>.  $\gamma'$  相的长大、粗化过程受扩散过程控制,符合 LSW 模型, $\gamma'$  相的长大激活能在 250 ~ 265 J/mol<sup>[8-9]</sup>. 上述文献未能充分考虑原始组织差异对合金组织演变和力学性能的影响. 本文对 GH4720Li 合金锻制棒坯不同位置的材料进行热处理前后的微观组织观察,并对其进行 20,650 ℃ 拉伸力学性能检测;以期确定不同原始组织对合金的组织演变和力学性能的影响,为制定合金的热处理工艺提供一定的参考.

# 1 实验材料和实验方法

本研究合金取自 GH4720Li 合金  $\phi$ 180 mm 锻制棒坯. 合金冶炼工艺为真空感应熔炼 + 真空电弧重熔,合金化学成分(质量分数,%): C 0.015, Cr 16.10, W 1.28, Mo 3.06, Al 2.50, Ti 5.01, Co 14.75, 其余为 Ni. 合金铸锭经过成分均匀化扩散退火和多次火次锻造成坯.

分别在锻制棒坯的边缘、1/2 半径和中心 3 个不同位置取金相和力学性能试样. 试样的热处理制度:1 090 ℃ 保温 4 h,油冷;650 ℃ 保温 24 h,空冷;760 ℃ 保温 16 h,空冷. 试样热处理后,加工成力学性能检测试样,分别测试合金的 20 和 650

℃ 拉伸性能. 20 ℃ 拉伸实验在变形达到 0.2% 以前的拉伸速度为 0.45 mm/min,之后为 10 mm/min;650 ℃ 拉伸实验在变形达到 0.2% 以前的拉伸速度为 0.1 mm/min,之后为 3 mm/min.

对热处理前后的金相试样在光学显微镜、扫描电镜上进行显微组织观察. 使用扫描电镜对测试后的试样断口进行检测,然后将试样沿中心纵向剖开,将剖面磨光,经化学腐蚀和电解腐蚀后,在光学显微镜和扫描电镜上观察显微组织,并采用电子探针(EPMA)对高温拉伸试样的一次  $\gamma'$  相进行成分分析. 金相试样的腐蚀液:3 g CuCl<sub>2</sub> + 20 mL HCl + 30 mL 酒精. 电解腐蚀液:150 ml H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 10 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 15 g CrO<sub>3</sub>. 电解腐蚀工艺:电压 5 V,腐蚀时间 2 ~ 5 s.

# 2 结果与讨论

## 2.1 微观组织分析

GH4720Li 合金是以  $\gamma'$  相为主要强化相的镍基高温合金. $\gamma'$  相的数量、尺寸、形态和分布情况对合金的力学性能有显著的影响. 采用 THERMO-CALC 对实验用 GH4720Li 合金材料进行热力学平衡相计算,得到  $\gamma'$  相初始溶解温度为 1 158.7 ℃.

图 1a 表明,合金棒坯边缘位置的晶粒呈现明暗相间的拉长状,为不完全再结晶组织;图 1b 表明,拉长晶的明暗条纹是由  $\gamma'$  相分布不均匀引起的,其中深色区域分布  $\gamma'$  相量比浅色区域的多. 图 1c 表明,棒坯 1/2 半径部位的晶粒为均匀细小的等轴晶组织, $\gamma'$  相分布均匀. 图 1d 表明,棒坯中心部位的晶粒为较粗大的等轴晶组织, $\gamma'$  相分布

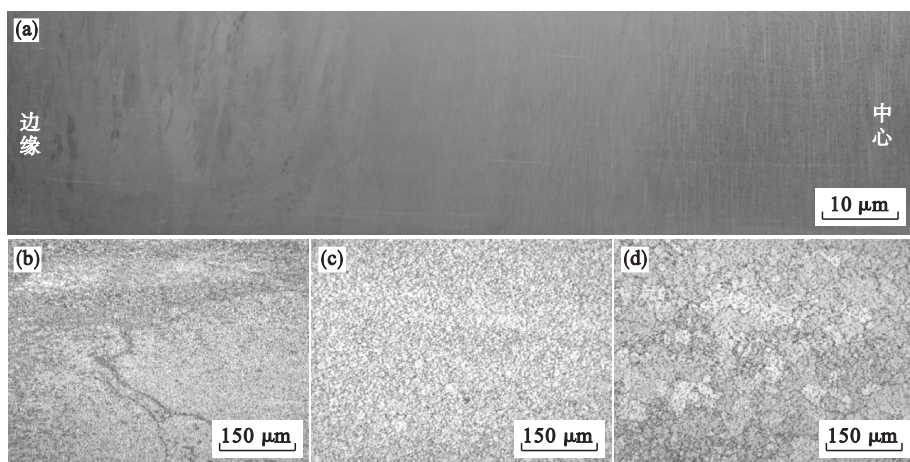


图 1 GH4720Li 合金锻制棒坯组织  
Fig. 1 The macrostructure and microstructure of GH4720Li forging bar  
(a)—纵向宏观组织;(b)—边缘;(c)—1/2 半径;(d)—中心.

略有不均,晶粒组织尺寸略有差别,颜色较深晶粒比颜色较浅晶粒略小。

锻态晶粒组织形成的原因是:(1)合金铸锭存在枝晶偏析,枝晶干比枝晶间的 $\gamma'$ 相形成元素含量少;锻造过程中,铸锭边缘变形不充分、变形温度低,枝晶破碎不充分、再结晶不完全,由枝晶干和枝晶间形成的不完全再结晶晶粒内的 $\gamma'$ 相的数量存在显著的差别,最终形成明显的条带状组织。(2)棒坯中心和1/2半径部位变形充分、变形温度高,枝晶破碎充分、再结晶完全,形成等轴晶组织;棒坯心部的变形温度最高、冷却最慢,晶粒出现了一定程度的不均匀现象。

图2为GH4720Li锻制棒坯热处理前、后的

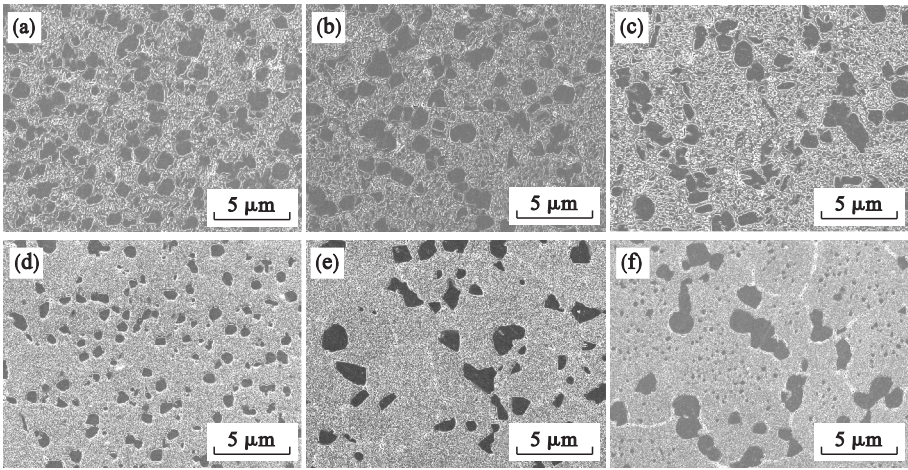


图2 GH4720Li合金棒坯不同位置材料热处理前、后扫描电镜的组织形貌  
Fig. 2 SEM images of GH4720Li before and after heat-treatment at different position of the bar

(a)—边缘,热处理前;(b)—1/2半径,热处理前;(c)—中心,热处理前;  
(d)—边缘,热处理后;(e)—1/2半径,热处理后;(f)—中心,热处理后。

合金热处理前后的 $\gamma'$ 相组织状态的形成原因是:(1) $\gamma'$ 相的形成存在形核和长大两个过程;通常温度越低, $\gamma'$ 相形成元素过饱和程度高,形核率高,而生长速度慢;反之亦然。所以,锻制状态下合金的一次 $\gamma'$ 相呈现出上述状态。(2)1 090℃是GH4720Li合金的亚固溶处理温度,一次 $\gamma'$ 相发生部分溶解。文献[10]研究表明,二、三次 $\gamma'$ 相在固溶处理过程中将发生明显的溶解。(3) $\gamma'$ 相溶解过程受扩散过程控制<sup>[8]</sup>,而晶界是原子扩散的高速通道,晶粒越细小,晶界越多,越有利于原子扩散;细晶区域的 $\gamma'$ 相的溶解速度快;所以,细晶区固溶处理后剩余的二次 $\gamma'$ 相的数量少、尺寸小。另外,锻态棒坯心部的二次 $\gamma'$ 相尺寸偏大是其热处理后二次 $\gamma'$ 相数量较多的另一个原因。

2.2 力学性能结果分析

图3为棒坯不同位置材料的拉伸试验数据。20℃和650℃拉伸结果显示:合金的 $R_{0.2}$ 和 $R_m$ 由

组织状态扫描电镜图。从图2中可知:在合金锻制状态下,锻制棒坯的一次 $\gamma'$ 相的数量由边缘向心部逐渐减少,而尺寸逐渐增大;锻态棒坯的不同位置都存在大量的二次和三次 $\gamma'$ 相,且二次 $\gamma'$ 相的尺寸由棒坯的边缘向心部逐渐增加。合金热处理后,锻制棒坯不同位置的一次 $\gamma'$ 相的数量仍然是由边缘向心部逐渐减少,而尺寸则逐渐增大;但是二次 $\gamma'$ 相的形态和分布发生了较大的变化。锻制状态下的二次 $\gamma'$ 相在固溶处理过程中大量溶解、消失;热处理后棒坯中心的二次 $\gamma'$ 相数量最多、尺寸最大,而1/2半径位置的二次 $\gamma'$ 相数量最少、尺寸最小;边缘位置的二次 $\gamma'$ 相的数量和尺寸介于两者之间。

棒坯边缘至中心先升高再降低;伸长量和面缩量等塑性指标由棒坯边缘至中心逐渐升高,即棒坯边缘部位的材料塑性最差、中心塑性最好。20℃拉伸测试的伸长量差值为9%,面缩量差值为6%;650℃拉伸测试的伸长量差值为10%,面缩量差值为7%。

图4为GH4720Li合金20℃拉伸试样的断口扫描电镜形貌。宏观断口包括中心起裂区、裂纹扩展区和瞬断区三部分,符合第二相粒子存在导致孔洞形核并最终断裂的断口形貌特征。结合图5的裂纹分布情况,此处的第二相粒子为一次 $\gamma'$ 相。

图5为GH4720Li合金650℃高温拉伸后试样的电子探针金相形貌。图5a中的一次 $\gamma'$ 相形状基本保持了热处理后的形态,未沿着拉伸方向发生变形,在一次 $\gamma'$ 相与基体的相界处出现了许多微裂纹,而在二次 $\gamma'$ 相周围未发现微裂纹。图5b中的一次 $\gamma'$ 相沿着拉伸方向产生变形,在一次 $\gamma'$

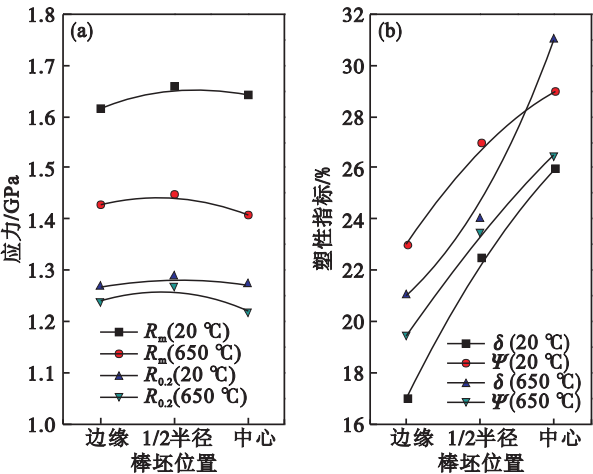


图 3 GH4720Li 合金拉伸试验结果

Fig. 3 Tensile properties of GH4720Li alloy

(a)—强度；(b)—塑性指标.

相上出现了较多的与拉伸方向垂直的微裂纹,并且在一次  $\gamma'$  相与基体的相界处也出现了微裂纹.图 5c 中的一次  $\gamma'$  相发生了沿拉伸方向的变形,而

一次  $\gamma'$  相自身未出现微裂纹;拉伸试样裂纹沿着一次  $\gamma'$  相与基体的相界分布.文献[11]研究发现,在高温低应变速率变形条件下,在  $\gamma'$  相与基体的相界处会形成由空洞长大的裂纹,这与本研究观察到的现象有相似之处.

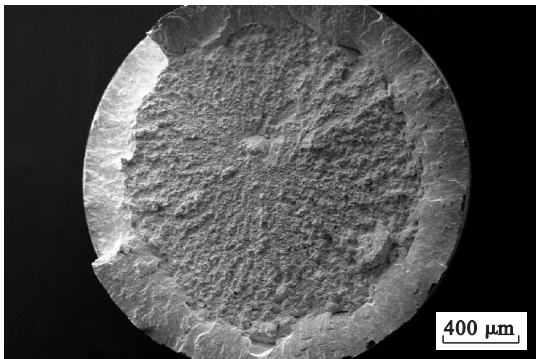


图 4 GH4720Li 合金 20 °C 拉伸试样的断口扫描电镜形貌

Fig. 4 SEM image of fracture of GH4720Li tensile sample at 20 °C

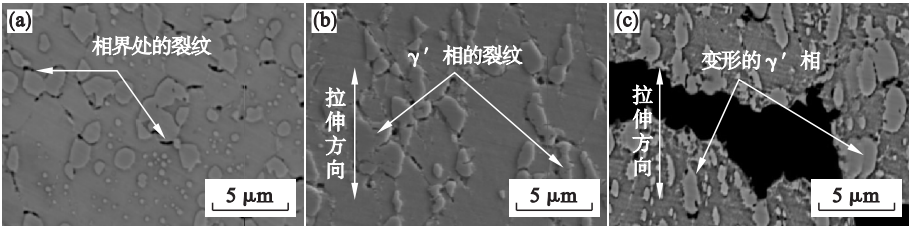


图 5 GH4720Li 合金 650 °C 高温拉伸试样电子探针金相形貌

Fig. 5 EPMA images of tensile samples of GH4720Li alloy at 650 °C

(a)—边缘；(b)—1/2 半径；(c)—中心.

$\gamma'$  相具有  $\text{Li}_2$  型的超点阵结构,原子构成为  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\gamma'$  相能够参与塑性变形<sup>[12]</sup>,并且  $\text{Ni}_3\text{Al}$  对很多元素有一定的溶解度.对 650 °C 拉伸试样中的一次  $\gamma'$  相进行电子探针能谱分析,棒坯各位置的一次  $\gamma'$  相成分(见表 1)表明,  $\gamma'$  相形成元素 (Al, Ti) 含量从棒坯的边缘到中心存在下降的趋势,而 Cr, Co, Mo 和 W 元素含量存在上升的趋势;依据文献[13], Ti 元素对  $\gamma'$  相存在较强的强化效果.由于中心位置的一次  $\gamma'$  相的 Ti 元素含量最低,所以其屈服强度最低,较容易变形;图 5 中一次  $\gamma'$  相在变形后的形貌表明,低 Al, Ti 含量的一次  $\gamma'$  相塑性较好.

2.3 微观组织对力学性能的影响

$\gamma'$  相作为 GH4720Li 合金的主要强化相,位错在合金中主要以切割沉淀相颗粒的方式通过  $\gamma'$  相<sup>[13-14]</sup>;  $\gamma'$  相的形貌、大小和分布情况对合金的力学性能产生显著的影响;二次和三次  $\gamma'$  相的尺寸越小、数量越多,合金强度越高<sup>[7]</sup>.

表 1 GH4720Li 合金一次  $\gamma'$  相成分分析(质量分数)  
Table 1 Composition analysis of primary  $\gamma'$  of GH4720Li alloy( mass fraction) %

位置	Ni	Al	Ti	Cr	Co	Mo	W
边缘	64.99	4.63	9.61	7.78	10.60	1.24	1.18
1/2 半径	65.71	4.59	9.71	7.06	10.37	1.36	1.20
中心	62.55	4.31	7.97	10.16	11.73	1.97	1.31

图 2 和图 5 表明:合金经过热处理后,棒坯边缘的一次  $\gamma'$  相数量最多;棒坯中心位置与 1/2 半径位置的一次  $\gamma'$  相数量相当,但是中心位置包含更多的二次  $\gamma'$  相;在  $\gamma'$  相总析出量不变时,1/2 半径位置将析出更多的三次  $\gamma'$  相.另外,依据霍尔-佩奇关系,材料的强度与晶粒直径的平方根成反比;而 1/2 半径位置的晶粒组织最为细小,所以 1/2 半径位置的合金强度最高.

图 5 表明, GH4720Li 合金在拉伸变形时,一次  $\gamma'$  相与基体的相界处容易产生微裂纹,这种微裂纹随着拉伸变形量的增加而不断扩展、相连,直到试样断裂,对合金的塑性产生显著影响.随着一

次  $\gamma'$  相数量增加,这种微裂纹发生的几率增加,彼此连通的距离缩短,断裂前的塑性变形减小,合金的塑性指标随之下降低。另外,一次  $\gamma'$  相强度越低、塑性越好,越容易产生协调变形;当位错运动到一次  $\gamma'$  相与基体的相界时,应力集中程度下降;进而降低在相界产生微裂纹的几率,进一步提高合金的塑性指标。所以,具有数量最少、塑性最好的一次  $\gamma'$  相的棒坯中心位置的拉伸塑性最佳。

### 3 结 论

- 1) 均匀细小的基体晶粒,数量适中、塑性高的一次  $\gamma'$  相,以及大量的三次  $\gamma'$  相,是 GH4720Li 合金获得最优的综合力学性能的主要因素。
- 2) GH4720Li 合金中的一次  $\gamma'$  相与基体的相界是拉伸断裂的主要裂纹源;一次  $\gamma'$  相的数量及其塑性是影响合金塑性的主要因素。
- 3) GH4720Li 合金中的一次  $\gamma'$  相随着析出温度升高,其塑性增加,Al, Ti 元素含量下降,而 Cr, Co, Mo 和 W 元素含量升高。

### 参考文献:

[ 1 ] Gopinath K, Gogia A K, Kamat S V, et al. Dynamic strain ageing in Ni-base superalloy 720Li [ J ]. *Acta Materialia*, 2009, 57 ( 4 ): 1243 – 1253.

[ 2 ] Yuan Y, Gu Y F, Cui C Y, et al. Creep mechanisms of U720Li disc superalloy at intermediate temperature [ J ]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528 ( 15 ): 5106 – 5111.

[ 3 ] Lupinc V, Maldini M, Zhou L Z, et al. Creep behavior modeling of Udimet 720Li superalloy [ J ]. *Acta Metallurgica Sinica ( English Letters )*, 2005, 18 ( 1 ): 65 – 73.

[ 4 ] Mao J, Chang K M, Yang W, et al. Cooling precipitation and strengthening study in powder metallurgy superalloy U720Li [ J ]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2001, 32 ( 10 ): 2441 – 2452.

[ 5 ] 宋西平,李红宇,盖靖峰,等. U720Li 合金高温析出  $\gamma'$  相的失稳分解 [ J ]. *金属学报*, 2005, 41 ( 11 ): 1233 – 1236.

( Song Xi-ping, Li Hong-yu, Gai Jing-feng, et al. The decomposition of metastable high-temperature  $\gamma'$  precipitates

in U720Li alloy [ J ]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 41 ( 11 ): 1233 – 1236. )

[ 6 ] Pang H T, Reed P A S. Effects of microstructure on room temperature fatigue crack initiation and short crack propagation in Udimet 720Li Ni-base superalloy [ J ]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30 ( 10 ): 2009 – 2020.

[ 7 ] Jackson M P, Reed R C. Heat treatment of UDIMET 720Li: the effect of microstructure on properties [ J ]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 259 ( 1 ): 85 – 97.

[ 8 ] Calliari I, Magrini M, Dabala M. Microstructural evolution of Udimet 720 superalloy [ J ]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 1999, 8 ( 1 ): 111 – 115.

[ 9 ] Monajati H, Jahazi M, Bahrami R, et al. The influence of heat treatment conditions on characteristics in Udimet 720 [ J ]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 373 ( 1/2 ): 286 – 293.

[ 10 ] Pang H T, Reed P A S. Microstructure variation effects on room temperature fatigue threshold and crack propagation in Udimet 720Li Ni-base superalloy [ J ]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2009, 32 ( 8 ): 685 – 701.

[ 11 ] 周舸,韩寅奔,曲敬龙,等. U720Li 镍基高温合金不同失稳判据的热加工图 [ J ]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2012, 33 ( 5 ): 702 – 706.

( Zhou Ge, Han Yin-ben, Qu Jing-long, et al. A comparative study of various flow instability criteria in processing map of superalloy U720Li [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2012, 33 ( 5 ): 702 – 706. )

[ 12 ] 李强,张麦仓,郑磊,等. GH720Li 合金  $\gamma + \gamma'$  两相区再结晶行为 [ J ]. *北京科技大学学报*, 2014, 36 ( 1 ): 74 – 81.

( Li Qiang, Zhang Mai-cang, Zheng Lei, et al. Recrystallization behavior of GH720Li alloy in the  $\gamma + \gamma'$  bi-model phase region [ J ]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36 ( 1 ): 74 – 81. )

[ 13 ] 冶军. 美国镍基高温合金 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1978, 51 – 52.

( Ye Jun. American nickel base superalloys [ M ]. Beijing: Science Press, 1978, 51 – 52. )

[ 14 ] Mitchell R J, Preuss M. Inter-relationships between composition,  $\gamma'$  morphology, hardness, and  $\gamma' - \gamma$  mismatch in advanced polycrystalline nickel-base superalloys during aging at 800 °C [ J ]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2007, 38 ( 3 ): 615 – 627.