

GH5188 高温合金热变形组织传递规律研究

郭续龙^{1,2}, 蒋世川^{1,2}

(1. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610303; 2. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009)

摘要:采用 Gleeble-3800 热模拟试验机研究了 GH5188 高温合金多道次变形和保温过程中的组织传递规律, 建立了变形速率 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, 变形量 50%, 变形温度 $980 \sim 1230 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的热加工图, 探讨了单道次变形后保温时间对双道次变形组织、双道次变形后保温时间和保温温度对组织遗传性以及双道次降温变形和保温时间对显微组织的影响。结果表明: 热加工图中高功率耗散率区的边界条件分别为 $1050 \sim 1175 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 和 $1200 \sim 1225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$, 低功率耗散率区的边界条件分别为 $975 \sim 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 和 $1150 \sim 1225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$; 第一道次变形后保温时间过长不利于第二道次动态再结晶的发生; 双道次变形后保温时, 发生了明显的再结晶现象, 随着保温时间的增加, 晶粒未发生明显的长大; 随着第二道次变形温度的降低, 试样再结晶比例降低, 保温温度越低, 越不容易发生静态再结晶。

关键词:GH5188 高温合金; 多道次变形; 热加工图; 再结晶; 保温过程

中图分类号: TF76, TG132.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)05-0145-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.05.021

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the microstructure evolution during hot deformation of GH5188 superalloy

Guo Xulong^{1,2}, Jiang Shichuan^{1,2}

(1. Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610303, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: In this paper, the transformation law of microstructure evolution during multi-pass deformation and heat preservation was investigated by a Gleeble-3800 thermal simulation testing machine. A hot working diagram was established at deformation rate $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, deformation amount 50%, and deformation temperature $980 \sim 1230 \text{ }^{\circ}\text{C}$. The effects of holding time after single-pass deformation on the microstructure of double-pass deformation, holding time after double-pass deformation and holding temperature on the microstructure evolution, and deformation and holding time after double-pass cooling on the microstructure were discussed. The results show that the boundary conditions of the high power dissipation zone in the hot working diagram are $1050 \sim 1175 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$, and $1200 \sim 1225 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$, respectively. The boundary conditions of the low power dissipation zone are $975 \sim 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, and $1150 \sim 1225 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$, respectively. Too long holding time after the first deformation is not conducive to the second dynamic recrystallization. The recrystallization phenomenon occurred after the double-pass deformation, and the grain size did not grow obviously with the increasing holding time. In addition, with the second deformation temperature decrease, the proportion of recrystal-

收稿日期: 2022-01-17

作者简介: 郭续龙, 1993 年出生, 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 助理工程师, 长期从事高温合金方面的基础研究工作, E-mail: 799773653@qq.com。

lization in the specimen decreases, and the lower the holding temperature, the less likely static recrystallization occurs.

Key words: GH5188 superalloy, multi-pass deformation, thermal processing map, recrystallization, heat preservation

0 引言

GH5188 是一种固溶强化型钴基高温合金, 国外相近牌号为 Hayness188^[1]。该合金具有良好的高温耐热性^[2]、高温抗氧化性^[3], 被广泛地用于制造航空发动机冷却环、涡轮发动机的燃烧室和喷油嘴等^[4]。近年来, 航空发动机对发动机叶片、涡轮盘等关键零部件的制造精度、服役性能的要求越来越严格, 这对材料的性能提出了更高的要求。

通过控制热变形工艺可以调控显微组织, 从而提高其性能^[5]。在热变形过程中, 合金的动态再结晶是一种重要的组织演化行为^[6]。动态再结晶可软化合金, 提高合金的塑性和延展性, 改善合金的塑性加工性能^[7]; 动态再结晶也是合金细化晶粒, 控制显微组织的关键技术^[8]。动态再结晶行为的研究是合金高温变形行为的重要内容。

目前对 GH5188 的研究主要集中在寿命分析、硬化和接合等方面, 针对热塑性的研究有待进一步加强, 特别是动态再结晶。在探索 Co-Ni 超合金的热变形时, Ouyang Lingxiao^[9] 揭示了一种新型的动态再结晶, 即孪生动态再结晶。Wu^[10] 等建立了一个 FGH96 高温合金的动态再结晶模型, 通过热模拟试验和定量微观结构表征, 发现升高温度或降低应

变速率会导致动态再结晶分数和晶粒尺寸的增加。在关于 Co-Cr-Ni 合金的应变硬化行为研究时, Guan^[11] 等人发现更高的应变率导致在 900 ~ 1 000 ℃ 时再结晶晶粒的比例较低, 而动态再结晶仅在 700 ℃、高应变率的情况下发生, 这表明温度和应变率对动态再结晶的影响复杂。

上述关于 GH5188 合金的研究均是基于单道次热压缩下保温温度和应变速率对动态再结晶的影响, 对多道次变形下的影响没有提及。基于此, 笔者在研究单道次保温不同时间对变形组织影响的基础上, 对双道次变形后保温时间和保温温度对组织遗传性的影响进行了研究, 揭示了 GH5188 高温合金多道次变形和保温过程中的组织传递规律, 建立了变形速率为 0.01 ~ 10 s⁻¹, 变形量为 50%, 变形温度为 980 ~ 1 230 ℃ 下的热加工图, 拟为材料热加工工艺的制定提供指导。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用原材料为 Ø150 mm 的 GH5188 合金棒材, 取自某厂, 化学成分见表 1。利用线切割方式以合金棒材 1/2 半径位置为中心轴线切取圆柱体热模拟试样, 尺寸为 Ø8 mm × 12 mm。

表 1 GH5 188 棒材化学成分
Table 1 Chemical composition of GH5188 superalloy bar

%

C	Cr	Ni	Co	W	Fe	B	La
0.078	21.023	21.447	余量	13~16	0.497	0.002 9	<0.4
Mn	Si	P	S	Al	Bi	Pb	Ti
0.837	0.430	0.007 0	<0.001	0.054	<0.001	<0.005	0.012

1.2 试验方案

1) 压缩试验: 采用 Gleeble-3800 热模拟机进行等温恒变速率轴向压缩, 以 10 ℃/s 的加热速度从室温将试样加热到测试温度并保温 180 s, 然后再以不同的应变速率对试样进行压缩变形, 其中热变形温度分别为 980、1 030、1 080、1 130、1 180 ℃ 和 1 230 ℃, 应变速率分别为 0.01、0.1、5 s⁻¹ 和 10 s⁻¹,

变形量为 50%, 通过对不同变形条件下峰值应力和峰值应变的计算, 得到了变形量为 50% 时的热加工图。

2) GH5188 合金多道次变形和保温过程中的组织传递规律试验: 将样品在 1 180 ℃ 下保温 3 min, 保温后的样品以 0.1 ~ 1 s⁻¹ 的应变速率进行第一次压缩, 压缩量为 20% 和 40%; 之后在该温度下保温一定时间(0.5、1、5、15、30 min), 接着以 0.1 ~ 1 s⁻¹

的应变速率进行第二次压缩, 压缩量为 40%; 然后将不同双道次压缩后的试样在 1 180 °C 分别保温 5、15、30、60 min, 观察组织演变规律。

3) 双道次降温变形和保温试验: 1 180 °C 保温 3 min 后的样品以 $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 的应变速率进行第一次压缩, 压缩量 40%, 然后在该温度下保温 15 min, 接着分别在 1 180、1 150 °C 以 $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 的应变速率进行第二次压缩, 压缩量为 40%, 然后将不同双道次压缩后的试样分别在该温度下保温 30、60、90、120 min, 观察组织演变规律。

2 结果与讨论

2.1 GH5188 热加工图建立

当温度和应变保持不变, 热变形金属材料所受的应力 σ 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 之间存在的动态关系如式(1)所示:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

式中, K 表示应变速率为 1 s^{-1} 时的流变应力(单位 Pa); m 为应变速率敏感因子, 如式(2)所示:

$$m = \partial(\ln \sigma) / \partial(\ln \dot{\epsilon}) \quad (2)$$

材料在热变形过程中单位体积内所吸收的总功率(P)可以用两个互补函数的和来表示, 如式(3)、(4)所示:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial J}{\partial G} \right)_{\epsilon, T} = \left(\frac{\dot{\epsilon} \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon, T} = \left[\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right]_{\epsilon, T} = m \quad (4)$$

由式(4)可知应变速率敏感因子 m 决定了 G 和 J 之间的分配。其中 G 代表由塑性应变引起的功率耗散, 其大多数转化为黏塑性热; J 代表材料变

形过程中由于组织结构变化而耗散的功率。取功率耗散余量(J)与理想线性耗散因子($J_{\max}$)的比值得到功率耗散系数 η , 如式(5)所示:

$$\eta = J/J_{\max} = 2m/(m+1) \quad (5)$$

通过对应变量、应变速率和温度三者关系作图, 可得到功率耗散图。在动态材料模型中, 将不可逆热动力学的极大值原理应用于大应变塑性流变中, 给出加工失稳区的判据如式(6)所示:

$$\frac{dD}{d\dot{\epsilon}} > \frac{D}{\dot{\epsilon}} \quad (6)$$

D 表示材料本征行为的耗散函数, 由于 J 值反应了冶金学过程的功率耗散, 所以可用 J 代替 D , 得到了在一定温度和应变下的微观组织保持稳定条件的表达式(式(7)):

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln[m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m > 0 \quad (7)$$

其中, ξ 为变形温度和应变速率的函数, 因此流变失稳同样与应变速率敏感因子 m 有关。基于上述动态材料模型原理^[12-18], 建立 GH5188 合金的功率耗散图和失稳图。读取不同变形条件下应变量为 50% 时的流变应力值, 用式(8)的三项多项式拟合 $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系曲线, 回归求得多项式系数 a 、 b 、 c 、 d 的数值。

$$\ln \sigma = a + b \ln \dot{\epsilon} + c (\ln \dot{\epsilon})^2 + d (\ln \dot{\epsilon})^3 \quad (8)$$

对式(8)两边关于 $\ln \dot{\epsilon}$ 求导, 得到式(9):

$$m = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \dot{\epsilon})} = b + 2c \ln \dot{\epsilon} + 3d (\ln \dot{\epsilon})^2 \quad (9)$$

通过计算得到不同变形条件下应变速率敏感指数 m 值, 见表 2。将 m 值代入式(5)即可求出功率耗散效率因子 η 值, 见表 3。

表 2 GH5 188 合金在不同变形条件下应变速率敏感指数 m
Table 2 The strain rate sensitivity index m of GH5188 alloy under different deformation conditions

$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	m					
	980 °C	1 030 °C	1 080 °C	1 130 °C	1 180 °C	1 230 °C
0.01	0.157 77	0.170 63	0.261 44	0.398	0.144 36	0.513 28
1	0.035 78	0.058 18	0.033 82	0.048 66	0.162 38	0.068 07
5	0.043 56	0.064 79	0.060 49	0.112 01	0.099 37	0.160 33
10	0.054 95	0.074 96	0.088 93	0.168 88	0.061 17	0.239 61

在 GH5188 合金变形温度和应变速率所构成的平面上绘制功率耗散效率因子的等值轮廓曲线, 就得到 GH5188 合金应变量为 50% 的功率耗散图, 如图 1 所示。

将式(9)代入式(7)中, 得到:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(m/m+1)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m = \frac{2c + 6d \log_{10} \dot{\epsilon}}{m(m+1) \ln 10} > 0 \quad (10)$$

将 m 值带入到式(9)即得到不同变形条件下的流变失稳判据值, 见表 4。在变形温度和应变速率

所构成的平面上绘制流变失稳判据的等值轮廓曲线, 就得到 GH5188 合金应变量 50% 的失稳图, 如图 2 所示。

表 3 GH5188 合金在不同变形条件下功率耗散效率因子 η 值

Table 3 The power dissipation efficiency factor η value of GH5188 alloy under different deformation conditions

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	η					
	980 °C	1 030 °C	1 080 °C	1 130 °C	1 180 °C	1 230 °C
0.01	0.272 54	0.291 52	0.414 51	0.569 38	0.252 3	0.678 37
1	0.069 09	0.109 96	0.065 43	0.092 8	0.279 39	0.127 46
5	0.083 48	0.121 7	0.114 08	0.201 46	0.180 78	0.276 35
10	0.104 18	0.139 47	0.163 33	0.288 96	0.115 29	0.386 59

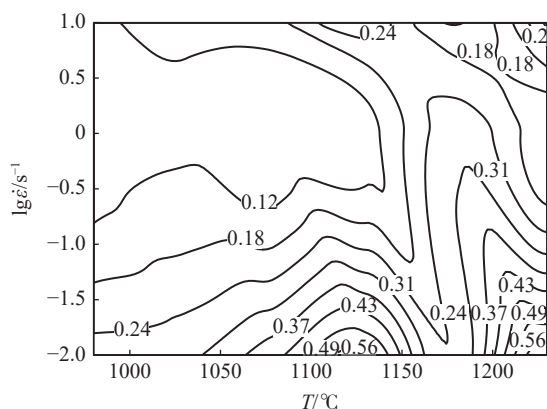


图 1 GH5188 合金的应变量为 50% 时的功率耗散图

Fig. 1 Power dissipation diagram of GH5188 alloy at 50% strain

将 GH5188 合金应变量为 50% 的功率耗散图与失稳图叠加, 就构成了 GH5188 合金热变形应变量为 50% 的加工图, 如图 3 所示。图中渐进阴影填

充部分是失稳图中等值线为负的失稳区。

从应变量为 50% 的加工图可以看出两个高功率耗散率区和两个低功率耗散率区, 高功率耗散率一区处在变形温度为 1 050 ~ 1 175 °C、应变速率为 0.01 ~ 0.1 s⁻¹, 该区域的最大功率耗散率值为 56%; 高功率耗散率二区处在变形温度为 1 200 ~ 1 225 °C、应变速率为 0.01 ~ 1 s⁻¹; 低功率耗散率一区位置在变形温度为 975 ~ 1 150 °C、应变速率为 0.01 ~ 10 s⁻¹; 低功率耗散率二区位置在变形温度为 1 150 ~ 1 225 °C、应变速率为 0.1 ~ 10 s⁻¹。两个高功率耗散率区分别对应低温低应变速率区、高温低应变速率区, 两个低功率耗散率区分别对应低温高应变速率区、高温高应变速率区。应变量为 50% 的加工图中存在失稳区, 与图中的高功率耗散率区和低功率耗散率区重合。

表 4 GH5188 合金在不同变形条件下流变失稳判据 ζ 值

Table 4 Rheological instability criterion ζ value of GH5188 alloy under different deformation conditions

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	ζ					
	980 °C	1 030 °C	1 080 °C	1 130 °C	1 180 °C	1 230 °C
0.01	-0.055 77	-0.047 05	-0.056 63	-0.050 45	-0.000 74	-0.045 67
1	-0.038 44	-0.023 14	-0.006 47	0.081 02	-0.064 42	0.104 18
5	0.035 98	0.019 75	0.096 98	0.123 56	-0.149 83	0.121 58
10	0.050 94	0.031 8	0.092 92	0.102 52	-0.280 07	0.097 96

2.2 单道次变形后保温时间对双道次变形组织的影响

图 4 为 GH5188 合金在 1 180 °C 以 0.1 s⁻¹ 的应变速率变形 40% 后, 经不同保温时间的显微组织和不同保温时间后再进行第二道次 40% 变形量的

显微组织。从图 4 可以看出, GH5188 合金在 1 180 °C 变形 40% 后经不同保温时间, 合金发生了不同程度动态再结晶; 在进行第二道次变形中合金继续发生动态再结晶。如图 4(e), 当保温 30 s 后进行第二道次变形时, 样品发生了完全再结晶; 如图 4(f), 保温

60 s 时样品出现了未完全再结晶现象; 随着保温时间的延长, 如图 4(h), 保温 30 min 后样品中出现了项链组织。对比单道次和双道次的变形组织, 发现随着第一道次变形后保温时间的延长, 晶粒尺寸逐渐增加, 在第二道次压缩中动态再结晶比例逐渐减少。这主要是由于晶界是动态再结晶的主要形核位置, 晶粒尺寸过大, 动态再结晶形核点减少, 所以第二道次热变形过程中动态再结晶发生越困难。因此, 第一道次变形后保温时间过长不利于第二道次热变形过程中动态再结晶的发生。

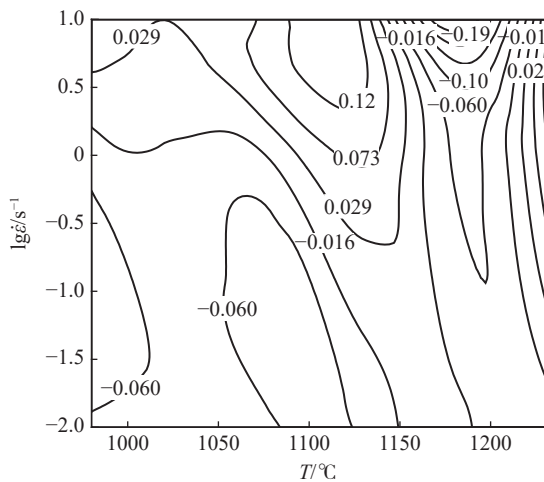


图 2 GH5188 合金的应变量为 50% 时的失稳图

Fig. 2 Instability diagram of GH5188 alloy at 50% strain

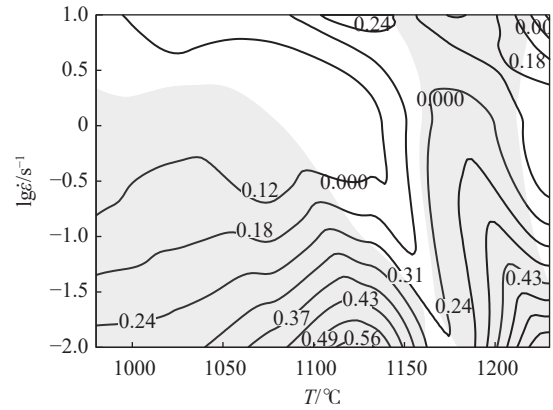
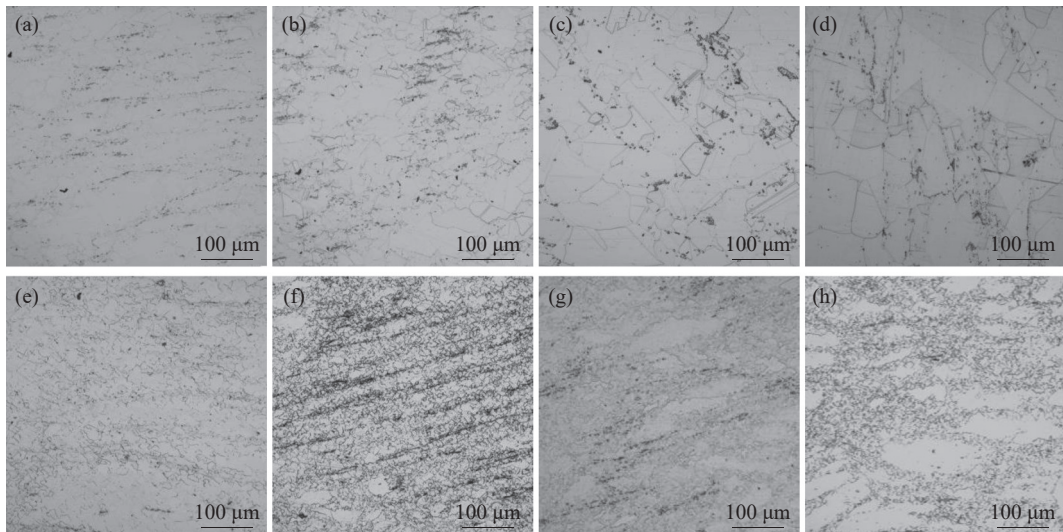


图 3 GH5188 合金变形量为 50% 时的加工图

Fig. 3 Processing drawing of GH5188 alloy at 50% deformation

2.3 双道次变形后保温时间和保温温度对组织遗传性的影响

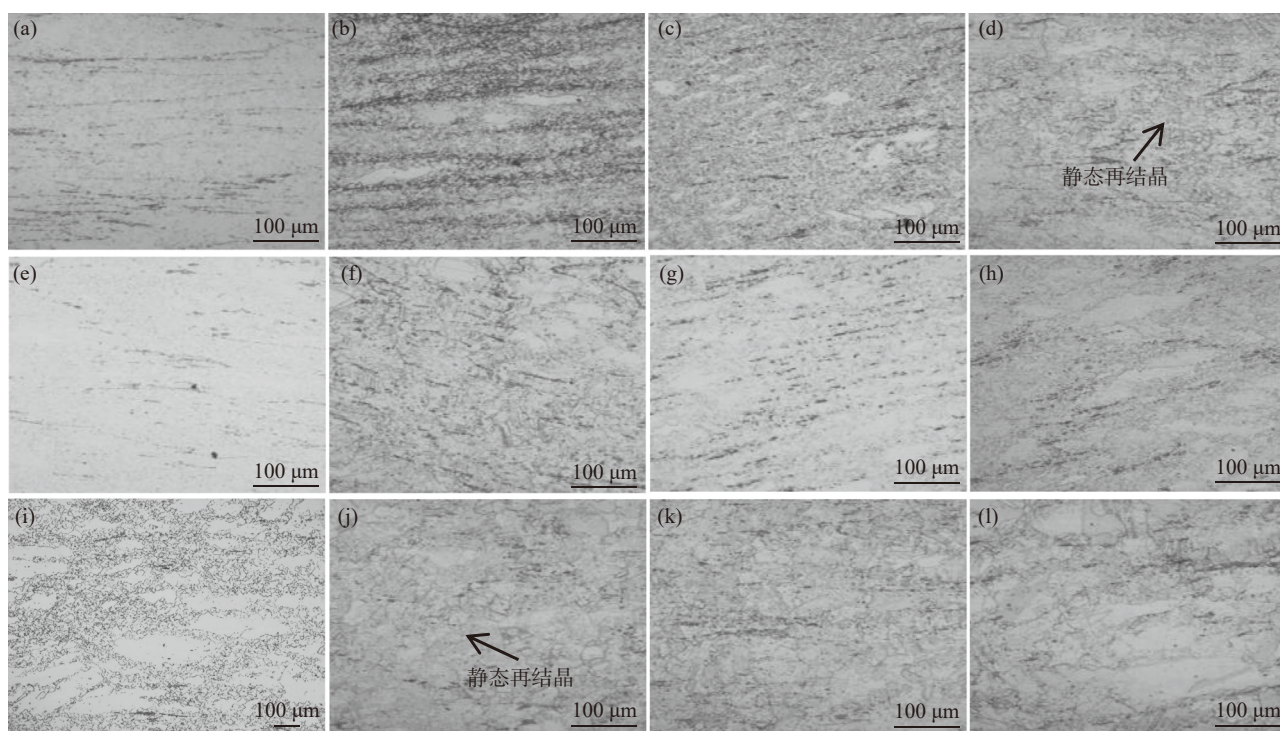
图 5 为 GH5188 合金经不同双道次变形条件变形后在 1 180 °C 保温 30 min 和 60 min 的显微组织, 从图 5 可以看出, 在 1 180 °C 保温过程中晶粒尺寸未发生明显的长大, 但发生了明显的静态再结晶现象; 双道次变形后未再结晶组织越多, 保温过程发生完全静态再结晶所需要的时间越长^[19]。除 1 180 °C-40%+30 min+1 180 °C-40% 双道次变形条件下, 保温 60 min 还未发生完全静态再结晶外, 其余变形条件在保温时间内均发生了完全再结晶。



(a) 1 180 °C-40%-30 s; (b) 1 180 °C-40%-60 s; (c) 1 180 °C-40%-15 min; (d) 1 180 °C-40%-30 min; (e) 1 180 °C-40%-30 s-40%; (f) 1 180 °C-40%-60 s-40%; (g) 1 180 °C-40%-15 min-40%; (h) 1 180 °C-40%-30 min-40%

图 4 单道次变形 40% 后经不同保温时间再变形 40% 前后的显微组织

Fig. 4 The microstructure before and after deforming 40% in a single pass and then deforming 40% after different holding times



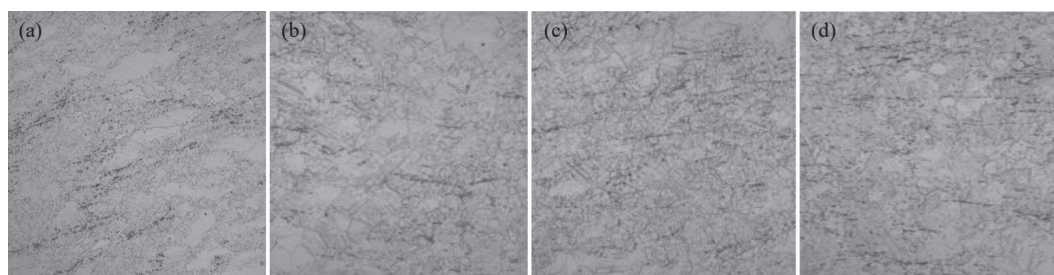
(a) 1 180 °C, 20%+5 min+1 180 °C, 40%, 0 min; (b) 1 180 °C, 20%+15 min+1 180 °C, 40%, 0 min;
(c) 1 180 °C, 20%+30 min+1 180 °C, 40%, 0 min; (d) 1 180 °C, 20%+5 min+1 180 °C, 40%, 30 min;
(e) 1 180 °C, 20%+15 min+1 180 °C, 40%, 30 min; (f) 1 180 °C, 20%+30 min+1 180 °C, 40%, 30 min;
(g) 1 180 °C, 40%+5 min+1 180 °C, 40%, 0 min; (h) 1 180 °C, 40%+15 min+1 180 °C, 40%, 0 min;
(i) 1 180 °C, 40%+30 min+1 180 °C, 40%, 0 min; (j) 1 180 °C, 40%+5 min+1 180 °C, 40%, 60 min;
(k) 1 180 °C, 40%+15 min+1 180 °C, 40%, 60 min; (l) 1 180 °C, 40%+30 min+1 180 °C, 40%, 60 min

图 5 不同双道次变形条件变形后保温 30 min 和 60 min 的显微组织

Fig. 5 The microstructure of different two-pass deformation conditions after deformation and holding for 30 min and 60 min

图 6 为 GH5188 合金在 1 180 °C-40%+15 min+1 180 °C-40% 条件下双道次变形后保温不同时间的显微组织,从图 6 可以看出,在该变形条件下,在 1 180 °C 保温 5 min 时双道次变形形成的未再结晶组织发生了完全再结晶,显微组织全部为细小的奥氏体

晶粒,随着保温时间的延长,晶粒未发生明显的长大,这是由于在 1 180 °C 保温时,变形后形成的未再结晶组织比例较少,很快发生了完全再结晶,且随着时间的延长,晶界上形成的大量碳化物包裹着再结晶晶粒,阻碍了奥氏体晶粒的长大^[20]。



(a) 1 180 °C, 40%+15 min+1 180 °C, 40%, 0 min; (b) 1 180 °C, 40%+15 min+1 180 °C, 40%, 5 min;
(c) 1 180 °C, 40%+15 min+1 180 °C, 40%, 30 min; (d) 1 180 °C, 40%+15 min+1 180 °C, 40%, 60 min

图 6 不同双道次变形条件变形后保温 30 min 和 60 min 的显微组织

Fig. 6 The microstructure of different two-pass deformation conditions after deformation and holding for 30 min and 60 min

2.4 双道次降温变形和保温时间对显微组织的影响

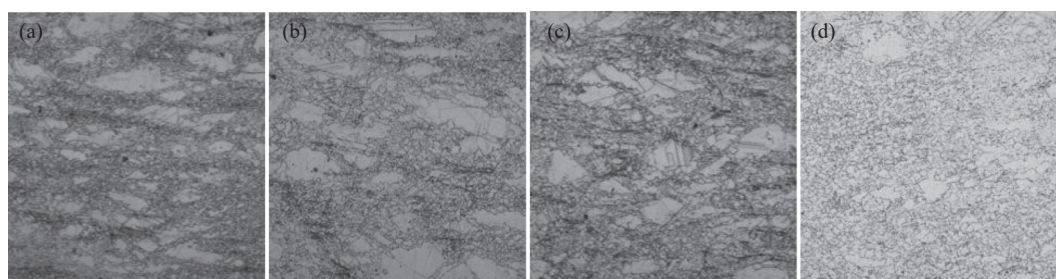
图 7 为 1 180 °C-40%+15 min+1 150 °C-40% 双

道次变形保温不同时间的显微组织。对比图 6 和图 7 可以看出, GH5188 合金在其他变形条件相同的条件下,随着第二道次变形温度的降低,试样再结

晶比例降低。

对比双道次变形后保温温度对显微组织的影响,当保温温度由 1 180 ℃ 降低到 1 150 ℃,发生静态再结晶的能力显著下降,随着保温温度的降低,不容

易发生静态再结晶;在 1 150 ℃ 保温时,当保温时间由 30 min 延长到 90 min 时,发生静态再结晶的现象不明显,当时间延长到 120 min 时可观察到明显的静态再结晶。



(a) 1 180 ℃-40%+15 min+1 150 ℃-40%-30 min; (b) 1 180 ℃-40%+15 min+1 150 ℃-40%-60 min; (c) 1 180 ℃-40%+15 min+1 150 ℃-40%-90 min; (d) 1 180 ℃-40%+15 min+1 150 ℃-40%-120 min

图 7 1 180 ℃-40%+15 min+1 150 ℃-40% 双道次变形后保温不同时间的显微组织

Fig. 7 The microstructure of 1 180 ℃-40%+15 min+1 150 ℃-40% double-pass deformation and heat preservation for a different times

3 结论

1) GH5188 合金变形量为 50% 的热加工图中存在两个高功率耗散率区和两个低功率耗散率区:高功率耗散率区的边界条件分别为 1 050 ~ 1 175 ℃、0.01 ~ 0.1 s⁻¹ 和 1 200 ~ 1 225 ℃、0.01 ~ 1 s⁻¹;低功率耗散率区的边界条件分别为 975 ~ 1 150 ℃、0.01 ~ 10 s⁻¹ 和 1 150 ~ 1 225 ℃、0.1 ~ 10 s⁻¹。

2) 第一道次变形后保温时间过长不利于第二道次变形过程中动态再结晶的发生。

3) 双道次变形后进行保温时,发生了明显的再结晶现象,且随着保温时间的增加,晶粒未发生明显的长大。

4) 随着第二道次变形温度的降低,试样再结晶比例降低,随着保温温度的降低,越不容易发生静态再结晶。

参考文献

- [1] Gao Yawei, Dong Jianxin, Yao Zhihao, *et al.* Microstructure characteristics and microstructure evolution of GH5188 superalloy during hot and cold working[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(10): 7.
(高亚伟, 董建新, 姚志浩, 等. GH5188 高温合金组织特征及冷热加工过程组织演变[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(10): 7.)
- [2] Li Juntao, Yan Ping, Wu Jiantao, *et al.* New high-strength hot-corrosion-resistant directional solidification superalloy DZ409[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2016, 28(2): 7.
(李俊涛, 燕平, 吴剑涛, 等. 新型高强抗热腐蚀定向凝固高温合金 DZ409[J]. *钢铁研究学报*, 2016, 28(2): 7.)
- [3] Wang Haitao, Zhang Guoling, Yu Huashun, *et al.* Effects of chromium, aluminum and silicon on the oxidation resistance of iron-based superalloys[J]. *Materials Engineering*, 2008, (12): 5.
(王海涛, 张国玲, 于化顺, 等. 铬、铝、硅对铁基高温合金抗氧化性能的影响[J]. *材料工程*, 2008, (12): 5.)
- [4] Jia Chonglin. Development and demand application of superalloys[J]. *Metal Materials Research*, 2011, 37(4): 6.
(贾崇林. 高温合金的发展与需求应用[J]. *金属材料研究*, 2011, 37(4): 6.)
- [5] Qin Qin, Mao Zijian, Liu Zhaofan. Application status and development of superalloys in aeroengine field[J]. *Tool Technology*, 2017, 51(9): 4.
(秦琴, 毛子荐, 刘昭凡. 高温合金在航空发动机领域的应用现状与发展[J]. *工具技术*, 2017, 51(9): 4.)
- [6] Zhang Xin, Li Hongwei, Mei Zhan, *et al.* Role of the inter-pass cooling rate in recrystallization behaviors of Ni-based superalloy during interrupted hot compression[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(5): 17.
- [7] Semiatin S L, Weaver D S, Goetz R L, *et al.* Deformation and recrystallization during thermomechanical processing of a nickel-base superalloy ingot material[C]// *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, 2007: 129-140.
- [8] Zhang Yun, Cao Furong, Lin Kaizhen, *et al.* Dynamic recrystallization behavior of GH4742 superalloy[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(11): 9.

- (张云, 曹富荣, 林开珍, 等. GH4742高温合金的动态再结晶行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(11): 9.)
- [9] Ouyang Lingxiao, Luo Rui, Gui Yunwei, *et al.* Hot deformation characteristics and dynamic recrystallization mechanisms of a Co-Ni-based superalloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 788: 139638.
- [10] Wu Hong, Liu Minxue, Wang Yan, *et al.* Experimental study and numerical simulation of dynamic recrystallization for a FGH96 superalloy during isothermal compression[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 23.
- [11] Guan Bo, Wang Yitao, Li Jianbo, *et al.* Comprehensive study of strain hardening behavior of CrCoNi medium-entropy alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 882: 160623.
- [12] Kong Yonghua, Chang Pengpeng, Li Qian, *et al.* Hot deformation characteristics and processing map of nickel-based C276 superalloy[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2015, 622: 738–744.
- [13] Zhang Jianbo, Wu Chongji, Peng Yuanyi, *et al.* Hot compression deformation behavior and processing maps of ATI 718Plus superalloy - Science direct[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835: 1263.
- [14] Li Sha, Zeng Li, Miao Huajun, *et al.* Hot deformation behavior and processing maps of Ni-based superalloy GH4700[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34(9): 51–56.
- [15] Pan Qinglin, Li Bo, Wang Ying, *et al.* Characterization of hot deformation behavior of Ni-base superalloy Rene'41 using processing map[J]. *Materials Science & Engineering A Structural Materials Properties Microstructure & Processing*, 2013, 585(15): 371–378.
- [16] Wang Ying, Pan Qingling, Zhang Yuwei, *et al.* Hot deformation behavior and processing map of GH4169 superalloy[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(11): 3752–3761.
- [17] Cai Dayong, Xiong Liangyin, Liu Wenchang, *et al.* Characterization of hot deformation behavior of a Ni-base superalloy using processing map[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(3): 921–925.
- [18] Zhang Hongbin, Zhang Kaifeng, Zhen Lu, *et al.* Hot deformation behavior and processing map of a γ' -hardened nickel-based superalloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 604(16): 1–8.
- [19] Zhao Lihua, Zhang Yanshu, Wu Guifang. Static recrystallization kinetics of GH4169 superalloy[J]. *Journal of Materials Heat Treatment*, 2015, (5): 6.
- (赵立华, 张艳姝, 吴桂芳. GH4169高温合金的静态再结晶动力学[J]. 材料热处理学报, 2015, (5): 6.)
- [20] Wu Zhigang, Li Defu, Guo Shengli, *et al.* Study on dynamic recrystallization model of GH625 nickel-based superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(2): 6.
- (吾志岗, 李德富, 郭胜利, 等. GH625镍基高温合金动态再结晶模型研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 6.)

编辑 唐 肖

海化集团 300 MW 光伏发电+30 MW/60 MWh 全钒液流电池储能项目开工

(9月15日消息)近日,潍坊滨海风光储智慧能源示范基地,海化集团首期300MW光伏发电项目正式开工。

作为鲁北盐碱滩涂千万kW风光储输一体化重要组成部分,潍坊滨海风光储智慧能源示范基地位于山东潍坊滨海经济技术开发区境内,由山东海化集团等企业投资建设,计划总投资140亿元,装机容量3000MW。其中,光伏发电2900MW,风电100MW。据悉,示范基地首期光伏项目建设容量300MW,设计年限25年,配套220kV升压站1座,计划于今年12月底并网。项目采用540W高效单晶PERC双面光伏组件,通过平单轴跟踪、固定跟踪两种方式运行,并配置30MW/60MW·h独立储能系统。项目建成投运,年发电量4亿kW·h,年可替代标煤12.5万t、减排二氧化碳34.2万t。

首期300MW光伏项目,在智能控制、智能巡检、运维成本、发电效率等方面大胆创新突破。智慧能源管理平台采用智能集中控制系统,实现对升压站、光伏区等远程监视、操作控制、分析决策、运行信息管理……无人机智能巡检系统可对发现故障自主分析,及时将检测结果上传管理平台;首次引用的集中式箱逆变一体机损耗小、易维护、节约占地,大幅降低运维成本;光伏组件采用半片组件技术、多主栅组件技术、PERC双玻双面电池技术,发电效率可达21%及以上。同时,光伏支架采用平单轴跟踪支架,发电效率可提升10%以上。

摘自 <http://www.cbcie.com/news/1153958.html>