脉冲电流处理对冷轧态 GH3030 合金 再结晶组织性能的影响

张弘斌,房蕊蕊,邓娜娜,王艳,周海萍

(山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:目的 探究不同工艺参数下脉冲电流处理对冷轧态 GH3030 合金静态再结晶组织的影响。方法 利用电 子背散射衍射(EBSD),探究脉冲电流处理(EPT)和常规退火处理(CHT)对 GH3030 合金静态再结晶的 影响。探究了两种热处理方式下不同退火温度和时间对冷轧态 GH3030 合金静态再结晶体积分数、晶粒尺寸 以及硬度的影响,计算两种热处理方式下不同工艺参数的静态再结晶动力学方程与激活能。结果 与常规退 火处理相比,脉冲电流处理可以快速提高冷轧态 GH3030 合金的静态再结晶体积分数,并且得到了尺寸更加 均匀的晶粒,而脉冲电流处理的合金其硬度值均小于相同条件下常规退火处理的合金。根据静态再结晶动 力学方程的结果可知,脉冲电流处理的合金再结晶激活能低于常规退火处理的合金,脉冲电流处理下发生 完全再结晶所需时间远远少于常规退火处理下所需时间。结论 脉冲电流处理促进了冷轧 GH3030 合金静态 再结晶行为,并且加速了再结晶晶粒的成核和长大,但脉冲电流处理对改善 GH3030 合金的硬度效果不明显。 关键词:脉冲电流处理;静态再结晶;激活能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.01.013

中图分类号: TG132.3⁺2; TH142.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2021)01-0095-10

Effects of Electropulsing Treatment on Recrystallization Microstructure and Properties of Cold-rolled GH3030 Alloy

ZHANG Hong-bin, FANG Rui-rui, DENG Na-na, WANG Yan, ZHOU Hai-ping

(School of Mechatronics Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effects of electropulsing treatment (EPT) on the static recrystallization structure of cold-rolled GH3030 alloy under different process parameters. The effects of EPT and conventional heat treatment (CHT) on static recrystallization of GH3030 alloy were investigated by electron backscattering diffraction (EBSD). In addition, the effects of different annealing temperatures and time on static recrystallization volume fraction, grain size and hardness of GH3030 alloy under two heat treatment methods was explored. Meanwhile, the kinetic equation and activation energy of static recrystallization under different heat treatment conditions were calculated. The results showed that EPT could significantly increase the static recrystallization volume fraction of cold-rolled GH3030 alloy than CHT. In addition, the grains with uniform sizes were obtained. However, the hardness of the alloy treated by EPT was lower than that by CHT under the same conditions. Based on the calculation results of static recrystallization kinetic equation, the recrystallization and activation energy of EPT treated alloys was lower than that of CHT treated alloys, besides, the time required for complete recrystallization under EPT was much less than that under CHT. The EPT promotes the static recrystallization behavior of cold-rolled GH3030 alloy and accelerates the nucleation and growth of recrystallized grains, but decreases the hardness of the alloy.

基金项目: 青岛市博士后应用资助

作者简介:张弘斌(1985—),男,博士,讲师,主要研究方向为高温合金热加工技术。

KEY WORDS: electropulsing treatment (EPT); static recrystallization; activation energy

GH3030 高温合金按合金强化类型分属固溶强化 型镍基高温合金,具有优良的抗氧化和耐腐蚀性能, 广泛应用于发动机、叶片等热端部件^[1-3]。GH3030 加工性能也较为优越,可以用于制作化工设备及配套 配件原料。随着工业领域的快速发展,对合金的工作 坏境要求越来越苛刻,需要合金具有稳定的性能和优 异的组织结构,通过加快材料的再结晶过程来改善合 金组织及材料性能,再结晶过程对材料的组织结构以 及性能方面有重要的影响。静态再结晶过程对冷变形 后的金属进行热处理后,金属内部原有的变形组织上 出现了新的晶粒并逐渐长大形成等轴晶,变形组织最 终消失^[4-9]。

近年来,利用脉冲电流技术对金属材料进行热处 理的研究有很多。GUO 等^[10]研究了电脉冲处理对冷 轧镁合金 ZK60 带材再结晶行为的影响,结果表明, 电脉冲处理显著提高了晶界的成核率和迁移能力,使 变形金属在较低温度下加速再结晶。李斌等[11]对冷轧 Hi-B 钢施加脉冲磁场,发现退火温度为 760 ℃时, 可促进晶粒发生再结晶长大。宋进林等[12]研究表明, 脉冲电流可以通过促进金属的再结晶行为来改善材 料的微观组织、变形组织,进而提高材料的力学性能。 王杰等^[13]在 AZ31 镁合金的拉伸变形中引入了脉冲电 流,发现经过脉冲电流处理的 AZ31 镁合金的变形抗 力明显降低,并且随着脉冲电流密度的增加,其变形 抗力下降的幅度增大。文中采用脉冲电流技术探究对 冷轧态 GH3030 合金再结晶组织性能的影响,通过对 比不同热处理工艺参数下脉冲电流和常规退火处理的 冷轧态 GH3030 合金并进行 EBSD 分析,研究脉冲电流 技术对冷轧态 GH3030 合金再结晶组织性能的影响。

1 试验

1.1 材料

将在 1130 ℃下固溶处理 2 h 后空冷的 GH3030 合金进行冷轧变形处理,试验材料选择冷轧处理后 变形量为 0.5 的试样合金,利用线切割设备沿轧制 方向将冷轧减薄 50%的试样切成 50 mm×5 mm× 1 mm 的长条状,用不同粒度的砂纸对其进行研磨, 之后在抛光机上进行抛光,并用酒精擦拭表面,以 去除试样表面的划痕及污渍。GH3030 合金化学成分 为(质量分数):C \leq 0.12%,Mn \leq 0.7%,Si \leq 0.8%, P \leq 0.015%,S \leq 0.01%,Fe \leq 0.15%,Cr 为 19%~22%, Ti 为 0.15%~0.35%,Al \leq 0.15%,Pb \leq 0.001%,Cu \leq 0.007%,余量为 Ni。图 1^[14]为固溶处理后的 GH3030 合金微观组织。



图 1 固溶处理后 GH3030 合金的微观组织^[14] Fig.1 Microstructure of GH3030 alloy after solution treatment

1.2 方法

脉冲电流设备由脉冲电源、紫铜电极、不锈钢保 温片及长条状合金试样形成闭合电路,电流通过试样 产生的焦耳热对其进行加热^[15]。在实验过程中,可以 调整脉冲电流密度来调控加热温度。

脉冲电流实验过程中,分别将试样加热到700, 750,800,850,900 ℃,即对应平均脉冲电流密度 分别为6.8,7.4,8.2,9.2,10.2 A/mm²,加热时间为 10,20,30 min。在加热过程中,使用红外测温枪对 试样加热温度进行实时测量,热处理后,试样放入水 中进行淬火。常规退火热处理,试样加热温度分别为 700,750,800,850,900 ℃,加热时间为30,60, 90,120 min。热处理后,试样放入水中进行淬火。

制备 EBSD 试样流程:将经过脉冲电流和常规退 火处理的长条状合金试样用线切割设备切成大小为 5 mm×5 mm 的试样。牙托粉和牙托水混合,加入切 割好的圆柱形金相样品,并用粒度不同的砂纸按照从 小到大的顺序依次对不同条件的样品进行打磨,然后 在抛光机上进行精抛,最后对试样进行电解抛光处 理,电解抛光液组分为体积分数为 20%的 H₂SO₄ 与 80%的 CH₃CH₂OH。工作温度为室温,工作电压为 40 V, 电解抛光时间为 30 s。使用液氮作为冷却介质, 将温度控制在-30℃左右。将经过电解抛光处理后的 脉冲电流和常规退火处理的试样进行 EBSD 试验,使 用 Channel 5 软件对经过 EBSD 实验的数据进行分析, 统计不同热处理试样的静态再结晶体积分数和晶粒 尺寸,揭示不同工艺条件(脉冲电流处理时间、退火 温度与退火时间)对合金中再结晶体积分数与再结晶 晶粒尺寸的影响规律。

2 脉冲电流处理对冷轧 GH3030 合 金静态再结晶的影响

2.1 退火温度对 GH3030 合金静态再结晶 的影响

为探究温度对合金静态再结晶的影响,选择加热时间为 30 min 加热温度不同的合金作为研究对象。 图 2 为不同温度下冷轧变形量为 0.5 的 GH3030 合金 试样在脉冲电流处理 30 min 后的再结晶体积分数。 可以明显观察到合金试样的再结晶变化行为,随着加 热温度的升高,再结晶体积分数不断升高,且再结晶 晶粒的平均晶粒尺寸逐渐增大。如图 2a 所示,加热 温度为 700 ℃时,固溶处理后原始大晶粒几乎消失, 且产生较多细小的再结晶晶粒,原始变形组织几乎消 失,此时再结晶体积分数为 91.8%。随着加热温度的 升高,再结晶体积分数不断增加,温度800℃时,再 结晶体积分数高达99.1%,如图2c—e所示,再结晶 晶粒逐渐长大并趋于均匀,这说明在脉冲电流处理过 程中,加热温度的变化对合金试样的再结晶行为产生 了重大影响。

作为脉冲电流处理合金试样的对照试验,采用相 同退火温度和加热时间的常规退火处理方法,观察合 金试样的再结晶体积分数变化,其再结晶体积分数见 图 3。如图 3a 所示,原始大晶粒晶界处出现细小的 再结晶晶粒,温度为 700 ℃时,再结晶体积分数为 42.6%,说明在该条件下,合金已经发生部分再结晶。 随着温度的升高,再结晶体积分数进一步增大,原始 变形晶粒逐渐减少近乎消失,如图 3b—e。当退火温 度达到 800 ℃之后,再结晶晶粒的尺寸渐渐变大,温 度为 900 ℃时,再结晶体积分数为 96.2%,如图 3d—e 所示。



图 2 GH3030 合金脉冲电流不同加热温度下处理 30 min 的再结晶体积分数 Fig.2 Recrystallization volume fraction of GH3030 alloy treated by EPT at different temperatures for 30 min

对比图 2 和图 3 可以明显看出,在相同温度下, 脉冲电流处理的合金试样的静态再结晶晶粒体积分 数远大于常规退火处理的静态再结晶晶粒体积分数, 且脉冲电流处理后的再结晶晶粒尺寸明显大于常规 退火处理的合金。这表明,脉冲电流处理显著加快了 合金试样静态再结晶行为,并极大促进了合金试样静 态再结晶晶粒的成核和生长^[16-17]。

在常规退火处理的合金中,退火温度只有在 900 ℃时,合金试样的静态再结晶体积分数才能达到 90%以上。脉冲电流处理的合金在700 ℃时的静态再 结晶体积分数也可以达到91.8%,而在该温度下常规 退火处理的合金静态再结晶体积分数为42.6%,只有 脉冲电流处理的一半。换句话说,脉冲电流处理可以 促进低温下合金静态再结晶行为的快速发展。

冷轧变形量为 0.5 的 GH3030 合金分别在 700, 750,800,850,900 ℃下经过脉冲电流处理和常规 退火处理 30 min 后的平均再结晶晶粒尺寸变化见图 4,可知,在相同温度下,脉冲电流处理的晶粒尺寸 明显大于常规退火处理的晶粒尺寸。这个现象在退火 温度为 900 ℃时尤为明显,在此温度下脉冲电流处理 的合金晶粒尺寸为 23.2 μm,而常规退火处理得到的 晶粒尺寸约为 6 μm。由此得出脉冲电流处理可以加 快静态再结晶晶粒的长大速率。通过以上分析,说明 了脉冲电流处理对 GH3030 合金静态再结晶晶粒的



图 3 GH3030 合金不同温度下常规退火处理 30 min 的再结晶体积分数 Fig.3 Recrystallization volume fraction of GH3030 alloy treated for annealing by CHT at different temperatures for 30 min





EPT and CHT at different temperatures for 30 min

成核和生长的加速作用是非常明显的。

2.2 退火时间对 GH3030 合金静态再结晶 的影响

850 ℃下脉冲电流处理 30 min 后的合金试样基本完成了静态再结晶过程,因此选择在 850 ℃下热处理的合金作为对象来探究退火时间对静态再结晶行为的影响。

850 ℃下不同脉冲电流处理时间下的 GH3030 合金再结晶体积分数见图 5。可明显观察到,随着时 间的增加,原始变形组织逐渐被细小的再结晶晶粒 代替,新生的再结晶晶粒增多,再结晶体积分数不 断提高,当退火时间由 10 min 增加到 30 min 时,试 样的静态再结晶体积分数从 87.3%增加到 99.7%。如 图 5b—c 所示,再结晶晶粒呈现不同程度的长大且均 匀性显著提高。



图 5 GH3030 合金在 850 ℃下脉冲电流处理不同时间的再结晶体积分数 Fig.5 Recrystallization volume fraction of GH3030 alloy treated with pulse current at 850 ℃ for different time

合金试样在 850 ℃下常规退火处理不同时间的 再结晶体积分数见图 6。可以明显看出,随着退火时 间的延长,原始变形晶粒逐渐被细小的再结晶晶粒取 代,再结晶晶粒逐渐增多且大小更加均匀,当退火时



图 6 GH3030 合金在 850 ℃下常规退火处理不同时间的再结晶体积分数 Fig.6 Recrystallization volume fraction of GH3030 alloy treated for annealing by CHT at 850 ℃ for different time

间由 30 min 延长到 120 min 时,合金再结晶体积分数 从 89.7%增加到 96%。当退火温度为 90 min 时,再 结晶晶粒尺寸呈现不均匀性,这可能是由于冷轧时合 金变形不均匀,造成在后续的退火过程中合金再结晶 不均匀^[18-19]。

比较图 5c 和图 6d 可以看出,脉冲电流处理的合 金中存在等轴完全再结晶晶粒,其形状及尺寸较为均 匀,而在常规退火处理的合金中难以发现。脉冲电流 处理时间为 30 min 时再结晶体积分数高达 99.9%,而 常规退火处理的时间长达 120 min 时,再结晶体积分 数也才达到 96%。通过以上分析可以得出结论:脉冲 电流处理明显加速了静态再结晶的行为,极大促进了 静态再结晶晶粒的成核和生长。

脉冲电流和常规退火两种热处理工艺下合金试 样不同加热时间后平均再结晶晶粒尺寸如图 7 所示。 由图 7 发现,GH3030 合金经过脉冲电流处理时,平 均再结晶晶粒尺寸随加热时间的延长而逐渐增加。退 火时间从 30 min 延长到 120 min,常规退火处理的平 均再结晶晶粒尺寸先增加后减小,退火时间为 90 min 时平均再结晶晶粒尺寸达到最大值 8.06 μm。常规退 火处理时间 90 min 时的平均再结晶晶粒尺寸大于 120 min 时的晶粒尺寸,其原因可能是由于冷轧时合 金变形不均匀,造成在后续的退火过程中合金再结晶 不均匀,导致该条件下的平均再结晶晶粒尺寸大于退 火时间为 120 min 的合金。观察图 7 明显地看到,脉 冲电流处理的合金再结晶晶粒尺寸明显大于常规退 火处理的合金,即使脉冲电流处理的时间远远少于



2.3 静态再结晶动力学方程与激活能

2.3.1 静态再结晶动力学

文中使用 Avirami 提出的 JMAK 方程来描述再结 晶过程动力学^[20],如式(1)所示。

$$X_{\text{SRX}} = 1 - \exp\left(-Kt^n\right) \tag{1}$$

式中: *X*_{SRX} 为再结晶体积分数; *K* 为常数; *t* 为 退火时间(min); *n* 为 Avrami 指数,与再结晶形核 和长大机制相关。对其两边取对数:

$$\ln\left[-\ln\left(1-X_{\text{SRX}}\right)\right] = \ln K + n\ln t \tag{2}$$

将合金在不同工艺参数下的 $t = X_{SRX}$ 代入式(2), 可以得到不同热处理参数下的 $\ln[\ln[1/(1-X_{SRX})]] - \ln t$ 图。再将实验数据经过最小二乘法进行拟合,得到合 金的静态再结晶动力学方程。

根据 Arrhenius 方程^[20],当再结晶晶粒体积分数 一定时,再结晶速率与退火时间 *t* 成反比,退火时间 与激活能之间的关系为:

$$1/t = A/\exp(-Q/RT)$$
(3)

式中: *Q* 为再结晶激活能(kJ/mol); *T* 为热力学 温度(K); *R* 为气体常数(*R*=8.314 J/(mol·K))。

根据不同温度下完成相同再结晶晶粒体积分数 所需时间的比值得到材料的再结晶激活能,可以表 示为:

$$Q = \left(\ln t_1 - \ln t_2\right) R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}$$
(4)

2.3.2 静态再结晶动力学方程与激活能

对固溶处理后的 GH3030 合金进行冷轧,变形量 为 0.5,脉冲电流处理的加热温度分别为 700,750, 800,850,900 ℃,脉冲电流处理时间为 10,20, 30 min。将经过不同脉冲电流处理的合金试样进行 EBSD 实验,再使用 Channel 5 软件对 EBSD 实验数 据进行分析,统计得出在不同温度下脉冲电流处理不 同时间的合金再结晶体积分数,如表 1 所示。

表 1 不同脉冲电流处理时间下 GH3030 合金的 再结晶体积分数

Tab.1 Volume fraction of SRX grains in GH3030 alloy treated by EPT at different annealing temperatures for different time

温度/℃		处理时间/min	
	10	20	30
700	0.572	0.822	0.918
750	0.698	0.889	0.962
800	0.796	0.95	0.991
850	0.873	0.975	0.997
900	0.919	0.993	0.999



图 8 脉冲电流处理下的 ln{ln[1/(1-X_{SRX})]}-ln t 曲线 Fig.8 ln{ln[1/(1-X_{SRX})]}-ln t curves of GH3030 alloy treated by EPT

将表 1 中的数据代入式 (2),得到不同温度下脉 冲电流处理不同时间的 ln {ln[1/(1-X_{SRX})]}-ln t 图,如 图 8 所示,显然,图 8 具有较好的线性关系。这说明 了采用 JMAK 方程可以较好地描述冷轧 GH3030 高温 合金经脉冲电流处理的静态再结晶过程^[21]。此后,将 实验数据进行拟合,得到的拟合方程如表 2 所示。

表 2 GH3030 合金经脉冲电流处理的静态 再结晶动力学方程 Tab.2 Kinetic equation of static recrystallization of

GH3030 alloy treated by EPT

温度 /℃	静态再结晶动力学方程
700	$\ln[-\ln(1 - X_{\rm SRX})] = -2.43273 + 0.98817\ln t$
750	$\ln[-\ln(1 - X_{\rm SRX})] = -1.922\ 67 + 0.910\ 47\ln t$
800	$\ln[-\ln(1 - X_{\rm SRX})] = -1.8072 + 0.980\ 76\ln t$
850	$\ln[-\ln(1 - X_{\text{SRX}})] = -1.436\ 37 + 0.930\ 89\ln t$
900	$\ln[-\ln(1 - X_{\text{SRX}})] = -1.202 \ 41 + 0.926 \ 86 \ln t$

参照表 2 数据,根据不同的动力学方程分别计算 出合金完成一定再结晶晶粒体积分数所需的时间。最 终由式(4)可计算出其再结晶激活能为 51.16~ 55.96 kJ/mol。

针对常规退火处理的合金试样,利用上述相同的 方法分别计算出静态再结晶动力学方程与激活能的 结果。由于 700 ℃和 750 ℃的热处理下部分合金试样 的 EBSD 实验测试效果太差,得到的实验分析数据无 法使用,因此只统计常规退火处理温度为 800,850, 900 ℃的合金静态再结晶体积分数进行计算,最终得 到常规退火处理的合金试样完全静态再结晶所需时 间。不同常规退火处理下 GH3030 合金的再结晶体积 分数如表 3 所示。计算出常规退火处理的再结晶激活 能为 267.19~294.3 kJ/mol。

根据计算的静态再结晶动力学方程结果,可得到 两种不同热处理条件下GH3030合金试样完成再结晶 的时间,如表4所示,可以看出,随着退火温度的增

加,完成再结晶的时间逐渐缩短。

表 3 不同常规退火处理下 GH3030 合金的 再结晶体积分数

Tab.3 Volume fraction of SRX grains in GH3030 alloy treated by CHT at different annealing temperatures for different time

温度/℃ -	处理时间/min				
	30	60	90	120	
800	0.815	0.865	0.899	0.918	
850	0.899	0.935	0.949	0.96	
900	0.962	0.973	0.984	0.99	

表 4 脉冲电流处理、常规退火处理的 GH3030 合金 完全静态再结晶所需时间

Tab.4 Time required for of GH3030 alloy completely static recrystallization treated by EPT and CHT

形中中达从田		一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一		
脉冲电流处理		吊规退火处理		
温度/℃	时间/min	温度/℃	时间/min	
700	60.26	800	231.98	
750	35.59	850	89.25	
800	19.32	900	23.12	
850	15.21	_	_	
900	11.95	_	_	

综上所述,脉冲电流处理下发生完全再结晶所需 时间远远少于常规退火处理下所需时间。同时,经脉 冲电流处理的合金激活能远小于常规处理条件下的 合金激活能。由此可见,脉冲电流可以促进GH3030 合金静态再结晶的发生,并显著降低合金的再结晶激 活能。

3 脉冲电流对冷轧 GH3030 合金硬 度的影响

对经过脉冲电流处理和常规退火处理的试样进 行硬度测试。该测试在 HVS-1000 型维氏硬度计上 进行。测试载荷为 200g,力保持时间为 10 s。硬度 测试前,将试样表面机械研磨抛光。测试时,每个 试样上取 10 个测试点,舍去最大值和最小值后,求 剩余 8 个测试点的平均硬度值作为硬度测试的最终 结果^[22]。

3.1 退火温度冷轧合金试样硬度的影响

对不同温度下经过脉冲电流处理和常规退火处 理 30 min 的 GH3030 合金进行维氏硬度测试,其结 果见图 9。可以看出,GH3030 合金经过脉冲电流处 理后,合金硬度值随温度的升高先增加后减小,在 750 ℃时硬度值(210.5HV)最高,900 ℃时的硬度 值(185.2HV)最小。在低温 700 ℃时,其硬度值略 大于原始合金(200.3HV); 而退火温度大于 850 ℃ 后, 其硬度值小于原始合金。这表明脉冲电流处理对 改善GH3030 合金的硬度效果不大,且退火温度较高 时合金硬度值反而会出现小幅度减小。经过700 ℃常 规退火处理的合金,硬度值超过300HV,这是因为 此时退火后的合金静态再结晶不完全,组织中还存 在部分原始变形晶粒。由图4可知,经脉冲电流处 理的平均晶粒尺寸明显大于常规退火处理,根据细 晶强化理论,随着晶粒平均尺寸增大,合金的强度 降低^[23-24],因此合金经过脉冲电流处理的硬度值均 小于相同条件下常规退火处理的合金。



常规退火处理 30 min 的硬度 Fig.9 Hardness of GH3030 alloy treated by EPT and CHT at different temperatures for 30 min

3.2 退火时间对冷轧合金硬度的影响

如图 10a 所示,合金硬度随着脉冲电流处理时间 的延长而降低,仅处理 10 min 的合金硬度值略大于 原始合金。时间继续延长后,合金的硬度值均小于原 始合金。这说明长时间的脉冲电流处理降低了合金的 硬度。这是由于随着脉冲电流处理时间的延长,合金 再结晶进程逐渐加深,显著消除了加工硬化,使硬度 减小且合金的平均晶粒尺寸逐渐增大,根据细晶强化 理论,合金的硬度随时间的增加而逐渐减小。

当退火时间由 30 min 延长到 120 min 时,常规退 火处理的合金硬度先增加后减小,如图 10b 所示。当 退火时间小于 90 min 时,合金再结晶程度逐渐加深, 细小的再结晶晶粒比例增多,使合金硬度增加。当退 火时间为 90 min 时,硬度值陡然增大至 245HV 左右, 其原因是该试样冷轧变形不均匀,导致再结晶晶粒大 小十分不均匀,而在进行硬度测试时,测试区域可能 集中在细小的晶粒区域,导致该条件下的合金硬度增 加明显。时间达到 120 min 时,再结晶程度较为彻底, 之前的再结晶晶粒明显长大,导致合金硬度下降幅度 较大。



图 10 GH3030 合金在 850 ℃下热处理不同时间的硬度 Fig.10 Hardness of GH3030 alloy heated at 850 ℃ for different time

比较经过两种热处理的合金硬度,可以发现,除 常规退火处理120 min 外,常规退火处理的合金硬度 远远大于脉冲电流处理。

由图 11 可以看到,退火温度从 700 ℃提高到 750 ℃时,硬度呈增加趋势,当温度为 750 ℃时,硬 度达到最大值;当温度高于 750 ℃后,硬度逐渐减 小,硬度下降幅度非常大。此外,可以明显看到,



图 11 脉冲电流处理时的 GH3030 合金的硬度 Fig.11 Hardness of GH3030 alloy treated by EPT

当脉冲电流处理时间由 10 min 延长到 30 min 时,显 微硬度随着热处理时间的延长而降低。这表明随着 脉冲电流处理温度的提高,时间对显微硬度变化的 影响逐渐减小。

虽然合金经过脉冲电流处理后,合金的硬度未得 到大幅度改善,但脉冲电流处理还有其他优点。与常 规退火处理工艺相比,脉冲电流处理技术具有加热效 率高、清洁、能耗低、可精确设计和控制等诸多优点, 而且,脉冲电流处理能在较短时间内促进静态再结晶 行为的发生。

4 结论

1)研究了脉冲电流处理对冷轧 GH3030 合金静态再结晶行为的影响,通过分析不同退火温度及退火时间对静态再结晶的变化规律,发现合金经过脉冲电流处理后的静态再结晶体积分数随退火温度的增加 而增加,且随退火时间的延长而逐渐增加。在相同温度或退火时间下,脉冲电流处理的静态再结晶晶粒体积分数远大于常规退火处理;脉冲电流处理的平均再结晶晶粒尺寸及均匀性高于常规退火处理。这说明了脉冲电流处理对GH3030合金静态再结晶晶粒的成核和生长的加速作用是非常明显的。

2)建立经过脉冲电流处理与常规退火处理的合 金静态再结晶动力学方程,求出经过脉冲电流处理的 合金激活能为 51.16~55.96 kJ/mol,远小于常规退火 处理的合金激活能 267.19~294.3 kJ/mol,因此可以证 明脉冲电流处理可以促进 GH3030 合金发生静态再结 晶行为。

3) 对经过脉冲电流处理的冷轧 GH3030 合金进 行硬度测试,发现合金的硬度随脉冲电流处理温度的 升高而先增大后减小;当温度为 750 ℃时,硬度达到 最大值。显微硬度随着脉冲电流处理时间的增加而减 小。此外,经过脉冲电流处理的合金硬度明显低于常 规退火处理。

参考文献:

- 安宁, 张志伟, 白凤江, 等. 碳含量对 GH3030 合金组 织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(5): 11—15.
 AN Ning, ZHANG Zhi-wei, BAI Feng-jiang, et al. The Effect of Carbon Content on the Structure and Properties of GH3030 Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(5): 11—15.
- [2] 杨斌, 耿国盛, 徐九华, 等. 钴基高温合金高速铣削 研究[J]. 航空制造技术, 2011(14): 58—61.
 YANG Bin, GENG Guo-sheng, XU Jiu-hua, et al. Research on High-speed Milling of Cobalt-based Superalloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,

2011(14): 58-61.

 [3] 郭建亭. 高温合金材料学(中)册[M]. 北京: 科学出版 社, 2008: 127—131.
 GUO Jian-ting. Material Science of Superalloys (Part

2)[M]. Beijing: Science Press, 2008: 127–131.

- [4] 毛卫民. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京: 冶金 工业出版社, 1994: 27—31.
 MAO Wei-min. Metal Recrystallization and Grain Growth[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 27—31.
- [5] 范淇元,谢江怀. 退火处理对轧制 Mg-4Al-4RE 合金 组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(20): 135—137.
 FAN Qi-yuan, XIE Jiang-huai. The Effect of Annealing Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Rolled Mg-4Al-4RE Alloy[J]. Hot Working
- Technology, 2019, 48(20): 135—137. [6] 刘文斌, 康永林, 牛涛, 等. 热连轧生产厚规格 X80 管线钢的静态再结晶行为及工艺优化[J]. 北京科技大 学学报, 2010, 32(4): 444—449.

LIU Wen-bin, KANG Yong-lin, NIU Tao, et al. Static Recrystallization Behavior and Process Optimization of Thick Gauge X80 Pipeline Steel Produced by Hot Strip Rolling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(4): 444—449.

[7] 王志刚,杨玉军,田水仙,等.冷拔变形对 GH3625
 合金组织和性能的影响[J].钢铁研究学报,2011(S2):
 92—95.

WANG Zhi-gang, YANG Yu-jun, TIAN Shui-xian, et al. The Effect of Cold Drawing Deformation on the Structure and Properties of GH3625 Alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011(S2): 92–95.

- [8] 赵宇新. GH625 合金的冷变形及其对力学性能的影响
 [J]. 材料工程, 2000(9): 36—37.
 ZHAO Yu-xin. Cold Deformation of GH625 Alloy and Its Effect on Mechanical Properties[J]. Materials Engineering, 2000(9): 36—37.
- [9] 胡廣详.金属学[M].上海:上海科学技术出版社, 1980:25—31.
 HU Geng-xiang. Metallology[M]. Shanghai: Shanghai

Science and Technology Press, 1980: 25—31. [10] GUO Hui-jun, ZENG Xun, FAN Jian-feng, et al. Effect

- of Electropulsing Treatment on Static Recrystallization Behavior of Cold-rolled Magnesium Alloy ZK60 with Different Reductions[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(6): 1113–1120.
- [11] 李斌,李莉娟,赵庆贺. 脉冲磁场对 Hi-B 钢初次再结 晶织构的影响[J]. 上海金属, 2018, 40(1): 28—33.
 LI Bin, LI Li-juan, ZHAO Qing-he. The Effect of Pulsed Magnetic Field on the Texture of the First Recrystallization of Hi-B Steel[J]. Shanghai Metal, 2018, 40(1): 28—33.
- [12] 宋进林,黎明发,汤朋,等. 电脉冲处理对 TC11 钛合 金力学性能及组织的影响[J]. 金属热处理,2018, 43(4):116—120.

SONG Jin-lin, LI Ming-fa, TANG Peng, et al. Effects of Electric Pulse Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of TC11 Titanium Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(4): 116–120.

- [13] 王杰, 王磊, 刘杨, 等. 脉冲电流下 AZ31 镁合金拉伸 行为及其显微组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(6): 1906—1910.
 WANG Jie, WANG Lei, LIU Yang, et al. Tensile Behavior and Microstructure Evolution of AZ31 Magnesium Alloy under Pulse Current[J]. Rare Metal Materials
- [14] ZHANG Hong-bin, ZHANG Cheng-cai, HAN Bao-kun, et al. Evolution of Grain Boundary Character Distributions in a Cold-deformed Nickel-based Superalloy during Electropulsing Treatment[J]. Journal of Materials and Research and Technology, 2020, 9(3): 5723-5734.

and Engineering, 2018, 47(6): 1906-1910.

ZHONG Xue-ying. The Effect of Pulse Current and Aging Treatment on the Microstructure and Properties of TC4 Titanium Alloys with Different Initial States[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 5—10.

- [16] 刘恢弘. 脉冲电流对 GH4169 合金再结晶行为的影响
 [D]. 沈阳:东北大学, 2011: 8—12.
 LIU Hui-hong. The Effect of Pulse Current on the Recrystallization Behavior of GH4169 Alloy[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011: 8—12.
- [17] 杭子迪, 冯运莉, 崔岩, 等. 变形温度对高 Ti 微合金
 高强钢再结晶的影响[J/OL]. 热加工工艺, 2020, 49(5):
 1—5.

HANG Zi-di, FENG Yun-li, CUI Yan, et al. The Effect of Deformation Temperature on the Recrystallization of High Ti Microalloyed High Strength Steel[J/OL]. Hot Working Technology, 2020, 49(5): 1–5.

- [18] ZHU Ru-fei, LIU Jian-an, TANG Guo-yi, et al. Properties Microstructure and Texture Evolution of Cold Rolled Cu Strips under Electropulsing Treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 544: 203– 208.
- [19] 张弘斌. GH99 高温合金高温变形行为及组织演化规 律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 5—12.
 ZHANG Hong-bin. Research on High Temperature Deformation Behavior and Microstructure Evolution of GH99 Superalloy[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2015: 5—12.
- [20] 彭聪辉,常辉,胡锐,等. Haynes230 高温合金的静态 再结晶动力学[J]. 航空材料学报,2011,31(2):8—12.
 PENG Cong-hui, CHANG Hui, HU Rui, et al. Static Recrystallization Kinetics of Haynes230 Superalloy[J].
 Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(2):8—12.
- [21] 邵振遥. X90 管线钢不同工艺制度下的相间析出行为
 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2017: 7—15.
 SHAO Zhen-yao. Interphase Precipitation Behavior of

X90 Pipeline Steel under Different Process Systems[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 7—15.

- [22] 刘振明,肖金城,林滔. 维氏硬度检测的误差影响因素分析[J]. 中国检验检测, 2020, 28(1): 13—17.
 LIU Zhen-ming, XIAO Jin-cheng, LIN Tao. Analysis of Influencing Factors of Error in Vickers Hardness Testing[J]. China Inspection and Testing, 2020, 28(1): 13—17.
- [23] 刘超. 脉冲电流下 GH4169 合金高温变形行为及动态 再结晶的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013: 10—15.

LIU Chao. Research on High Temperature Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization of GH4169 Alloy under Pulse Current[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013: 10—15.

[24] 田素贵,李振荣,赵中刚,等.制备工艺对GH4169合 金组织结构与蠕变行为的影响[J].稀有金属材料与工 程,2012,41(9):1651—1656.
TIAN Su-gui, LI Zhen-rong, ZHAO Zhong-gang, et al. The Effect of Preparation Process on the Structure and Creep Behavior of GH4169 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(9): 1651—1656.