

应变对 PH13-8Mo 钢在 1 050 ~ 1 150℃ 时 变形组织的影响

舒小勇¹ 鲁世强¹ 郑海忠¹ 刘大博² 金建军²

(1 南昌航空大学材料科学与工程学院, 南昌 330063)

(2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

文 摘 采用 Gleeble 热模拟试验机, 对 PH13-8Mo 钢进行热变形模拟实验, 研究了应变对 PH13-8Mo 钢在应变速率为 10/s, 变形温度为 1 050 ~ 1 150℃ 时变形组织的影响。结果表明, PH13-8Mo 钢在 1 050℃、应变达到 0.69 时仍未发生完全再结晶, 但在 1 100 和 1 150℃、应变分别达到 0.29 和 0.24 后, 发生了明显的完全再结晶。再结晶体积分数随应变增加和变形温度升高而逐渐增大, 直至发生完全再结晶。当应变 < 0.29 时, 再结晶晶粒尺寸和试样的平均晶粒尺寸随应变增加较快地减小; 当应变 > 0.29 后, 再结晶晶粒尺寸和试样的平均晶粒尺寸随应变增加缓慢地减小。再结晶晶粒尺寸和试样的平均晶粒尺寸均随变形温度的升高而增大。

关键词 PH13-8Mo 钢, 应变, 变形组织, 再结晶

Effect of Strain on Microstructure Evolution of PH13-8Mo Steel Deformed at 1 050 to 1 150℃

Shu Xiaoyong¹ Lu Shiqiang¹ Zheng Haizhong¹ Liu Dabo² Jin Jianjun²

(1 School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

(2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract The influence of strain on deformation microstructure evolution of PH13-8Mo steel was investigated through isothermal compression tests using Gleeble thermal-mechanical simulator within the temperature range of 1 050 to 1 150℃ and with the strain rate of 10/s. The results show that dynamic recrystallization occurs partially when the strain reaches maximum 0.69 at 1 050℃. However, at 1 100℃ and 1 150℃, full dynamic recrystallization has occurred when the strain reaches 0.29 and 0.24, respectively. The fraction of recrystallization increases with increasing strain and deformation temperature. The recrystallized grain size and average grain size of the impacted steel markedly reduce with the strain before the strain reaches 0.29, then slowly reduce. However, the recrystallized grain size and average grain size of the impacted steel both increase with increasing deformation temperature.

Key words PH13-8Mo steel, Strain, Deformation microstructure, Recrystallization

0 引言

马氏体时效不锈钢自发明以来, 由于其高强度、高韧性以及优良的耐蚀性, 各国相继对其进行了大量的研制和开发, 尤其是前苏联和美国成为马氏体时效不锈钢的主要研制和生产国^[1-2]。PH13-8Mo 钢是一种高强度马氏体时效不锈钢, 此钢的特性是具有高强度、高断裂韧性、良好的横向力学性能以及突出的耐海洋环境应力腐蚀性能^[3-5], 已广泛应用于宇航、核反应堆和石油化工等领域, 如冷顶锻和机加工紧固

件、飞机部件、反应堆部件以及石油化工装备等^[6-7]。金属的热变形行为及其组织演变规律是制定其挤压、轧制、扭转等热加工工艺的理论依据, 同时通过热变形还可以改善金属材料的组织和性能。对于材料在热加工过程中组织演变规律的研究引起了各国学者极大的兴趣^[8-10]。本文采用热模拟方法, 研究了 PH13-8Mo 钢在 1 050 ~ 1 150℃ 热变形时应变对变形组织的影响, 研究结果对制定 PH13-8Mo 钢的热加工工艺具有指导意义。

收稿日期: 2010-11-22

基金项目: 江西省自然科学基金项目(2008GZC0041)

作者简介: 舒小勇, 1983 年出生, 硕士研究生, 研究方向为高温结构材料及其加工技术。E-mail: xiaoyong202@126.com

μm 。1 100℃时的变形组织与1 050℃的相似之处在于:随着应变的增加,再结晶体积分数增大,变形后的晶粒尺寸逐渐减小。不同之处在于:当应变达到0.29[图2(b)]时,大部分晶粒均呈等轴状,并未发现变形的原始晶粒,并且晶粒明显细化,这表明PH13-8Mo钢在1 100℃、应变达到0.29时已发生了较明显的完全再结晶。这主要是由以下三个方面引起的:一是随着变形温度的升高,原子扩散、晶界迁移的能

力强,容易发生动态再结晶,且动态再结晶晶粒易于长大^[15];二是随着变形温度的升高,PH13-8Mo钢所含的合金元素大部分固溶于奥氏体中,只有少量合金元素在晶界偏聚,减小了合金元素在热变形过程中阻碍动态再结晶形核的不利作用,从而有利于动态再结晶的发生^[16];三是应变的增加有利于再结晶的发生。即使应变达到0.69[图2(c)],变形组织仍呈等轴状,仍处于完全再结晶阶段。

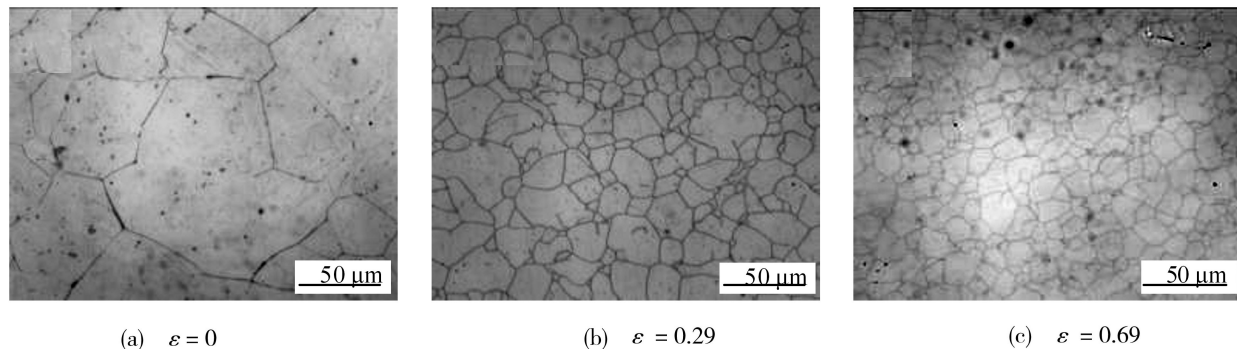


图2 PH13-8Mo钢1 100℃时不同应变下的变形组织

Fig. 2 Microstructures of PH13-8Mo steel in different strain at 1 100℃

2.3 应变对1 150℃变形组织的影响

图3是PH13-8Mo钢在1 150℃时不同应变下的变形组织。从图3可以看出,该变形温度下应变对变形组织的影响与1 100℃(图2)时的大致相同。不同的是,当应变达到0.24(<1 100℃时的0.29)时就基本发生了完全动态再结晶[图3(b)]。并且再结晶

晶粒尺寸明显>1 100℃的晶粒。这主要是因为随着变形温度升高,合金元素完全固溶于奥氏体中,不会阻止再结晶的形核,此时原子活性也较强,也有利于再结晶的发生。同时随着变形温度的升高,原子、晶界迁移的能力增强,晶粒易于长大。

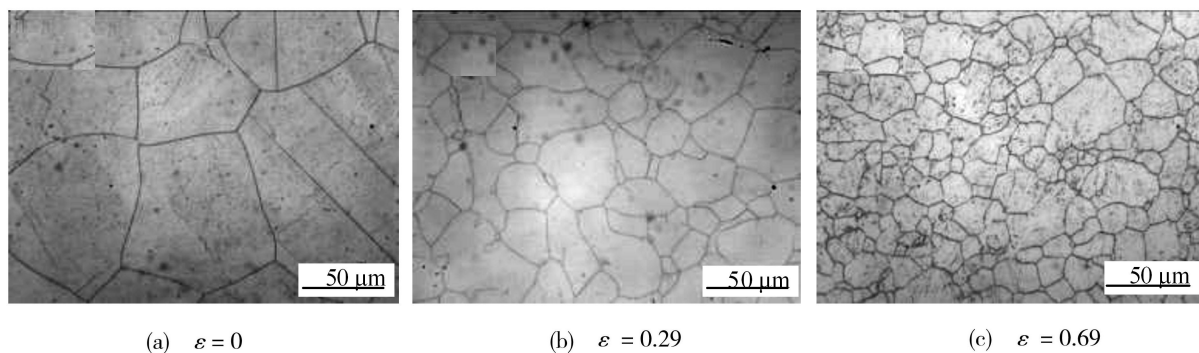


图3 PH13-8Mo钢1 150℃时不同应变下的变形组织

Fig. 3 Microstructures of PH13-8Mo steel in different strain at 1 150℃

2.4 应变对再结晶体积分数和晶粒尺寸的影响

图4、图5分别为PH13-8Mo钢在不同变形温度下应变对再结晶体积分数和晶粒尺寸的影响曲线。从图4和图5中可以看出,再结晶体积分数随应变的增加而逐渐增大,再结晶晶粒尺寸随应变的增加逐渐减小。当应变<0.29时,再结晶晶粒尺寸随应变增大而较快地减小;当应变达到0.29后,再结晶晶粒尺寸随应变增大而较缓慢地减小,此时再结晶晶粒尺寸在8~13 μm 。例如,在1 150℃时,应变从0增加到宇航材料工艺 <http://www.yhelgy.com> 2011年 第5期

0.14,再结晶体积分数从0缓慢增大到15%左右,再结晶晶粒尺寸从22.8 μm 左右减小到20.5 μm 左右;随着应变继续增加到0.29,再结晶体积分数明显增大,约为95%,而再结晶晶粒尺寸迅速减小到15 μm 左右;当应变>0.29后,由于发生了完全再结晶,体积分数均为100%,晶粒尺寸基本上稳定在13 μm 左右。从图4和图5中不难看出,再结晶体积分数和晶粒尺寸均随变形温度升高而增大,对再结晶晶粒尺寸而言,小应变段(<0.29)的幅度略大于大应变段

(>0.29)的幅度。

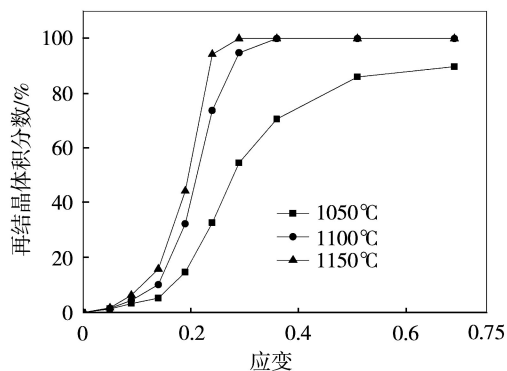


图4 再结晶体积分数与应变关系曲线

Fig. 4 Relationship between volume fraction and strain at different temperatures

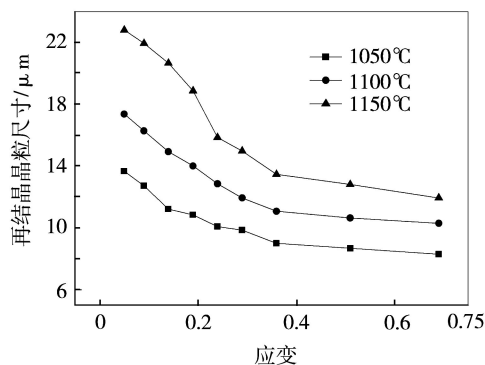


图5 再结晶晶粒尺寸与应变关系曲线

Fig. 5 Relationship between recrystallized grain size and strain at different temperatures

2.5 应变对平均晶粒尺寸的影响

图6为不同变形温度下试样的平均晶粒尺寸与应变关系曲线。

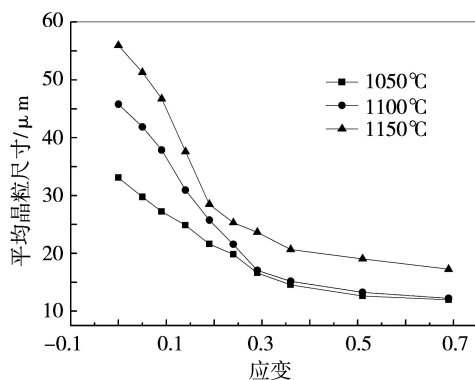


图6 平均晶粒尺寸随应变的变化曲线

Fig. 6 Relationship between average grain size and strain

从图6中可以看出,平均晶粒尺寸随着应变的增加而减小,随变形温度的升高而增大。当应变<0.29时,平均晶粒尺寸随应变增大而迅速减小;当应变达到0.29后,平均晶粒尺寸随应变增大而缓慢减小。应变<0.29时,平均晶粒尺寸在1050~1100℃时随

温度升高的增幅要大于在1100~1150℃时的增幅;应变>0.29时,平均晶粒尺寸在1050~1100℃时随温度升高的增幅明显要大于在1100~1150℃时的增幅;从变形组织均匀性角度考虑,热加工温度应在1100~1150℃、应变应>0.29,这时可以获得较均匀的再结晶组织;从细化晶粒角度考虑,热加工温度应在1050~1100℃,应变应>0.29。

3 结论

从PH13-8Mo钢在1050~1150℃,应变速率为10/s,应变为0~0.69时的热压缩变形组织演变规律的研究中可以得出以下结论。

(1)在1050℃,当应变达到0.69时再结晶仍未完全发生,只发生部分再结晶。当应变<0.29时,原始晶粒变形程度较小,仅在晶界处形成少量再结晶晶粒;当应变>0.29时,原始晶粒变形程度逐渐增大,且在晶界以及晶界处的再结晶晶粒明显增多。但在1100℃和1150℃,当应变分别达到0.29和0.24时,就已发生了完全再结晶。

(2)随着应变的增加,再结晶体积分数增大,晶粒尺寸(无论是再结晶晶粒尺寸还是平均晶粒尺寸)得到细化,并且在应变<0.29时,增大应变对晶粒细化的影响程度较大,而当应变>0.29时,对晶粒细化的影响程度则较小。

(3)随着变形温度的升高,再结晶体积分数、再结晶晶粒尺寸和平均晶粒尺寸均增大。再结晶晶粒尺寸在各应变下随变形温度升高的增幅基本相同。而平均晶粒尺寸,在应变<0.29时,在1050~1100℃时随温度升高的增幅要>在1100~1150℃时的增幅;在应变>0.29时,在1050~1100℃时随温度升高的增幅要明显<在1100~1150℃时的增幅。

(4)从获得较均匀的完全再结晶组织角度考虑,热加工温度应在1100~1150℃、应变应>0.29;从细化晶粒角度考虑,热加工温度应在1050~1100℃,应变应>0.29。

参考文献

- [1] 姜越,尹钟大,朱景川,等. 马氏体时效不锈钢的发展现状[J]. 特殊钢, 2003, 24(3): 1-5
- [2] 杨志勇,刘振宝,梁剑雄,等. 马氏体时效不锈钢的发展[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(4): 1-7
- [3] Seetharaman V, Sundararaman M, Krishnan R. Precipitation hardening in a PH13-8Mo stainless steel[J]. Materials Science and Engineering, 1981, 47(1): 1-11
- [4] Munn P, Andersson B. Hydrogen embrittlement of PH13-8Mo steel in simulated real-life tests and slow strain rate tests[J]. Corrosion, 1990, 46: 286-295
- [5] 孙志华, 张晓, 汤智慧, 等. PH13-8Mo钢在3.5% NaCl水溶液中应力腐蚀性能研究[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2011年 第5期

[6] 戴秀梅, 何枫. 高强度沉淀硬化不锈钢在飞机上应用[J]. 航空材料学报, 2003, 23: 280

[7] 美国机械性能新据中心. 宇航结构金属手册[M]. 成都: 四川人民出版社, 1975

[8] Dehghan-Manshadi A, Barnett M R, Hodgson P D. Recrystallization in AISI 304 austenitic stainless steel during and after hot deformation[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485: 664-672

[9] Tian Baohui, Lind Christoph, Schaffler Erhard, et al. Evolution of microstructures during dynamic recrystallization and dynamic recovery in hot deformed nimonic 80a[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 367: 198-204

[10] Dudova N, Belyakov A, Sakai T, et al. Dynamic recrystallization mechanisms operating in a Ni-20% Cr alloy under hot-to-worm working[J]. Acta Materialia, 2010, 58: 3624-3632

[11] 赵永庆, 舒滢, 曾卫东, 等. 高度稳定化 β 型 Ti40

阻燃钛合金的动态再结晶行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(8): 1432-1436

[12] 钟志平, 谢富冬, 翊边, 等. 20MnMoNi55 钢的后动态再结晶模型[J]. 塑性工程学报, 2000, 7(2): 23-26

[13] 欧阳德来, 鲁世强, 崔霞, 等. TA15 钛合金 β 热变形中的动态再结晶形核[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(6): 116-120

[14] 张北江, 赵光普, 焦兰英, 等. 热加工工艺对 GH4586 合金微观组织的影响[J]. 金属学报, 2005, 41(4): 351-356

[15] 向嵩, 鞠泉, 刘国权. 变形温度对 15Cr-25Ni-Fe 基合金动态再结晶行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(3): 97-100

[16] 王凯, 王立军, 任海鹏. 钒钛合金化低碳钢高温变形动态再结晶[J]. 材料冶金学报, 2005, 4(1): 51-54

(编辑 李洪泉)

(上接第 68 页)

当涂层厚度到一定程度, 缺陷对涂层寿命的影响大于涂层厚度增加对性能的增益, 涂层性能降低, 表现为抗氧化寿命降低。

综上, “056” 涂层厚度低于 150 μm 时, 随厚度增加, SiO_2 生成量增多, 延长了的防护时间, 并且其自愈合能力能够抵消随厚度增加而增加的缺陷带来的影响, 因此表现为涂层寿命随厚度增加而提高; 当涂层厚度高于 150 μm 时, 虽然 SiO_2 生成量增多, 但其愈合能力不足以弥补厚度增加带来的大量缺陷, 造成涂层寿命受缺陷影响明显, 性能下降。

3 结论

(1) 二代 490 N 远地点发动机推力室用“056” 高温抗氧化涂层为硅化物体系, 其涂层性能受厚度影响明显, 在 100 ~ 200 μm 内, 涂层寿命随厚度变化呈现抛物线规律, 涂层最优厚度为 140 ~ 160 μm 。

(2) 涂层厚度在低于 150 μm 时, 氧化时厚度较高的涂层能够生产更多的 SiO_2 并且有效弥补缺陷, 涂层性能较高; 当涂层厚度高于 150 μm 后, 厚度增

加带来的缺陷增多, 超过了 SiO_2 增多带来的防护和愈合作用, 性能下降。

参考文献

[1] 刘昌国, 张中光, 韩宏印, 等. 高比冲双组元液体远地点火箭发动机研究[J]. 上海航天, 2003(4): 30-33

[2] 美国国家材料咨询委员会所属涂层委员会. 高温抗氧化涂层[M]. 北京: 科学出版社, 1980

[3] 贾中华. 料浆法制备钕合金和钼合金高温抗氧化涂层[J]. 粉末冶金技术, 2001(2): 74-76

[4] 张春基, 吕宏军, 贾中华, 等. 钕钨合金材料在液体火箭发动机上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(6): 57-60

[5] Kofstad P. High temperature oxidation of metals[M]. 1967, New York: John Wiley and Sons

[6] Tortorici P C, Dayananda M A. Interdiffusion and diffusion structure development in selected refractory metal silicides[J]. Mater. Sci. Eng. A, 1999(A216): 64-77

(编辑 李洪泉)