Metallurgical Engineering 冶金工程, 2019, 6(4), 246-250
Published Online December 2019 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/meng
https://doi.org/10.12677/meng.2019.64034

Effect of Hot Deformation Temperature on the Microstructure of a Ni-35Co Alloy

Xiaoyu Sun[1,2], Longfei Zhang[1,2], Long Jiang[1,2], Liang Jiang[1,2*]

[1]State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha Hunan
[2]Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha Hunan
Email: *liangjiang@csu.edu.cn

Received: Dec. 4th, 2019; accepted: Dec. 17th, 2019; published: Dec. 24th, 2019

Abstract

A Ni-Co alloy with 35 wt.% Co was prepared by vacuum induction melting. The microstructure evolution of the alloy at different hot deformation temperatures was studied. The results show that, at low or medium temperature, the alloy structure is consisted by elongated grains and there are obvious shear bands in mostly grains; under high temperature conditions, the alloy structure is consisted by fine grains and a considerable volume fraction of twins.

Keywords

NiCo Alloy, Microstructure, Hot Deformation

热压缩温度对Ni-35Co合金组织的影响

孙晓瑜[1,2]，张龙飞[1,2]，蒋　龙[1,2]，江　亮[1,2*]

[1]中南大学粉末冶金国家重点实验室，湖南 长沙
[2]中南大学粉末冶金研究院，湖南 长沙
Email: *liangjiang@csu.edu.cn

收稿日期：2019年12月4日；录用日期：2019年12月17日；发布日期：2019年12月24日

摘　要

通过真空感应熔炼制备了Co含量为35 wt.%的NiCo合金，本文研究了该合金在不同温度条件下热压缩后组织演变。研究结果表明：合金在中低温压缩后形成晶粒压长且部分晶粒内存在明显剪切带的合金组织；高温条件下形成晶粒细小且存在大量孪晶的合金组织。

*通讯作者。

文章引用：孙晓瑜，张龙飞，蒋龙，江亮．热压缩温度对 Ni-35Co 合金组织的影响[J]．冶金工程, 2019, 6(4): 246-250.
DOI: 10.12677/meng.2019.64034

关键词

NiCo合金，显微组织，热变形

1. 引言

镍基高温合金具有优异的综合力学性能(高温强度、抗高温氧化、抗蠕变、抗疲劳)，被广泛应用于航空发动机和燃气轮机的热端部件[1]。随着航空工业的发展与发电高热效率的急切需要，提升镍基高温合金的服役温度和高温综合力学性能迫在眉睫。虽然增加 γ'相含量和增大 γ'的尺寸可以提高高温合金的强度，但是当 γ'的含量超 50%时，高温合金的塑性和热加工性能变得非常糟糕。

近来，沈阳金属研究所徐等[2]在 Ni 基高温合金中通过调节层错能(SFE)引入微孪晶组织，同时提高了高温合金的强度(极限抗拉强度)和塑性。强度的增强是由于细小的变形孪晶阻碍了位错的运动，并把位错分离到狭小的区域，阻碍位错的恢复。塑形的提高是由于变形孪晶改变变形的同质性，而且孪晶界可以作为滑移面协调变形。

镍基高温合金中基体镍为高层错能(SFE)面心立方金属。Co 元素的加入能够显著减少 Ni 合金的层错能[3]。在本文中以 Co 含量为 35 wt.%的 NiCo 合金作为研究对象，研究该合金不同温度条件下的热变形行为和组织演变。在中低温形成晶粒压长且部分晶粒内存在明显剪切带的合金组织；高温条件下形成晶粒细小且存在大量孪晶的合金组织。并对合金变形后组织进行硬度测试，反映了不同温度条件下合金残余应力的大小。

2. 实验方法

本实验采用真空感应熔炼技术来制备 Co 含量为 35 wt.%的 NiCo 合金铸锭，熔炼浇注温度约为 1500℃。使用电火花线切割从铸锭中间切取多个 φ6 × 9 mm 的热压缩圆柱试样，如图 1(a)所示。热压缩实验前，依次用 180 目、600 目砂纸打磨圆柱试样，来消除圆柱试样表面油污以及线切割痕迹。

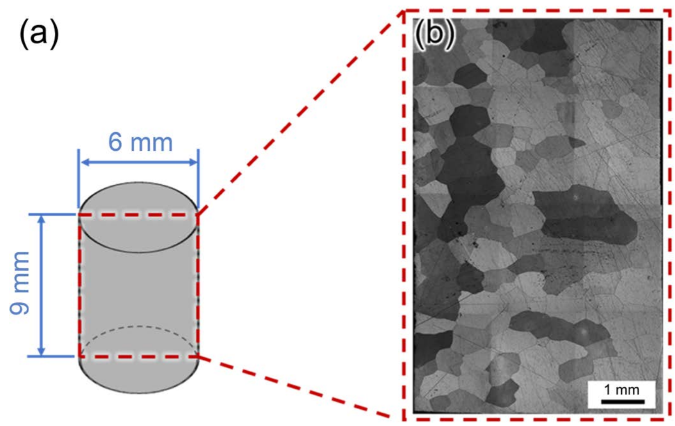

Figure 1. Initial state of alloys: (a) The size of samples; (b) Initial microstructure
图 1. 合金初始状态：(a) 试样尺寸；(b) 初始组织

热压缩实验在型号为 Gleeble-3180 的热模拟机上进行。压缩过程中在圆柱试样和夹头间放置石墨片来减小热压缩变形过程中的摩擦。在真空条件下，以 5℃/s 的升温速率升温到目标温度(25℃、300℃、500℃、700℃、900℃)来加热试样；保温 3 min 后，以 10/s 的压缩速率进行热压缩，压下量为 50%。压缩完成后，立即水冷保留变形组织。

将热压缩后的试样沿压缩方向从中心切开。镶样后使用 SiC 砂纸和 Al_2O_3 抛光粉对试样横截面进行打磨和抛光。对抛光后的试样进行腐蚀，腐蚀溶液为王水(60 mL HCl + 40 mL HNO_3)。用徕卡金相显微镜观察热压缩后的组织。使用硬度计测试不同变形条件下热压缩后合金的硬度。

3. 结果和分析

3.1. 合金的初始组织和层错能

图 1(b)展示了腐蚀后整个 NiCo 合金试样截面的初始组织。合金的初始组织由粗大的等轴晶晶粒所构成。其平均晶粒直径约为 0.8 mm。初始组织晶粒分布均匀，无明显的织构。当 Co 含量小于 65 wt.%时，NiCo 合金为面心立方(FCC)结构。对于 FCC 结构的金属来说，层错能是一个变形过程中组织演变的重要参数。已有文献表明，随着 FCC 合金层错能的降低，易于孪生的发生，进而形成孪晶组织。NiCo 合金的层错能由文献[4]得到。如图 2 所示，随着 Co 含量的增加，NiCo 的层错能显著降低。在 Co 含量约为 40 wt.%时存在一个斜率的突变。Co 含量为 35 wt.%的 NiCo 合金，其层错能约为 80 mJ/m^2。这表明该合金为中层错能合金。

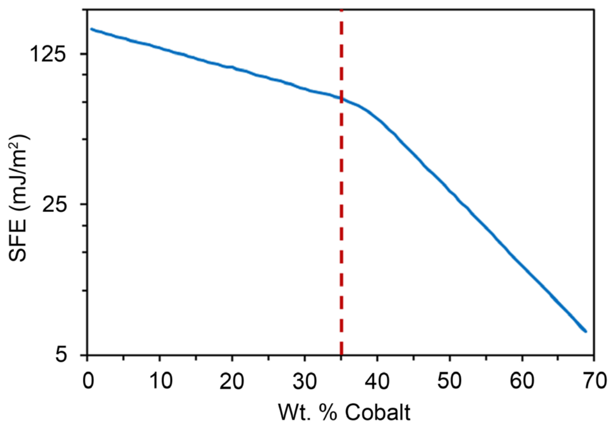

Figure 2. The variation of the stacking fault energy with alloying in Ni-Co alloys
图 2. NiCo 合金层错能的变化

3.2. 真应力－真应变曲线

Ni-35Co 合金在不同温度下压缩所得的真应力－真应变曲线如图 3 所示。最大真应变为 0.69，真应力随着真应变的增加而增加。压缩温度不同，真应力－真应变曲线有明显的差别。当热压缩温度小于或等于 500℃时，真应力－真应变曲线呈抛物线状，即随着真应变的不断增加，真应力遵循抛物线规律不断增大。这是因为在中低温(0℃~500℃)热压缩过程，合金变形以位错滑移为主导，位错的不断累积使得应力持续升高。当热压缩温度大于或等于 700℃时，真应力－真应变曲线先经历真应力随应变增加呈抛物线规律增加的阶段，而后进入稳态变形阶段。在稳态阶段，当热压缩温度为 700℃时，真应力随真应变以微小的斜率呈直线增加；当热压缩温度为 900℃时，真应力随真应变的增加基本保持不变。在高温 700℃~900℃热压缩过程中，组织发生动态再结晶，真应力在压缩过程基本保持不变。

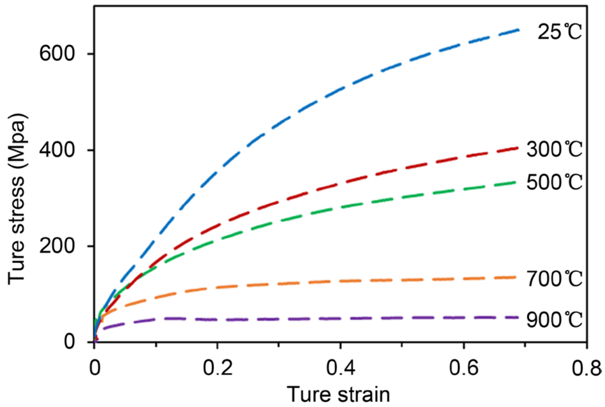

Figure 3. True stress-true strain curves of Ni-35Co alloy under different deformation temperature
图 3. 不同变形温度下 Ni-35Co 合金的真应力–真应变曲线

3.3. 组织演变

不同温度条件下 NiCo 合金热压缩后的组织如图 4 所示，变形后试样均没有产生裂纹。中低温下压缩后的合金组织由被压长的晶粒以及剪切带构成；高温下压缩后的组织由动态再结晶细化的晶粒和孪晶构成。中低温热压缩过程中，在压应力的作用下，原来粗大的等轴晶被压长。由于变形过程中位错的增殖、运动和阻塞，在晶粒内部形成剪切带来协调变形。大部分剪切带均横贯整个被压缩的晶粒，少量没有横贯整个晶粒的剪切带优先分布在应力集中的晶界处，如图 4(b)所示。随着温度的增加，剪切带间的宽度明显增加(图 4(a)~(c))在宽剪切带间看以明显观察到产生新的剪切带，它们与原剪切带的伸长方向不同。当变形温度高于或者等于 700℃时，合金组织在热压缩过程中晶粒得到细化，晶粒直径由原始的 800 μm 细化到 77 μm (图 4(d)~(e))。这归功于动态再结晶和孪晶形成的共同作用。热变形过程中粗大的等轴晶在应力和高温的作用下，发生动态再结晶产生新的细小的晶粒。而且，合金组织在残余应力和退火的作用下产生大量退火孪晶，晶粒进一步得到细化。900℃与 700℃产生的组织相比，晶粒更大，孪晶所占分数更少。这是由于温度更高时动态再结晶过程晶粒进一步长大和储存残余应力小导致孪晶所占分数少的结果。

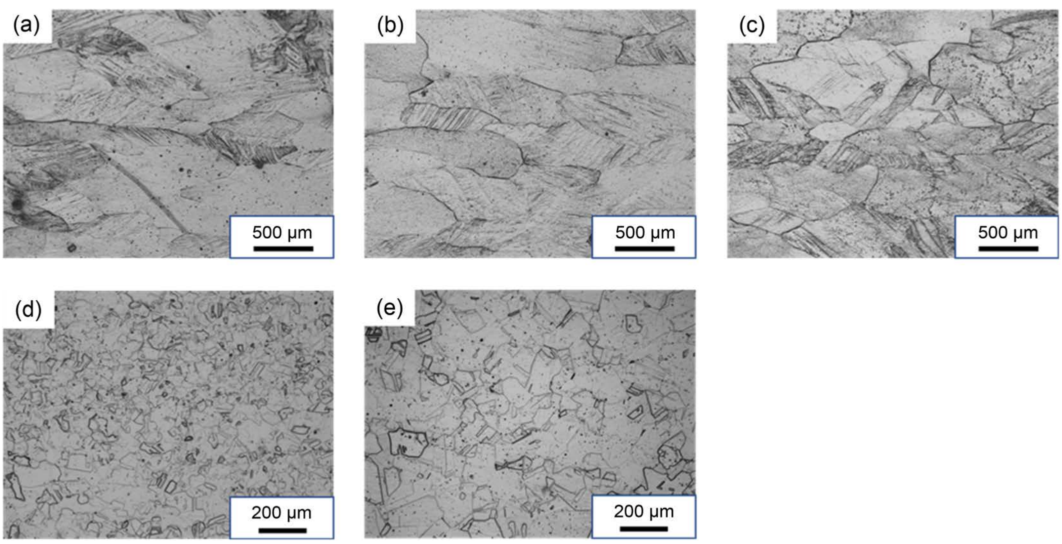

Figure 4. The microstructure of alloys after deformation at different temperature: (a) 25˚C; (b) 300˚C; (c) 500˚C; (d) 700˚C; (e) 900˚C
图 4. 不同变形温度压缩后的合金组织：(a) 25˚C；(b) 300˚C；(c) 500˚C；(d) 700˚C；(e) 900˚C

3.4. 硬度

不同温度下热压缩后的合金横截面的维氏硬度值，如图 5 所示。未变形前的组织硬度为 83.2 (±1.12) HVN。误差棒表示多次测量值的标准差，合金维氏硬度值随着压缩温度的升高而降低从 500℃到 700℃过程中存在骤降。维氏硬度值与真应力–真应变曲线以及变形后组织存在明显的关联。温度越低，合金试样变形所需应力越高，而且中低温变形以位错滑移为主。这使得中低温下合金在变形过程储存了更多的残余应力，使得硬度值高。高温度下，使得合金变形所需要的应力低，而且在热变形过程发生动态再结晶进而退火过程孪晶的生成均消耗了组织中残余应力，造成硬度值低。

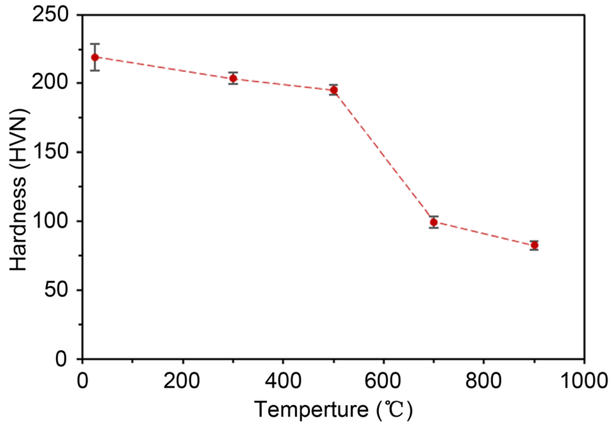

Figure 5. The hardness of Ni-35Co alloy under the conditions of different deformation temperature
图 5. 不同温度压缩后 Ni-35Co 合金的硬度

4. 结论

不同温度条件对 Ni-35Co 合金热压缩后的组织有着显著的影响。在中低温形成晶粒压长且部分晶粒内存在明显剪切带的合金组织；高温条件下形成晶粒细小且存在大量孪晶的合金组织。当热压缩温度为 700℃时，在动态再结晶和孪生的共同作用下，会形成晶粒均匀细小的合金组织。

致　谢

作者感谢中南大学研究生科研创新项目(2018zzts420)对本课题的支持。

基金项目

中南大学研究生科研创新项目(2018zzts420)。

参考文献

[1] 陈国良. 高温合金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.

[2] Xu, H., Zhang, Z.J., Zhang, P., *et al.* (2017) The Synchronous Improvement of Strength and Plasticity (SISP) in New Ni-Co Based Disc Superalloys by Controling Stacking Fault Energy. *Scientific Reports*, 7, Article No. 8046. https://doi.org/10.1038/s41598-017-07884-4

[3] Meyers, M.A., Vöhringer, O. and Lubarda, V.A. (2001) The Onset of Twinning in Metals: A Constitutive Description. *ActaMaterialia*, **49**, 4025-4039. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00300-7

[4] Gallagher, P.C.J. (1970) The Influence of Alloying, Temperature, and Related Effects on the Stacking Fault Energy. *Metallurgical Transactions*, **1**, 2429-2461.