

· 组织和性能 ·

锻造和预备热处理对超高强度钢 23Co-Ni 晶粒度的影响

王瑞 龚伟 姜周华 薛向欣

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110819)

摘要 实验钢(成分: 0.24C, 0.01Mn, 0.06Si, 0.001S, 0.002P, 13.42Co, 11.32Ni, 3.05Cr, 1.18Mo, 0.015Al, 0.015Ti)为6 t真空感应炉+真空自耗熔炼的Φ600 mm锭经3次镦拔锻制的Φ300 mm钢棒,并经650℃ 20 h退火处理(晶粒度6.0级)。实验研究了Φ300 mm钢棒至Φ250 mm钢棒(变形30%)的锻制温度(900~1200℃)和预备热处理(860℃和900℃正火)对钢的晶粒度的影响。结果表明,锻造温度1000~1140℃,变形量30%时可获得细小的完全再结晶晶粒(7.0级)。900℃正火处理该钢可获得均匀细小的晶粒(7.0级)。

关键词 超高强度钢 23Co-Ni 锻造 温度 变形量 预备热处理 晶粒度

Effect of Forging and Conditioning Heat Treatment on Grain Size of Super-High Strength Steel 23Co-Ni

Wang Rui, Gong Wei, Jiang Zhouhua and Xue Xiangxin

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The test steel (composition: 0.24C, 0.01Mn, 0.06Si, 0.001S, 0.002P, 13.42Co, 11.32Ni, 3.05Cr, 1.18Mo, 0.015Al, 0.015Ti) Φ300 mm bar is forged with 3 times upsetting and forging-out from Φ600 mm ingot melted by 6t vacuum induction furnace + vacuum arc remelting process and annealed at 650℃ for 20 h (grains rating 6.0). The effect of temperature (900~1200℃) forging the Φ300 mm bar to Φ250 mm bar (deformation 30%) and conditioning heat treatment (normalizing at 860℃ and 900℃) on grain size of steel has been tested and studied. Results show that with forging at 1000~1140℃ and deforming 30%, the steel has fine and complete recrystallization grains (rating 7.0). With normalizing at 900℃ the steel has homogeneous and fine grains (rating 7.0).

Material Index Super-High Strength Steel 23Co-Ni, Forging, Temperature, Deformation, Conditioning Heat Treatment, Grain Size

23Co-Ni 钢是一种新型的二次硬化 Co-Ni 超高强度钢。它的极限抗拉强度 σ_b 可达1930~2070 MPa,而断裂韧性 K_{IC} 可超过110 MPa·m^{1/2}[1-3]。由于23Co-Ni 钢良好的综合性能,所以其在航空工业中的应用前景极其广阔[4,6]。

钢铁材料的晶粒愈细,其韧性就愈高[7]。由于23Co-Ni 钢的纯净度非常高、高温的变形抗力也高,针对Φ300 mm大尺寸棒材,获得技术条件要求的7~8级晶粒度很困难。本文研究了不同变形工艺参数和预备热处理制度对其晶粒度的影响。

1 实验用钢和实验方法

实验用材料(表1)为6 t真空感应炉+真空自耗熔炼的钢锭(自耗锭直径为Φ660 mm,锭重5.2 t),锻造开坯利用现场生产锻造设备3500 t快锻机,采用三次镦拔工艺,始锻温度1180℃,变形方式为Φ660 mm→Φ900 mm→Φ660 mm→Φ900 mm→Φ660 mm→Φ900 mm→Φ300 mm,锻制出Φ300 mm的23Co-Ni 原始试验棒材。采用饱和苦味酸水溶液+十二烷基磺

酸钠为腐蚀剂,浓度配比为100:1(质量比)。常温下将试样检测面朝上浸入腐蚀液中,每隔20~30 min将试样取出,用清水冲洗并滴酒精吹干,在显微镜下观察腐蚀情况,直至晶界显示清晰、连续、完整为止。晶粒度评级执行GB/T6394-2002标准。

2 实验结果及分析

2.1 变形工艺参数对23Co-Ni 钢晶粒度的影响

实际生产中对晶粒度大小影响最为明显的变形参数是变形温度(加热温度)和变形量。

图1是Φ300 mm圆棒材加热到650℃,保持20 h,空冷后的退火组织晶粒度照片,晶粒度评级仅有6.0级。

图2是利用现场3500 t快锻机,不同加热温度下(初锻温度)对实验钢Φ300 mm圆棒材变形30%空冷后的奥氏体晶粒度对比结果(锻造变形后棒材

表1 实验用钢 23Co-Ni 分析成分/%
Table 1 Analysis of test steel 23Co-Ni/%

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Co
0.24	0.01	0.06	0.001	0.002	11.32	3.05	1.18	0.015	0.015	13.42

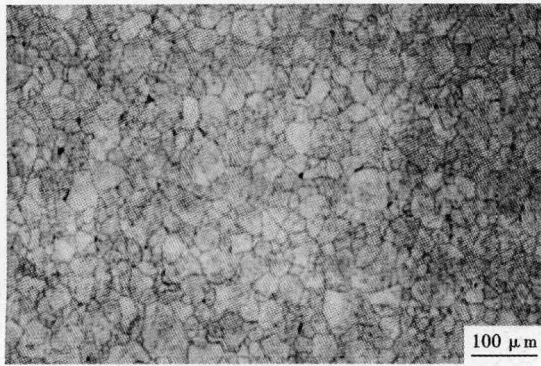


图 1 Φ300 mm 23Co-Ni 钢 650 °C 20 h 退火后晶粒形貌(晶粒度 6.0 级)

Fig.1 Morphology of grains in Φ300 mm bar of steel 23Co-Ni annealed at 650 °C for 20 h (rating 6.0)

直径 Φ250 mm)。从实验结果可知,从1 000 ~ 1 140 °C变形的锻件晶粒明显细小,一般可以达到 7 ~ 8 级;当加热温度大于1 140 °C时晶粒尺寸开始长大,变形温度到1 220 °C后晶粒度达到 5.5 级,晶粒尺寸急剧长大。

图 3 是相同温度下实验钢从 Φ300 mm 圆锻造变形 30% 到 Φ250 mm 圆和原始 Φ300 mm 圆棒材 23Co-Ni 钢的晶粒组织对比。从图 3 可以看出,变形 30% 后的试样晶粒尺寸减小,变形温度越高细化越明显。

文献指出^[8-9],当以 0.1 s⁻¹ 的变形速率在1 000 ~ 1 150 °C 变形时,各个温度的流变曲线均出现应力峰,流变曲线呈现出典型的动态再结晶特征。随着变形温度的升高,动态再结晶不断发生,1 050 °C 时实验用钢已发生完全动态再结晶,温度继续升高,完全动态再结晶晶粒尺寸逐渐增大,晶粒迅速粗化。

因此,对于 23Co-Ni 钢,在变形量为 30% 时,将变形温度控制在1 000 ~ 1 140 °C 可获得细小的完全再结晶组织。另一方面,随着变形温度的升高,晶粒分布在更宽的尺寸范围,并更为分散,变形均匀性降低。在热塑性成形过程,变形温度降低至1 000 ~ 1 140 °C 可在细化晶粒的同时改善微观组织均匀性。

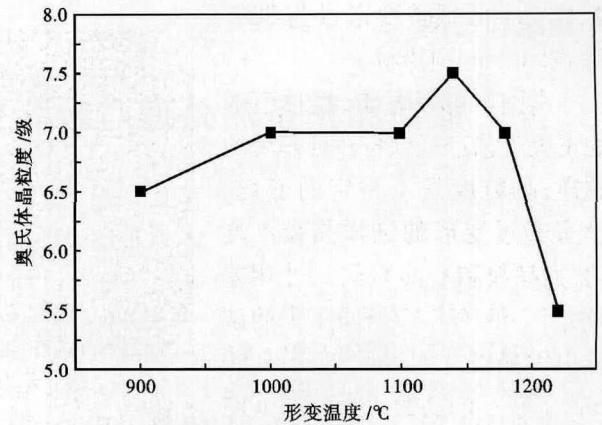


图 2 加热温度对 23Co-Ni 钢 Φ300 mm 锻造至 Φ250 mm 空冷钢棒时钢的晶粒度级别的影响

Fig.2 Effect of heating temperature on rating of grains in Φ250 mm bar, air cooling, forged from Φ300 mm bar, steel 23Co-Ni

2.2 不同预备热处理制度对 23Co-Ni 钢晶粒度的影响

分别经 860 °C 145 min、900 °C 145 min 不同正火制度预备热处理。晶粒组织图片如图 4 所示,其中,图 4(a,b)为1 100 °C 实验钢原始 Φ300 mm 圆棒材不变形的试样,图 4(c,d)为1 100 °C 实验钢从

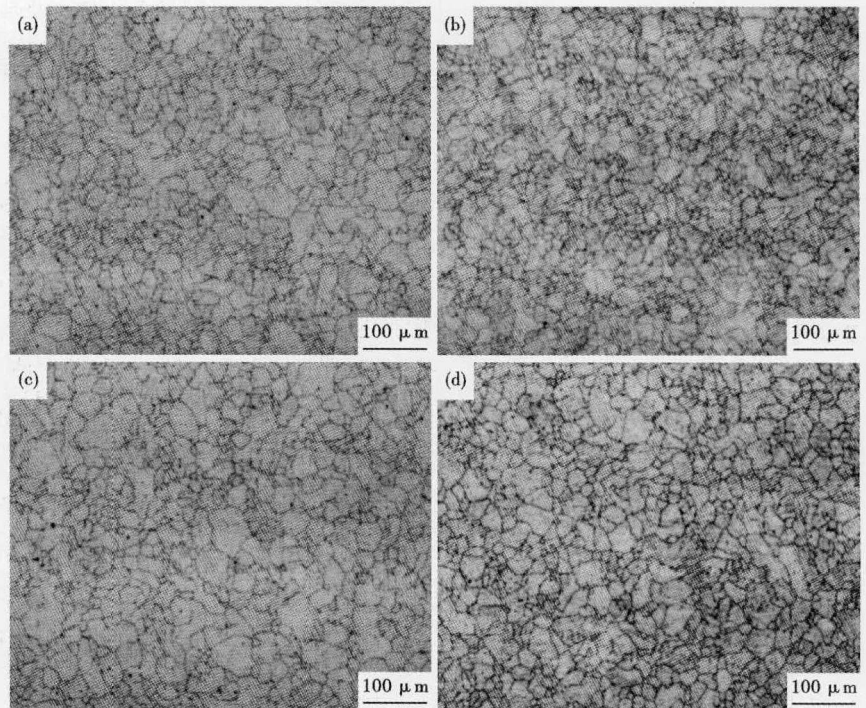


图 3 加热温度和锻造变形(30%)对 23Co-Ni 钢晶粒形貌的影响:(a) Φ300 mm 棒, 1 100 °C 加热,锻造前,空冷,晶粒度 7.0 级;(b) Φ250 mm 棒,加热于 1 100 °C,锻造后(变形 30%),空冷,晶粒度 7.5 级;(c) Φ300 mm 棒,1 140 °C 加热,锻造前,空冷,晶粒度 7.0 级;(d) Φ250 mm 棒,加热于 1 140 °C,锻造后(变形 30%),空冷,晶粒度 7.5 级

Fig.3 Effect of heating temperature and forging deformation (30%) on morphology of grains in steel 23Co-Ni: (a) Φ300 mm bar, heating at 1 100 °C, before forging, air cooling, grain size rating 7.0; (b) Φ250 mm bar, heating at 1 100 °C, after forging (deformation 30%), air cooling, grain size rating 7.5; (c) Φ300 mm bar, heating at 1 140 °C, before forging, air cooling, grain size rating 7.0; (d) Φ250 mm bar, heating at 1 140 °C, after forging (deformation 30%), air cooling, grain size rating 7.5

Φ300 mm 圆锻造变形量为 30% 后 Φ250 mm 圆棒材。

由图 4 可以看出,经过不同的正火工艺进行预备热处理后的试样,晶粒度发生一定的变化。没有经过变形的试样晶粒不均匀,大晶粒和小晶粒的尺寸相差较大。860 °C 145 min 正火的试样中大晶粒的尺寸可达 70 ~ 80 μm,而较小的晶粒只有 10 μm 左右。而 900 °C 145 min 正火制度预备热处理的晶粒比 860 °C 145 min 制度的要细小均匀得多。

正火是一个再结晶和奥氏体化的过程,23Co-Ni 钢的 A_{c3} 温度为 827 °C,通常正火温度为 A_{c3} 以上 30 ~ 50 °C,提供一定的过热度,可以加速奥氏体的形核。因此正火温度不应低于 860 °C。在 860 ~ 980 °C 正火,较低的温度晶粒长大的倾向较小,但奥氏体均匀化所需的时间较长,保温时间的延长也可能使晶粒长大。所以在时间相同的情况下,正火温度较低时,晶粒没有得到充分的均匀化。

综合变形参数和预备热处理的配合效果来看,经过预备热处理后晶粒可以得到细化,而且变形温度越高,细化的效果越明显,如 1 180 °C 不变形空冷的晶粒度为 4 级,经预备热处理后可以达到 7 级,但变形温度太高后即使经过预备热处理也不能细化到规定的级别,如变形温度达到 1 220 °C 后,晶粒虽然也通过预备热处理而得到了细化,但不变形的状态晶粒仍很大,只有 5.5 级。因此锻件的变形应尽量避免较高的加热温度,以免晶粒过分长大。

3 结论

(1) 对于 23Co-Ni 钢,在变形量为 30% 时,将变形温度控制在 1 000 ~ 1 140 °C 可获得细小的完全再结晶组织,同时改善微观组织均匀性。

(2) 应用正火工艺进行预备热处理可以提高晶粒度级别,均匀组织。合适的正火温度在 900 ~ 950 °C,且保温时间不宜过长,防止晶粒过分长大。

国家自然科学基金项目资助(51174050)

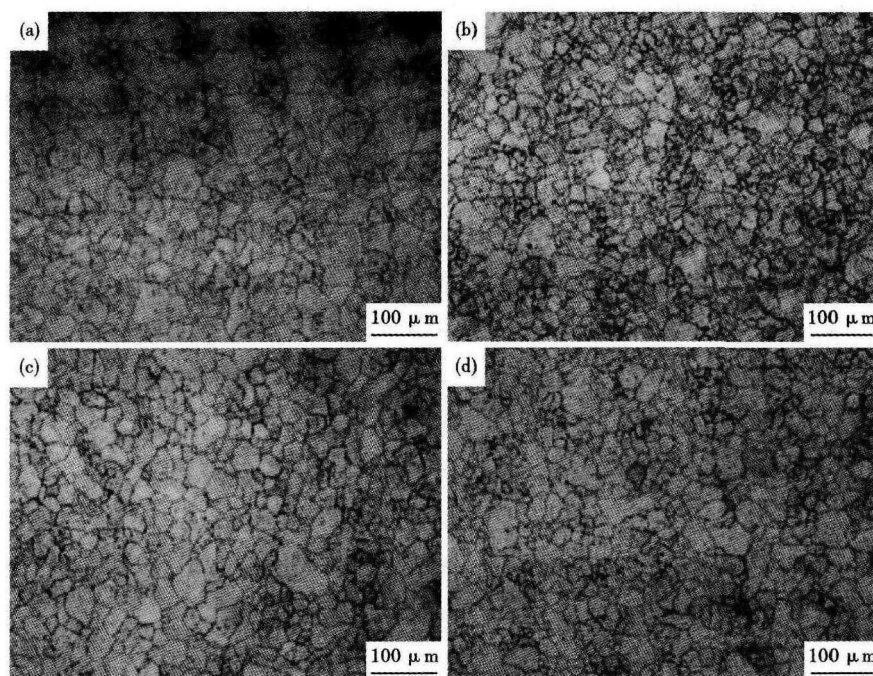


图 4 预备热处理对锻造前后实验钢晶粒的影响:锻造前 Φ300 mm- (a) 860 °C 145 min,空冷,6.5 级,(b) 900 °C 145 min,空冷,7.0 级;锻造后 Φ250 mm(变形 30%)- (c) 860 °C 145 min,空冷,6.5 级,(d) 900 °C 145 min,空冷,7.0 级

Fig. 4 Effect of conditioning heat treatment on grains in test steel before and after forging: before forging, Φ300 mm bar- (a) heating at 860 °C for 145 min, air cooling, rating 6.5; (b) heating at 900 °C for 145 min, air cooling, rating 7.0; after forging, Φ250 mm bar (deformation 30%)- (c) heating at 860 °C for 145 min, air cooling, rating 6.5; (d) heating at 900 °C for 145 min, air cooling, rating 7.0

参考文献

- [1] Wang L D, Jiang L Z, Zhu M, et al. Improvement of Toughness of Ultrahigh Strength Steel Aermet 100 [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2005, 21: 160-168.
- [2] 赵振业, 李春志, 李志, 等. 探索强韧化机理, 创新超高强度高韧性不锈钢 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 202-206.
- [3] Hu Z R, Wu X F. High Resolution Electron Microscopy of Precipitates in High Co-Ni Alloy Steel [J]. Micron, 2003, 34(1): 19-23.
- [4] Grujicic M. Implication of Elastic Coherency in Secondary Hardening of High Co-Ni Martensitic Steels [J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(5): 1357-1362.
- [5] Ayer R, Machmeier P. On TiC Characteristics of M_2C Carbides in the Peak Hardening Regime of Aermet 100 Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29(3): 903-905.
- [6] 李志, 赵振业. Aermet 100 钢的研究与发展 [J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 265-269.
- [7] 陈春, 易幼平, 李蓬川. 23Co13Ni11Cr3Mo 超高强度钢模锻件锻造工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(17): 15-18.
- [8] 王春旭, 刘宪民, 田志凌, 等. 超高强度 23Co14Ni12Cr3MoE 钢的热变形行为研究 [J]. 航空材料学报, 2011, 31(6): 19-23.
- [9] 黄始全, 易幼平, 李蓬川. 23Co14Ni11Cr3Mo 超高强度钢的高温变形行为 [J]. 材料研究学报, 2011, 25(3): 283-288.

王瑞(1968-), 女, 博士研究生(东北大学), 教授级高级工程师, 1990 年东北工学院(本科)毕业, 超高强度钢研究。E-mail: wangrui871@163.com

收稿日期: 2015-06-02