

固溶处理对 GH4700 镍基合金管组织及力学性能的影响

李阳 李莎 王岩

(太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003)

摘要 研究了1 000~1 150 °C固溶处理对 GH4700 合金(0.05C, 25Cr, 20Co, 1.65Nb, 1.47Al, 1.69Ti, 余 Ni)组织及力学性能的影响。结果表明,1 180 °C挤压空冷后 $\Phi 89$ mm \times 15 mm GH4700 管材的抗拉、屈服强度和伸长率分别为1 150 MPa, 780 MPa 和 36%;合金在1 000~1 060 °C固溶处理,随着温度的提高, γ' 相逐渐溶入基体,合金晶粒明显长大,强度显著降低,塑性显著升高;在1 090~1 150 °C随着温度的提高,晶粒长大趋势不明显,合金强度和塑性的变化趋势放缓。1 150 °C固溶处理后 GH4700 合金抗拉强度 800 MPa,屈服强度 330 MPa,伸长率 65%。

关键词 镍基合金 GH4700 固溶处理 γ' 相 晶粒尺寸 力学性能

Effect of Solid Solution Treatment on Structure and Mechanical Properties of Nickel Base Alloy GH4700

Li Yang, Li Sha and Wang Yan

(State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The effect of solid solution treatment at 1 000~1 150 °C on structure and mechanical properties of alloy GH4700 (0.05C, 25Cr, 20Co, 1.65Nb, 1.47Al, 1.69Ti, bal Ni) has been studied. Results show that the tensile, yield strength and elongation of $\Phi 89$ mm \times 15 mm GH4700 alloy tube extruded at 1 180 °C, air cooling are respectively 1 150 MPa, 780 MPa, and 36%; as the alloy solid-solution-treated at 1 000~1 060 °C with increasing temperature the γ' phase gradually dissolves into the matrix, the grains of alloy grow obviously, the strength decreases markedly and the plasticity rapidly increases; at 1 090~1 150 °C the trend of grain growth is not appreciable, the change trend of strength and plasticity of alloy is very slow; with solid-solution-treated at 1 150 °C, the tensile strength, yield strength and elongation of alloy GH4700 are respectively 800 MPa, 330 MPa and 65%.

Material Index GH4700 Nickel Base Alloy, Solid-Solution Treatment, γ' Phase, Grain Size, Mechanical Properties

GH4700 合金是以铝、钛时效强化为主的镍基高温合金,该合金在高温长时间使用条件下具有高强度、高塑性、抗热腐蚀能力强、组织稳定等特点^[1]。在确定合金的化学成分之后,影响合金组织的因素有冶炼铸造、塑性变形和热处理等工艺,其中热处理工艺对合金组织的影响更为敏感^[2]。其中固溶处理可以使一次 γ' 相、二次 γ' 相、各种碳化物和硼化物充分地溶入基体中,得到过饱和固溶体,并最大限度的减少($\gamma + \gamma'$)共晶的含量^[3-4]。

1 实验材料及方法

实验材料经 500 kg 真空感应 + 电渣重熔冶炼浇铸成 410 kg 铸锭,锻造开坯后热挤压成 $\Phi 89$ mm \times 15 mm 管材,挤压温度为 1 180 °C,挤压后空冷。合金成分(%)为:0.05C、25.00Cr、20.00Co、1.65Nb、1.47Al、1.69Ti、Ni 余量。

试样热处理实验温度的设定以 Thermo-Calc 计算结果为参考,即 1 000~1 150 °C 1 h,水冷。

原始管材试样及固溶处理后的试样电解腐蚀后进行光学和扫描电子显微镜(SEM)观察分析,并进

行硬度和拉力试验。

2 实验结果及分析

2.1 热挤压管材组织分析

热挤压 GH4700 合金管材的晶界处有碳化物析出(图 1a),通过 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)分析,碳化物主要为 $M_{23}C_6$ 。并观察到组织中析出了大量弥散分布的 γ' 相(图 1b)。由于合金热挤压温度在 γ' 相析出温度之上,在冷却过程中析出了大量的二次 γ' 相。管材上析出的大量 γ' 相会显著提高合金的强度,降低合金塑性,考虑到管材需要进行后续的冷加工,因此需要通过热处理使这些 γ' 相溶入基体,以降低合金的冷加工难度。

从图 1(c)可以看出荒管晶粒大小较均匀,荒管在挤压过程中发生了动态再结晶,且在空冷过程中发生了后动态再结晶,因此再结晶比较充分。

2.2 固溶处理对显微组织的影响

图 2 是 GH4700 合金经过不同温度固溶处理 1 h 后的 SEM 显微组织照片,对照图 1 的原始组织可以看出,随着固溶处理温度的升高, γ' 相逐渐溶解

到基体中。经 1 000 ℃ 固溶处理 1 h 后,奥氏体晶界附近的 γ' 相首先开始溶解(图 2a);当固溶温度提高到 1 030 ℃ 时,奥氏体晶界的 γ' 相完全溶解,晶粒内的 γ' 相也开始溶解, γ' 相尺寸和数量均明显减少(图 2b);固溶处理温度到 1 060 ℃ 时,晶界和晶粒内的 γ' 相已溶解完全(图 2c),在更高温度 1 090 ~ 1 150 ℃ 固溶处理后,合金组织中已经观察不到 γ' 相(图 2d, e, f)。

由热力学相图计算得到, GH4700 合金 γ' 相开始析出温度为 974 ℃,在此温度以上固溶处理时, γ' 相开始溶入基体。由于晶界原子的扩散激活能较小,原子在晶界的扩散速度大于晶粒内部^[5],晶界的 γ' 相首先满足溶解的动力学条件,因此在较低固溶温度下晶界的 γ' 相开始溶解。随着固溶温度的提高,晶粒内的 γ' 相也开始满足溶解的动力学条件,最终 γ' 相全部溶入基体。

2.3 固溶处理对晶粒尺寸的影响

晶粒尺寸及均匀性对高温合金材料的塑性、韧性、强度有明显影响,而固溶处理工艺可以有效地调整晶粒尺寸。图 3 是 GH4700 合金在不同温度保温 1 h 水冷后的金相照片,图 4 为平均晶粒尺寸随固溶温度的变化趋势。可以看出,随着固溶温度提高,晶粒逐渐长大,其中在 1 000 ~ 1 060 ℃ 固溶处理时,晶粒长大趋势尤为明显,而在 1 060 ~ 1 150 ℃ 温度段,晶粒尺寸几乎没有变化,只有微量的长大。

晶粒长大的主要驱动力是界面自由能的降低,在界面自由能驱动下,晶界发生迁移,晶界迁移引起晶粒之间的相互消失与合并,从而使晶粒长大。由于界面迁移是通过原子克服一定位垒跳迁来完

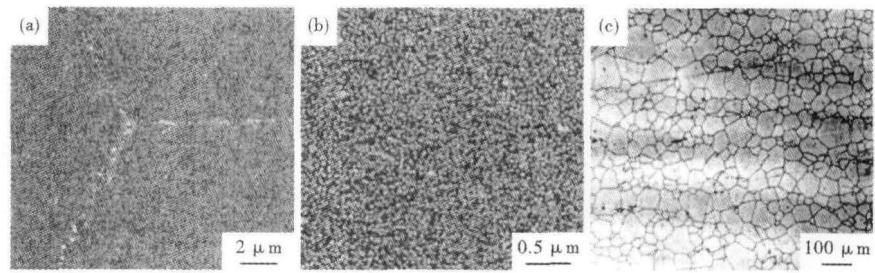


图 1 GH4700 合金热挤压管材组织形貌:(a)晶界碳化物;(b) γ' 相;(c)晶粒,SEM
Fig.1 Morphology of structure of alloy GH4700 hot-extruded tube: (a) grain boundary carbides; (b) γ' phase; (c) grain, SEM

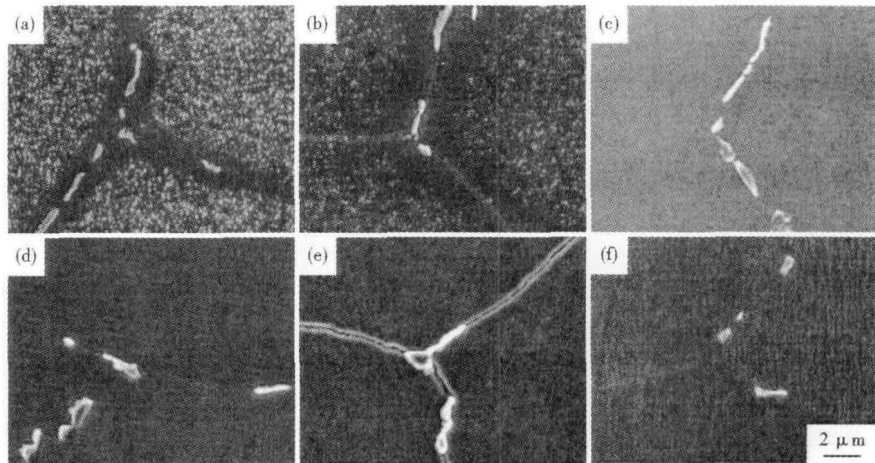


图 2 GH4700 合金的析出相形貌,固溶温度/℃:(a)1 000;(b)1 030;(c)1 060;(d)1 090;(e)1 120;(f)1 150

Fig.2 Morphology of precipitated phase in alloy GH4700 solid-solution-treated at 1 000 ℃ (a); 1 030 ℃ (b); 1 060 ℃ (c); 1 090 ℃ (d); 1 120 ℃ (e) and 1 150 ℃ (f)

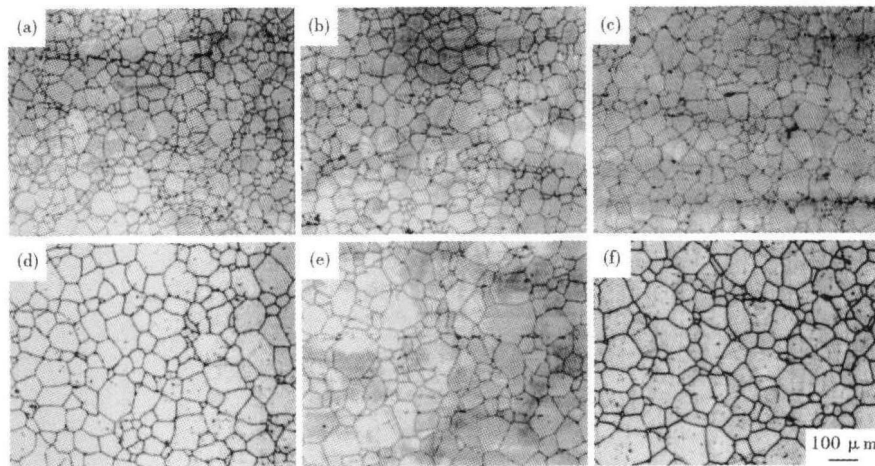


图 3 GH4700 合金的晶粒形貌,固溶温度/℃:(a)1 000;(b)1 030;(c)1 060;(d)1 090;(e)1 120;(f)1 150

Fig.3 Morphology of grain of alloy GH4700 solid-solution-treated at 1 000 ℃ (a); 1 030 ℃ (b); 1 060 ℃ (c); 1 090 ℃ (d); 1 120 ℃ (e) and 1 150 ℃ (f)

成,可视为热激活过程,所以温度对晶界迁移速度影响显著,从而影响晶粒长大的程度^[6]。固溶温度在

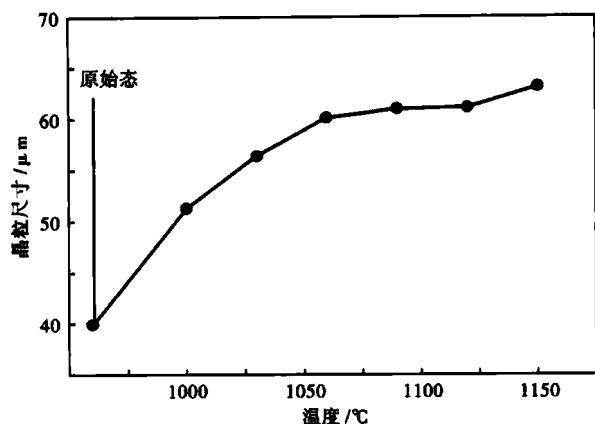


图 4 固溶处理温度对 GH4700 合金平均晶粒尺寸的影响
Fig. 4 Effect of solid-solution-treated temperature on average grain size of alloy GH4700

1 000 ~ 1 060 °C 时,随着固溶温度的提高,γ'相逐渐融入基体,使晶界处钉扎作用明显减弱,晶界自由能降低,从而使晶粒长大;而继续提高温度,在1 060 ~ 1 150 °C 时,合金的析出相没有明显变化,晶界自由能几乎不变,因此晶粒长大趋势不明显。

2.4 固溶处理对力学性能的影响

从图 5 可以看出,1 180 °C 挤压空冷后(原始态)Φ89 mm × 15 mm GH4700 管材的抗拉、屈服强度和伸长率分别为1 150 MPa、780 MPa 和 36%,相对于原始态管材,固溶处理后管材的强度下降,塑性提高,且随着固溶温度的升高,抗拉强度、屈服强度继续下降,伸长率继续升高。

在1 000 ~ 1 090 °C 固溶处理时,随着固溶温度的升高,合金的抗拉强度、屈服强度均显著下降,伸长率显著升高;继续提高温度,在1 090 ~ 1 150 °C,随着固溶温度的提高,抗拉强度、屈服强度又缓慢下降,伸长率缓慢升高。

GH4700 合金是典型的沉淀强化型高温合金,γ'相是合金主要的强化相,γ'相的数量、形态和分布是影响该合金力学性能的决定性因素。γ'相在热挤压后管材冷却过程中均匀弥散地从基体中析出,使合金的抗拉强度、屈服强度都达到较高的水平,伸长率较低;固溶温度在1 000 ~ 1 060 °C 时,随着γ'相的大量溶解,析出相对合金的强化作用减弱,使合金的强度显著降低,塑性显著提高;继续提高温度到1 090 ~ 1 150 °C,γ'相已经溶解完全,由于晶粒缓慢长大,使合金的强度稍有下降,塑性稍有提高。Φ89 mm × 15 mm GH4700 合金挤压管径1 150 °C 固溶水冷后其抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 800 MPa、330 MPa 和 65%。

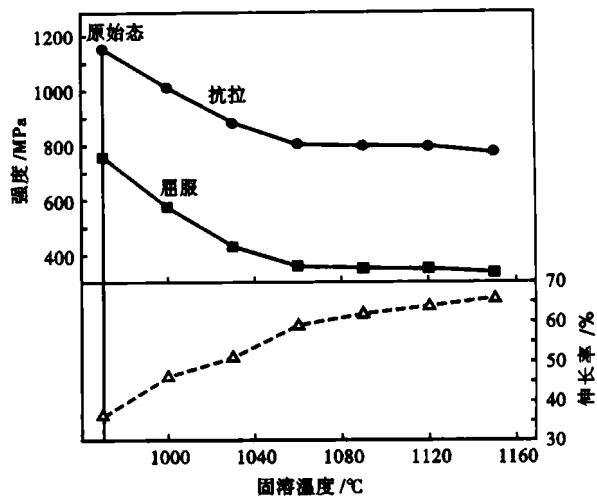


图 5 固溶处理温度对 GH4700 合金力学性能的影响
Fig. 5 Effect of solid-solution-treated temperature on mechanical properties of alloy GH4700

3 结论

(1) GH4700 合金经过固溶处理之后,随着温度的提高,γ'相逐渐溶入基体,其中晶界的γ'相先溶解。固溶温度到1 060 °C 时,γ'相基本完全溶解。

(2) 合金在1 000 ~ 1 060 °C 固溶处理,随着温度的提高,GH4700 合金晶粒明显长大,在1 090 ~ 1 150 °C 继续提高温度,晶粒长大趋势不明显。

(3) 固溶温度在1 000 ~ 1 060 °C 时,随着温度的升高,GH4700 合金的强度显著降低,塑性明显提高;在1 090 ~ 1 150 °C 继续提高温度,合金强度和塑性的变化趋势放缓。

国家重点基础研究发展计划(2012CB723905)

参考文献

- [1] Cowen C J, Danielson P E, Jablonski P D. The Microstructural Evolution of Inconel Alloy 740 during Solution Treatment, Aging, and Exposure at 760 °C [C]. Journal Materials Engineering and Performance, 2010.
- [2] 郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] 夏鹏成, 于金江, 孙晓峰, 等. 热处理对定向镍基高温合金 DZ951 γ'相的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 779-782.
- [4] 谢世殊, 潘险峰, 杨洪才, 等. γ'尺寸对 GH586 合金镍基合金疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 金属学报, 1999, 35(增刊 2): 466-469.
- [5] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [6] 丰 涵. 固溶处理对 Inconel 690 合金组织和力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(3): 46-50.

李 阳(1985-), 男, 硕士, 工程师, 钢铁研究总院毕业, 不锈钢及镍基高温合金材料研究。E-mail: Bury_heart@163.com

收稿日期: 2012-12-25