

固溶-时效处理对 GH2696 合金的组织及硬度的影响

侯少林 于腾 宋彬 齐超 王飞
(抚顺特殊钢股份有限公司技术中心,抚顺 113001)

摘要 研究了时效硬化型 GH2696 合金在不同热处理工艺下的微观组织演变及硬化行为。结果表明,随着固溶温度提高,GH2696 合金基体的过饱和度增加。经1 100 ℃ 2 h 固溶的 GH2696 合金 γ' 相在 780 ℃ 16 h 时效处理时析出,导致硬度显著提高。650 ℃ 16 h 低温时效处理起到补充时效硬化的作用,其 HBW 硬度值为 350。

关键词 GH2696 合金 组织 时效处理 硬度

Effect of Solution-Aging Treated Process on Microstructure and Hardness of GH2696 Alloy

Hou Shaolin, Yu Teng, Song Bin, Qi Chao and Wang Fei
(Technology Center, Fushun Special Steel Group Co Ltd, Fushun 113001)

Abstract The microstructure evolution and hardening behavior of GH2696 alloy with aging hardening by different heat treatment scheme are studied. The results show that the supersaturation of GH2696 alloy matrix increases with the increase of solid solution temperature. In 1 100 ℃ 2 h solution-treated GH2696 alloy the γ' phase precipitates adequately in 780 ℃ 16 h aging process, and the hardness increases significantly. The low temperature at 650 ℃ 16 h aging treatment plays the role of supplementary aging, it HBW hardness number is 350.

Material Index GH2696 Alloy, Structure, Aging Treatment, Hardness

GH2696 合金是以 Fe-Cr-Ni 为基体的典型变形时效高温合金^[1],适合于制造在 650 ℃ 以下长期工作的涡轮和压气机紧固件、盘件和工作叶片、涡轮壳体、环形零件(包括连接环),以及在 400 ~ 650 ℃ 工作的圆柱形螺旋弹簧等。合金的短时工作温度可达 750 ℃。该合金可生产供应各种形状的变形产品,如锻件、环件、棒材、板材、带材、丝材等。

GH2696 合金由 γ 基体、碳化物及 η 相等组成,含有 Al、Ti (Al + Ti < 4.0%) 元素,时效沉淀析出 γ' (Ni_3AlTi) 金属间化合物是其主要强化相^[2], Mo 元素有较强的固溶强化作用,间接促进 Ti 元素在时效过程中析出,增加 γ' 析出数量,进一步提高强度,微量 B 元素可以改善晶界析出相数量、形态和分布,多种强化机制相互协同作用保证该合金的综合性能。热处理工艺对该合金的微观组织及硬度有较大的影响,GH2696 合金热轧棒材常用两种技术标准的热处理制度及硬度值为,标准 I: (1 100 ± 10) ℃ 1 ~ 2 h 油冷, (780 ± 10) ℃ 16 h 炉冷至 (650 ± 10) ℃ 16 h 空冷, HBW 硬度值 285 ~ 341; 标准 II: 950 ~ 1 050 ℃ 1 ~ 2 h 油冷, 730 ~ 780 ℃ 16 h 炉冷或空冷至 600 ~ 650 ℃ 10 ~ 16 h 空冷, HBW 硬度值 302 ~ 363。本文研究了 GH2696 合金在不同热处理工艺下微观组织演化及硬化行为。

1 试样制备及试验方法

研究所用的 GH2696 合金采用“真空感应冶炼(6 t 炉) + 真空自耗重熔(直径 $\Phi 406$ mm)”工艺冶炼,其化学成分见表 1 所示。自耗锭经锻造开坯后,坯料再加热至 1 050 ℃ 轧成 $\Phi 22$ mm 棒材,终轧测温 960 ℃ 空冷至室温,在其轧材上切取 $\Phi 22$ mm × 20 mm 的金相试样和 $\Phi 22$ mm × 10 mm 硬度试样,试样

表 1 GH2696 合金的化学成分 / %

C	Cr	Mo	Ti	Al	Ni	Si	Mn	B
≤ 0.10	10 ~ 12.4	1.0 ~ 1.6	2.6 ~ 3.2	≤ 0.8	21 ~ 24.5	≤ 0.6	≤ 0.6	≤ 0.02

表 2 试验 GH2696 合金的热处理工艺及 HBW 硬度值
Table 2 Heat treatment schedule and HBW hardness value of tested GH2696 alloy

工艺代号	热处理工艺	HBW 硬度值
原始组织	热轧态	180
A	1 160 ℃ 2 h, 空冷	115
B	1 160 ℃ 2 h, 空冷, 1 100 ℃ 2 h, 油冷 + 780 ℃ 16 h 炉冷至 650 ℃ 16 h, 空冷	360
C	1 100 ℃ 2 h, 油冷	125
D	1 100 ℃ 2 h, 油冷 + 780 ℃ 16 h, 空冷	300
E	1 100 ℃ 2 h, 油冷 + 780 ℃ 16 h 炉冷至 650 ℃ 16 h, 空冷	350
F	1 000 ℃ 2 h, 油冷 + 780 ℃ 16 h 炉冷到 650 ℃ 16 h, 空冷	325

在标准 I 热处理制度的基础上增加 1 160 °C 2 h 固溶处理,时效温度均按标准上限;标准 II 固溶温度选择 1 000 °C,时效温度均按标准上限,选取的热处理工艺如表 2 所示。金相组织经热处理后用 2% 的硫酸铜腐蚀液腐蚀,采用 UH3001 型布氏硬度计标定不同热处理工艺下的布氏硬度,每个硬度取 6 个点,去除第一点其余 5 点取平均值,用 ZEISS EVO 18 型扫描电子显微镜和 Olympus Gx51 型光学显微镜观察不同热处理工艺下微观组织变化。

2 实验结果与分析

2.1 微观组织演变及硬化行为

由图 1、图 2 可知,不同热处理工艺对轧材微观组织及硬度有显著的影响,经 A 和 B 工艺热处理后,奥氏体基体晶粒粗大,平均晶粒尺寸分别为 165 μm 和 168 μm ,奥氏体 γ 基体上沉淀析出大量的碳化物及其他析出相(图 1a、b),硬度有较大差异,B 工艺处理后 HBW 硬度值高出 A 工艺 245,经 C、D、E 工艺热处理后,奥氏体基体晶粒较小,平均晶粒尺寸分别为 121、123、127 μm ,奥氏体 γ 基体上沉淀析出分布不均匀的碳化物及其他析出相(图 1c、d、e),HBW 硬度值呈逐步增长趋势,分别为 125、300、350,时效处理后对 GH2696 合金的硬度有显著的影响,经 F 工艺热处理后,奥氏体基体晶粒均匀细小,

平均晶粒尺寸只有 58 μm 。

2.2 SEM 组织形貌演化

图 3 为 GH2696 合金经 1 100 °C 2 h 固溶处理、1 100 °C 2 h 固溶 + 780 °C 时效处理、1 100 °C 2 h 固溶 + 780 °C 16 h 时效 + 650 °C 16 h 补充时效处理后的 SEM 的微观组织形貌(图 3a、b、c),由图 3 可知,显微组织中有 1 ~ 18 μm 块状的一次碳化物(TiC 或者 TiCN)分布在奥氏体基体上,固溶及时效处理均有未溶解的碳化物或者碳氮化物,780 °C 16 h 时效和 650 °C 16 h 时效处理后,析出的 γ' 相和 M_3B_2 型硼化物偏聚在晶界附近,由图 3(d)可见,晶界宽度增加,晶内及晶界附近的一次碳氮化物和各类析出相阻碍晶界的迁移及滑移,进而保证在高温服役环境下具有优异的综合性能^[3]。

2.3 分析与讨论

GH2696 合金轧态组织为:以 Fe-C-Ni 为基组成稳定的 γ 基体、一次 MC 碳化物、 M_3B_2 和 η 相等^[4],而 γ' (Ni_3AlTi) 强化相通过时效处理弥散分布在 γ 基体上,块状的一次碳化物 MC 碳化物 TiC 随机分布在晶内和晶界上,抑制随固溶温度的提高 γ 基体晶粒迅速粗化,Mo 元素有较强的固溶强化作用,进而导致晶格畸变能加剧,提高基体强度,在时效过程间接促进 Ti 元素以 γ' 形式弥散析出,使合金的综合

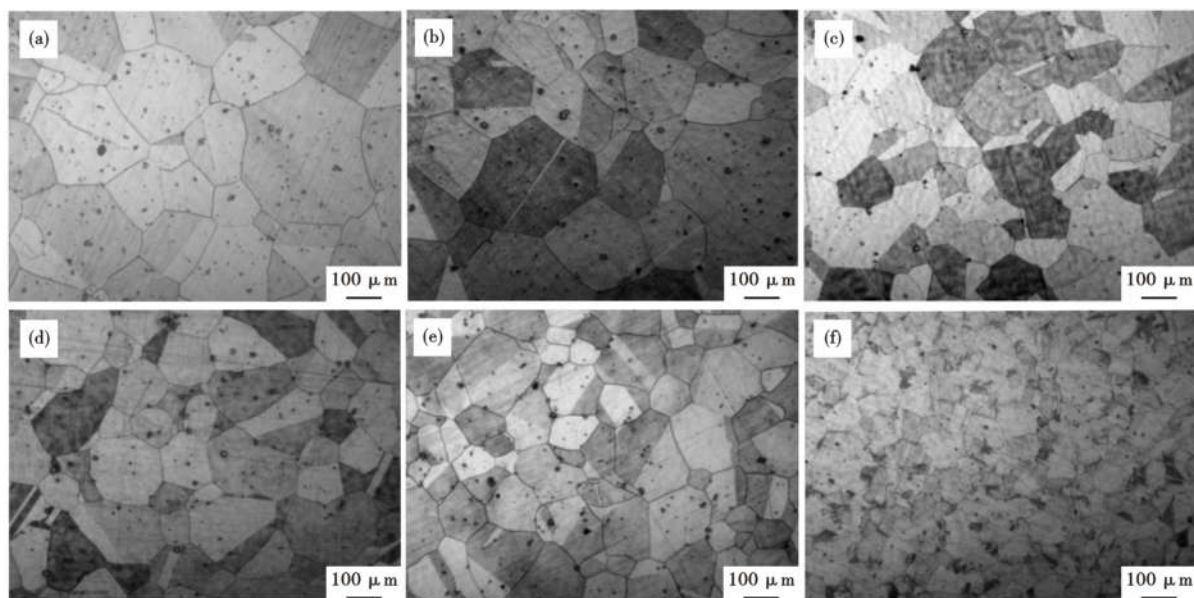


图 1 固溶-时效工艺 A:1 160 °C 2 h 空冷(a),B:1 160 °C 2 h 空冷,1 100 °C 2 h 油冷,780 °C 16 h 炉冷至 650 °C 16 h 空冷(b),C:1 100 °C 2 h 油冷(c),D:1 100 °C 2 h 油冷,780 °C 16 h 空冷(d),E:1 100 °C 2 h 油冷,780 °C 16 h 炉冷至 650 °C 16 h 空冷(e)和 F:1 000 °C 2 h 油冷,780 °C 16 h 炉冷至 650 °C 16 h 空冷(f)GH2696 合金的组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of GH2696 alloy by solution-ageing process A:1 160 °C 2 h air cooling (a),B:1 160 °C 2 h air cooling,1 100 °C 2 h oil cooling,780 °C 16 h furnace cooling to 650 °C 16 h air cooling (b),C:1 100 °C 2 h oil cooling (c),D:1 100 °C 2 h oil cooling,780 °C 16 h air cooling (d),E:1 100 °C 2 h oil cooling,780 °C 16 h furnace cooling to 650 °C 16 h air cooling (e), and F:1 000 °C 2 h oil cooling,780 °C 16 h furnace cooling to 650 °C 16 h air cooling (f)

性能得到进一步提高。

GH2696合金在生产应用中的标准热处理工艺是固溶+两次时效组成,试样经固溶处理,轧态的 γ' 相和一次碳化物重新回溶,HBW硬度值由轧制态的180减小到115和125,由图1(a,c)可见,随固溶温度提高基体过饱和度增加,一次碳化物溶解弱化对晶粒晶界的钉扎作用减弱,平均晶粒尺寸分别为168 μm 和123 μm ,A工艺HBW硬度值比C工艺硬度值小10,固溶处理后试样的硬度均有显著的降低,较热轧态HBW硬度值分别降低65和55见表1和图2(b)。1160 $^{\circ}\text{C}$ 2 h+标准热处理, γ 基体奥氏体晶粒粗化,使得单位面积内的晶界总长度减少,固溶强化作用相比1100 $^{\circ}\text{C}$ 稍弱,最终室温HBW硬度值分别为360和350,相比高出了10,由图2可见,780 $^{\circ}\text{C}$ 16 h时效使 γ' 大量析出,合金的硬度显著提高,HBW硬度值由固溶态的125提高到300^[5],较低温度650 $^{\circ}\text{C}$ 16 h等温长时间处理后,780 $^{\circ}\text{C}$ 16 h时效析出的 γ' 相得到均匀化,并且在 γ 基体原位再次析出更细小弥散的 γ' 相,大部分析出相偏聚在晶界附近,结合硼化物在晶界析出,增强了晶界强度,HBW硬度值又提高了50,由此可见,两步时效处理中780 $^{\circ}\text{C}$ 16 h时效是主要的时效强化阶段,650 $^{\circ}\text{C}$ 16 h低温时效起到补充时效的作用。

3 结论

(1)1100 $^{\circ}\text{C}$ +780 $^{\circ}\text{C}$ +650 $^{\circ}\text{C}$ 热处理工艺后, GH2696合金 γ 基体上弥散析出大量的 γ' 强化相,平均晶粒尺寸为127 μm ,HBW硬度值为350。

(2)随着固溶温度提高, GH2696合金基体的过饱和度增加, γ' 相在780 $^{\circ}\text{C}$ 时效处理时析出,导致硬度显著提高;650 $^{\circ}\text{C}$ 低温时效处理起到补充时效硬化的作用。

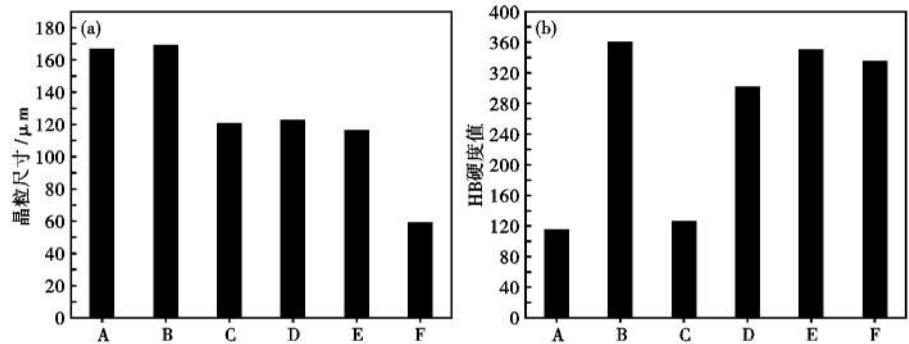


图2 热处理工艺对GH2696合金的晶粒度(a)和HBW硬度值(b)的影响

Fig. 2 Effect of heat treatment technology on grain size (a) and HBW hardness number of GH2696 alloy

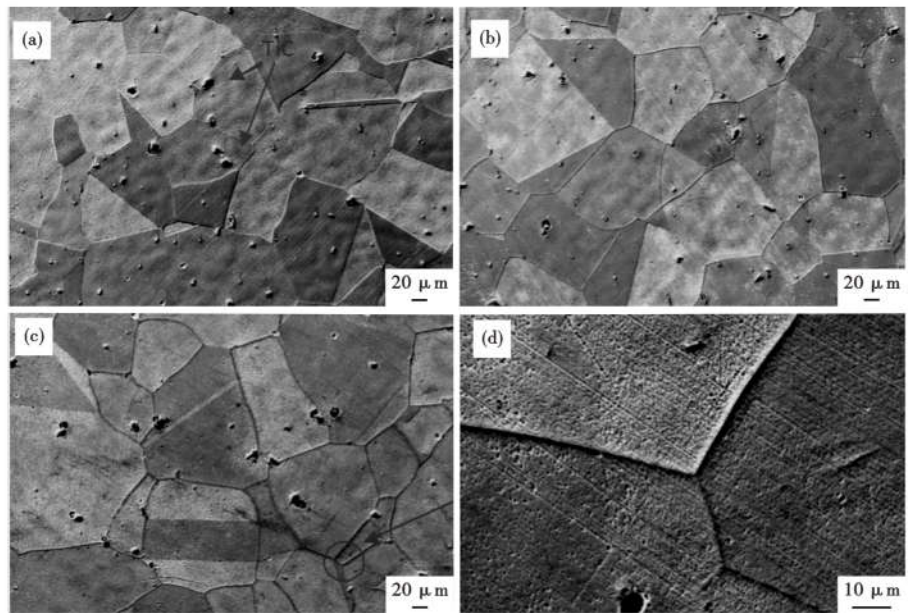


图3 固溶-时效工艺C:1100 $^{\circ}\text{C}$ 2 h油冷, D:1100 $^{\circ}\text{C}$ 2 h油冷,780 $^{\circ}\text{C}$ 16 h空冷 (b), E:1100 $^{\circ}\text{C}$ 2 h油冷,780 $^{\circ}\text{C}$ 16 h炉冷至650 $^{\circ}\text{C}$ 16 h,空冷(c)和(d)GH2696合金SEM组织形貌

Fig. 3 Morphology of structure of GH2696 alloy by solution-ageing process C:1100 $^{\circ}\text{C}$ 2 h oil cooling (a), D:1100 $^{\circ}\text{C}$ 2 h oil cooling,780 $^{\circ}\text{C}$ 16 h air cooling (b), and E:1100 $^{\circ}\text{C}$ 2 h oil cooling,780 $^{\circ}\text{C}$ 16 h furnace cooling to 650 $^{\circ}\text{C}$ 16 h air cooling (c) and (d), SEM

参考文献

- [1] 李殿魁,孙德生. GH696 铁基时效硬化型高温合金的研究[J]. 上海钢研,1999(2):3-10.
- [2] 上海第五钢铁厂. GH696 合金热处理制度研究[J]. 1988(4):15-21.
- [3] 黄乾尧,李汉康. 高温合金[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [4] 董晓峰,马凌霄. GH696 合金的热处理工艺[J]. 钢铁研究学报,2003(7):425-427.
- [5] 赵杰,王来,戚琳,等. GH696 合金弹簧组织和性能特性分析[J]. 机械工程材料.2004(11):49-51.

侯少林(1986-),男,硕士(2015年辽宁科技大学),工程师,2010年辽宁科技大学(本科)毕业,高温合金组织和性能研究. E-mail:512002423@qq.com.

收稿日期:2021-04-01