

热处理参数对 GH2150A 合金冲击韧性的影响

赵宇新^{1a}, 袁英², 缪宏博^{1b}

(1. 北京航空材料研究院 a 先进高温结构材料国防科技重点实验室; b 失效分析中心, 北京 100095; 2 钢铁研究总院 高温材料研究所, 北京 100081)

摘要: 研究 GH2150A 合金经前期热处理与中间热处理后合金组织变化对室温冲击性能的影响。利用光学金相和扫描电镜对合金组织和冲击断口进行观察。结果表明, 经过这种热处理可以显著提高合金的室温冲击韧性, 比经标准热处理的 A_{10} 提高 36%。主要原因是该处理改变合金中碳化物的析出数量、形态和分布, 减小 γ' 相的尺寸, 从而改变室温冲击的断裂机制。该处理可以使合金得到良好的综合性能。

关键词: GH2150A 合金; 热处理参数; 冲击韧性; 碳化物

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2008)02-0009-05

GH2150A 合金是近年来研制的一种时效强化 Fe-Ni 基高温合金, 以 γ' 相为主要强化相, 合金具有良好的综合力学性能, 主要用于制造在 600°C 下长期使用的航空发动机高压压气机叶片等零部件^[1]。由于压气机叶片在工作条件下受外界冲击, 因此要求叶片材料具有良好的冲击韧性。为了满足零件的使用要求, 提高零件的冲击韧性, 对叶片的热处理工艺参数进行研究。

合金锻件标准规定使用的热处理制度为: 1000~1130°C, 2~3h 油冷 + 780~830°C, 5h 空冷, + 650~730°C, 16h 空冷。合金经这样的热处理后具有较高的室温拉伸强度, 但室温冲击性能较低。在

热处理工艺研究中发现, 合适的前期热处理与中间热处理, 可以大幅度提高合金的室温冲击韧性, 而室温拉伸强度变化较小。本研究对经标准热处理和加前期热处理与中间热处理的合金组织和室温性能进行了分析, 可为零件制造中的热处理工艺参数的制定提供依据。

1 试验材料和试验方法

试验用料取自采用双真空熔炼的 GH2150A 合金锻制扁材, 扁材由 $\phi 28$ mm 轧制棒材经 1050°C 加热后拍扁, 变形量为 40%。合金的化学成分示于表 1。

表 1 化学成分 / w%

Table 1 Chemical composition of samples

| C | Ni | Cr | W | Mo | Al | Ti | Nb | Fe |
|------|------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0.05 | 45.0 | 14.80 | 2.8 | 4.5 | 1.2 | 2.1 | 1.1 | Bal |

试验采用的标准热处理制度 (RT) 为: 1080°C × 2h/快冷 + 780°C × 5h/AC + 650°C × 16h/AC; 采用的前期热处理再加中间热处理的制度 (HT) 为: 950°C × 30min/随炉升到 1080°C × 40min/AC + 1000°C × 40min/AC + 780°C × 5h/AC + 650°C × 16h/AC。

合金经不同热处理后, 测试样品的室温拉伸和室温 U 型缺口冲击性能。用光学显微镜和扫描电镜观察经不同热处理后合金的晶粒度、晶界析出相形态和 γ' 相的尺寸。用扫描电镜观察和分析试样室温冲击断口形貌。

2 试验结果

2.1 对室温性能的影响

经不同处理后合金的室温拉伸和室温冲击性能结果示于表 2。比较可见, 经 HT 处理后, 合金的抗

收稿日期: 2007-11-01; 修订日期: 2007-12-03

作者简介: 赵宇新 (1959—), 女, 研究员, (E-mail) zyx_bj592@sina.com。

表 2 合金的室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of GH 150A at room temperature

| Heat treatments | Tensile properties | | | | Impact toughness A_{ku} / J |
|-----------------|--------------------|----------------------|-----------------|-------------|----------------------------------|
| | σ_b / MPa | $\sigma_{0.2} / MPa$ | $\delta_5 / \%$ | $\phi / \%$ | |
| RT | 1260 | 767 | 27.7 | 41.5 | 73.6 |
| HT | 1240 | 737 | 29.0 | 42.1 | 100 |

拉强度比 RT 处理的降低 20MPa, 屈服强度降低 30MPa, 塑性指标变化不大, 但合金的室温冲击韧性比 RT 处理的提高 36%。

2.2 对晶粒度的影响

图 1 是经不同热处理后合金的晶粒组织。可以

看出不同处理后合金的晶粒度基本相同, 为 ASTM No. 4-5 级。由于合金的晶粒度主要取决于热处理中最高处理温度, 在这两种热处理制度中热处理的最高温度都是 1080°C, 因此 HT 处理没有对晶粒度产生影响。

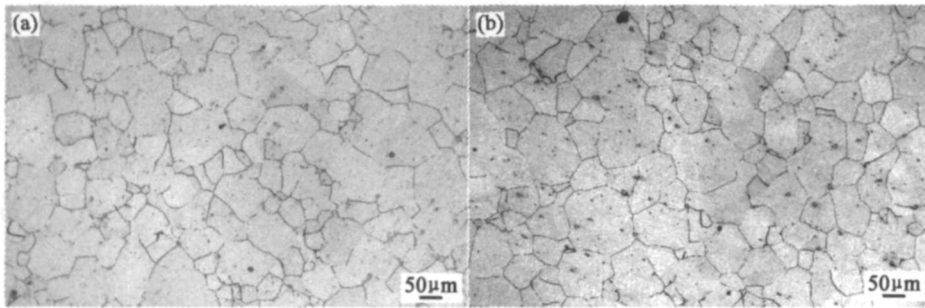


图 1 不同处理后的晶粒组织

Fig. 1 Grain size at different heat treatment

(a) RT; (b) HT

2.3 对碳化物的影响

采用扫描电镜观察发现, 经不同处理后的合金晶内和晶界析出碳化物的数量、形态和分布有所区别。从图 2 可以看出, 经 RT 处理后, 晶界上碳化物少部分是细小连续颗粒状析出, 大部分是薄膜状析出 (图 2a), 一些晶界没有碳化物析出。而经 HT 处理后, 晶界上碳化物有长大趋势, 颗粒状较多, 薄膜

状碳化物较少 (图 2b)。能谱分析表明, 晶界上颗粒状的碳化物 (图 2a 标 2 处) 主要是富含 Mo 和 W 的碳化物 (图 3a), 由于薄膜状的碳化物 (图 2a 标 1 处) 太薄, 能谱分析有些偏差, 但能够确定是富含 Cr 的碳化物 (图 3b); 晶内块状碳化物主要是 MC 型的 Ti(C, N)。可见 HT 处理增加了碳化物的析出数量并改善了晶界碳化物的析出状态。这种颗粒状分布

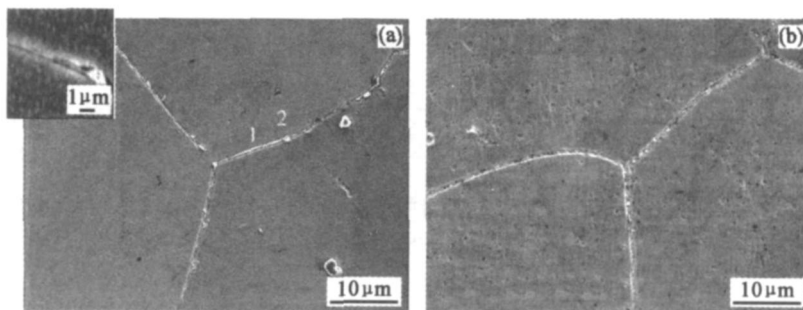


图 2 不同热处理后的显微组织

Fig. 2 SEM micrograph at different heat treatment

(a) RT; (b) HT

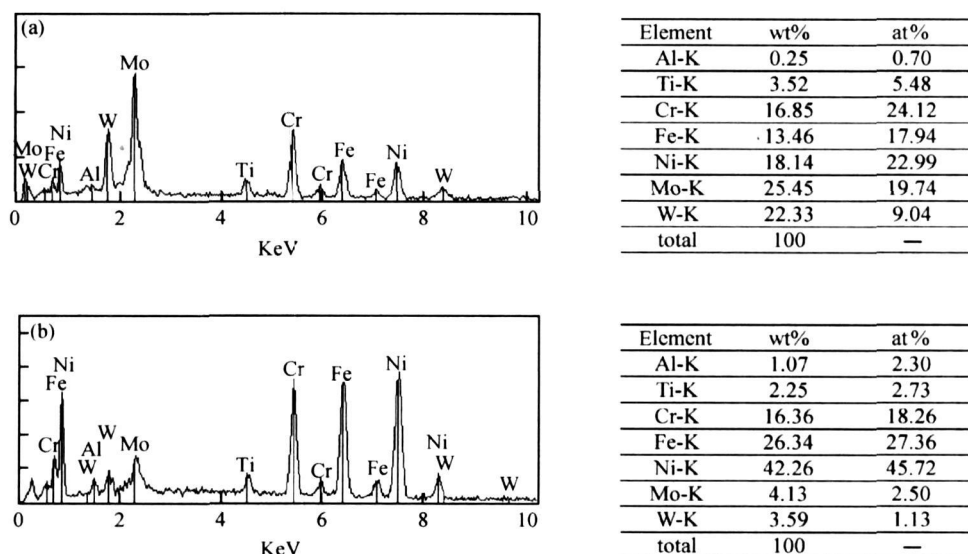


图 3 晶界析出相能谱分析

(a) 颗粒状析出物; (b) 薄膜状析出物

Fig 3 EDS analysis of grain boundary precipitates

(a) granular (b) films

的晶界碳化物,有利于提高合金的塑性。

2.4 对 γ' 相的影响

图 4 是不同处理后的 γ' 相形貌。不同处理后的合金中 γ' 相呈球状,且弥散分布。比较两种处理状态的 γ' 相尺寸可以看出,经 RT 处理后的 γ' 相尺寸比较均匀;而经 HT 处理的 γ' 相的大小不均匀,大 γ' 的尺寸与 RT 处理的基本相同,还存在小尺寸 γ' 相。

2.5 冲击断口形貌

采用 SEM 观察经不同处理合金的室温冲击断口。从图中可以看出,在 RT 处理后,断口裂纹源区主要是沿晶刻面和少数韧窝混合形貌,存在沿晶孔洞和裂纹(图 5a);放射区明显可见二次延晶裂纹(图 5c);在 HT 处理后,裂纹源区主要是韧窝和少

数沿晶刻面混合形貌,孔洞多发在晶内碳化物周围(图 5b)。断口放射区多见晶界孔洞,明显看到以大碳化物为中心的深度韧窝(图 5d)。

2.6 讨论与分析

GH2150A 合金是 Fe-Ni 基高温合金,含有大量的 Cr, W 和 Mo 等元素,在标准热处理后合金中存在 MC, $M_{23}C_6$ 和 M_6C 和 γ' 相。不同热处理制度会对这些相的析出数量、形态和分布产生影响,导致合金的性能产生变化。

合适的前期热处理与中间热处理可使合金得到两种尺寸的 γ' 相,这是因为 HT 处理经过两次高温阶段的处理,在冷却过程中都会有 γ' 相析出,在随后的时效过程中 γ' 相分别长大成不同的尺寸。同时在 HT 中碳化物数量的增加也消耗一定的形成 γ'

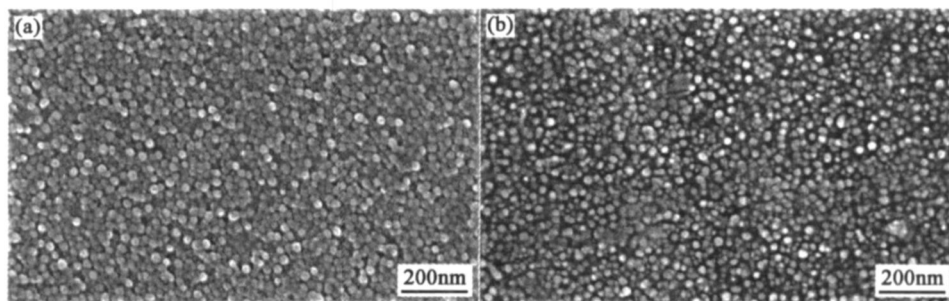


图 4 不同热处理后的 γ' 相的形貌

Fig 4 Morphology of γ' phase of different heat treatment

(a) RT; (b) HT

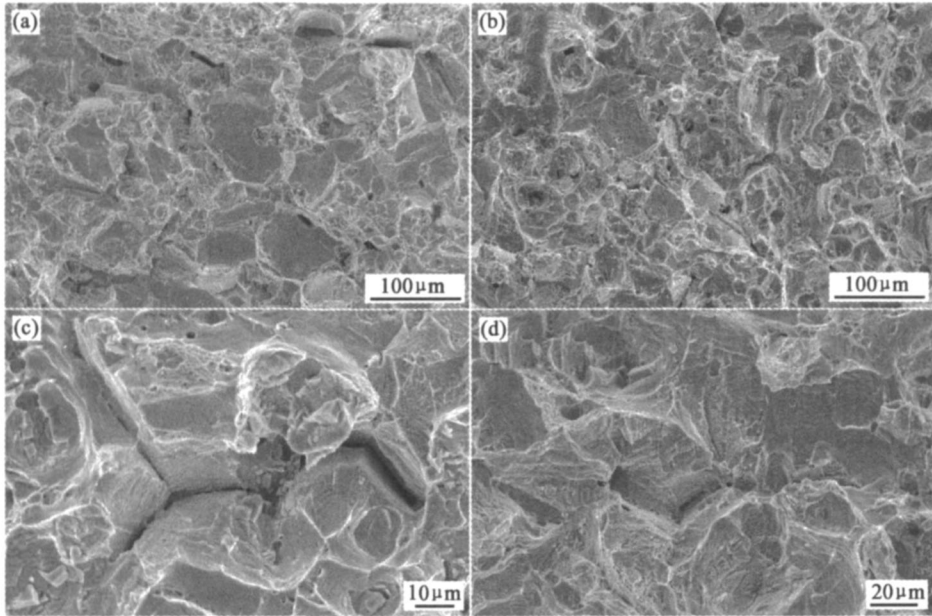


图 5 室温冲击断口形貌

Fig 5 Impact fracture surface at room temperature

(a) RT; (b) HT

相的元素,影响到 γ' 相尺寸和数量。而经 TR 处理只经过一次高温阶段处理,因此 γ' 相比较均匀一致。对于 GH2150A 合金,合金强度随 γ' 相数量的增加而提高, γ' 相数量的增加和尺寸变小可大大提高合金的晶内强化效果^[2]。经过 HT 处理,虽然对 γ' 相的析出数量影响不大,但使合金中的 γ' 相出现两种尺寸,使 γ' 相有一合理的分布,出现尺寸搭配效应^[3],进一步提高合金塑性。

合金室温冲击韧性的差别主要是合金的碳化物析出形态发生变化,从而导致断裂机制不同。冲击断口观察表明,经 RT 处理后,合金主要为沿晶断裂,分析认为,与晶界上存在较多的薄膜状碳化物有关^[4]。晶界上薄膜状碳化物降低晶界的结合力,在受力情况下晶界易萌生裂纹,并由于晶界结合力的降低,裂纹往往沿晶界扩展,从而发生沿晶断裂。而经 HT 处理的断裂主要是穿晶断裂,部分发生在晶界,这是因为在受力条件下,晶界区可以通过颗粒状碳化物阻止裂纹扩展,细小颗粒间也可以相对滑移而松弛应力集中,提高合金的冲击韧性^[5]。另一方面,由于 HT 处理在晶内有更多的碳化物析出,在冲击断口中成为韧窝的源心^[5],减少沿晶断裂,也提高合金的冲击性能。由于合适的前期热处理与中间

热处理改善了晶界碳化物的析出形态,使晶界和晶内具有良好的强度匹配,因此,提高了合金的室温冲击韧性。

3 结 论

(1)合适的前期热处理与中间热处理可以显著提高 GH2150A 合金的室温冲击韧性。

(2)该热处理通过改善晶界碳化物的析出状态,使 γ' 相出现尺寸搭配效应,成为提高室温冲击韧性的主要原因。

参考文献:

- [1] 梁学锋, 缪宏博, 谢永军. GH2150 合金叶片的疲劳性能 [J]. 钢铁研究学报, 2003 15(7): 150-153.
- [2] 赵宇新, 黄福祥. GH150 合金的热处理和性能 [J]. 北京科技大学学报, 1991, 13: 387-391.
- [3] 冶军. 美国镍基高温合金 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [4] 李玉清, 刘锦盐. 高温合金晶界间隙相 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [5] 王祯, 符仁钰, 朱雅年. 热加工参数对弹簧钢冲击韧性的影响 [J]. 上海金属, 2002 24(5): 11-13.

Effects of Heat Treatment on Impact Toughness of Alloy GH2150A

ZHAO Yu-xin^{1a}, YUAN Ying², MIAO Hong-bo^{1b}

(1a National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structure Materials, 1b Center of Failure Analysis, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2 High Temperature Materials Research Institute, CRI, Beijing 100081, China)

Abstract The effect of microstructure changes after pre-treatment and intermediate heat treatment on the impact properties of room temperature of GH2150A alloy was researched. Optical metallography and SEM were used to observe the microstructure and impact fracture of the alloy. The results showed that after the treatment, the impact toughness at room temperature was significantly improved. Compared with the standard heat treatment, A_k increased by 3%. The main reason for the improvement was that it changed precipitation volume, shape and distribution of the carbide and decreased the size of γ' , so it changed the fracture mechanism of impact at room temperature. The treatment could obtain good comprehensive properties.

Key words alloy GH2150A; heat treatment parameters; impact toughness; carbide