

固溶温度对改型 Inconel 718 合金组织和性能的影响

吴艳阳^{1,2} 程世长² 刘正东² 李 谦¹

(1 河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳 471003; 2 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要 用 X-射线衍射法(XRD)和扫描电镜(SEM)研究了 960~1 020 ℃固溶+720 ℃ 8 h 炉冷至 620 ℃ 8 h 空冷(二次时效)处理的改型 718 合金的力学性能和组织。结果表明,随固溶温度的提高,合金室温和 350 ℃强度降低,塑性和韧性显著提高。随固溶温度升高,合金中强化相 η 数量减少,1 000 ℃时完全消失;强化相 $\gamma' + \gamma''$ 随固溶温度升高而增加,达到 1 000 ℃时最多。固溶+二次时效后,大部分 γ' 尺寸为 10~18 nm。

关键词 改型 Inconel 718 合金 固溶温度 组织 性能

Effect of Solid Solution Temperature on Structure and Properties of Modified Inconel 718 Alloy

Wu Yanyang^{1,2}, Cheng Shichang², Liu Zhengdong² and Li Qian¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003; 2 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The structure and mechanical properties of 960~1 020 ℃ solid solution treated + 720 ℃ 8 h furnace cooling to 620 ℃ 8 h air cooling double aging modified 718 alloy have been studied by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). Results showed that with increasing solid solution temperature the ambient and 350 ℃ strength of alloy decreased, while plasticity and toughness increased; with increasing solid solution temperature, the amount of strengthening phase η in alloy decreased and disappeared at 1 000 ℃, and the amount of strengthening phases $\gamma' + \gamma''$ increased until 1 000 ℃ then decreased. After solid solution + double aging, the size of most of γ' was 10~18 nm.

Material Index Modified Inconel 718 Alloy, Solid Solution Temperature, Structure, Properties

Inconel 718 是以 FCC 奥氏体为基,以 γ'' -Ni₃Nb 为主要强化相,并辅以 γ' -Ni₃(Al, Ti, Nb) 沉淀强化的镍基高温合金。该合金在室温和 350 ℃具有较高的强度和韧性。为了进一步增强合金在室温和高温的强度,试验合金将 Ti 含量提高到 1.54%。本试验通过热处理制度的变化,研究不同固溶温度对改型 718 合金室温和高温力学性能的影响规律、微观组织影响机理。

1 试验材料与方法

试验用材料成分见表 1,采用 25 kg 真空感应炉

熔炼,锻成 Φ 15 mm 圆棒和 14 mm × 14 mm 方棒。采用 4 种热处理工艺(分级时效之间的降温速度都为 50 ℃/h):960,980,1 000,1 020 ℃固溶 1 h + 720 ℃保温 8 h,以 50 ℃/h 炉冷至 620 ℃保温 8 h,空冷(简称固溶+二次时效)。试样进行室温拉伸、350 ℃拉伸和室温冲击试验。

2 试验结果

由图 1(a)、(b)可见,随着固溶温度提高,二次时效后合金的室温和 350 ℃高温下的拉伸强度均降低,而合金的塑性随之增高。

表 1 试验用改型 Inconel 718 合金的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test modified Inconel 718 alloy /%

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Mo	Nb	V	Al	Ti	Zr	Ce	Mg	S	P
0.045	0.23	0.20	16.82	55.26	17.26	2.87	4.96	0.06	0.71	1.54	0.016	0.014	0.015	0.002	0.005

图 1(c)表明,合金随着固溶温度的提高,二次时效后合金的冲击功值随之升高,变化规律与韧性相同。

采用化学定量法及 XRD 衍射分析,确定合金中

析出相类型、相组分和相的粒度分布,分别见表 2、3。

不同固溶温度+二次时效的改型 Inconel 718 合金组织示于图 2(a)、(b)、(c)、(d)。

图 2 表明 960 ℃+二次时效后 η 相呈长棒状和

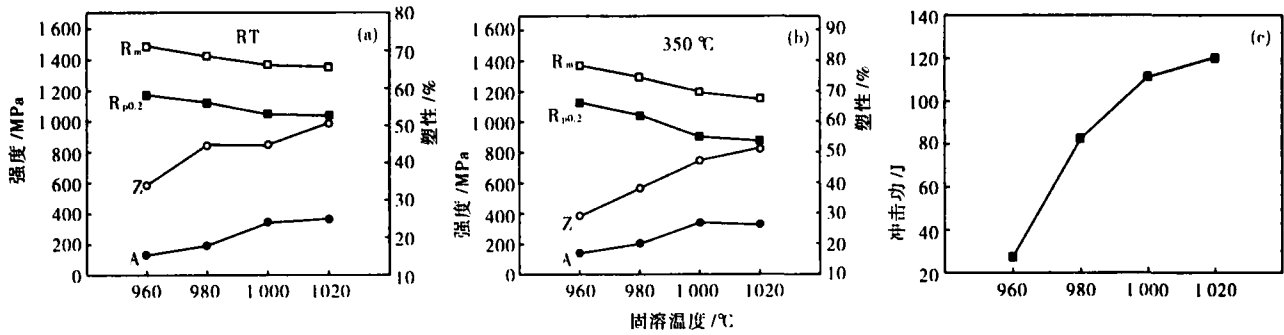


图 1 固溶温度对二次时效后合金室温 (a)、350 °C (b) 拉伸和室温冲击 (c) 性能的影响

Fig. 1 Effect of solid solution temperature on tensile properties at ambient (a) and 350 °C (b) and toughness at ambient (c) of double aging modified Inconel 718 alloy

表 2 改型 Inconel 718 合金相分析结果 / %

Table 2 Analysis results of phases in modified Inconel 718 alloy / %

热处理制度 / °C	析出类型	η	$\gamma' + \gamma''$	Nb (C, N)	析出总量
960/720/620	$\gamma' + \gamma'' + \eta + \text{Nb(C, N)}$	15.882	2.344	0.382	18.608
980/720/620	$\gamma' + \gamma'' + \eta + \text{Nb(C, N)}$	4.945	15.511	0.378	20.834
1000/720/620	$\gamma'' + \gamma' + \text{Nb(C, N)}$		20.672	0.380	21.052
1020/720/620	$\gamma' + \gamma'' + \text{Nb(C, N)}$		19.001	0.369	19.370

片层状分布在晶内和晶界。980 °C + 二次时效后, η 相发生变化呈短棒状和颗粒状分布在晶内, 析出量明显减少。1000 °C 和 1020 °C + 二次时效后, η 相消失, 有大小不等的 Nb (C, N) 和 $\gamma' + \gamma''$ 相弥散分布。

表 3 改型 Inconel 718 合金不同固溶温度 + 二次时效后 γ' 、 γ'' 析出相晶粒尺寸和数量

Table 3 Size and amount of $\gamma' + \gamma''$ precipitates in modified Inconel 718 alloy at different solid solution temperature + double aging

热处理制度 / °C	晶粒尺寸 / nm	数量 / %
960/720/620	5 ~ 10	9.5
	10 ~ 18	90.4
	18 ~ 36	
980/720/620	1 ~ 5	0.2
	5 ~ 10	2.5
	10 ~ 18	95.6
1000/720/620	18 ~ 36	1.8
	1 ~ 5	0.6
	5 ~ 10	3.9
1020/720/620	10 ~ 18	93.8
	18 ~ 36	1.6
	1 ~ 5	0.3
1020/720/620	5 ~ 10	12.5
	10 ~ 18	85.0
	18 ~ 36	2.1

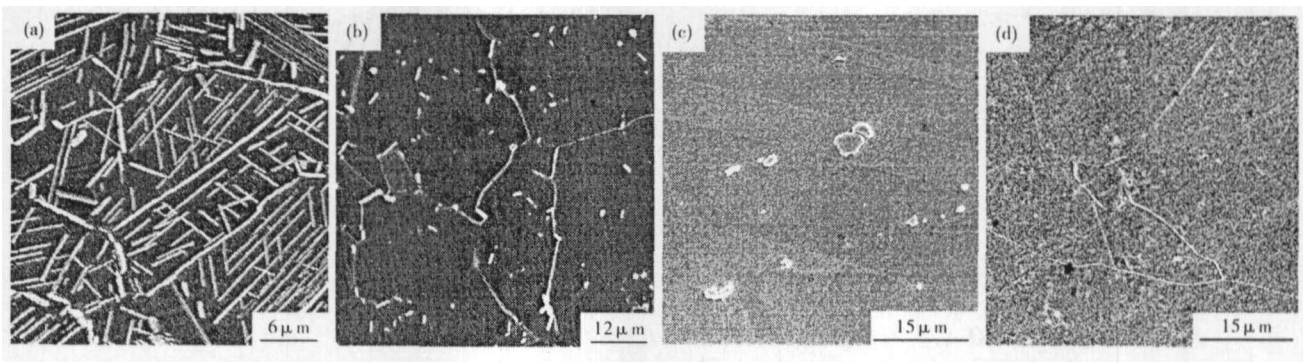


图 2 改型 Inconel 718 合金二次时效组织, SEM, 固溶处理: (a) 960 °C 1 h; (b) 980 °C 1 h; (c) 1000 °C 1 h; (d) 1020 °C 1 h

3 讨论

3.1 固溶温度对析出相的影响

表 2 相分析结果表明, Nb (C, N) 含量较少, 随着固溶温度提高, 数量基本不变。合金在 960 ~ 980

°C 固溶 + 二次时效后, 随着固溶温度的提高, η 相逐渐溶解, 数量减少。

η 相结构为 Ni_3Ti , η 相的溶解使基体 Ni、Ti 含量增多, 有利于 $\gamma' + \gamma''$ 相析出, 合金随着固溶温度提

高, $\gamma' + \gamma''$ 析出量增大。合金经1 000 °C + 二次时效后, η 相已完全溶解, 在时效过程不再析出, 此时 $\gamma' + \gamma''$ 析出量最多。固溶温度提高到1 020 °C, 进行二次时效, $\gamma' + \gamma''$ 析出量变小。在960 ~ 1 020 °C温区固溶, 随着固溶温度升高, 析出相种类变化, 即960 ~ 980 °C固溶 + 二次时效后存在 η 相, 而1 000 ~ 1 020 °C固溶 + 二次时效后仅为 $\gamma' + \gamma''$ 相。

图2表明, Inconel 718合金960 °C固溶 + 二次时效后 η 相比980 °C固溶 + 二次时效后的 η 相显著增大。980 °C固溶 + 二次时效后 η 相呈较为弥散的短棒状析出。合金经过1 000 °C和1 020 °C固溶 + 二次时效后, 合金中只含 $\gamma' + \gamma'' + \text{Nb}(\text{C}, \text{N})$, 且 $\text{Nb}(\text{C}, \text{N})$ 含量较少, 数量基本不变。合金经1 000 °C固溶 + 二次时效后, $\gamma' + \gamma''$ 相晶粒尺寸在10 ~ 18 nm之间的质量分数占93.8%。合金经1 020 °C固溶 + 二次时效后, $\gamma' + \gamma''$ 相晶粒尺寸在10 ~ 18 nm之间的质量分数降低到85%。

文献[1]表明, γ' 相质点尺寸在10 ~ 100 nm之间强化效果好。而合金经1 000 ~ 1 020 °C固溶 + 二次时效后, $\gamma' + \gamma''$ 相尺寸在18 ~ 36 nm之间的质量分数相当。所以合金经1 000 °C固溶 + 二次时效后的强度大于合金经1 020 °C固溶 + 二次时效后的强度。

3.2 固溶温度对强度、塑性、韧性的影响

合金在960 ~ 1 020 °C + 二次时效后, 随着固溶温度的提高, 合金的强度降低, 而塑性和韧性均升高; 在1 000 ~ 1 020 °C固溶 + 二次时效后, 合金的强度降低较少, 而塑性和韧性升高的也较少。

表2、表3相分析结果表明, 合金960 °C固溶 + 二次时效后, 其主要析出相为 $\eta + \gamma' + \gamma''$ 和少量的 $\text{Nb}(\text{C}, \text{N})$ 。此时 η 相含量为15.882%, $\gamma' + \gamma''$ 析出相仅占2.344%, 说明此时 η 相为主要强化相。

合金经980 °C固溶 + 二次时效后, η 析出相含量变为4.945%, $\gamma' + \gamma''$ 析出相增加到15.511%, 此时 $\gamma' + \gamma''$ 析出相为主要强化相, 但合金强度降低。而 $\gamma' + \gamma'' + \eta$ 相总量比960 °C固溶 + 二次时效后 $\gamma' + \gamma'' + \eta$ 相总量增加, 说明 η 相强化效果高于 $\gamma' + \gamma''$ 析出相; 但由于 η 相在合金内呈片层状分布, 强化的同时, 降低了合金的塑性和韧性, 而 $\gamma' + \gamma''$ 析出相在合金内呈弥散状分布, 有利于合金的塑性和韧性。所以, Inconel 718合金经980 °C固溶 + 二次时效后的塑性和韧性高于该合金经960 °C固溶 + 二次时效后的塑性和韧性。

当合金在1 000 °C固溶 + 二次时效后, η 相完全

溶解, $\gamma' + \gamma''$ 析出相含量增大到20.672%, 且此时析出相总含量大于合金经980 °C固溶 + 二次时效后的析出相总含量, 但合金的塑性和韧性升高而强度却下降。这进一步说明 η 相强化效果高于 $\gamma' + \gamma''$ 析出相, 而呈弥散状分布的 $\gamma' + \gamma''$ 析出相比片状分布的 η 相对合金的塑性和韧性影响较小。

1 020 °C固溶 + 二次时效后, 合金中 $\gamma' + \gamma''$ 析出相减少到19.001%; 此时强度继续下降, 塑性和韧性继续升高。图1表明, 合金经1 000 ~ 1 020 °C固溶 + 二次时效后, 强度和塑性、韧性变化较小, 这是由于合金经1 000 °C、1 020 °C固溶 + 二次时效后, 合金内不含 η 析出相, 随着固溶温度升高, 只有 $\gamma' + \gamma''$ 析出相数量的变化, 因此, 此时合金的强度下降和塑性、韧性上升的趋势不如在960 ~ 1 000 °C固溶 + 二次时效后的趋势明显。

4 结论

(1) 随着固溶 + 二次时效中固溶温度提高, Inconel 718合金的室温和350 °C高温强度均降低, 而塑性和韧性均升高。

(2) 随着固溶 + 二次时效中固溶温度提高, η 相数量相应的减少, 到1 000 °C完全溶解。 $\gamma' + \gamma''$ 析出相数量随着固溶温度升高先增多, 温度达到1 000 °C时析出量最多, 固溶温度升到1 020 °C后, 析出量又减少。

(3) 合金在960 ~ 980 °C范围内进行固溶 + 二次时效工艺, 主要强化相为 $\eta + \gamma' + \gamma''$ 相。 Inconel 718合金在1 000 ~ 1 020 °C温度范围内进行固溶 + 二次时效工艺, 主要强化相为 $\gamma' + \gamma''$ 相。

(4) 改型 Inconel 718合金在980 ~ 1 020 °C固溶 + 二次时效后, 大部分 γ' 相的尺寸在10 ~ 18 nm之间, 强化效果好。

(5) 改型 Inconel 718合金在960 ~ 980 °C温度范围内进行固溶 + 二次时效工艺, η 相对强度的强化效果高于 $\gamma' + \gamma''$ 强化效果。

参考文献

- 1 Stoloff N S. The Superalloys, New York: John Wiley & Sons, 1972: 79

吴艳阳(1982-), 男, 硕士, 2004年河南科技大学毕业, 从事高温金属材料研究。

收稿日期: 2006-11-13