

钛含量对 Inconel 690 镍基合金力学性能的影响

丑英玉^{1,2} 程世长² 刘正东² 廖丕博¹ 张钱珍^{1,2}

(1 昆明理工大学机电工程学院,昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所,北京 100081)

摘要 研究了Ti含量(0.35%~1.10%)对Inconel 690镍基合金(%:0.034~0.036C, 29.40~29.68Cr, 9.11~9.22Fe, 0.34~0.36Al, 0.0044~0.0045N)950~1100℃水冷+715℃15~100h空冷后的室温和350℃的组织 and 力学性能。结果表明,含1.10%Ti合金的强度(R_m 和 $R_{p0.2}$)较含0.35%~0.70%Ti合金的强度高200~400MPa,强度提高的主要原因为715℃时效后1.10%Ti合金析出3.70%~3.99% γ' 强化相,而0.35%~0.70%Ti合金715℃时效后 γ' 强化相析出量仅为0~0.53%。

关键词 Inconel 690 镍基合金 钛含量 力学性能

Effect of Titanium Content on Mechanical Properties of Nickel Base Alloy Inconel 690

Chou Yingyu^{1,2}, Cheng Shichang², Liu Zhengdong², Liao Pibo¹ and Zhang Qianzhen^{1,2}

(1 Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing100081)

Abstract Effect of Ti content (0.35%~1.10%) on structure and mechanical properties at ambient and 350℃ for nickel base alloy Inconel 690 (%: 0.034~0.036C, 29.40~29.68Cr, 9.11~9.22Fe, 0.34~0.36Al, 0.0044~0.0045N) solid solution treated at 950~1100℃, water quenched and aged at 715℃ for 15~100h, air cooled has been studied. Results showed that the strength (R_m and $R_{p0.2}$) of 1.10% Ti alloy was by 200~400 MPa higher than that of 0.35%~0.70% Ti alloy, the main reason of increasing strength was 3.70%~3.99% γ' strengthening phase precipitated in 1.10% Ti alloy after aging at 715℃, while only 0~0.53% γ' strengthening phase precipitated in 0.35%~0.70% Ti alloy after aging at 715℃.

Material Index Nickel Base Alloy Inconel 690, Titanium Content, Mechanical Properties

Inconel 690合金是理想的核电蒸发器传热管材料,在国内外得到广泛使用。研究表明^[1-3],Inconel 690合金具有良好的耐蚀性能。本文研究了Ti含量对合金力学性能的影响及其机理,以便为不同强度需求提供试验基础。

1 试验材料

试验合金采用25kg真空感应炉冶炼,合金成分列于表1。铸锭经1160℃锻造开坯,终锻温度 \geq 1000℃,锻成 Φ 14mm的圆棒。使用日立S-4300扫描显微镜观察合金显微组织,按GB/T228-2002测量室温力学性能,按GB/T4338-2006测量高温力学性能。

2 试验结果

2.1 试验合金的室温和高温力学性能

图1(a,b)表明,1#合金(0.35%Ti)和2#合金(0.70%Ti)在950~1075℃固溶15min水冷(WQ)+715℃15h空冷(AC)后,

室温抗拉强度和屈服强度水平相当,曲线平稳,在1075~1100℃固溶15min WQ+715℃15h AC后,室温强度都明显下降。而3#合金(1.10%Ti)的室温抗拉强度比1#和2#合金高300~400MPa,比较平稳,室温屈服强度同样高300~400MPa,在 \geq 1020℃固溶温度后,室温屈服强度明显下降。

图1(c,d)表明,随着Ti含量的提高,合金的350℃拉伸强度均有不同程度的提高。2#合金比1#合金屈服强度提高20~40MPa,3#合金屈服强度比1#合金提高约200MPa。

2.2 合金在715℃长时间时效后的室温和高温力学性能

由图2(a,b)表明,3炉合金时效25h后,室温

表1 试验用Inconel 690镍基合金的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of test nickel base alloy Inconel 690 / %

炉号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Al	Ti	N
1#	0.034	0.10	0.36	\leq 0.005	0.002	29.57	9.16	0.34	0.35	0.0045
2#	0.036	0.13	0.38	\leq 0.005	0.003	29.40	9.11	0.36	0.70	0.0044
3#	0.036	0.12	0.38	\leq 0.005	0.003	29.68	9.22	0.36	1.10	0.0044

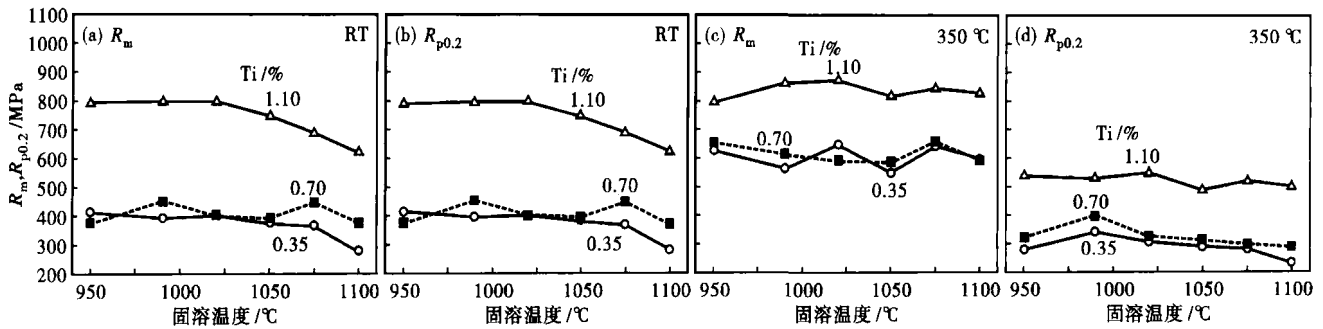


图 1 Ti 含量和固溶温度对 Inconel 690 镍基合金室温(a,b)和 350 °C (c,d) 抗拉强度(a,c)和屈服强度(b,d)的影响,715 °C 15 h 空冷时效

Fig.1 Effect of Ti content and solid solution treated temperature on U. T. S. (a, c) and Y. S. (b, d) of nickel base alloy Inconel 690 at ambient (a, b) and 350 °C (c, d), aged at 715 °C for 15 h, AC

抗拉和屈服强度趋于稳定,1#合金略有增加;在时效 25 h 以前,合金强度有所波动,基本上先增加后降低,100 h 比 50 h 时效屈服强度要略高一些。

由图 2(c,d)表明,3 炉合金的 350 °C 拉伸强度呈现出与室温强度相同的趋势。

2.3 合金 715 °C 长时间时效后 Cr₂₃C₆ 和 γ' 相的形态及金相定量分析

图 3(a,b,c)表明,715 °C 时效合金中的 Cr₂₃C₆ 平均尺寸都随合金中 Ti 含量的增加而减小。

由表 2 可见,当 Ti 含量由 0.70% 增至 1.10%

时,钢中 γ' 相析出量由 0.53% 增至 3.99%。

3 讨论

3.1 Ti 含量对合金力学性能的影响

由表 2 可知,1# 和 2# 合金仅仅析出 Cr₂₃C₆ 相,其质量分数分别为 0.339% 和 0.409%,这种析出量与 3# 合金中 Cr₂₃C₆ 析出量(0.379%)相当,由于 3.70% γ' 相的析出,使 3# 合金强度大幅度提高。

2# 合金强度略高于 1# 合金,表 2 可知,2# 合金中没有分析出 γ' 相。但 2# 合金中 Cr₂₃C₆ 相析出量比 1#

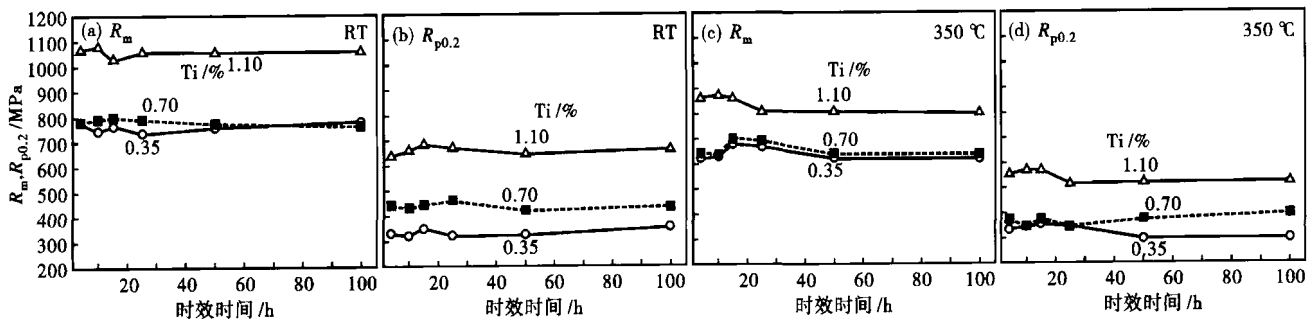


图 2 Ti 含量和 715 °C 时效时间对 Inconel 690 镍基合金室温(a,b)和 350 °C (c,d) 抗拉强度(a,c)和屈服强度(b,d)的影响,固溶:1 075 °C 15 min 水淬

Fig.2 Effect of Ti content and aging time at 715 °C on U. T. S (a, c) and Y. S. (b, d) of nickel base alloy Inconel 690 at ambient (a, b) and 350 °C (c, d), solid solution treated at 1 075 °C for 15 min, WQ

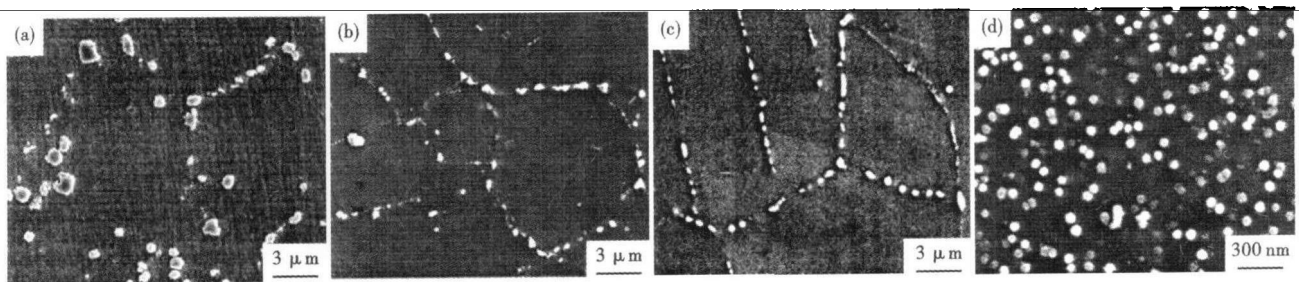


图 3 1 075 °C 15 min 水淬 + 715 °C 100 h 空冷处理后 Inconel 690 镍基合金中 Cr₂₃C₆ (a,b,c) (晶界处)和 γ' 析出相(d)的分布和形貌,(a)0.35% Ti;(b)0.70% Ti;(c)1.10% Ti;(d)1.10% Ti

Fig.3 Distribution and morphology of Cr₂₃C₆ (a- 0.35Ti, b- 0.70Ti, c- 1.10Ti) at grain boundary and γ' precipitated phase (d- 1.10Ti) in nickel base alloy Inconel 690, 1 075 °C, 15 min, WQ + 715 °C, 100 h, AC

表2 Ti含量对 Inconel 690 镍基合金1075 °C 15 min 水冷,715 °C时效后析出相的影响
Table 2 Effect of Ti content on precipitated phases in nickel base alloy Inconel 690 after solid solution treated at 1075 °C for 15 min, WQ and aged at 715 °C, AC

炉号 (Ti/%)	715 °C时效 时间/h	Cr ₂₃ C ₆ 析出量/%	Cr ₂₃ C ₆ 粒度分布/%			γ'相 析出量/%	γ'相粒度分布/%		
			10 ~ 36 nm	36 ~ 300 nm	300 ~ 620 nm		1 ~ 10 nm	10 ~ 18 nm	18 ~ 36 nm
1# (0.35)	15	0.339	8.8	57.3	33.9	-	-	-	-
	100	0.658	-	-	-	-	-	-	-
2# (0.70)	15	0.409	6.6	62.3	31.1	0	-	-	-
	100	0.627	-	-	-	0.53	-	-	-
3# (1.10)	15	0.379	7.7	62.3	30.0	3.70	13.1	69.8	10.4
	100	0.569	-	-	-	3.99	10.0	34.2	55.8

合金多0.070%,这个增量相当于1#合金中Cr₂₃C₆量的20.65%,从Cr₂₃C₆析出量的对比,2#合金的强度应当高于1#合金。

1#和2#合金的强度不仅取决于Cr₂₃C₆析出相的质量分数,而且受Cr₂₃C₆尺寸大小的影响,Cr₂₃C₆大部分分布在晶界上,2#合金的Cr₂₃C₆的尺寸相对细小、弥散。统计15个不同视场,1#合金中晶界上Cr₂₃C₆平均尺寸约550 nm,2#合金约390 nm,相差约160 nm。当析出相尺寸较大时,其强化主要为Orowan机制^[4]。因此,析出物尺寸越小,强化效果越大。据此分析,2#合金的强度应当高于1#合金。表2中在10~36 nm,1#合金质量分数为8.8%,2#合金质量分数为6.6%,实际上2#合金中的数量应当是 $6.6\% \times (0.409\% \div 0.339\%) = 7.963\%$,与1#合金差0.837%;在36~300 nm,1#合金质量分数为57.3%,2#合金为62.3%,实际上应为 $62.3\% \times (0.409\% \div 0.339\%) = 75.164\%$,比1#合金高17.864%;在300~620 nm,1#合金质量分数为33.9%,2#合金为31.1%,实际上应为 $31.1\% \times (0.409\% \div 0.339\%) = 37.522\%$,比1#合金高3.622%。从以上Cr₂₃C₆粒度分布三区间的分析对比表明,2#合金中Cr₂₃C₆的量高于1#合金。

3.2 Ti含量对高温长时间时效后合金力学性能影响

表2中列出了715 °C 100 h AC状态时3炉合金Cr₂₃C₆析出量,1#、2#、3#合金分别为0.658%、0.627%、0.569%。其次,对比γ'相的析出量,2#和3#合金的析出量分别为0.53%和3.99%,相差3.46%;2#合金中析出的γ'量占3#合金中γ'量的13.28%。

表2相分析对比表明:1#合金仅有Cr₂₃C₆析出相的强化。3#比2#合金Cr₂₃C₆析出量少0.058%,但是3#合金γ'相析出量增加3.46%,是2#合金的7.53倍。由于γ'相是Ni₃(Al,Ti)型金属间化合物,γ'相尺寸主要分布在10~36 nm属于纳米级强化,它的强化效果

比Cr₂₃C₆要高得多。因此,3#合金的屈服强度是1#和2#合金的1倍,3#与2#合金相比,Ti含量由0.70%增加到1.10%,虽然Ti含量仅增加0.40%,但屈服强度增加50%以上。2#合金R_{p0.2}高于1#合金也是由于2#合金中析出0.53%γ'相。

3.3 715 °C长时间时效对合金强度的影响

根据表2结果,1#合金100 h时效后Cr₂₃C₆析出量都大幅度增加,合金的强度应当随之提高,但在长时间时效后Cr₂₃C₆的尺寸增大,Cr₂₃C₆析出量增加的强化作用与Cr₂₃C₆尺寸长大的弱化作用基本相当,使强度曲线基本不变(图2c,d)。

对于2#和3#合金,在100 h长时间时效后γ'析出量增加(表2),但是图3(d)表现出在长时间时效后γ'相长大,会影响合金的强度下降,因此认为这两方面的因素导致长时间时效后合金的强度基本不变。

4 结论

(1)Ti含量影响合金的力学性能是明显的,随着Ti含量的增加,合金的强度提高。合金的强度提高,是由于随着Ti含量的增加合金析出γ'相的量随之增加的结果。

(2)随着Ti含量的增加,合金中Cr₂₃C₆的平均尺寸减小,Cr₂₃C₆的析出量比例相对减小。

(3)Inconel 690合金中Ti含量在0.35%~1.10%,合金在715 °C长时间时效后的力学性能是平稳的,组织是稳定的。

参考文献

- 1 Kai J J, Yu G P, Tsai C H, et al. The Effects of Heat Treatment on the Chromium Depletion, Precipitate Evolution, and Corrosion Resistance of INCONEL Alloy 690. Metallurgical Transactions A, vol. 20A, October 1989:2057
- 2 Crum J P, Donati J R. Materials Requirement for Pressurized Water Reactor Steam Generator Tubing. Nuclear Technology, 1981, 55(1):88
- 3 Yu G P, Yao H C. The Relation Between the Resistance of IGA and IGSCC and the Chromium Depletion of Alloy 690. Corrosion, 1990, 46(5):391
- 4 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相. 北京:冶金工业出版社, 2006

丑英玉(1983-),男,助理工程师,2004年沈阳理工大学毕业,Ni基高温合金研究。

收稿日期:2008-11-17