

ATI 718Plus 合金国内研究进展

王民庆^{1,2,3}, 邓 群^{1,3}, 杜金辉^{1,3}, 田志凌¹, 朱 静²

(1. 钢铁研究总院, 北京 100081)

(2. 清华大学, 北京 100084)

(3. 高温合金新材料北京市重点实验室, 北京 100081)

摘 要: ATI 718Plus (简称 718Plus) 合金作为一种新型镍基变形高温合金涡轮盘材料, 由于在 700 °C 以下具备优异的综合力学性能、良好的热加工和焊接等工艺性能以及适宜的成本, 而受到国内外的广泛关注。本文综述了近几年国内 718Plus 合金的研究进展, 主要包括: (1) 718Plus 合金相组成及合金特点; (2) P 对 718Plus 合金组织及性能的影响规律及机理; (3) Al 对 718Plus 合金组织及性能的影响规律及机理; (4) 析出相对 718Plus 合金性能的影响规律及机理。

关键词: 718Plus 合金; η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相; 铝; 磷; 三维原子探针 (3DAP)

中图分类号: TG146.1+5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)12-3335-06

718Plus 合金是 2005 年左右推出的一种新型 700 °C 用镍基变形高温合金涡轮盘材料, 该合金的成功研制有效填补了目前世界上两个最广泛应用高温合金——650 °C 用 IN718 (国内牌号 GH4169) 合金和 750 °C 用 Waspaloy (国内牌号 GH4738) 合金之间长期存在的空白。718Plus 合金是在 IN718 合金基础上, 将 Fe 由 18% 降为 10%, 加入 1%W 和 9%Co, 调整 Al+Ti 以及 Al/Ti, 并适当提高 Nb 含量而研制成功的。718Plus、IN718 以及 Waspaloy 3 种合金的化学成分的对比如表 1 所示。与 IN718 合金相比, 718Plus 合金主要强化相由 γ'' 相转变为 γ' 相, 650 °C 以上热稳定性显著增加, 因而合金使用温度得到显著提高; 与其他 γ' 相强化的合金如 Waspaloy 相比, 718Plus 合金中的 γ' 相析出速率明显减慢, 使其热加工性能和焊接性能得到显著改善。因此, 718Plus 合金兼具了 IN718 合金良好的综合力学性能、热加工和焊接性能以及 Waspaloy 合金使用温度高的综合优点, 而克服了两种合金存在的不足, 因此在 700 °C 长期使用具有独特优势, 因而被称为“下一代 IN718 合金”, 也被美国认为是未来几十年高性能航空发动机和燃气轮机颇具潜

力的应用材料。目前, 718Plus 合金已在 R.R、GE、P&W、SNECMA 等主要航空发动机公司以及 Solar Turbines、SIMENS 等燃气轮机公司得到推广和应用, 包括盘件、机匣、叶片、紧固件等关键零部件的制造。

基于 718Plus 合金良好的综合性能以及在未来航空发动机和燃气轮机等领域应用的重要潜力, 国内对该合金也进行了一些相关研究工作, 本文综述了国内近几年 718Plus 合金研究方面的主要进展。

1 718Plus 合金相组成及合金特点

718Plus 合金虽然是在 IN718 合金成分基础上发展起来的, 但 718Plus 合金与 IN718 合金相比, 具有完全不同的相组成。众所周知, IN718 合金是以 γ'' 相强化为主, 辅以 γ' 相强化, 晶界存在 δ 相。而 718Plus 合金则以 γ' 相强化, 晶界析出相最初也被认作 δ 相, 后经 Xie 等^[1]、Wang 等^[2]以及剑桥大学的 Pickering 等^[3]证实, 晶界相主要为具有 η -Ni₃Ti 结构的 Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} (或者称为 η -Ni₆AlNb) 相。718Plus 合金与 IN718 合金 2 种合金的组织对比如图 1 所示。

表 1 718Plus 与 IN718 和 Waspaloy 合金成分对比

Table 1 Composition comparison of alloy 718Plus, IN718 and Waspaloy ($\omega/\%$)

Alloy	C	Ni	Cr	Mo	W	Co	Fe	Nb	Ti	Al	P	B
IN718	0.025	B	18.10	2.80	-	-	18.00	5.40	1.00	0.45	0.007	0.004
718Plus	0.020	B	18.00	2.75	1.0	9.0	10.00	5.45	0.70	1.45	0.010	0.004
Waspaloy	0.035	B	19.40	4.25	-	13.25	-	-	3.00	1.30	0.006	0.006

收稿日期: 2015-12-15

作者简介: 王民庆, 男, 1982 年生, 博士, 高级工程师, 钢铁研究总院, 北京 100081, 电话: 010-62184622, E-mail: minqingw@yahoo.com

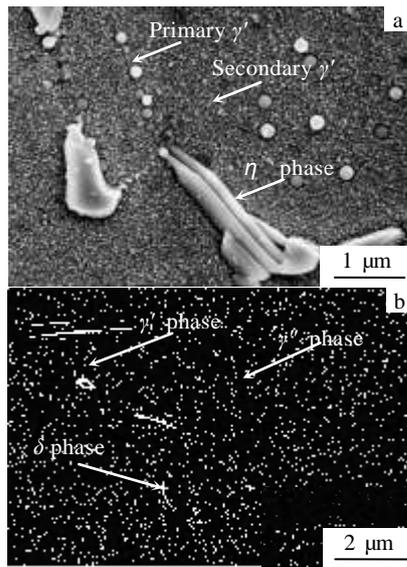


图 1 718Plus 和 IN718 合金经标准热处理后的组织

Fig.1 Microstructures of 718Plus (a) and IN718 (b) alloys after standard heat treatment^[12]

通过化学萃取以及 X 射线衍射等方法, Wang 等^[2]对 718Plus 合金中 γ' 相和 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5}的相组成做了进一步确定。结果证实, 标准热处理条件下 γ' 相的质量分数可占到 718Plus 合金的 22%~27%, η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5}可占到 1.5%~7.0%, 其质量分数会随着热处理制度和化学成分的变化有所不同。 γ' 相和 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5}相中均含有一定量的 Nb, 其原子分数分别达到 9%和 13%, 由于 Nb 在镍基基体中具有较低的扩散系数, 这被认为是 718Plus 合金中 γ' 相的析出速率慢于其他常见 γ' 相强化合金的重要原因。时效热处理之前, 718Plus 合金组织主要由碳化物、大尺寸一次 γ' 相和 η 相组成, 如图 2 所示。 η 相周围明显贫一次 γ' 相, 这有利于协调 718Plus 合金中 η 相附近的塑性变形。时效热处理后, 大量尺寸更小的二次 γ' 相析出。X 射线衍射结果证实, 一次 γ' 相的尺寸在 60 nm 以上, 二次 γ' 相的尺寸主要在 10~36 nm。并随着热处理制度的变化, η 相和 γ' 相数量会发生相互演变, 进而影响到力学性能的不断变化。

可见, 718Plus 合金与 IN718 合金相比虽然名字相似, 但 718Plus 合金的化学成分、基体强化相以及晶界析出相与 IN718 合金相比都发生了非常大的改变, 因此两种合金的相析出、溶解规律以及对性能的影响机理也有所不同。

2 P 对 718Plus 合金组织及性能的影响规律及机理

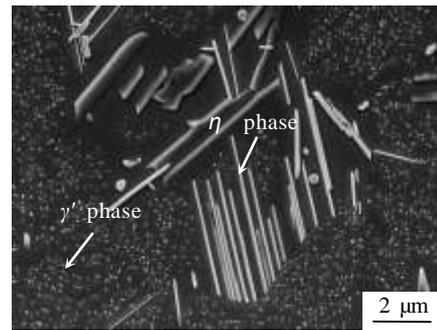


图 2 718Plus 合金固溶热处理后的组织

Fig.2 Microstructure of alloy 718Plus after solution heat treatment^[2]

自 1994 年 Cao 等^[4]发现 P 可以显著提高 IN718 合金的持久蠕变性能以来, 国内外做了大量的研究工作^[5], 并成为最近 20 年 IN718 合金的研究热点。大部分学者认为 P 对 IN718 合金的有益作用与 P 的晶界偏聚有关, 偏聚到晶界的 P 可以提高晶间结合力。于是部分学者开展了 P 在 IN718 合金中晶界偏聚浓度的测定工作^[6-11], 但由于试验本身的难度以及试验手段的限制, P 在晶界的定量分布尤其是其他位置如相界的定量分布一直缺少相应的试验结果, 而 P 在高温合金中定量分布的确定是准确理解 P 对高温合金作用机理的前提。基于 P 对 IN718 合金的有益作用, Wang 等^[12]对 P 在 718Plus 合金中的影响规律进行了研究, 为进一步揭示 P 对 718Plus 的影响机理, 采用 3DAP 技术首次在国际上完整绘制出了 P 在 718Plus 合金中的三维浓度分布图, 这为人们准确理解 P 对 718Plus 以及 IN718 等高温合金的作用机理提供了重要依据。

同 P 对 IN718 合金的影响规律类似, P 对 718Plus 合金的屈服强度影响不大 (如图 3 所示), 但 704 °C /690 MPa 持久性能随 P 含量增加显著上升, 当 P 的含量由 50 $\mu\text{g/g}$ 增加到 170 $\mu\text{g/g}$ 后, 合金的持久寿命可以提高约 2.5 倍, 如图 4 所示, 但持久塑性随 P 含量的进一步增加会有所降低^[12]。

为进一步揭示 P 对 718Plus 合金的作用机理, 利用 3DAP 技术完整测定出了 P 在 718Plus 合金中不同位置的三维浓度分布, 如图 5~7 所示, 图中的每一个点代表一个原子, 并按总的原子数量的一定比例显示。P 在合金中不同位置, 包括基体、 γ' 相、 η 相、晶界及 η/γ 相界的浓度汇总如表 2 所示。

当 P 的原子分数平均值为 2.2×10^{-4} (质量分数为 120 $\mu\text{g/g}$) 时, P 在 γ' 相和 γ 基体中的含量基本一致, 其浓度平均值测定分别约为 1.57×10^{-4} 和 1.30×10^{-4} (原子分数), 没有发现 P 在 γ'/γ 和 γ'/η 界面存在偏聚, 如图 5 所示。

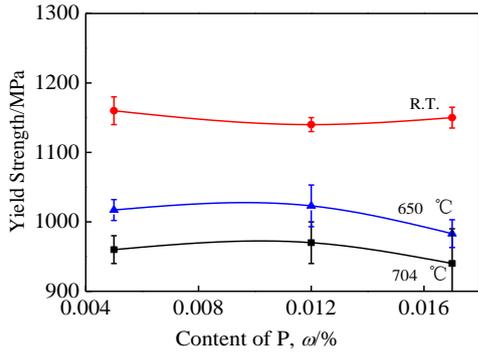


图 3 P 对 718Plus 合金屈服强度的影响

Fig.3 Yield strengths of 718Plus with different phosphorus concentrations^[12]

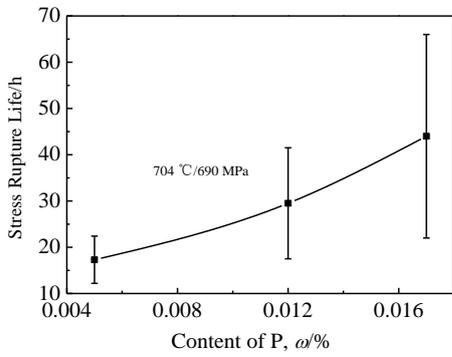


图 4 P 对 718Plus 合金持久寿命的影响

Fig.4 Stress rupture life of 718Plus with different phosphorus concentrations^[12]

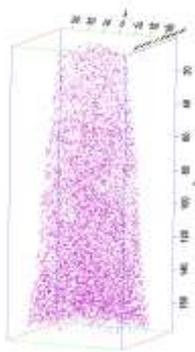


图 5 P 在基体和 γ'相中的分布

Fig. 5 Atom mappings of phosphorus in γ-matrix and γ'^[12]

但 P 在晶界存在明显偏聚，其晶界原子分数峰值高达 0.9%。该浓度约是 γ 基体中 P 浓度的 70 倍，约是合金中 P 平均浓度的 40 倍。通过对 3 个晶界上 6 个点的 P 的浓度进行统计测定，其平均原子分数约为

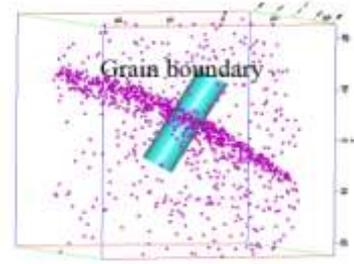


图 6 P 在晶界的原子分布

Fig.6 Atom mappings of phosphorus at grain boundary^[12]

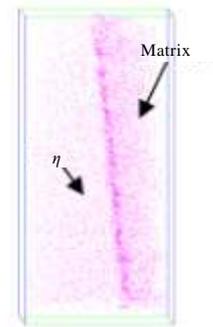


图 7 P 在 η 相和 η/γ 界面原子分布

Fig.7 Atom mappings of phosphorus at η and η/γ interface^[12]

1.1%。P 在晶界的偏聚宽度约为 7 nm，这与晶界宽度相当，如图 6 所示。除了晶界偏聚，P 在 η/γ 相界面也存在明显偏聚，P 在 η/γ 相界的偏聚浓度峰值可达 0.1 at%，但 P 在 η 相中严重贫化，其原子分数仅为 7×10^{-6} ，如图 7 所示。

Yamaguchi 等^[13]通过第一性原理计算证实，P 可以增加镍基高温合金的晶间结合力。所以 P 对 718Plus 合金的有益作用被认为主要跟 P 在晶界显著偏聚增加晶间结合力有关。由于 P 与其他原子在晶界存在位置竞争关系，所以 P 在晶界的大量存在也会阻碍环境氧沿晶界的扩散，从而减轻氧对合金尤其是晶界的有害作用；另外，由于 P 在 η 相中严重贫化，并在 η/γ 界面处显著偏聚，从而证实，P 对 η 相本身没有影响，但可以阻碍 η 相的进一步长大。因为 η 相长大时，需要将界面处的 P 扩散到很低浓度才能进行，并且 P 在晶界的大量偏聚也必然会阻碍贫 P 的 η 相在晶界形核以及影响 η 相的长大取向。相分析结果证实，随着 P 含量从 50 μg/g 增加到 170 μg/g，η 相的质量比从 1.5% 降到了 0.8% 左右，由于 η 相对 718Plus 合金的持久寿

命会产生显著影响, 所以由 P 含量导致的 η 相数量的变化必然会对合金的持久性能产生一定影响。所以, 适量 P 对 718Plus 合金的有益作用主要与 P 增加晶间结合力、阻碍环境氧沿晶界扩散以及 P 阻碍 η 相形核、长大有关。由于 718Plus 合金失效的主要原因在于 γ' 相粗化, 而 P 在 γ 基体和 γ' 相中均匀分布, γ'/γ 界面没有明显偏聚, 所以 P 对决定 718Plus 合金使用温度的 γ' 相的粗化没有太大影响。

另外, 由于 P 对 718Plus 等高温合金的作用主要来自于晶界和相界, 所以我们提出一种 P 的“有效浓度”概念。认为偏聚到晶界和相界 P 的“有效浓度”是影响合金性能变化的主要因素, 而 P 在晶界的“有效浓度”除了受到基体浓度影响外, 还受到热处理制度、 η 相含量以及晶粒度等因素的影响。所以, P 在 718Plus 合金或者 IN718 合金持久性能达到峰值的最佳浓度值不是固定的, 其峰值会随着热处理制度、晶

粒度、 η 相或者 δ 相含量的变化有所移动。

3 Al 对 718Plus 合金组织及性能的影响规律及机理

Al 是 718Plus 合金中需要精确控制的元素, Al 含量以及 Al+Ti、Al/Ti 的少量变化会对合金性能产生显著影响。研究者对不同 Al 含量条件下 718Plus 合金的力学性能、组织结构以及相组成规律进行了系统研究。Wang 等^[2]证实, Al 在 η 相和 γ' 相中的原子分数分别达到 7% 和 11.5%, 远高于其在 IN718 合金中 δ 相和 $\gamma''+\gamma'$ 相的原子分数 0.1% 和 5% 左右, 因此, Al 对 718 Plus 合金组织和性能的影响相对更加明显。当 Al 的质量分数由 1.36% 增加到 1.78% 时, 718Plus 合金 704℃ 的屈服强度可以上升 150 MPa, 而拉伸塑性会有所降低, 如图 8 所示。而相对应的标准热处理下 10~36 nm 尺

表 2 P 在 718Plus 合金中的定量分布

Table 2 Distribution of phosphorus in alloy 718Plus (at%)^[12]

Element	Average	Matrix	γ' phase	η phase	Grain boundary	η/γ interface
Phosphorus	2.2×10^{-2}	1.3×10^{-2}	1.57×10^{-2}	7×10^{-4}	1.1	0.1

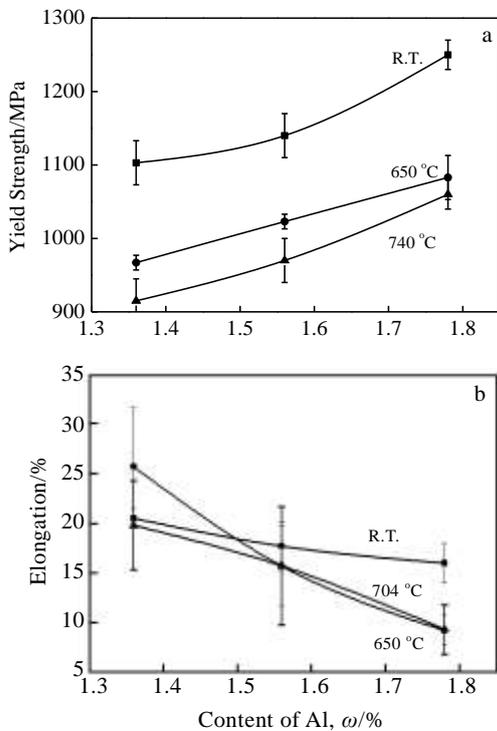


图 8 Al 对 718Plus 合金拉伸性能的影响

Fig.8 Tensile properties of 718Plus with different aluminum concentrations: (a) yield strength and (b) elongation^[2]

寸的 γ' 相数量所占比例由 93.6% 下降到 74.8%, 60~300 nm 的 γ' 相数量由 4.2% 增加到 23.3%, 总的 γ' 相的数量由 22.3% 增加到 27.4%, 而 η 相的数量由 2% 降到 0.7%, 表明随着 Al 含量升高, 大尺寸 γ' 相析出倾向性增加。另外, 通过计算证实, 如表 3 所示, 当 Al 的质量分数由 1.36% 上升到 1.78% 时, γ' 相的溶解温度可以上升 20~30 °C, 而 η 相的溶解温度可以降低约 15 °C, 因此 Al 对析出相的溶解温度会产生明显影响, 而这也显著影响合金的组织演变规律和热加工工艺。

由此可见, Al 会显著影响 718Plus 合金中 γ' 相和 η 相数量以及两种相的化学组成及溶解温度, 从而引起 718Plus 合金性能的逐渐变化。Al 对 718Plus 合金强度的影响主要由 Al 引起的 γ' 相数量变化有关, 而拉伸塑性变化跟基体中 γ' 相的数量和尺寸以及晶界 η 相的减少均相关。

4 析出相对 718Plus 合金性能的影响规律及机理

如 δ 相对 IN718 合金的组织 and 力学性能会产生重要调节作用一样, η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相的数量及形貌对 718Plus 合金的力学性能及缺口敏感性也起着重要调节作用, 因此, 合理地控制 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相的数量及

表 3 Al 对 γ' 和 η 相溶解温度及平衡含量的影响

Table 3 Solvus temperature and equilibrium content of γ' and η phase with different contents of Al^[2]

Al content, $\omega/\%$	Solvus temperature of γ'/K	Equilibrium content of γ' at 973 K, $\omega/\%$	Solvus temperature of η/K	Equilibrium content of η at 1233 K, $\omega/\%$
1.36	1245	17.1	1299	6.2
1.56	1260	20.0	1291	5.3
1.78	1272	23.0	1283	4.3

表 4 不同固溶热处理制度下合金的相组成

Table 4 Chemical compositions of phases at different solution temperatures^[2]

Solution temperature/ $^{\circ}C$	η content, $\omega/\%$	Element contents of η phase/at%									
		Ni	Co	Fe	Cr	Al	Mo	Nb	Ti	W	
945	7.342	67.47	5.48	1.42	1.25	7.68	0.25	12.52	3.77	0.15	
960	5.435	67.36	5.51	1.45	1.36	7.09	0.27	12.92	3.89	0.15	
975	2.975	67.15	5.57	1.51	1.54	6.86	0.29	12.95	3.99	0.15	
Solution temperature/ $^{\circ}C$	γ' content, $\omega/\%$	Element contents of γ' phase/at%									
		Ni	Co	Fe	Cr	Al	Mo	Nb	Ti	W	
945	20.450	68.67	2.95	1.39	3.98	11.51	0.33	8.55	2.40	0.22	
960	21.774	68.82	2.97	1.35	3.73	11.55	0.31	8.61	2.47	0.21	
975	24.051	68.97	2.98	1.34	3.42	11.41	0.28	8.81	2.60	0.19	

形貌是获得合金理想力学性能的关键。由此, Wang 等^[14]研究了不同晶界含量 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相条件下 718Plus 合金的组织 and 性能的演变规律。

通过不同固溶热处理制度获得如表 4 所示不同晶界质量分数的 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 析出相^[2]。结果证实, 伴随 η 相质量分数由约 7.3% 降到约 3%, γ' 相质量分数由约 20% 增加到了约 24%, 但 $\eta+\gamma'$ 相总的的质量分数在 27%~28% 之间。这是因为 η 相和 γ' 相的组成元素基本一致, 而组成元素总的含量一定, 所以一种相的减少往往会引起另一种相的相应增加, 进而对合金力学性能起着重要的调节作用。另外, 随着总的 γ' 相数量由约 20% 增加到约 24%, 尺寸在 10~36 nm 的 γ' 相的数量所占比例由 77.1% 增加到 93.2%, 140~300 nm 的 γ' 相数量由 15.0% 降到 5.6%^[14], 如图 9 所示。

研究表明, 随着 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相含量降低以及 γ' 相增加, 合金的拉伸强度和持久寿命均有所上升, 但当 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相低于一定量 (约 1.1%) 时, 合金会表现出明显的缺口敏感性, 这对大部分航空构件而言是不允许的。Yang^[15]等试验证实, 在 IN718 合金中 δ 相的质量分数在 4.82% 时, 其持久寿命达到最大值, 该峰值现象在 718Plus 合金中并未被发现, Wang^[14]等在对 IN718 合金研究过程中未对该现象重复证实, 因此该峰值结果需要做进一步证实。

作为 718Plus 合金中的晶界析出相— η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5}, 虽然其结构和形貌与 IN718 合金中的 δ 相不同, 但两种相在晶界析出时具有相似的作用机理:

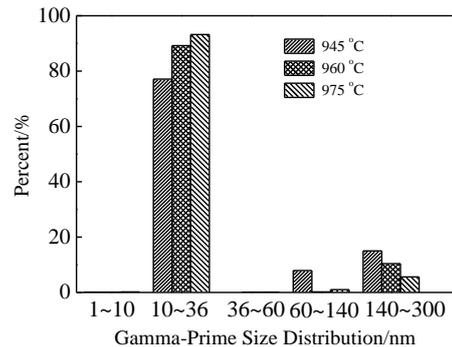


图 9 不同固溶热处理制度下 γ' 相尺寸分布

Fig.9 γ' phase size distribution at different solution temperatures^[14]

钉扎晶界、阻碍晶界裂纹扩展, 防止合金缺口敏感性等。因此, η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相在晶界大量析出时会导致合金基体 γ' 相数量显著减少, 合金强度降低; 而 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相析出低于一定量会导致合金产生缺口敏感。因为缺少晶界析出相的光滑平直晶界, 在外界应力作用下, 平行于外应力的晶界容易产生相对滑动, 垂直于外力的晶界容易产生开裂。因此, 如果想获得 718Plus 合金理想的综合性能, 必须将 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相的数量和形貌控制在一个合理的范围内, 从而获得拉伸、持久、蠕变、疲劳等综合力学性能的平衡。

5 结 语

过去 50 年, IN718 合金经过热处理制度的改进、合金成分的改型、微量元素的控制以及高纯净化冶炼技术的发展, 已将合金的性能和质量不断推向新的高度。作为“下一代 IN718 合金”, 718Plus 合金经过近十年的研究, 也因其 700 °C 下优异的综合力学性能和良好的热加工、焊接等工艺性能以及适宜成本的独特优势, 已在多种新型航空发动机上获得大量应用, 包括涡轮盘、机匣、叶片、紧固件等多种不同关键构件的制造, 成为继 IN718 合金之后的新一代一材多用变形高温合金。

在目前 718Plus 合金研究基础上, 其析出相的优化设计、合金成分改型、关键力学性能改进、组织长期稳定性以及承温能力提高的研究也在同步开展。在国内外高温合金学者共同努力下, 随着对 718Plus 合金认识的不断深入, 未来 718Plus 合金的综合力学性能水平将会得到稳步提高, 应用范围和领域也会不断扩大。

参考文献 References

- [1] Xie X S, Wang G L, Dong J X *et al.* *Superalloys 718, 625, 706 & Various Derivatives*[M]. Warrendale, PA: TMS, 2005: 179
- [2] Wang M Q, Du J H, Deng Q *et al.* *Materials Transactions*[J], 2015, 56 (5): 635
- [3] Pickering E J, Mathur H, Bhowmik A. *Acta Materialia*[J], 2012, 60(6-7): 2757
- [4] Cao W D, Kennedy R L. *Superalloy 718, 625, 706 and Various Derivatives*[C]. Warrendale, PA: TMS, 1994: 463
- [5] Sun W R, Guo S R, Lee J H *et al.* *Material Science & Engineering A*[J], 1998, 247(1-2): 173
- [6] Liu X B, Liu H, Dong J X *et al.* *Scripta Materialia*[J], 1999, 42(2): 189
- [7] Dong J X, Zhang M C, Xie X S. *Materials Science & Engineering A*[J], 2002, 328(1-2): 8
- [8] Zheng L, Xu T D, Deng Q *et al.* *Materials Letters*[J], 2008, 62(1): 54
- [9] Chen W, Chaturvedi M C, Richards N L *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1998, 29(7): 1947
- [10] Horton J A, Mckamey C G, Miller M K *et al.* *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*[C]. Warrendale, PA: TMS, 1997: 401
- [11] Ping D H, Gu Y F, Cui C Y *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 456(1-2): 99
- [12] Wang M Q, Du J H, Deng Q *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 626: 382
- [13] Yamaguchi M, Shiga M, Kaburaki H. *Science*[J], 2005, 307(5708): 393
- [14] Wang M Q, Du J H, Deng Q *et al.* *8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives*[C]. Warrendale, PA: TMS, 2014: 769
- [15] Yang Y R, Liang X F, Huang F X. *Journal of Aeronautical Materials*[J], 1996, 16(2): 38

Research Progress of Alloy ATI 718Plus in China

Wang Mingqing^{1,2,3}, Deng Qun^{1,3}, Du Jinhui^{1,3}, Tian Zhiling¹, Zhu Jing²

(1. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

(2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3. Beijing Key Laboratory of Advanced High Temperature Materials, Beijing 100081, China)

Abstract: Alloy 718Plus is a recently developed Ni-Fe based superalloy which is capable of maintaining excellent strength, hot working and welding performance up to 704 °C (1300 °F). In this paper, the research progress of alloy 718Plus in China was summarized. It mainly included 4 parts: (1) the phase composition and structure of alloy 718Plus, (2) the effect of phosphorus on microstructure and mechanical properties of alloy 718Plus, (3) the effect of aluminum on microstructure and mechanical properties of alloy ATI 718Plus, and (4) the effect of precipitates on mechanical properties of alloy ATI 718Plus.

Key words: alloy ATI 718Plus; η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} phase; aluminum; phosphorus; 3DAP

Corresponding author: Wang Mingqing, Ph. D., Senior Engineer, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-62184622, E-mail: minqingw@yahoo.com