

## 第二代定向凝固柱晶合金 PWA1426

近十多年来,定向凝固合金发展多集中于单晶合金方面,对于柱晶合金的发展工作似乎处于低潮。但是,美国 PW 公司却在继续研制这类合金,基于获取力学性能相当于在先进航空发动机中广泛应用的第一代单晶合金 PWA1480 而又能大大降低生产成本的新柱晶合金的设想,已导致第二代定向柱晶高温合金 PWA1426 的诞生,该合金的温度能力比第一代柱晶合金 PWA1422 高 50F (28℃)。经过五年的试验室研究和发动机试车考核以及与单晶合金 PWA1480 进行广泛的对比评价后,发现各项主要性能都与 PWA1480 相当,甚至高于 PWA1480,这就

确认了它的先进性。该合金现已投入生产,并在多种先进的军用和民用发动机(如 F100-PW-229、PWA2037 等)中获得应用。由于其成本低于单晶合金,预料其应用将进一步扩大。

### 合金成分

PWA1426 合金的成分列于下表。与 PWA1422 相比,它减少 Cr、W,增加 Al,加入 Ta、Re、Mo,去除 Ti、Nb,使合金的难熔元素含量超过 16%,有利于提高合金的高温强度。增加 Al、去除 Ti 使合金的抗氧化性提高。Re 的加入使  $\gamma'$  相的高温粗化速度大为降低,组织稳定性好。去除 Ti 和 Nb,加入少量 Ta 可扩大热处理范围,有利于通过热处理进一步提高合金性能。

PWA1426 与 PWA1422、PWA1480 合金成分的比较, wt%

合金	Ni	Cr	Ti	Mo	W	Re	Ta	Al	Co	B	Zr	C	Hf
PWA1426	余	6.5	—	1.7	6.5	3	4	6	10	0.015	0.1	0.1	1.5
PWA1422	余	9	2	—	12	—	(1C <sub>6</sub> )	5	10	0.015	0.1	0.14	1.5
PWA1480	余	10	1.5	—	4	—	12	5	5	—	—	—	—

### 显微组织与热处理

试验表明, PWA1426 的 980℃ 持久强度直接与热处理过程中固溶的  $\gamma'$  体积分数成正比,但 760℃ 的横向持久延性则呈反比。因此,选择了适中的固溶温度。该合金的初熔温度为 1260℃,其最佳热处理制度为: 1227℃/4h、快速冷却+1080℃/4h+870℃/12h。其中, 1227℃/4h 的固溶处理使 50% 的  $\gamma'$  回溶,快速冷却 (>56℃/min) 后,重新析出尺寸为 <4μm 的  $\gamma'$  相。试验表明,从 1227℃ 至 1204℃ 的冷却速度极为重要,尤其对中温性能有明显影响。例如,当冷速从 23℃/min 提高到 70℃/min 时, 980℃ 和 760℃ 的持久寿命分别提高 30% 和 100%。这与持久寿命对  $\gamma'$  相尺寸的敏感性有关。因此,在热处理工序中,要注意正确控制这个阶段的冷却速度。在热处理制度中, 1080℃/4h 处理是涂层扩散的需要,而 870℃/12h 的时效处理则是为了提高合金的中温屈服强度。在合金研究中,曾将它与 PWA1480 合金同时进行  $\gamma'$  相高温 (1080℃ 和 1204℃) 粗化试验,结果表明,两种合金的  $\gamma'$  相粗化速度基本相同,这就进一步证明它们的高温使用性能是相当的。在 870℃~1093℃ 进行长时间曝晒包括带应力的长期时效后,未发现有新相析出,说明该合金具有良好的组织稳定性。

### 力学性能

蠕变断裂试验和瞬时拉伸试验结果表明, PWA1426 的力学性能相当于、甚至高于单晶合金 PWA1480,尤其是其高温屈服强度更高,而且延性好,一般大于 10%。在 870~1093℃ 温度范围内进行的模拟外物撞击涡轮叶片的夏比冲击试验的结果表明,该合金的冲击值均大于 67 焦耳,比 PWA1422 和 PWA1480 都高,这正是由于该合金具有较高的屈服强度和延性之故。

用涂有 NiCoCrAlHfSiY 涂层的 PWA1426 合金空心管状试样进行控制应变的热机械疲劳试验 (循环温度为 427~1038℃、应变范围为 0.4~0.6%) 表明,其循环寿命与 PWA1480 相当。对 PWA1426 进行的高周疲劳试验证明,其疲劳强度 (>10<sup>7</sup> 循环) 相当于、甚至高于 PWA1480,在更高温度 (≥870℃) 和更高应力 (>345MPa) 下,则高于 PWA1480。

此外,对 PWA1426 合金在未加涂层的情况下进行 1150℃ 氧化试验和 900℃ 的喷射高浓度人造海水腐蚀试验的结果均表明,它的抗高温氧化性能和耐环境性能与 PWA1480 相当。

### 铸造性能

曾在 PW 公司本部及其铸件供应厂进行过三年的大量铸件生产实践,所铸叶片包括长度小于 50mm 的涡轮叶片和高度达到 150mm、弦宽达到 100mm 的导向叶片,结果表明,该合金继承了 PWA1422 的优良可铸性,但与 PWA1480 单晶叶片相比,成本却显著下降。这是由于这种叶片合金的合格率较高,而工艺成本和检验成本较低的缘故。

五年来用 PWA1426 合金制成的军用和民用发动机的涡轮叶片和导向叶片经受过恶劣工作条件的试车,并与 PWA1480 单晶叶片同台混装进行试验,证明两种合金的工作性能相当。对工作过几千个循环的 PWA1426 叶片进行目视和金相分析证明,它们在抗氧化和抗开裂方面均处于良好状态。

通过一系列对比试验、发动机试车和成本分析认为, PWA1426 柱晶合金在许多用途上是取代 PWA1480 单晶合金的理想候选材料。

(东华)