

DD3单晶合金的评估

Evaluation for DD3 SC Superalloy

唐定中 叶国胜 吴仲堂 吴学仁 (北京航空材料研究院)

Tang Dingzhong Ye Guosheng Wu Zhongtang Wu Xueren
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

Li-sen (Jim) Lin A. D. Cetel D. N. Duhl (普拉特惠特尼公司 Pratt & Whitney Company)

[摘要] 叙述了北京航空材料研究院 (BIAM) 和美国普拉特惠特尼公司 (Pratt&Whitney) 对 DD3 单晶合金的成本、主要力学性能指标和单晶铸造性能进行的评估。评估认为: DD3 合金有优良的力学性能和良好的铸造性能, 与第一代单晶合金 PWA 1480 合金相当, 且适合低成本生产, 是一种很有推广应用价值的航空发动机单晶涡轮叶片材料。

关键词 高温合金 单晶 涡轮叶片

[Abstract] In this paper, the cost, properties and castability of DD3 single crystal alloy had been evaluated. The results show that DD3 single crystal alloy has excellent mechanical properties equivalent to that of PWA 1480 single crystal alloy. The casting test exhibited the excellent single crystal castability of DD3. The single crystal turbine blades of DD3 alloy can be produced at low cost. So DD3 is an applicable single crystal superalloy for turbine blades in aero-engines.

Keywords superalloy single crystal turbine blades

1 前言

北京航空材料研究院 (BIAM) 与美国普拉特惠特尼公司 (P&W) 于1995年开始进行一项共同研究和开发新型低成本单晶合金的计划。双方确定首先对 DD3 单晶合金进行一些比较性评估, 然后再开发新型单晶合金。在评估试验阶段, 双方按确定的项目在各自的试验室对 BIAM 提供的 DD3 试样进行试验, 并与美国 P&W 现役的第一代单晶合金 PWA 1480 进行比较, 作出结论。此次评估的内容包括: 合金的拉伸性能, 蠕变性能, 疲劳性能, 抗氧化抗腐蚀性能, 组织稳定性, 热处理工艺性能和单晶铸造性能。本文介绍和讨论部分项目的评估结果。

2 试验方法

用真空感应熔炼的 DD3 母合金料锭在 BIAM 的 ZGD1 定向单晶炉内浇注出单晶试板, 用劳厄法测定试板的晶体取向, 确保所选每根单晶试样的轴向与 001 晶体取向的偏离度在 10° 以内。单晶试样的热处理

制度为: 1250 / 4h 空冷, 870 / 32h, 空冷。经热处理后分别按 BIAM 和 P&W 的标准加工性能试样, 然后在各自的试验室进行试验。拉伸试验中, BIAM 采用的拉伸应变速率为: 屈服前 0.02L₁mm/min, 屈服后 0.1 L₁mm/min (L₁ 为试样的标距长度)。P&W 采用的拉伸应变速率为 0.005mm/min。可铸性试验选择具有复杂型腔的单晶空心涡轮叶片, 用 BIAM 的型芯、单晶工艺和设备浇铸单晶叶片, 然后进行单晶检查。

3 试验结果和讨论

3.1 DD3 合金的化学成分特点

表 1 列出 DD3 合金和国外常用第一代单晶合金的化学成分和密度, 可以看出, DD3 单晶合金以 W、Mo、Al、Ti 复合强化为主, 不含贵重元素 Ta, 具有低密度和低成本的优点。

3.2 DD3 合金的拉伸和蠕变性能

拉伸和蠕变性能的评估, 由 BIAM 提供相同炉批和状态的试样, 分别按 BIAM 和 P&W 的实验方法进行拉伸试验, 结果见表 2 和图 1。从图 1 可以看出, 试样的晶体

取向（即轴向）与 001 晶向的偏离度控制在10 内时，晶体取向对拉伸性能的影响不大。BIAM 的实验数据略高于 P&W 的实验数据，其原因主要是 BIAM 的拉伸应变速率高于 P&W 的拉伸应变速率。图2是 DD3合金与 PWA 1480拉伸性能的对比，可以看出，DD3合金的抗拉强度与 PWA1480合金相当，室温塑性比 PWA1480高，中高温塑性相当。

表1 DD3合金和常用单晶合金的化学成分和密度^[1]
Table 1 The chemical composition of DD3 alloy and other single crystal alloys

合金	合金成分, wt%									密度 g/mm ³
	Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Ti	Nb	Ni	
DD3	9.5	5	3.8	5.2		5.9	2.2		余	8.2
PWA1480	10	5		4	12	5	1.5		余	8.7
Rene N4	9	8	2	6	4	3.7	4.2	0.5	余	8.56
CMSX-2	8	5	0.6	8	6	5.6	1.0		余	8.56

表2 DD3合金的拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results of DD3 alloy

试验单位	θ	σ _{0.2} , MPa	σ _b , MPa	δ, %	ψ, %
BIAM	650	941	1059	16.5	18.5
		890	1048	17.0	19.0
		993	1038	17.5	19.0
P&W	650	848	969	25.7	20.3
		841	1003	21.9	19.3
		834	934	26.4	21.3
BIAM	760	931	1155	6.1	11.2
		959	1200	4.5	10.1
		979	1259	8.0	12.8
P&W	760	850	1001	11.2	10.46
		901	1121	5.6	5.28
		874	1086	12.53	7.39

图3和图4是蠕变曲线对比，表3是蠕变试验结果对比。从对比结果可以看出，P&W 和 BIAM 的试验结果彼此吻合。同时，DD3合金在982 / 207MPa 和1038 / 159MPa 的蠕变曲线有明显的第三阶段存在，第一阶段蠕变量小，稳态蠕变速率很低，因此，DD3合金有良好的高温蠕变性能。由拉逊-米勒曲线对比可以看出，DD3合金的蠕变性能与 PWA 1480的相当。

3.3 DD3合金的组织稳定性

DD3合金的组织稳定性是在 P&W 的试验室进行的，试样经 870 / 1000h、982 / 1000h、1093 /

1000h 长时处理后用金相法检查有无 TCP 相析出，试验结果见图5。从图可看出，DD3合金在上述试验条件下除了γ有所粗化外，均未见 TCP 相析出。由此可见，DD3合金具有较好的组织稳定性。

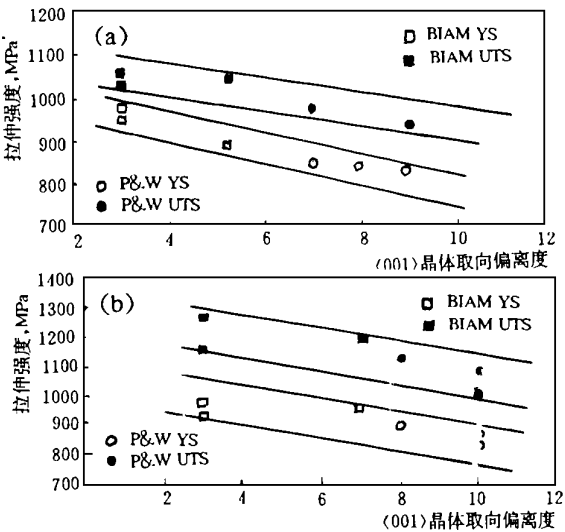


图1 DD3合金在650 (a) 和760 (b) 的拉伸性能
Fig. 1 Tensile test results of DD3 alloy at 650 (a) 和760 (b)

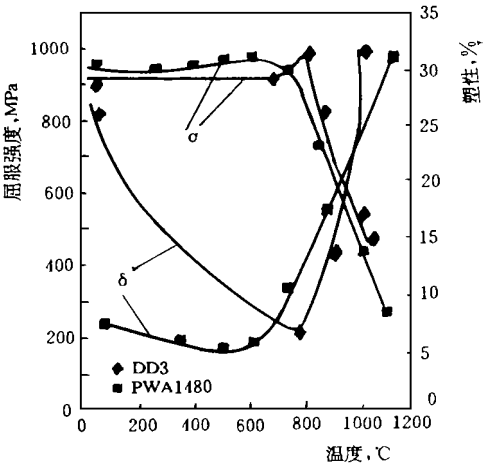


图2 DD3合金与 PWA 1480合金拉伸性能对比^[2]
Fig. 2 Comparison of DD3 with PWA 1480 in tensile property

3.4 DD3合金的单晶铸造性能

为评估 DD3合金单晶铸造性能，选择具有复杂内腔的某型发动机一级空心涡轮叶片（见图6）作试验对象，并对叶片单晶质量进行检查。铸造过程中，影响单晶成功率的因素除合金铸造性能外，叶片形状的复杂程度及工艺因素也有较大的影响。因此，本研究中设计了不同的工艺方案。本次试验最佳工艺方案的单晶成功率

达到了100%，说明 DD 3 合金具有优良的单晶铸造性能，就合金而言，可实现单晶叶片的低成本生产。

表3 DD3合金的蠕变试验结果
Table 3 Creep test results of DD3 alloy

试验单位	试验条件	试验结果					
		蠕变量%的时间, h			变寿命 t _f , h	延伸率 δ, %	断面收缩率 ψ, %
		0.5%	1%	2%			
BIAM	982 / 207MPa	12.0	76.0	172.0	216.9	14.01	42.68
		22.5	48.0	140.0	213.6	13.06	38.56
		8.7	37.0	143.0	193.3	12.85	40.52
P&W	982 / 207MPa	10.0	42.0	173.0	238.5	—	—
		13.0	63.0	156.0	201.9	23.13	52.24
BIAM	1038 / 159MPa	2.2	45.0	149.0	160.7	10.01	54.47
		6.6	29.0	117.0	214.8	10.89	41.45
		4.8	—	145.0	149.7	18.60	44.13
P&W	1038 / 159MPa	2.1	13.0	169	196.7	12.27	36.52
		1.9	7.6	129.0	163.8	10.92	54.46

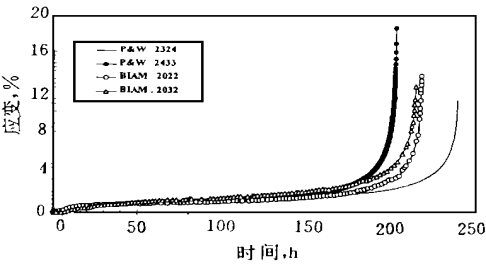


图3 DD 3合金982 / 207MPa 蠕变曲线
Fig. 3 Creep curve of DD3 alloy at 982 / 207MPa

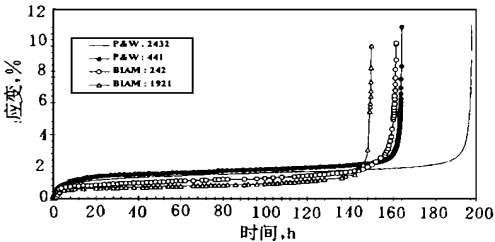


图4 DD 3合金1038 / 159Mpa 蠕变曲线
Fig. 4 Creep curve of DD3 alloy at 1038 / 159MPa

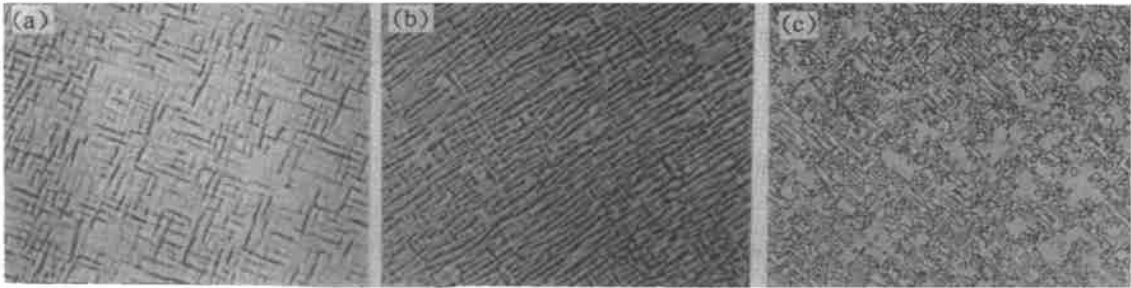


图5 DD3合金长时组织稳定性试验后的组织 1000×
Fig. 5 Microstructure of DD3 after stability test 1000×
(a) 870 / 1000h; (b) 982 / 1000h; (c) 1093 / 1000h

(下转第12页)

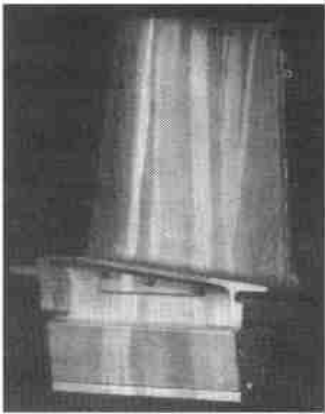


图6 DZ125合金涡轮叶片

Fig. 6 The turbine blade made of DZ125 alloy

4 结论

- (1) DZ125定向凝固高温合金具有高的中、高温力学性能,其性能水平达到甚至超过美国广泛应用的高性能定向凝固高温合金 PWA1422。
- (2) DZ125合金具有良好的可铸性和小的薄壁效应,可用于制造内腔复杂的薄壁空心涡轮叶片。

参考文献

1 P. Aldred. SAE 751049, 1975
2 渡边力藏. 铁と钢. 1975, 61 (9): 2274
3 D. N. Duhl. USP3711737, 1973
4 J. M. Marder. AD- A077270, 1979
5 郑运荣. 金属学报. 1986, 22 (2): A119

(上接第5页)

在1540~1600 浇注单晶空心叶片, 经过50多炉次浇注, 其叶片包芯率大于66%, 叶片壁厚经工业CT 检测符合要求, 型芯能用化学法脱除。

由于采用了二元矿化剂改变了型芯矿化剂分布不均匀问题和本身团聚的缺点, 故型芯的综合性能较好, 采用了两级焙烧法改善了烧成型芯的表面质量, 提高了型芯的烧成率, 达到80% 以上。

5.3 薄壁高强度壳型

由于单晶叶片在较高温度和较大的温度梯度下进行定向凝固, 因此要求单晶叶片用型壳具有较高的高温强度和较好的耐急冷急热等性能。一般来说, 壳型工作温度为1540~1600 , 1500 抗弯强度为3~5MPa, 1600 圆环自重变形小于5mm, 平均壁厚为4~6mm, 而且适用于快速凝固。研制出的一种高强薄壁新壳型, 其基本性能满足了上述要求, 称为811B 壳型。经过不同

单晶炉浇注单晶试棒和叶片试验, 表明性能良好。

俄罗斯 Al₂O₃壳型的壁厚为5~7mm, 每批生产周期为2周, 壳型要求在低于600 下入炉浇注, 这种壳型条件在我国定向炉使用中难以达到, 不利于连续工作。南非制造的壳型, 其壁厚为7~8mm, 工作温度为1500 , 但经常漏钢, 难以制备单晶。811B 壳型与俄罗斯、南非壳型相比, 具有较大的优点, 它可以在1600 工作, 可以在1200 入炉, 定向单晶炉中连续工作, 而壁厚仅3~6mm, 生产周期仅5天, 故有明显的优越性。

综上所述, “八五” 期间航材院在航空发动机的几个关键材料和工艺方面的研究, 取得了令人鼓舞的进展。这些成果的推广应用, 必将推动我国航空工业更快发展。

(上接第8页)

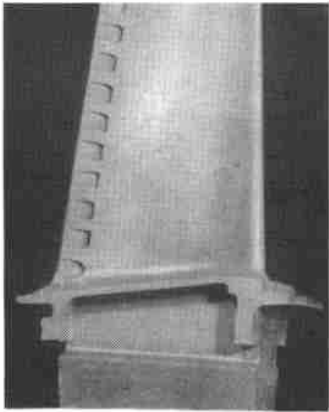


图6 DD3单晶空心叶片

Fig. 6 Single crystal hollow turbine blades of DD3

4 结论

BIAM 和 P&W 经过共同评估认为: DD3单晶合金具有成分简单, 成本低的优点, 力学性能与 PWA1480 相当, 并具有良好的组织稳定性和良好的单晶铸造工艺性能, 但抗氧化腐蚀能力较 PWA1480差。为此, 双方商定在此评估基础上, 将共同研制综合性能与 P&W 公司第二代单晶合金 PWA1484相当的低成本合金。

参考文献

1 陈荣章. 材料工程, 1995, (8): 1
2 D. M. Shah and D. N. Duhl. Proc. of 5th Inter. Symp. on Superalloys 1984: 105