

# 定向凝固涡轮叶片合金 DZ22B 的研究

北京航空材料研究所 余力 穆寿昌 殷克勤 王罗宝

DZ22B 合金是在 DZ22 合金的基础上改型的定向凝固涡轮叶片合金,其成分特点是仅含 1.0% 的铪。合金的力学性能水平与美国著名的定向凝固高温合金 PWA1422 相当。经长达 5000h 的高温曝晒,未发现 TCP 相析出,力学性能基本稳定。合金已用作某涡轴型发动机高压涡轮叶片材料,并投入批量生产。

**关键词:** 高温合金, 定向凝固, 涡轮叶片长期曝晒

## Study of the Directionally Solidified Superalloy DZ22B for Turbine Blades

She Li Mu Shouchang Yin Kegin Wang Luobao

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

DZ22B is an improved directionally solidified superalloy for turbine blades. The composition is characterized by only 1.0% Hf. Its mechanical properties are comparable to American famous directionally solidified superalloy PWA1422. No TCP phase are found to precipitate after high temperature exposure for 5000 hours. The mechanical properties remain steady. This alloy has been served as high pressure blade material in a aeroengine and become commercialized.

**Keywords:** superalloy, directional solidification, turbine blade, long-term exposure

### 1 前言

定向凝固高温合金以其独特的平行于零件主应力轴择优生长的柱晶组织及其优异的力学性能而获得长足发展,已广泛应用于各种类型的航空发动机制作涡轮叶片和导向叶片,我国研制了 DZ4、DZ22 等高性能定向合金,并已投入使用。为了适应某涡轴型发动机的国产化需要,我们在 DZ22 合金的基础上又发展出另一个定向合金 DZ22B,并已投入使用。本文扼要介绍该合金的成分、性能、组织特点及应用概况。

### 2 实验方法

母合金用容量为 500kg 的 IS65V8 型真空感应炉冶炼,浇注成  $\phi 80$ mm 锭坯,将锭坯在 ISP2/Ⅲ DS 型定向凝固炉中重熔浇注和定向凝固成棒坯,切取试样测试合金的各种力学性能。试样热处理制度为 1175℃/0.5h + 1205℃/2h 空冷 + 1080℃/4h 空冷 + 870℃/32h 空冷。按航标 5150 标准方法进行力学性能试验。

用光学显微镜、扫描电镜和电子探针进行合金的显微组织及微区成分分析。

材料工程

用硝酸:氢氟酸:甘油 = 1:2:3 的腐蚀剂显示常规组织,并用铁氰化钾 10g + 氢氧化钠 10g + 水 100ml 的腐蚀剂显示 TCP 相。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 合金的成分特点

DZ22B 合金的成分列于表 1。

表 1 DZ22B 合金的主要成分

元素	C	Cr	Co	W	Nb	Ti	Al	Hf	B	Ni
DZ22B	0.14	9.0	9.5	12	0.9	1.9	4.9	1.0	0.015	余

由表可见 DZ22B 属于高 W 类型的镍基高温合金, W 是高熔点难熔元素,不仅起着固溶强化的作用,而且进入  $\gamma'$  相,对强化  $\gamma'$  起着重要作用,并提高了  $\gamma'$  高温稳定性。

DZ22B 合金的另一个特点是含铪 (Hf),但其含量比 DZ22 合金降低 0.5%,这是根据某发动机叶片的具体情况和降低成本而确定的。加铪是改善镍基铸造高温合金中温横向性能的有效手段,因为铪改善了合金的组

织。实验测定了铪在 DZ22B 各相中的分配, 见表 2。

表 2 铪在合金各组成相中的分配

含 Hf 量 (wt%)	$\gamma$ - $\gamma'$ 共晶		枝晶间 粗 $\gamma'$	枝晶间 粗 $\gamma'$	MC <sub>1</sub>	MC <sub>2</sub>
	中心	边缘				
0.5		4.594	5.423	3.644	12.580	61.272
1.0	3.029	5.697	5.789	2.958	15.478	57.346

由表 2 可见, Hf 主要富集在碳化物 MC<sub>2</sub>, 枝晶间粗大的  $\gamma'$  相及  $\gamma'$  共晶相的边缘。由于 Hf 在基体  $\gamma$  中溶解

度很低 ( $<1\%$  at), 在凝固过程中被排斥到枝晶间, 而在 Ni<sub>3</sub>(Al, Ti) 中的溶解度较大 (约  $6\%$  at), 因此可直接进入枝晶间的  $\gamma'$  相中。加铪还改善了合金的凝固特性, 使固液相线温度降低, 并有加宽凝固范围的倾向, 促使形成较多量的  $\gamma+\gamma'$  共晶相, 这对改善中温性能和可铸性有良好的作用。表 3 列出了不同 Hf 含量对持久性能的影响。可见 Hf 含量增加明显地改善了  $760^\circ\text{C}$  的横向性能, 而  $1040^\circ\text{C}$  的高温持久性能则稍有降低, 这可能是由于大量的  $\gamma+\gamma'$  共晶相在高温下过早的软化或开裂所致。

表 3 Hf 含量对持久性能的影响

Hf 含 量 (%)	纵向持久性能						横向持久性能					
	$760^\circ\text{C}$ 724MPa			$1040^\circ\text{C}$ 127MPa			$760^\circ\text{C}$ 724MPa			$1040^\circ\text{C}$ 127MPa		
	$\tau$	$\delta$	$\psi$	$\tau$	$\delta$	$\psi$	$\tau$	$\delta$	$\psi$	$\tau$	$\delta$	$\psi$
	(h)	(%)	(%)	(h)	(%)	(%)	(h)	(%)	(%)	(h)	(%)	(%)
0.5	439:00	16.6	17.3	195:00	21.2	5.3	4:00	1.5	4.0	106:00	3.6	4.3
1.0	419:00	14.7	15.5	165:3	36.6	50.0	22:00	3.0	5.7	92:00	3.4	4.9

### 3.2 合金的组织及组织稳定性

DZ22B 合金的低倍组织具有定向凝固的固有特征, 即由平行排列、结晶取向为  $[001]$  的柱状晶组成, 柱晶取向偏离度一般小于  $10^\circ$ , 合金组织的树枝状结构极其明显。

合金显微组织的组成相包括  $\gamma$ 、 $\gamma'$ 、 $\gamma+\gamma'$  共晶、MC<sub>1</sub>、MC<sub>2</sub>、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、M<sub>3</sub>B<sub>2</sub>。 $\gamma'$  相是本合金重要的强化相, 按相分计算结果, 约占合金重量的 60%。从形态看  $\gamma'$  相可分为两种, 一种是在凝固后期形成的粗大  $\gamma'$  相, 主要分布在枝晶间和晶界, 而另外的  $\gamma'$  相和固溶体组成花

朵状的  $\gamma+\gamma'$  共晶 (约  $8\sim9\%$ ), 全溶温度在  $1250^\circ\text{C}$  以上。另一种  $\gamma'$  则是固溶处理后在冷却过程中和时效过程中析出的细小  $\gamma'$  相, 均匀而弥散地分布在基体上, 一般认为该细小的  $\gamma'$  相越多, 合金的持久性能越好, 在晶界上粗大的  $\gamma'$  与热处理过程中析出的 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 碳化物颗粒组成咬合状晶界。另外 Hf 还能夺取偏析在晶界和枝晶间有害杂质 S 形成稳定的初生硫化物 (M, Hf)SC, 净化了晶界, 这对合金的性能是有利的, 组织见图 1 和图 2。

合金的组织稳定性程度是合金长期应用性能的重



图 1 合金的显微组织 800 $\times$

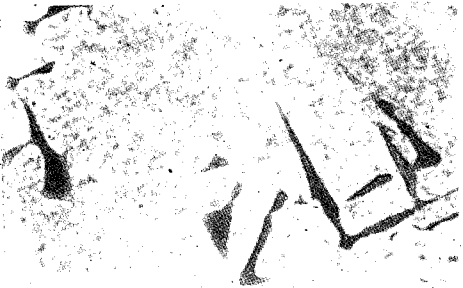


图 2 合金中的碳化物 800 $\times$

要指标之一, 如果组织稳定性差, 会降低涡轮叶片长期使用的可靠性。为此进行了  $800^\circ\text{C}$  长期曝晒至 5000h 的试验, 试样是经过标准热处理的定向凝固棒坯, 时效过程中, 在不同阶段取样观察组织和测试性能, 结果见表 4。

试验结果表明,  $800^\circ\text{C}$  长期时效后, 除  $760^\circ\text{C}$  724MPa 的持久寿命稍有降低外, 对合金其它性能无明显影响。不同时效阶段取样观察组织, 均未发现 TCP 相

析出和  $\gamma'$  相长大现象, 见图 3。

与此同时试验了  $850^\circ\text{C}/370\text{MPa}$  长期应力时效至 850h, 对定向凝固试棒和某发动机叶片还进行了  $900^\circ\text{C}$  长期时效至 3000h 的试验, 均未发现 TCP 相析出。上述试验结果与相分计算结果相吻合, 说明合金的成分控制是合理的。

### 3.3 合金的性能水平

表 5 和表 6 比较了 DZ22B 合金和美国广泛应用的

高性能定向合金 PWA1422 的拉伸性能和持久性能,可以看出这两种合金的纵向和横向性能水平相当。

表 4 长期曝晒对合金性能的影响

曝晒 时间 (h)	室温拉伸性能			持久性能					
	$\sigma_b$	$\delta$	$\psi$	760℃ 724MPa			982℃ 220MPa		
	MPa	%	%	$\tau$ , h	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\tau$ , h	$\delta$ , %	$\psi$ , %
0	1075	4.5	5.5	251	16.9	18.3	87	23.8	42.2
500	1220	8.0	13.6	152	16.8	20.7	93	38.8	56.9
1000	1045	4.6	6.5	161	15.0	18.4	86	22.7	46.7
1500	1100	6.0	6.0	199	14.0	17.4	-	-	-
2000	1270	8.0	10.5	169	19.2	20.5	60	26.8	51.9
3000	1180	8.0	12.5	163	18.8	18.6	87	33.2	51.3
4000	1120	5.0	8.5	155	20.4	22.6	66	22.4	53.9
5000	1155	6.5	9.0	87	17.2	21.2	77	38.0	55.2



图 3 合金经 800℃ 5000h 曝晒后无 TCP 相

DZ22B 合金具有较高的中、高温持久性能,760℃ 和 1040℃ 的 100h 的纵向持久强度极限分别为 793M

表 5 DZ22B 和 PWA1422 的拉伸性能

性 能 合 金	室温				760℃				980℃			
	$\psi$	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$\psi$	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$\psi$	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$
	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)
DZ-22B	1075	951	5.9	11.9	1195	1032	7.2	12.5	697	527	16.0	26.0
PWA1422	1130	960	6.1	8.3	1180	1050	4.3	12.7	626	485	21.8	28

表 6 DZ22B 和 PWA1422 的持久性能

取向	合金	760℃			850℃			980℃		
		$\sigma$	$\tau$	$\delta$	$\sigma$	$\tau$	$\delta$	$\sigma$	$\tau$	$\delta$
		(MPa)	(h)	(%)	(MPa)	(h)	(%)	(MPa)	(h)	(%)
纵向	DZ-22B	690	>420	17.2	529	95	28	220	79	26
	PWA1422	689	700	—	—	—	—	220	75	—
横向	DZ-22B	690	780	2.4	—	—	—	177	176	5.68
	PWA1422	689	170	5.3	412	120	9.8	163	125	7.6

Pa 和 135MPa。实验还测量了 DZ22B 合金在不同温度和不同应力下的蠕变量,确定其蠕变极限强度,在 100h 内产生残余形变为 0.2% 时的应力,760℃ 为 530MPa, 900℃ 为 260MPa。

4 结论

本研究结果表明, DZ22B 合金具有较高的中、高温力学性能和良好的工艺性能,而成本比 DZ22 合金低。该合金可用作 1000℃ 以下工作的涡轮零件,现已作为涡轮进口温度为 1330K 的某涡轴型航空发动机 I 级涡轮叶片材料,制做了一批无余量定向叶片并通过了 1000h 台架试车考验,投入批量生产。

参考文献

1. 王罗宝, 陈荣章, 王玉屏, 航空材料 (学报), 1909. 9 (2). 1  
2. J. D. Jackson and M. H. Fassler, 33rd Annual Meeting of the Investment casting Institute, 1985

\*\*\*\*\*

Inco7 83 合金

最近研制成的 Inco783 合金属 Ni-Co-Fe 系, 适于制造压气机、涡轮发动机排气罩与环形件。该合金热膨胀系数比 718 合金低 20%, 而 704℃ 以下的抗氧化能力与 718 合金相当, 抗冲击能力及组织稳定性优于 Inco909。