

# 定向凝固涡轮叶片合金DZ22

DZ22 题目组

## 一、前言

定向凝固 DZ22 镍基高温合金是为我国先进的航空燃气涡轮发动机研制的叶片材料,作涡轮工作叶片可用于950~1000℃,作导向叶片可用于1000~1050℃,其化学成分与美国的PWA1422(即DS Mar-M200+Hf)合金基本相同。

众所周知,PWA1422合金是美国普拉特·惠特尼公司主持研制的定向凝固叶片合金。它具有很高的强度、良好的中温性能、突出的热疲劳性能以及满意的铸造性能。经过十多年的精心研究和实践考验,已经在多种航空涡轮发动机上获得应用,如TF-30、JT9D、F100、PT6等。到目前为止,已生产该合金的定向叶片数十万件,累计飞行数百万小时。其中最引人注目的是在推重比为8、涡轮前温度达1370℃的F100发动机作高压1、2级涡轮空心叶片和1级导向叶片。多年的生产和使用的实践证明:PWA1422合金具有旺盛的生命力,是当前公认的综合性能最好的定向凝固高温合金之一。

根据我国航空工业发展的需要,我们研制了化学成分同PWA1422相仿的DZ22合金。其工艺、组织和主要性能已达到PWA1422的水平,可满足普拉特·惠特尼公司为F100发动机涡轮叶片制定的技术条件(PWA1422K)对机械性能的要求。下面对DZ22合金作一简要介绍。

## 二、合金的熔铸和热处理工艺

母合金在ZG 200真空感应炉熔炼,浇注成

合金锭棒,然后在VSG-30真空感应炉改装的定向凝固炉中重熔、浇注和定向凝固,得到试样板坯(尺寸:180×70×15或180×35×15毫米)。所用壳型系按《定向凝固涡轮叶片精铸壳型制造工艺说明书》制作的硅溶胶-铝矾土熔模壳型。所采用的定向凝固工艺,前期为功率下降法,后期为拉出铸型法。合金的重熔精炼温度约1560℃,浇注温度约1520℃,壳型的加热温度约1520℃,铸型的拉出速度为5~10毫米/分。

测试纵向和横向性能的试样从板坯上切取。机加工前按如下规范进行热处理:

1204℃, 2小时, 空冷+870℃, 32小时, 空冷。

## 三、合金的成分

DZ22合金是采用 $\gamma'$ 相强化、固溶强化、晶界和枝晶间强化的复杂合金化合金,其成分列于表1,从表中可以看出如下特点:

表1 DZ22合金的公称成分(重量%)

C	Cr	Co	W	Al	Ti	Nb	Hf	B	Ni
0.14	9.0	10.0	12.0	5.0	2.0	1.0	1.5	0.015	余

### 1. 钨含量较高

这使合金具有高的强度。从国内外镍基铸造合金的发展来看,在950~1000℃使用的涡轮叶片合金,大多是高钨类型的,如Mar-M246、Mar M002、Mar M247、Rene'125、M21、M22、JHC6V、K19H等。这是由于钨是强有力的固溶强化元素,它主要偏析在枝晶轴上,并进入 $\gamma'$ 相中强化 $\gamma'$ 相,从而保证合金的高温强度。但是,钨含量高,伴随而来的是

合金比重较大。DZ22的比重约8.55。

## 2. 含有1.5%铪

这对于保证合金的中温横向性能和铸造性能是必不可少的。试验结果表明,加入1~2%铪,能改变合金的凝固特性,从而改善合金的组织,显著提高760℃的纵向和横向性能,尤其是760℃-73.8公斤/毫米<sup>2</sup>的横向持久性能(图1),同时对980℃-22.5公斤/毫米<sup>2</sup>持久寿命无明显影响,而1040℃-13公斤/毫米<sup>2</sup>持久寿命却有所降低(图2)。经过综合考虑,确定本合金的公称含铪量为1.5%,即比PWA1422的公称含铪量低0.5%。

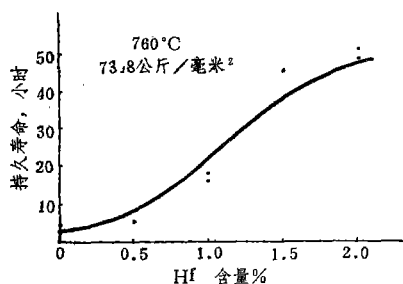


图1 铪含量对DZ22合金中温横向持久性能的影响

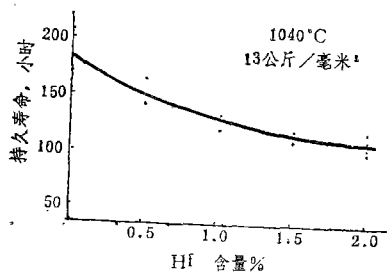


图2 铪含量对DZ22合金高温纵向持久性能的影响

## 3. 含碳量

含碳量与普通铸造镍基合金相当。通常认为,碳的作用是形成各种类型的碳化物,提高合金的强度。我们的试验结果表明,过低(<0.09%)的含碳量,对1040℃-13公斤/毫米<sup>2</sup>的持久寿命有不利影响(图3),但对760℃的

持久和瞬时拉伸性能影响不大。为了保证DZ22的高温性能,确定其公称含碳量为0.14%。据一份AD报告透露,在F100发动机涡轮叶片的技术条件(PWA1422K)中,规定的合金含碳量已从原来的0.08~0.14%提高到0.12~0.16%,可能也是考虑到碳化物对高温性能的良好作用而采取的措施。

## 4. 严格控制杂质含量

对本合金主要杂质元素的分析结果为:Bi~0.5ppm; Pb~1ppm; Ag~0.5ppm,这说明合金的纯度较高,而且符合技术条件PWA1422K的要求。

## 5. 原材料立足国内

DZ22合金含有的合金元素,符合我国资源情况,原材料可以立足于国内,价格比同性能水平的含钼合金便宜。

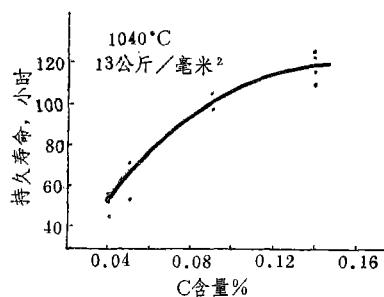


图3 碳含量对DZ22合金高温持久性能的影响

## 四、合金的组织

DZ22合金的宏观组织具有定向凝固合金固有的特征,即由平行于纵轴排列的、结晶取向为〔001〕的柱状晶所组成(图4),基本上使宏观横向晶界得以消除。晶粒尺寸和枝晶密度与凝固工艺参数有关,据测定,功率降低法所得的板坯,在距激冷铜板40毫米处(相当于试棒工作部位),平均晶粒直径约为1.2毫米;一次枝晶臂距平均约为0.35毫米(图5),二次枝晶臂距平均为0.13毫米,与资料报导的PWA1422的数据相近。

DZ22合金的显微组织与PWA1422十分

相似，其热处理后的组成相有： $\gamma$ 、 $\gamma'$ 、 $\gamma/\gamma'$ 共晶、 $MC_{(1)}$ 、 $(M,Hf)C_{(2)}$ 、 $M_{23}C_6$ 、 $M_6C$ 、 $M_3B_2$ 、 $Ni_5Hf$ 、 $(Hf,M)_2SC$ 。图6示出合金的典型组织。

$\gamma'$ 相是合金最重要的强化相，约占合金重量的58%，其成分中不仅有大量的Ni、Co、Al、Ti，而且还有相当数量的Hf、W、Nb等元素。从形态上看， $\gamma'$ 相分为两种，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，大多与 $\gamma$ 固溶体组成花朵状的 $\gamma/\gamma'$ 共晶相。共晶相的数量约占合金体积13%左右，其全溶温度高于1240℃。试验表明，一定数量的 $\gamma/\gamma'$ 共晶相的存在，有利于改善合金的中温横向性能。另一种 $\gamma'$ 相是在固溶处理后冷却过程和时效过程中析出的细小( $<0.5\mu$ ) $\gamma'$ 相，它均匀而弥散地分布在基体上(图7)。通常认为，当 $\gamma'$ 相总量一定时，这种细小 $\gamma'$ 相越多，合金的持久、蠕变性能越好。

DZ22 由于含有铪而使合金的显微组织具有一系列重要特点，首先，枝晶间的 $\gamma/\gamma'$ 共晶较多，粗大 $\gamma'$ 相与 $M_{23}C_6$ 碳化物颗粒组成咬合状晶界。其次，合金中初生MC碳化物呈孤立的块状，而不像不含铪合金那样呈长条状或骨骼状。在热处理过程中，由于 $Ni_5Hf$ 的溶解，多余的铪与基体中残存的碳组成细小块状的 $(M,Hf)C_{(2)}$ 碳化物(图8)。最后，从稳定的硫化物 $(Hf,M)_2SC$ 的出现可知，铪攫取了偏析于晶界和枝晶间的有害杂质硫。毫无疑问，上述显微组织特点

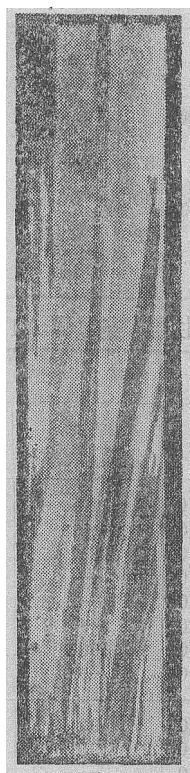


图4 DZ22合金板坯的低倍组织

对于合金的性能，特别是中温性能是有益的。

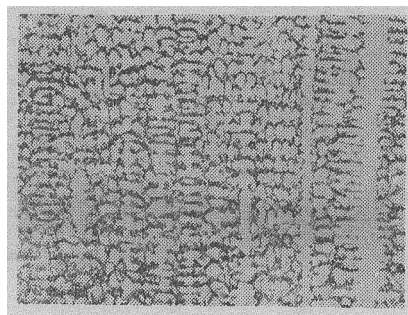
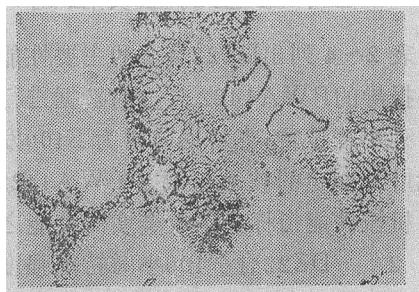
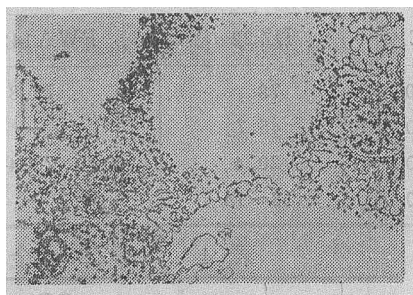


图5 DZ22合金纵向枝晶组织 20×



a 铸态



b 热处理

图6 DZ22合金的显微组织 400×

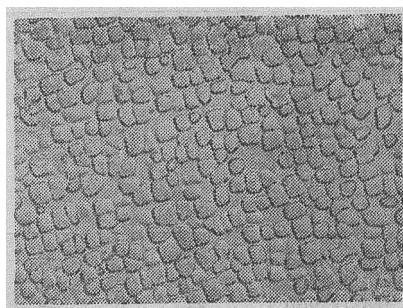
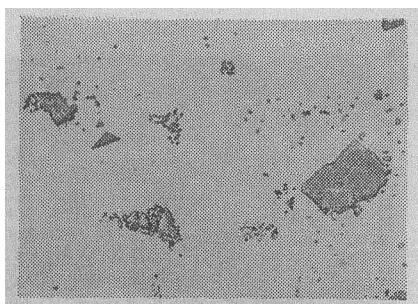


图7 DZ22合金中的细小 $\gamma'$ 相

10000×



500X

图 8 DZ22合金中的MC<sub>(1)</sub>和MC<sub>(2)</sub>碳化物

## 五、合金的主要性能

表 2~4 列出DZ22合金的主要性能, 并与资料报导的PWA1422 合金的数据进行对比。

表 5 列出普拉特·惠特尼公司为 F100发动机的涡轮叶片制定的技术条件 (PWA1422K) 规定的机械性能指标与本合金实测性能之比较。

表 2 DZ22合金100小时持久强度极限 (与PWA1422对比)

温 度 °C	100小时持久强度极限 公斤/毫米 <sup>2</sup>	
	DZ 22	PWA1422
760	78	73.8
870	45.7	—
980	20.4	20.4
1040	13~14	—

从表中数据可以看出,DZ22合金的主要性能与PWA1422 合金水平相当, 并且可以满足技术条件 (PWA1422K) 规定的机械性能要求。

表 3 DZ22合金的持久性能 (与PWA1422对比)

取 向	试验 温度 °C	DZ 22			PWA1422			
		$\sigma$	$\tau$	$\delta\%$	$\sigma$	$\tau$	$\delta\%$	
		公斤/毫米 <sup>2</sup>	小时		公斤/毫米 <sup>2</sup>	小时		
纵  向	760	70.3	>690	—	70.3	700	3.2	
		73.8	520	10.0	—	—	—	
		78	137	10.0	—	—	—	
	870	45.7	122	25	42	180	6.7	
	980	20.7	95	23.0	—	—	—	
		21.1	93	27.0	21.1	70	19.0	
		22.5	67	24.0	—	—	—	
	1000	19	99	34.0	—	—	—	
	1040	12.75	149	34.0	12.66	130	20.0	
		13	121	24	—	—	—	
		14	101	27	—	—	—	
	1093	8.44	75	30	—	—	—	
	横  向	760	66	323	3.6	59.5	780	4.2
			70.3	264	6.4	—	—	—
			73.8	50	3.2	—	—	—
870		—	—	—	42	120	9.8	
900		35	145	8.0	—	—	—	
980		21.2	90	14.0	17.5	125	7.6	
1040		14	31	4.2	—	—	—	

表 4 DZ22合金的瞬时拉伸性能 (与PWA1422对比)

取 向	温 度 °C	DZ 22				PWA/422			
		$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\delta$ %	$\psi$ %	$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\delta$ %	$\Psi$ %
纵 向	室温	116	—	8.0	9.0	113	96	6.1	8.3
	700	117	—	6.0	10.0	—	—	—	—
	760	121	—	8.0	15.0	121	98	9.0	14.0
	800	119	—	7.0	9.0	—	—	—	—
	870	97	—	13.0	17.0	—	—	—	—
	900	90	—	6.0	12.0	—	—	—	—
	980	65	—	13.0	28.0	63	49	21.8	28.0
	1000	60	—	23.0	28.0	—	—	—	—
横 向	室温	100	—	8.0	13.0	93	82	9.0	14.5
	760	100	—	8.0	14.0	99	81	9.2	13.5
	900	87	—	5.0	15.0	—	—	—	—
	980	—	—	—	—	60	47	17.4	15.3
	1000	58	—	6.0	8.0	—	—	—	—

表 5 DZ22 合金实测性能与PWA1422技术条件要求之比较

PWA1422技术条件规定的指标		DZ22实测数据
室温拉伸性能	$\sigma_b \geq 105$ 公斤/毫米 <sup>2</sup> $\sigma_{0.2} \geq 91$ 公斤/毫米 <sup>2</sup> $\delta_5 \sim 13\%$	104~127 公斤/毫米 <sup>2</sup> ——— 4~12%
760°C-70.3公斤/毫米 <sup>2</sup> 持久性能	寿命 $\geq 48$ 小时 在48小时测 $\delta_{4D} \leq 4\%$	684:00, 696:00, >676:00, >655:00 1.6, 1.2%
980°C-22.5公斤/毫米 <sup>2</sup> 持久性能	寿命 $\geq 32$ 小时 在20小时测 $\delta_{4D} \leq 2\%$ 断裂延伸率 $\delta_{4D} \geq 10\%$	72:00, 68:50, 60:00, 62:05 ——— 25.2, 27.2, 27.2, 28.8%
1093°C-8.44 公斤/毫米 <sup>2</sup> 持久性能	寿命 $\geq 40$ 小时 断裂延伸率 $\delta_{4D} \geq 10\%$	52:20, 73:00, 59:00, 90:00 40.0, 34.4, 30.4, 24.8%
760°C-70.3 公斤/毫米 <sup>2</sup> 横向持久性能	要求报告持久寿命并报告 断前2小时的延伸率	———

## 六、结 束 语

综上所述, DZ22合金同PWA1422合金一样, 具有良好的综合性能, 在某些方面还优于PWA1422 合金, 如含铅量较低, 中温纵向性

能较高; 可以作为先进航空发动机的定向凝固涡轮叶片和导向叶片材料。目前我们正在对它作进一步的研究。我们相信, 随着我国航空发动机的发展, DZ22合金将会为我国新的航空发动机的研制和应用作出应有的贡献。

(陈荣章 执笔)

☆

☆

☆

☆

☆

☆

## 又一种新的飞机蒙皮涂料通过鉴定

新的飞机蒙皮涂料——13-2丙烯酸聚氨酯(脂肪族)磁漆(简称13-2磁漆)和各色丙烯酸标志漆技术鉴定会于1981年3月16日至18日在天津举行。这次会议由化工部委托天津市化工局主持(属部级技术鉴定)。参加会议的有化工部、三机部、空军、海军所属30多个单位60多名代表。会议期间, 天津油漆总厂涂料研究所作了两种涂料的研制报告; 六二一所作了国内外几种脂肪族聚氨酯飞机蒙皮磁漆性能试验总结报告, 13-2磁漆使用调查报告; 一二二厂作了飞机表面试喷13-2磁漆工艺总结报告。代表们还到有关机场考察了涂有13-2磁漆和标志漆的飞机并到生产厂进行了参观学习。

原来使用的飞机蒙皮涂料13号热固型丙烯酸磁漆, 还存在涂层泛黄和粉化的缺陷。针对这些缺陷, 天津油漆总厂涂料研究所在三机部六二一所、一二二厂、六〇一所的协助下, 又研制了保光保色性好

的13-2磁漆, 经评定试验、验收试验和涂机试验考核, 达到了飞机蒙皮涂料的技术要求, 克服了原13号磁漆的缺点, 基本上满足了飞机的使用要求。但由于底面漆配套性能尚有不足, 所以在飞复杂气象时, 在雨蚀作用下, 进气道、机翼、尾翼等迎风面部位尚有不同程度的漆层脱落现象。

与会代表对13-2磁漆的中试报告、各色标志漆的试验报告以及两种涂料的技术标准进行了认真讨论, 一致通过了技术鉴定报告和技术标准。会议认为: 13-2磁漆具有优良的机械性能、“三防”性能和优良的保光保色性能, 不易粉化泛黄, 优于13号磁漆。各色丙烯酸标志漆经试用, 与13号磁漆和13-2号磁漆有良好的结合力, 且标志漆保光保色性好, 是13-2号磁漆良好的配套材料。该两种产品配方成熟, 工艺稳定, 喷涂性良好, 因此, 可以在飞机上推广使用。

(六〇一所陈嘉珠)