

无铅高强度定向凝固高温合金DZ-4

DZ-4定向合金题目组 孙传棋执笔

DZ-4合金是专门为定向凝固涡轮叶片和导向叶片设计研制的新材料,其成分见表1。该合金具有优异的持久蠕变性能,100小时的持久强度极限:760℃为804MPa,980℃为206MPa,1040℃为141MPa(图1),与目前美国PWA1422合金相当。由于DZ-4合金比重小,其比强度比PWA1422合金高,见表2;比In-100和K3合金可提高使用温度30~70℃,见图2。该合金还兼有良好的综合性能,如拉伸性能、蠕变特征(图3)、疲劳性能、横向性能、薄壁性能,并有较好的抗氧化和抗环境腐蚀性能。

众所周知,同材料的等轴晶比柱状晶有较高的晶界强度,因此,至今所有服役使用的定向合金都添加元素铪(Hf)来强化纵向晶界

和横向性能,从而满足合金浇注零件时可铸性的要求,但Hf的加入影响合金采用尽可能高的固溶热处理温度,同时将提高合金和返回料的成本。

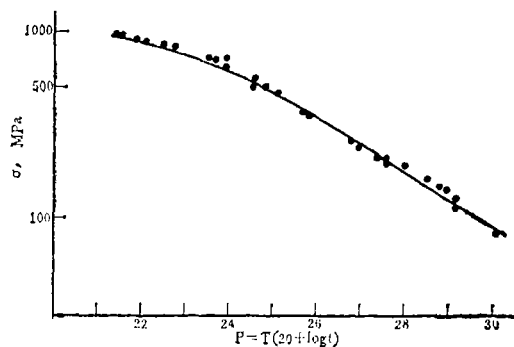


图1 DZ-4合金L-M曲线

表1 DZ-4合金化学成分(%)

C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Al+Ti	B	Ni
0.10~0.16	9.0~10.0	5.5~6.5	5.1~5.8	3.5~4.2	5.6~6.4	1.6~2.2	≥7.6	0.012~0.025	余

表2 DZ-4与几个合金持久比强度比较

合金	比重 g/cm ³	持久比强度							
		760℃	800℃	850℃	900℃	950℃	980℃	1000℃	1040℃
DZ-4	8.15	10.06	8.46	6.50	4.41	3.06	2.57	2.26	1.77
DZ-3	8.10	9.75	7.90	6.17	4.32	2.96	2.59	2.20	1.72
DZ-5	8.12	9.42	7.88	6.40	4.18	3.07	2.58	2.21	—
DZ-22(相当于PWA-1422)	8.56	9.57	—	6.30	—	—	2.45	—	1.63
DZ-17G	7.75	9.29	7.74	—	4.25	2.83	2.32	2.00	—
DZ-9	8.22	8.68	7.41	5.71	4.23	2.79	2.31	2.00	—
DS-In100	7.75	8.77	—	—	—	—	2.26	—	—
DZ-002	8.50	8.89	7.64	6.11	4.32	3.00	—	2.17	1.67
K17	7.80	—	7.17	5.51	4.10	2.69	—	1.92	—
K3	8.10	—	6.54	5.06	3.70	2.71	—	1.85	—
GH49	8.40	—	5.29	3.69	2.55	1.48	—	0.83	—

注:持久比强度=100小时持久强度极限/比重。

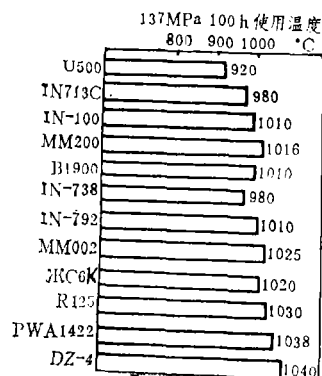


图2 DZ-4与几个典型合金
使用温度的比较

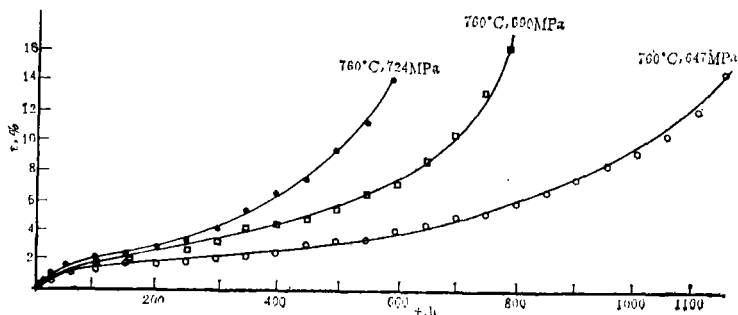


图3 DZ-4合金760°C下不同应力的蠕变关系

铸件的热裂往往是在合金的固相线和液相线之间靠近固相线处形成的。此时合金处于固液两相区中，当合金凝固时晶体形成连续的骨架，开始收缩时的温度和固相线之间的范围称为有效结晶温度范围 (ΔT_1)。此值对形成裂纹起着重要的作用，通过测定和对 ΔT_1 值的计算，发现合金元素Zr和Ti是扩大 ΔT_1 值的主要因素。为此，合金设计为获得高的热强性能，既保持了高的 γ' (Vol%)，又采用了进入 γ' 相而不形成 $\gamma + \gamma'$ 相元素来代替或最大程度地减小易形成 $\gamma + \gamma'$ 共晶的这些元素。基于上述原则设计研制的DZ-4合金 ΔT_1 值将比一般合金缩小30°C。等温淬火试验结果表明，合金直至1290°C不过烧。DZ-4合金具有优异的可铸性已为浇注数以千计的带有复杂型芯的薄壁(0.5mm)定向涡轮叶片所证实，合金对壳型和型芯具有良好的相容性，表现出良好的抗晶界开裂性能。无铅高强度可铸性良好的定向合金的研制成功，为设计研制定向凝固高温合金开辟了一种新的途径。

合金的显微组织特征有力地支持了上述的结论，本合金含有高的 γ' 相 (61Vol%)，而无 ($\gamma + \gamma'$) 共晶相，在一般镍基高温合金中 ($\gamma + \gamma'$) 共晶是常有的相，DZ-4合金通过高温热处理可使 γ' 相很大程度地溶解并在基体上析出均匀弥散分布的约0.4 μm 的 γ' 粒子。此外，合金组织中部分块状和部分骨架状MC初

生碳化物比较不稳定，在热处理过程中MC分解为大量 $M_{23}C_6$ 和 M_6C 相。合金的使用状态具有良好的组织稳定性，经850°C和930°C、3000小时长时无应力时效不出现有害的TCP相。

DZ-4合金已通过了300~950°C模拟发动机的热冲击考核，经600循环次无裂纹，较K17合金提高六倍以上，较8#合金提高十二倍以上。

DZ-4合金已被广泛地应用于我国先进的航空发动机定向无余量和定向空心无余量涡轮叶片。图4是高性能发动机一级定向空心涡轮叶片一例。

本文首次公布了DZ-4合金的组织特征和主要力学性能。

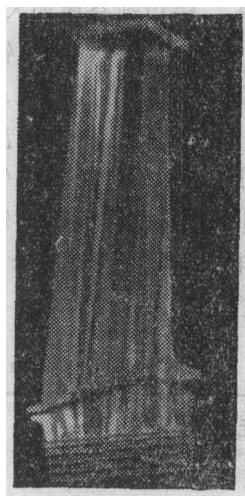


图4 DZ-4合金的一级
定向空心涡轮叶片

本研制工作得到了颜鸣皋教授和黄恢元高级工程师的指导，深表谢意。