

K417 合金细晶铸造热参数的研究

北京航空材料研究所 汤鑫 刘发信 杨爱德 袁文明

本文研究了 K417 合金的细晶铸造热工艺参数。研究表明,当型壳温度控制在 $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$,浇注温度控制在 $P+29^{\circ}\text{C}\sim P+50^{\circ}\text{C}$ 时,可获得健全的 K417 细晶铸件。与普通铸件相比,其低周疲劳寿命提高 2~3 倍。

Investigation of K417 Fine Grain Casting Thermal Parameters

Tang Xin Liu Faxin Yang Aide Yuan Wenming

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

The thermal process parameters of K417 fine grain casting have been investigated in this paper. The results show that the sound fine grain castings of K417 can be obtained, while the pouring temperature is controlled within $P+29^{\circ}\text{C}\sim P+50^{\circ}\text{C}$, and the mold temperature is controlled within $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$. The main advantage of the fine grain castings over conventional castings is that the low-cycle fatigue life is increased by a factor of 3~4.

1 前言

高温合金铸件的力学性能在很大程度上受晶粒度和微观组织的影响,所以长期以来,人们致力于使铸件获得优良的晶粒形态和合适的尺寸。高温合金细晶铸造技术使铸件在整体上获得细小、均匀和各向同性的等轴晶粒。与普通铸造组织相比,细晶铸造组织表现为细小的晶粒度、高度弥散分布的细小碳化物质点、细小而均匀的 γ' 相分布^[1]。

与普通铸件相比,细晶铸件的主要优点是大大改善了低周疲劳性能,减少了铸件力学性能的分散度,拉伸性能也有所改进^[2]。因此自 70 年代以来,西方国家尤其是美国大量开展了细晶铸造工艺的研究和应用。主要用于制造涡轮叶片^[3]、整体涡轮盘^[4]和结构件^[5]。国内北京航空材料研究所正在就高温合金细晶铸造工艺进行详细而系统的研究。

铸件的整体细化有三种方法:热控法、机械法和化学法。

热控法是获得细晶铸件最简单最经济的方法。细化的机理是:一方面通过降低浇注温度来增加过冷度,从而增加了晶核数目;另一方面通过降低浇注温度,使一些难熔质点如碳化物析出作为结晶核心;同时由于结晶时间短,晶粒也不易长大。

材料工程

本文具体研究了 K417 细晶形成的热控工艺参数,并测试了其力学性能,讨论了晶粒度和微观组织如初生碳化物和 γ' 相对 K417 低周疲劳性能影响的机理。

2 实验条件

2.1 试样制备

实验在某专用真空炉上进行,所用炉料为 K417 母合金锭,型壳材料为硅酸乙酯—刚玉。

在一般情况下,型壳温度低,铸件凝固速率快,晶粒容易细化,但型壳温度过低,铸件容易产生欠铸并出现柱状晶,型壳温度过高,晶粒又容易粗化。实验选择型壳温度为 900°C 、 1000°C 和 1100°C 。

合金浇注温度用 $P+T$ 表示,其中 P 为 K417 合金的液相线温度, T 为液相线 P 以上的过热温度。合金精炼温度为 $1500\sim 1560^{\circ}\text{C}$ 。

在不同的热工艺参数下浇注了拉伸性能试棒和低周疲劳性能试棒,其工作尺寸分别为 $\phi 6.5$ 和 $\phi 8$,并浇注了某型号机上实心叶片。

测试的力学性能试样经过热等静压处理,其工艺参数为 $1180^{\circ}\text{C}/150\text{MPa}/3\text{h}$ 。

2.2 性能测试、微观晶粒度评级和组织分析

在 MTS-810 试验机上测定室温低周疲劳性能,轴

向拉-压疲劳循环特征 $R = -1$ ，总应变控制量为 0.8%，频率为 20~30 次/分。

宏观和微观晶粒度按 ASTM E112-80 评级，用金相和扫描电镜对相应的力学性能试棒进行微观组织分析，包括初生碳化物和 γ' 相。

3 实验结果

3.1 合金浇注温度和型壳温度对 K417 合金平均晶粒度的影响

型壳温度和合金浇注温度对 K417 平均晶粒度的影响见表 1。表 1 有相应的晶粒度等级，图 1 为晶粒尺寸与温度参数的关系曲线。

表 1 温度参数对 K417 晶粒度的影响

序号	炉号	型壳温度 (°C)	浇注温度 (°C)	晶粒平均 直径, mm	ASTM 等级 G 或 M
a	10	1100	P+32	0.103	G3.5~4.0
b	11	1100	P+37	0.110	G3.0~3.5
c	7	1100	P+47	2.0	M8~8.5
d	3	1000	P+29	0.084	G4.0~4.5
e	14	1000	P+41	0.110	G3.5~4.0
f	18	1000	P+50	0.67	M11.5
g	19	1000	P+60	1.6	M9
h	5	900	P+33	0.084	G4.0~4.5
i	20	900	P+40	0.104	G3.5~4.0
j	21	900	P+50	0.25	M14 或 G1
k	4	900	P+125	3.2	M7

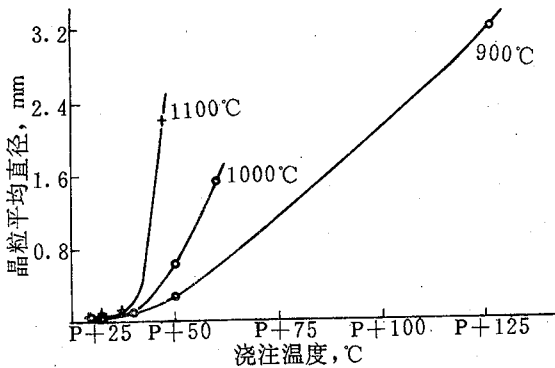


图 1 晶粒尺寸与温度参数的关系曲线

表 1 和图 1 的结果表明：如果降低型壳温度和浇注温度，则晶粒尺寸减小，且浇注温度对晶粒度的影响比型壳温度对晶粒度的影响更显著。

当型壳温度为 1100℃ 时，浇注温度为 P+47℃ 就

出现柱状晶和粗晶，当型壳温度为 900℃ 和 1000℃ 时，浇注温度为 P+50℃ 铸件仍保持较好的等轴细晶粒。因此获得健全的细晶铸件的型壳温度范围内，浇注温度控制在 P+29℃~P+50℃，可获得健全的细晶铸件，且在工艺控制上便于实现；当浇注温度低于 P+29℃ 时，铸件出现欠铸现象。

3.2 K417 晶粒尺寸与力学性能的关系

选择第 11 炉细晶铸造试样，第 18 炉中等晶粒尺寸铸造试样与第 4 炉普通铸造粗晶试样做性能对比。第 4 炉普通铸造试样为铸态不经热等静压处理和热处理，第 11 炉和第 18 炉为铸态经热等静压而不经热处理。测试了其室温下的拉伸性能和低周疲劳性能，列于表 2 和表 3。

从表 2 可以看出，与普通铸造试样相比，细晶铸造试样的 σ_b 平均提高 20%， δ_5 平均提高 3 倍， ψ 平均提高 40%，只 $\sigma_{0.2}$ 稍微降低。晶粒越细， σ_b 、 δ_5 和 ψ 提高得越多，尤其是 δ_5 和 ψ 提高的幅度更大。

表 2 K417 晶粒尺寸与室温拉伸性能的关系

试样号	晶粒平均 直径, mm	ASTM G 或 M	试样 状态	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)
4-A	3.2	M7	铸态	844	920	5.7	14.8
4-B			(普通铸	821	845	2.1	11.1
平均			造)	832.5	882.5	3.9	12.9
18-A	0.67	M11.5	铸态+	794	935	6.7	15.5
18-B			热等静	827	935	6.7	15.5
平均			压	810.5	984.5	8.8	14.8
11-A	0.11	G3.0~ 3.5	铸态+	782	959	9.7	17.8
11-B			热等静	839	1149	15.3	19.1
平均			压	807	1054	12.5	18.5

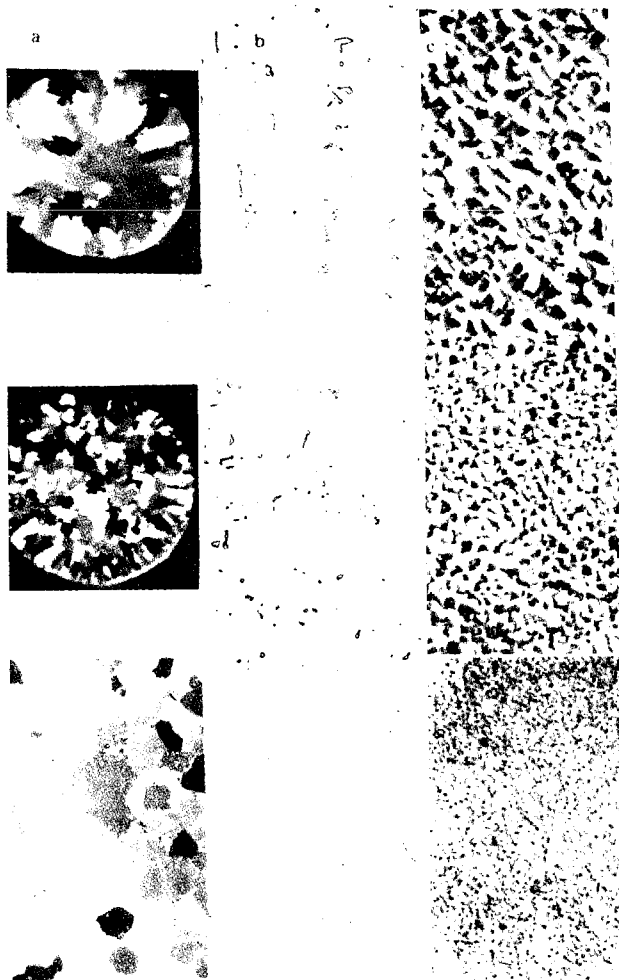
表 3 K417 晶粒尺寸与室温低周疲劳性能的关系

试样号	晶粒平均 直径, mm	ASTM G 或 M	试样 状态	试验 频率, (次/分)	疲劳 寿命 N_f (次)	疲劳寿命 平均值, N_f (次/分)
4-C	3.2	M7	铸态	30	49	1484.5
4-D					2920	
18-C	0.67	M11.5	铸态+	20	5171	6575
18-D					7303	
18-E					7252	
11-C	0.11	G3.0~ 3.5	铸态+	20	6776	7907
11-D					8464	
11-E					8482	

从表3可以看出:晶粒尺寸越小,低周疲劳寿命越长。第11炉细晶铸造试样的低周疲劳寿命是第4炉普通铸造试样4-D的2.7倍,并且数据的分散度明显减小。

3.3 K417 晶粒尺寸与微观组织的关系

用普通金相显微镜和扫描电镜观察了第4炉普通铸造试样、第18炉中等晶粒度试样和第11炉细晶铸造试样的初生碳化物MC和 γ' 相,如图2。



(a) 第4炉, 普通铸造, 晶粒平均直径3.2mm, ASTM M7
(b) 第18炉, 晶粒平均直径0.67mm, ASTM M11.5
(c) 第11炉, 晶粒平均直径0.11mm, ASTM G3.0~3.5

图2 不同晶粒尺寸K417合金的初生MC、 γ' 相形态及大小

从图2可以看出:晶粒平均尺寸由3.2mm减小到0.67mm,初生碳化物(MC)变得细一些;晶粒尺寸进一步变小到0.11mm,则碳化物成为更细小的颗粒状。

此外, γ' 相随着晶粒尺寸的减小而变细,且形状由块状变为圆形。晶粒尺寸为0.11mm时, γ' 相成为细而弥散分布的颗粒。

上述因素的综合影响,使细晶铸件的力学性能高于普通铸件。

材料工程

4 讨论

4.1 K417 铸件的晶粒度对低周疲劳寿命的影响

(1) 晶粒度影响裂纹成核时间

在常温或低温下工作的零件,晶界由于其点阵的扭曲或半无序化而处于远比晶体为高的应力状态,导致晶界的强度高于晶体,使晶内的滑移中止于晶界,晶界起了阻碍继续滑移的作用。晶粒越细,晶面积越大,阻碍滑移的能力越强,并使应变分布于更多的晶界上,从而使每一晶界上的形变程度减小,减少了应力集中,使裂纹成核时间增长。

(2) 晶粒度影响裂纹扩展速率

晶粒越细,裂纹在晶粒内部向前推进时,受到取向不同的相邻晶粒的限制越多,这样裂纹扩展受到更大的阻力,裂纹扩展速率更慢。

因此,如果K417晶粒越细,则裂纹成核时间越长,扩展速率越慢,从而提高了其低周疲劳寿命。

4.2 K417 微观组织对低周疲劳寿命的影响

(1) 初生碳化物对低周疲劳寿命的影响

在常温或低温下工作的零件,碳化物与低周疲劳寿命之间存在着紧密的关系^[6]。碳化物尺寸越大,数量越多,越容易造成应力集中,给疲劳裂纹成核造成有利条件。而且碳化物是一种脆性相,平面滑移切入碳化物后容易开裂。因此晶内碳化物处往往成为疲劳源。

(2) γ' 相对低周疲劳寿命的影响

在常温或低温下工作的零件,疲劳断裂主要表现为穿晶断裂。因为晶内比晶界弱,在晶内裂纹容易成核,且扩展速率快,而晶界对裂纹扩展具有很强的阻碍作用。因此,如果能提高晶内强度,将使裂纹不容易在晶内产生并降低裂纹在晶内的扩展速率,从而达到提高其低周疲劳寿命的目的。而 γ' 相越细,则晶内强度越高。

对于K417细晶铸件,不仅晶粒细化了,同时初生碳化物和 γ' 相也得到细化,因此提高了其低周疲劳寿命。

因此,正是由于晶粒度和微观组织的综合影响,使K417细晶铸件的低周疲劳寿命高于普通铸件。

5 结论

(1) 当型壳温度控制在900°~1000℃、浇注温度控制在P+29℃~P+50℃时,可获得健全的K417细晶铸件。

(2) 对于K417细晶铸件,由于晶粒、初生碳化物和 γ' 相得到细化,因此明显提高了低周疲劳性能。另外拉伸性能也得到了一定程度的提高。

参考文献(略)