

# 不同冷却方式对 K465 合金组织和力学性能的影响

Influence of Different Cooling Methods on Microstructure and Mechanical Properties of K465 Superalloy

张宏伟, 肖程波, 王定刚, 余 乾, 尹健伟, 宋尽霞  
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

ZHANG Hong-wei, XIAO Cheng-bo, WANG Ding-gang,  
YU Qian, YIN Jian-wei, SONG Jin-xia  
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了热处理过程中不同冷却方式对 K465 合金力学性能和组织的影响。表明, 冷却方式对 K465 合金的组织 and 性能影响很大。采用大气空冷和真空控温冷却方式热处理后, K465 合金的  $\gamma'$  组织都比较细小, 性能完全满足技术条件要求。而经炉冷方式热处理后合金的  $\gamma'$  组织比较粗大, 性能不理想。因此, 对于 K465 合金, 大气空冷和真空控温冷却是较好的方式, 二者可取其一, 而炉冷方式不可取。

关键词: 高温合金; 冷却方式; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG132.3+2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 12-0033-03

**Abstract:** Influence of different cooling methods during heat treatment on mechanical properties of K465 superalloy was studied. The results show that properties and microstructure of K465 superalloy are affected obviously by the cooling methods. The size of  $\gamma'$  phase in specimen by air-cooling or vacuum-control cooling is finer than that in specimen by cooling in furnace. Mechanical properties of K465 superalloy by air-cooling or vacuum-control cooling can meet the criterion, but that by cooling in furnace is not satisfied. So air cooling and vacuum-control cooling are acceptable. Cooling in furnace is not acceptable.

**Key words:** superalloy; cooling method; mechanical properties; microstructure

K465 合金是我国研制的一种高强度铸造镍基高温合金, 具有良好的综合性能, 主要用于制作某发动机的涡轮转子叶片和导向叶片。

按 K465 合金技术标准的要求, 其标准热处理制度为: 1210℃/4h+ 空冷。但是 K465 合金制作的涡轮叶片零件的热处理都是在真空状态下进行, 其冷却速度与母合金试样在大气下进行热处理相差很大, 而技术标准对冷却速度没有具体明确的要求。如果不对其冷却速度加以合理控制, 就不能达到理想性能效果, 而冷却速度与冷却方式密切相关, 因而冷却方式的选择极为重要。本工作研究了不同冷却方式对 K465 合金力学性能和显微组织的影响, 以便确定一个较好的冷却方式, 发挥 K465 合金的特点。

## 1 实验方法

采用真空熔铸炉重熔浇注 K465 合金试棒, 选择以下 3 种热处理的冷却方式:

方案 1: 1210℃/4h+ 空冷; 方案 2: 1210℃/4h + 炉冷; 方案 3: 真空控温冷却 (真空下 1210℃/4h

+ 真空氩冷)。

观测不同冷却方式对 K465 合金的组织与性能带来的影响。

性能测试选择了技术标准规定的室温拉伸与高温持久性能方案, 以便进行比较。

对不同冷却方式下的 K465 合金进行显微组织观察, 研究其不同热处理方案下的组织变化。

## 2 实验结果

### 2.1 力学性能测试结果

表 1 为不同方案下的室温拉伸性能。

从表 1 来看, 对于拉伸性能来说: 方案 1 的强度指标  $\sigma_{0.2}$  和  $\sigma_b$  最高, 塑性指标  $\delta_5$  和  $\Psi$  处于中等水平; 方案 3 的  $\sigma_{0.2}$  和  $\sigma_b$  稍低, 但塑性指标  $\delta_5$  最高; 方案 2 的  $\sigma_{0.2}$  和  $\sigma_b$  最低, 但塑性指标  $\delta_5$  与方案 3 的相近。三种方案的拉伸性能均能满足技术标准规定的指标。

表 2 为不同方案的高温持久性能 (975℃/225MPa)。

从表 2 来看, 方案 1 的持久寿命最高, 断面收

缩率也最高，但数据比方案 2 和方案 3 要分散一些；方案 2 的持久寿命最低，稍稍超过技术标准的要求，断面收缩率在方案 1 和方案 3 之间；方案 3 的持久寿命在方案 1 和方案 2 之间，断面收缩率不高，但是数据分散性比方案 1 和方案 2 要小得多。

表 1 不同方案的室温拉伸性能

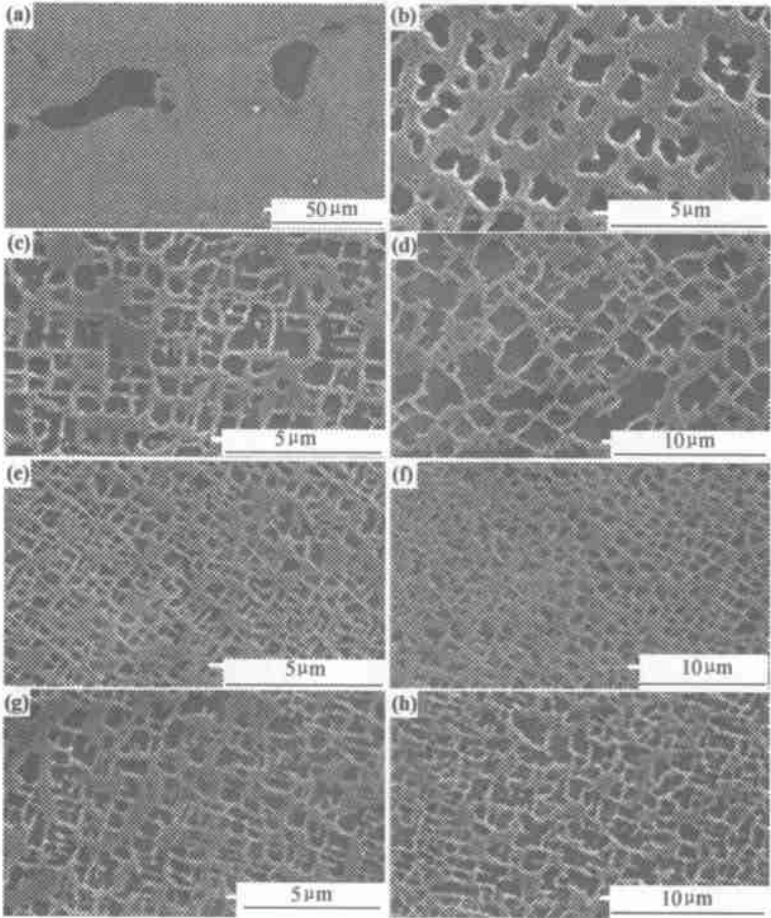
Table 1 Tensile properties at room temperature with different cooling methods				
方案号	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_b$ / MPa	$\delta_5$ / %	$\Psi$ / %
1	832	987	—	—
	864	1022	5.2	11.8
2	740	940	7.0	10.3
	741	959	7.0	14.2
3	775	996	7.0	11.8
	786	979	—	—
技术标准要求	—	830	3	—

2.2 显微组织观察结果

对不同热处理方案下合金显微组织进行观察，发现不同方案下 K465 合金的  $\gamma'$  组织形貌相差明显。图 1 是不同方案的  $\gamma'$  组织以及铸态的  $\gamma'$  组织对比。从图 1 可以看出，铸态的  $\gamma'$  组织呈四方形，大

表 2 不同方案的高温持久性能 (975℃/225MPa)

Table 2 High temperature stress rupture properties with different cooling methods		
方案号	$\tau$ / h	$\Psi$ / %
1	75.00	11.64
	65.50	11.46
	69.00	8.21
2	47.50	11.64
	39.50	7.84
	40.25	8.02
3	53.50	8.02
	55.17	8.21
	52.33	8.02
技术标准要求	40.00	—



(a) 方案 1 的微观组织；(b) 方案 1 的  $\gamma'$  组织；(c) 方案 2 枝晶干的  $\gamma'$  组织；(d) 方案 2 的枝晶间的  $\gamma'$  组织；(e) 方案 3 枝晶干的  $\gamma'$  组织；(f) 方案 3 的枝晶间的  $\gamma'$  组织；(g) 铸态的枝晶干  $\gamma'$  组织；(h) 铸态的枝晶间  $\gamma'$  组织

图 1 不同方案  $\gamma'$  组织和铸态的  $\gamma'$  组织

Fig. 1  $\gamma'$  phase in specimen by different cooling methods and in as cast

- (a) the microstructure in specimen by air cooling; (b)  $\gamma'$  phase in specimen by air cooling;
- (c)  $\gamma'$  phase of dendrite arm in specimen by cooling in furnace; (d)  $\gamma'$  phase of interdendrite in specimen by cooling in furnace;
- (e)  $\gamma'$  phase of dendrite arm in specimen by vacuum control cooling; (f)  $\gamma'$  phase of interdendrite in specimen by vacuum control cooling;
- (g)  $\gamma'$  phase of dendrite arm in specimen in as cast; (h)  $\gamma'$  phase of interdendrite in specimen in as cast

小均匀不一，尤其是枝晶间区域存在明显粗大的 $\gamma'$ ；方案 1 的 $\gamma'$ 组织存在非常细小与相对粗大的两种，两者交织在一起，粗大的呈现四方形，边角比较圆滑；方案 2 的 $\gamma'$ 组织也呈四方形，但是尺寸很大，已经超过了铸态的大小，枝晶间更加明显，有的四方形棱角已圆滑了，但枝晶干上的 $\gamma'$ 组织仍然保持较好，这样的 $\gamma'$ 组织对力学性能没有好处；方案 3 的 $\gamma'$ 组织比较细小均匀，呈三角形与四方形交错状，枝晶干 $\gamma'$ 棱角分明，枝晶间的也是很细小均匀，这是一种对合金力学性能很有利的 $\gamma'$ 组织。

3 讨论

从 2.2 节可以知道，K465 合金经不同制度的热处理后，显微组织变化明显，主要是 $\gamma'$ 组织的形貌差别较大，这说明冷却方式对 K465 合金的显微组织影响很大。对镍基铸造高温合金来说，细小均匀的 $\gamma'$ 组织对其力学性能有利。大气空冷(方案 1)与真空控温冷却(方案 3)得到的 $\gamma'$ 组织都是比较细小的，这对合金力学性能有利，而炉冷(方案 2)得到的 $\gamma'$ 组织非常粗大，立方化效果也不如方案 1 和方案 3，这对合金力学性能是不利的，热处理效果不能令人满意。这一点也从力学性能测试结果反映出来了。

从 2.1 节可以知道，大气空冷(方案 1)、炉冷(方案 2)与真空控温冷却(方案 3)这三种冷却方式的力学性能均能达到 K465 合金技术条件要求。拉

伸性能方面，方案 1 的强度最高，但 $\delta_5$ 低，方案 2 强度最低，但塑性好，方案 3 的强度比方案 1 的稍低，但塑性明显好于方案 1；高温持久性能方面，方案 1 的最高，其次是方案 3，方案 2 的稍稍比技术条件的指标高一些，富余量非常小。另外，从数据分散的情况看，方案 3 的最小，其次是方案 2，方案 1 的分散度较高。因此，综合考虑，可以认为，大气空冷(方案 1)与真空控温冷却(方案 3)都是可取的固溶处理冷却方案，而炉冷(方案 2)不可取。

4 结论

(1) 采用大气空冷或真空控温冷却方式固溶处理后 K465 合金的力学性能满足技术标准的要求。

(2) K465 合金的固溶处理应采用大气空冷或真空控温冷却，二者可任选其一，不宜采用炉冷方式。

参考文献

[1] C T 西姆斯等. 高温合金 [M]. 赵杰等译, 大连: 大连理工大学出版社, 1992: 61- 81.  
[2] 黄乾尧, 师燕渝. 镍基铸造高温合金均匀化处理后的组织研究 [A]. 铸造高温合金论文集 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 200- 206.

收稿日期: 2002-12-01  
作者简介: 张宏伟 (1971-), 男, 工程师, 联系地址: 北京市 81 号信箱 1 分箱 (100095).

\*\*\*\*\*

(上接第 40 页)

受载方式。这点在制品设计和使用时要特别注意。因此采用这样结构的制件通常是要提高制件的整体性，如：提高回转体形状制件的整体抗冲击性能及整体的抗扭转剪切性能。

表 1 T700 碳纤维二维编织物增强及单向复合材料力学性能  
Table 1 The mechanical properties of weave reinforced and unidirectional composites of T700

性能	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /GPa
纤维方向 1	234.8 (170.3 <sup>[5]</sup> )	24.4 (20.1 <sup>[5]</sup> )	266	23.3
纤维方向 2	59.2	9.62	116	9.58
单向复合材料	2200	140	1500	123

3 结论

6421 树脂是一种高性能 RTM 专用 BMI 树脂，其反应放热峰宽，在工艺过程中，对温度的变化不敏感，具有优良的 RTM 工艺性，可以制备出高质量的 RTM 复合材料。

12K 碳纤维二维编织复合材料试样条的性能大大低于单向层板，其原因是编织试样的载荷实质上是纵横剪切。编织复合材料的优点是它的整体结构性，因此关于这类复合材料的性能评价、设计与应用还有大量工作有待探索。

参考文献

[1] 徐敬一, 马玉录. 树脂传递模塑 (RTM) 成型工艺及应用 [J]. 中国塑料, 1992, 6 (2): 9- 16.  
[2] Marsh George. Putting SCRIMP in context [J]. Reinforced Plastics, 1997, 1: 22- 26.  
[3] Beckwith S W, et al. Resin tranfer molding, a decade of technology advances [J]. SAMPE Journal, 1998, 34 (6): 3- 23.  
[4] 许亚洪. RTM 复合材料结构件用 BMI 树脂基体 6421 体系的研究 [J]. 航空制造工程, 1998, 6.  
[5] Masters, et al. Effect of Preform Architecture on Modulus and Strength of Two dimensional, Triaxially Braided, Textile Composite Materials [J]. Composite Materials, 1996: 201- 217.

收稿日期: 2001-06-27; 修订日期: 2002-03-25  
作者简介: 许亚洪 (1968-), 男, 工程师, 联系地址: 北京 81 信箱 3 分箱 (100095).

—————●