

K3镍基铸造高温合金回炉料的利用

三三一厂 何继绥

一、问题的提出

我厂从1969年开始试制涡桨型发动机,该发动机涡轮部分的高压、中压涡轮工作叶片,高压涡轮导向叶片等六种叶片毛坯都是采用K3镍基铸造高温合金精密铸造的。

K3镍基铸造高温合金中,有许多价格昂贵的合金元素(如Ni、Cr、Co、Mo、W等),其中Ni占70%,Cr约占10%,Co、Mo、W各占5%左右,主要元素镍是从国外进口的。

长期以来,特别是1973年涡桨型发动机转入批生产后,精铸车间堆积的K3合金回炉料(如废叶片、浇冒系统等)越来越多,目前库存估计约30吨左右,价值一百三十万元。所以充分利用K3镍基高温合金回炉料,不仅可为国家节约资源、降低成本、减少外汇开支、便于材料管理,而且为K3镍基铸造高温合金的广泛应用开拓了道路。

1979年,我们根据工厂K3合金回炉料多的实际情况,提出了“关于充分利用K3合金旧料的试验研究”课题,并结合生产做了一些试验研究工作。

通过三年多的试验和生产实践,目前,我厂K3合金回炉料的应用情况是:涡桨型发动机I、II级涡轮叶片(每级包括左、右两种叶片)以及I级导向叶片(每级包括定位和非定位两种叶片)等六种叶片使用50%的K3合金回炉料。II、III级涡轮导向叶片(每级包括定位和非定位两种叶片)等四种叶片使用100%的K3合金回炉料。这样,从根本上解决了工厂K3合金回炉料的严重积压现象,大大减少了合金

反复熔炼的次数、省工、省电。据统计,200公斤真空炉每熔炼一炉母合金的费用是616元,按每炉熔炼120公斤计算,30吨回炉料须要熔炼250炉,可节约十三万元左右。

二、真空熔炼工艺

高温合金的真空熔炼主要是利用碳脱氧或者氧化物的挥发等工艺手段,使基本金属净化到一定放气量,然后再加入铝、钛等活泼元素,使夹杂物的数量控制在很低的水平。

这里必须强调指出,对回炉料来讲,夹杂的主要来源还是材料本身,因此对废叶片、浇冒口的表面状态必须严格要求,尽量减少外来夹杂。我厂试验用回炉料,都是工厂自己生产的废叶片和浇冒口,经吹砂、自来水清洗、烘干、在200公斤真空炉内熔炼成回炉料母合金锭,与50%的全新材料母合金锭合并熔炼成母合金锭,再重熔浇注叶片和试样。

我们试验时采用的坩埚系由电熔镁砂加1~2%硼酸调制后经烧结制成。目前,许多工厂使用电熔镁砂等静压成型坩埚,当然是比较理想的真空熔炼的炉衬材料。

1. 母合金熔炼工艺

试验用母合金锭是在200公斤真空炉中熔炼的,原材料经酸洗或吹砂、水洗后烘干,不允许有氧化物,锭模预热温度150℃左右,母合金熔炼时开化前的真空度不低于 5×10^{-2} 毫米汞柱,精炼温度1560℃,精炼时间20分,去除大部分液面氧化膜,然后结膜冷冻,浇注温度1400~1420℃,铸成 $\phi 80$ 毫米母合金锭,去除其铸造表面氧化物、夹渣、麻坑等缺陷,且不

允许有开放性的缩孔。

2. 重熔工艺

试验用的叶片和试棒在25公斤真空炉内重熔，铸型温度950℃，采用快速熔化，无精炼期，使钢液保持在较低温度，并使金属液在坩埚中停留的时间尽可能缩短，减少由于坩埚沾污以及炉内残余气体和真空泵气体回流所造成的沾污等问题。重熔时真空度 2×10^{-3} 毫米汞柱，漏气率不大于6μ/分。浇注温度1440~1450℃，浇注速度≤3秒，铸型从培烧炉内取出至浇注完毕不多于32分，浇注后停留5分钟破真空，再开箱清理。

三、热处理

试验用叶片和试棒按表1规范进行热处理。

表 1

合金牌号	加热温度	保温时间	冷却方法
K3 合金	1210±10℃	4~4.5小时	空 冷
K14 合金	1100±10℃	5~5.5小时	空 冷

四、试验结果

试样编号

0h表示全新料；

50h表示50%回炉料；

75h表示75%回炉料；

100h表示100%回炉料；

1、2、3、4系回炉料回炉次数，如 100h4表示100%回炉料经四次回炉熔炼。

1. 化学成分

主要化学元素及杂质列于表 2 和表 3。

表 2 主 要 化 学 元 素

试样编号	主 要 元 素 , %							
	C	Cr	W	Al	Ti	Co	Mo	B
技术条件规定	0.17~0.18	10.0~12.0	4.8~5.5	5.3~5.9	2.3~2.9	4.5~6.0	3.8~4.5	0.01~0.03
0h	0.14	10.73	5.25	5.46	2.61	5.23	3.93	0.026
50h	0.18	10.60	5.33	5.40	2.70	5.30	4.03	0.024
75h	0.171	10.70	5.23	5.32	2.76	5.35	3.98	0.024
100h1	0.159	10.11	5.51	5.49	2.64	5.30	3.97	0.026
100h2	0.156	10.57	5.26	5.37	2.84	5.82	4.13	0.025
100h3	0.148	10.01	5.34	5.38	2.68	5.01	3.89	0.026
100h4	0.151	10.39	5.24	5.35	2.65	4.65	3.79	0.026

表 3 杂 质

试样编号	杂 质 , % , 不 多 于											
	Pb	Sb	Bi	Sn	As	Ag	V	Si	Fe	Mn	Cu	Mg
技术条件规定	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	0.0005	0.1		2.0			0.003
0h	0.001	0.001	0.002	0.0008	—	—	—	—	—	—	—	—
50h	0.001	0.001	0.001	0.002	0.0008	0.0001	0.05	0.079	0.33	0.009	0.006	0.001
75h	0.001	0.001	0.001	0.002	0.0008	0.0001	0.05	0.09	0.62	0.006	0.005	0.001
100h1	0.001	0.001	0.001	0.002	0.0008	—	—	—	—	—	—	—
100h2	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	—	—	—	—	—	—	—
100h3	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	0.0001	0.05	0.12	0.64	0.005	0.005	0.001
100h4	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	0.0001	0.05	0.12	0.66	0.005	0.005	0.001

2. 机械性能

试验用100% K3 合金回炉料, 50% K3 合金回炉料, 100% K3合金新料, 100% K14合金回炉料各五炉, 每炉浇注试棒12根, 分别进行

高温持久和高温瞬时机械性能对比试验, 并明确高温持久试验时, 当持续时间 ≤ 100 小时, 每隔8~10小时加负荷3.5公斤, 试验结果如下。
(1) 高温持久机械性能见表4、5

表 4 K3合金高温持久性能

试样编号	试验温度 °C	试验应力 公斤/毫米 ²	持 续 时 间, 小 时 : 分					
			技 术 条 件 规 定 ≥ 25 小 时					
0h	975	20	83 : 40 83 : 15	80 : 02 80 : 45	89 : 10 76 : 00	93 : 45 84 : 41	71 : 45 81 : 04	平 均 82 : 42
50h	975	20	90 : 25 81 : 48	63 : 00 81 : 51	102 : 00 79 : 50	91 : 40 72 : 00	95 : 05 103 : 42	平 均 86 : 08
100h	975	20	71 : 55 100 : 25	98 : 00 85 : 00	64 : 50 77 : 00	77 : 23 87 : 03	65 : 50 100 : 17	平 均 83 : 22
试样编号	试验温度 °C	试验应力 公斤/毫米 ²	持 续 时 间, 小 时 : 分					
			技 术 条 件 规 定 ≥ 40 小 时					
0h	850	25	133 : 05 143 : 30	143 : 15 140 : 40	145 : 30 141 : 00	142 : 50 145 : 03	141 : 36 140 : 39	平 均 141 : 36
50h	850	25	137 : 15 141 : 00	142 : 10 141 : 00	148 : 00 144 : 00	141 : 12 143 : 50	140 : 40 143 : 15	平 均 142 : 12
100h	850	25	>98 : 15 152 : 35	91 : 05 144 : 20	91 : 45 147 : 15	152 : 35 >154 : 05	>154 : 05 >154 : 05	平 均 >134
试样编号	试验温度 °C	试验应力 公斤/毫米 ²	持 续 时 间, 小 时 : 分					
			技 术 条 件 规 定 ≥ 40 小 时					
0h	800	52	137 : 50 70 : 00	129 : 43 121 : 40	111 : 40 135 : 50	132 : 15 116 : 53	122 : 40 70 : 00	平 均 114 : 47
50h	800	52	141 : 00 138 : 50	129 : 00 130 : 00	133 : 00 140 : 00	70 : 00 138 : 50	138 : 30 136 : 25	平 均 129 : 37
100h	800	52	64 : 00 99 : 25	7 : 35* 4 : 30*	123 : 20 135 : 25	142 : 50 54 : 45	43 : 15* 12 : 55*	平 均 103 : 12

*试样断口有铸造缺陷。

表 5 K14合金高温持久性能

试样编号	试验温度 °C	试验应力 公斤/毫米 ²	持 续 时 间, 小 时 : 分					
			技 术 条 件 规 定 ≥ 40 小 时					
100h	850	25	114 : 35 111 : 55 114 : 35 >125 : 15	120 : 15 103 : 40 >120 : 15 >122 : 45	112 : 10 108 : 45 117 : 00 >117 : 00	110 : 15 108 : 50 >110 : 15 116 : 15	>112 : 10 116 : 15 122 : 45 125 : 15	平 均 120

(2) 高温瞬时机械性能*见表6。

表 6

试样编号	试验温度 °C	σ_b 公斤/毫米 ²	δ %	ψ %
技术条件规定	800	≥ 80	2	3
0h	800	103.94	3.132	5.54
50h	800	99.45	2.44	4.75
100h	800	100.5	2.88	4.623

* 瞬时机械性能系45个试样的性能平均值。

3. 气体含量 见表7

表 7

试样编号	N ₂ , %
0h	0.0010
50h	0.0040
75h	0.0022
100h1	0.0012
100h2	0.0010
100h3	0.0011
100h4	0.0013

4. 夹杂物含量 见表8

表 8

试样编号	夹杂物含量, %				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	总量
0h	0.0017	0.0012	0.0014	0.0001	0.0044
100h	0.0019	0.0028	0.00085	0.0011	0.0068

5. 晶粒度

我们将100% K3合金新料、50% K3合金回炉料、75% K3合金回炉料以及100%的 K3合金回炉熔炼的母合金锭重熔浇注涡轮型发动机Ⅱ级涡轮叶片, 叶片经酸洗检查晶粒度, 结果见表9。

表 9

试样编号	晶粒度级别	附 注
0h	3~4	有柱晶
50h	3	有柱晶
75h	3	有柱晶
100h1	1~2	
100h2	1	
100h4	1~2	

6. 显微疏松

试验采用不同配比的K3合金回炉料锭, 重熔浇注涡轮型发动机Ⅱ级涡轮叶片, 检查叶身、榫头、叶身R转接处显微疏松, 检查结果见表10。

表 10

试样编号	显微疏松级别		
	叶 身	榫 头	叶身R转接处
0h	<1	<2	<1
50h	<1	<2	<1
100h1	0.5~1	0.5~1	0.5~1
100h2	0~0.5	0	1~2
100h3	0.5	0.5~1	1.5~2

五、结 论

1. K3合金回炉料的化学成分、杂质、气体含量、显微疏松等在精铸工艺稳定的情况下, 随着回炉料数量和回炉次数(但一般不应超过四次)的增加, 没有明显的差异, 仅叶片的晶粒度变细, 夹杂物略有增加。

2. 100% K3合金回炉料和K3合金新料的高温持久和高温瞬时机械性能相当, 前者略低于后者, 但均大大超过技术条件规定。

3. 要确保回炉料的性能等, 必须严格控制熔炼工艺(如真空度、漏气率、精炼温度和时间等), 严格控制回炉料的污染。回炉料必须在真空中熔炼成母合金锭, 方能用来重熔浇注叶片。

4. 涡轮型发动机Ⅰ、Ⅱ级涡轮叶片和Ⅰ级导向等六种叶片使用50% K3合金回炉料, 在精铸工艺稳定的情况下, 所制造的叶片的质量是安全可靠的。

