

# 航空用优质高温合金锭制造技术的研究

Research on Manufacturing Technology of Superally  
Ingots with Premium Quality

桂忠楼, 吴昌新, 孙传棋, 李其娟, 戴修彦 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

GUI Zhong-lu, WU Chang-xin, SUN Chuan-qi, LI Qi-juan, DAI Xiuyan  
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 研制了航空用优质高温合金锭的制造工艺 (BIAM 优质工艺), 显著地降低了合金中的气体和有害杂质含量, 提高了铸锭表面质量和断面质量, 使合金性能大幅度提高。用该工艺生产出的合金锭的气体 and 有害杂质含量、表面质量和断面质量均达到了国外同类产品的航空用优质水平。

**关键词:** 高温合金; 合金锭; 熔炼技术

中图分类号: TG132.3+2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 03-0020-04

**Abstract:** Manufacturing technology of aerospace superalloy ingots with premium quality (BIAM Technology) have been researched, which significantly lowers the gas and detrimental elements content, improving its surface quality, and simultaneously improves the creep property of superalloy. The level of the gas and detrimental elements content and surface quality of the superalloy ingots manufactured by BIAM Technology have reached the premium quality grade of similar superalloy ingots abroad.

**Key words:** superalloy; ingot; melting technique

发动机涡轮前温度的不断提高主要得益于涡轮叶片材料性能的提高、熔模精铸技术的进步、叶片结构设计的改进和涂层技术不断发展。其中, 合金性能提高的一个重要因素就是合金纯净度的不断提高, 这当然与熔炼技术密切相关。众所周知, 合金中氧、氮、硫会形成非金属夹杂  $Al_2O_3$ , (Ti, Ta) C/N, (Ti, Ta) $\cdot$ S, 晶粒缺陷会在这些夹杂物上形成<sup>[1]</sup>。氧、氮、硫形成的非金属夹杂是主要的疲劳源, 它们的数量、大小和形态对合金的性能有明显的影响<sup>[2]</sup>。因此, 合金的纯净度是母合金制造水平的主要标志之一, 目前普遍认为<sup>[3]</sup>, 要获得纯净的高温合金应该从以下几点入手: 采用纯净的原材料; 采用合适的控制精炼温度、精炼时间以及真空度, 以便有效的去除氮、氧; 采用陶瓷过滤器。

近年来, 航空材料研究院 (简称 BIAM) 致力于高温合金锭生产研究, 从合金锭生产的各个环节进行研究, 结合不同合金要求, 研究出了一套优质高温合金锭的生产制造技术 (简称 BIAM 优质工艺), 采用该技术制造的高温合金如定向合金 DZ4, DZ22B, 金属间化合物基合金 IC6 和单晶合金 DD3, 其气体含量和杂质含量均已达到了国外优质航空型母合金的质量水平, 并已用于制造我国先进航空发动机涡轮叶

片, 采用该技术制造的 IN713LC 和 738LC 合金锭, 其气体含量和杂质含量均远远低于国外用于制造发动机的母合金技术条件要求, 并出口国外。所有合金锭的表面质量和断面质量均满足或接近国外同类高温合金锭的要求。

## 1 研究方法

在容量为 500kg 的 IS65V8 型真空感应炉和容量为 1000kg 的 VIM1000 型真空感应炉中采用 BIAM 优质工艺, 熔炼目前国内用于航空发动机涡轮叶片制造所用的 DD3 单晶合金, DZ4, 0DZ22B 定向合金, IC6 金属间化合物基合金以及出口国外的 IN713LC 和 IN738LC 等轴晶合金。所选用的原材料符合 HB/Z131—1988 的要求。通过分析合金的气体 and 杂质元素的含量以及合金锭的表面质量和断面质量, 来判断合金锭的质量。

## 2 结果和讨论

### 2.1 母合金锭气体和杂质元素的含量

表 1 是国外某些高温合金的技术条件对气体 and 杂质的要求及 BIAM 优质工艺熔炼的几个主要母合金的气体 and 杂质含量。

表 1 国外技术条件规定的气体与杂质含量和本工艺熔炼的合金气体和杂质含量

Table 1 The content of gas and detrimental elements required in abroad's perally specifications and in the ingots manufactured by BIAM Technology

合金牌号	国外一些高温合金的技术条件对气体和杂质的要求，不大于× 10 <sup>-6</sup>													备注
	N	O	P	S	As	Bi	Ag	Pb	Sb	Se	Sn	Te	Tl	
NWC8Ta6AK (CMSX-2)	12	10	50	20	5	0.3	5	2	5	1	15	0.3	0.3	见文献 [4]
CMSX-6	16	12		20	5	0.3	2	2	3	0.5	25	0.3	0.3	见文献 [5]
NW12KCA THf (DZ22B)			150	100		0.3		5		1		0.5	0.5	见文献 [4]
ЖС26У-ВМ	9	6	150	100		5		10						见文献 [6, 7]
NC13ADb.c (IN713LC)			150	150		2		10						见文献 [4]
IN713LC	25	25	150	150		0.5	5	5		3	25	0.5	1	见文献 [8]
IN738LC	25	25	150	150		0.5	5	5		3	25	0.2	1	见文献 [8]
N738LC	50	15	50	30	10	0.1	0.4	0.5	3	1	20	0.5	0.2	见文献 [9]
	BIAM 优质工艺熔炼的合金气体和杂质元素含量/× 10 <sup>-6</sup>													
DD3	5.5	5.3	100	10	10	0.3	1	3	3		5.3			4 炉平均值
IC6	< 5	< 10	< 150	10		0.3		2	2	2	12	0.5	0.4	S 和 P 为 32 炉、其它为 12 炉值
DZ22B	8	7	150	10		0.3		2		1		0.5	0.3	4 炉平均值
DZ4	6	8	150	10	10	0.3		2	2		2			As、Bi、Pb 和 Sn 为 7 炉、N 和 O 为 26 炉、其它为 30 炉平均值
IN713LC	9.5	6	110	15	6	0.3	1	2	2	1	2	0.5	0.2	2 炉平均值
IN738LC	16	10	100	10	10	0.2	0.4	0.9	2	1	2.5	0.5	0.4	2 炉平均值

从表 1 可以看出，采用 BIAM 优质工艺熔炼的单晶合金 DD3 合金中的气体和杂质含量符合法国透博梅卡公司用于制造阿赫耶发动机涡轮叶片的单晶合金 NWC8Ta6AK (CMSX-2) 的技术要求和美国单晶合金 CMSX-6 的技术要求；定向合金 DZ4、DZ22B 合金和金属间化合物基 IC6 合金的气体 and 杂质含量，符合法国透博梅卡公司用于制造阿赫耶发动机涡轮叶片的合金 NW12KCA THf (DZ22B) 和技术要求，低于俄罗斯定向合金 ЖС26У-ВМ 的含量，并且都符合上述国外单晶合金的技术要求；另外，优质工艺熔炼的 IN713LC、IN738LC 合金的气体含量和杂质含量远远低于英国 DONCASTERS 母合金技术条件规定的含量和美国 TELEDYNE PICCO 公司的该合金订货技术条件规定的含量。

熔炼过程是一个十分复杂的热工艺过程，任何一个环节都对合金的纯净度有影响

要获得纯净的高温合金，除了采用优质原材料以外，还需对原材料进行特殊处理。

设备的漏气率大小对合金的纯净度影响很大。如

果设备的抽速为 50000L/s，生产过程中真空度因漏气从 1.33Pa 降到 2.67Pa 并保持工作，这相当于 0.7g [N] /s 进入熔炼室，假设 700Kg 合金液将进入的氮 100% 吸收，则相当于 1× 10<sup>-6</sup> [N] /s 的吸收率。因此，设备的密封程度对合金中的气体含量影响是很大的。

真空度是真空感应熔炼中十分重要的因素。真空度越高，脱氧越容易，[O] 含量越低；去气作用越强，[N]、[H] 含量越低；金属更容易蒸发，合金中对热强性有不利影响的低熔点元素更容易蒸发，因此其含量越低。但是，真空度越高，坩埚反应越强；合金中某些元素大量蒸发，合金成分控制难度增大；另外，抽真空时间较长，生产周期增长。

精炼温度和精炼时间的控制对真空熔炼也是十分重要的。长的精炼时间和高的精炼温度，有利于降低合金中的气体和杂质含量，这有利于提高合金的纯净度；但是，这会加剧坩埚反应，反而降低了合金的纯净度。因此，合适的精炼时间或温度是十分重要。

过滤不仅能有效地去除氧化渣，而且能使合金平稳流入锭模中，减少浇注过程裹入合金锭中的气

体<sup>[13]</sup>，但是，过滤器等耐火材料如果没有很好的处理，不仅达不到上述效果，反而会起到相反的作用。

耐火材料如中间包等是生产过程中必不可少的，但也吸附了大量的气体，因此生产使用的耐火材料也必须进行适当预处理。

另外，电磁搅拌能有效加速气体和杂质的去除，但是电磁搅拌冲刷坩埚壁，会将坩埚壁上的氧化渣带入钢水中，因此合适的电磁搅拌也是十分重要的。

总之，BIAM 通过严格控制上述的各种因素，特别是严格控制设备的漏气率，在一定的真空度下，按照合适的精炼温度和精炼时间，配合有效的挡渣过滤和电磁搅拌，对耐火材料进行适当的预处理，从而使合金中的气体和杂质含量达到很低的水平。

## 2.2 表面质量和断面质量

表面质量和断面质量是合金锭的主要指标之一，BIAM 对合金锭的表面质量和断面质量也进行了研究。图 1 是采用 BIAM 优质工艺制造母合金锭，发货合金锭几乎没有一次缩孔，将 7 炉 DZ4 定向合金锭的每根锭子切割成 4 根，统计合金锭二次缩孔，二次缩孔一般较小，最大直径为 6mm，如图 2 所示。表 2 为

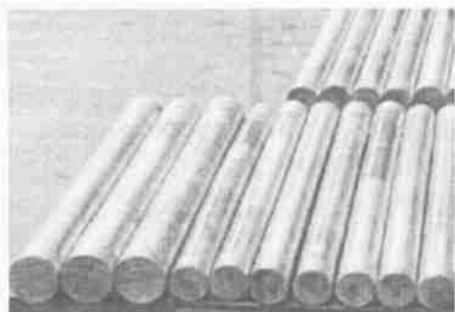


图 1 优质工艺制造的合金锭表面质量和断面质量

Fig. 1 The surface quality of ingots manufactured by BIAM Technology

BIAM 优质工艺制造母合金锭的表面质量和断面质量和国外母合金技术条件规定的对比。

由图 1、图 2 和表 2 可以看出，BIAM 优质工艺制造的合金锭表面质量和断面质量满足国外相关技术条件。

合金锭表面质量与锭模的内表面状态、浇注温度、锭模预热温度等有密切关系。锭模内部表面越光滑，合金锭表面质量；浇注温度和锭模预热温度越高，冷隔等表面缺陷越少，但同时会增大漏钢几率和合金与锭模熔接在一起的机率，一旦合金锭和锭模熔接结在一起，则脱模困难，而且会降低表面质量。当浇注温度、锭模预热温度过高时，会增大一次、二次缩孔，反而降低合金锭断面质量。另外，保温冒口对于提高

断面质量也很重要。为了使合金锭的表面质量达到满意程度，必须采用特殊的表面处理技术。



图 2 DZ4 合金锭最大二次缩孔

Fig. 2 The maximum secondary shrinkage cavities of DZ4 alloy ingot manufactured by BIAM Technology

总之，BIAM 从锭模的内表面状态、采用合适的浇注温度、锭模预热温度、保温冒口技术和合金锭表面处理技术着手，使合金锭的表面质量和断面质量达到了优于国外或满足国外同类合金锭的技术条件水平。

## 2.3 合金性能

图 3 是采用 BIAM 优质工艺熔炼的目前应用量较大的金属间化合物基 IC6 合金的在其它条件不变情况下的持久性能。本工艺熔炼的 19 组数据与该合金试验室研究阶段中的数据相比可以看出，采用本工艺熔炼的合金，高温持久性能明显提高，是技术指标的 3~12 倍，最高性能是合金研制阶段的 2.4 倍，平均性能是研制阶段的 1.55 倍，这无疑要归功于母合金纯净度的提高。

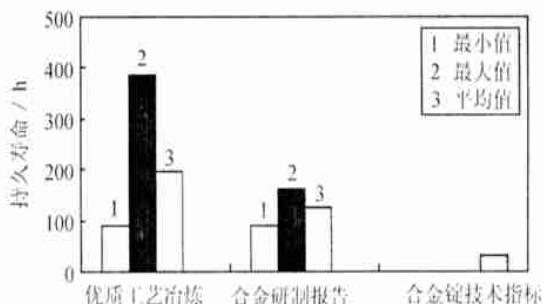


图 3 IC6 合金 1100 °C / 90 MPa 的持久寿命对比

Fig. 3 The comparison of creep properties of alloy IC6 at 1100 °C / 90 MPa

总之，BIAM 优质工艺就是严格控制设备的漏气率，在一定的真空度下，按照合适的精炼温度和精炼时间，配合有效的挡渣过滤和电磁搅拌，对耐火材料

进行适当的预处理,从而使合金中的气体和杂质含量达到很低水平;考虑到锭模的内表面状态,采用合适的浇注温度、锭模预热温度、保温冒口技术和合金锭表面处理技术,从而使合金锭的表面质量和断面质量优于国外或满足国外同类合金锭的技术条件要求;

由于优质工艺熔炼的合金纯净度提高,从而使合金的性能也明显提高。另外,DZ4合金已大批量用于现役航空发动机,DD3,DZ22B,IC6均已在航空发动机中得到应用。因此可以说,采用BIAM优质工艺熔炼的合金已达到了优质航空型的水平。

表 2 BIAM 优质工艺制造的合金锭表面质量和断面质量和国外某些母合金技术条件的规定

Table 2 The surface quality and the requirements in abroad specifications and manufactured by BIAM Technology

表面质量和 断面质量	表面质量		断面质量	备注
	洁净程度要求	表面缺陷要求		
BIAM 优质工艺熔炼的合金锭	所有的锭子都经过打磨或车去铸造表面;锭子表面干净,没有任何污染如油迹、赃物、水迹、氧化膜和锈迹。	锭子表面没有冷隔、飞边、裹进或粘着的氧化夹渣、热裂、针孔缩孔、裹进外来金属或锭模材料。 允许用局部磨清除表面不深的缺陷。	所有的锭子几乎没有一次缩孔(即使个别锭子有一次缩孔,其最大直径也小于 5mm)	
俄罗斯铸造高温合金合金锭标准	毛坯表面不允许有夹渣和非金属夹杂(氧化膜)、外来金属和陶瓷夹杂以及增大毛坯直径的铸瘤	表面允许有冷隔、洁净的砂眼和氧化色;允许用局部或全面打磨清除表面较深的缺陷(从实际尺寸算起深度不大于 15mm)。	没有污染的收缩缩孔存在不作为判废的标准	见文献 [10]
美国 TELE-DYNE PICCO 公司合金锭标准	所有的锭子应进行无心磨,不允许有喷砂、喷丸和铸造表面;锭子表面必须干净,没有任何污染如油迹、赃物、水迹、氧化膜和锈迹。	不允许有下列缺陷: 冷隔、飞边、表面有裹进或粘着的氧化夹渣、热裂、针孔缩孔、过度研磨、裹进外来金属或锭模材料	一次缩孔的直径必须测量,当锭子直径为 $\Phi 63.5 \sim 82.5$ 时,一次缩孔最大直径为 9.5; $\Phi 82.5 \sim 108$ 时,一次缩孔最大直径为 12.7;锭子端头一次缩孔的直径超过要求值时,必须切掉,直到满足要求为止。一次缩孔直径的要求不适用于二次缩孔。	见文献 [8]

3 结论

综合考虑母合金熔炼生产过程中的各个因素制订和实践的 BIAM 优质工艺生产的合金锭,在气体和杂质含量、在航空发动机中的应用情况以及表面质量和断面质量等方面均已达到优质航空型的水平。

参考文献

[1] Cary l Ericks n, P lycrystalline Cast S perall ys. Metals Handb k 10th editi n , 1990, 1: 981—994.

[2] K Harris, G L Ericks n, R E Schwer. Directi nally S lidified and Single S perall ys [ J ] . Metals Handb k 10th editi n 1990, 1: 995—1006.

[3] 荣科,殷克勤. 航空发动机用铸件的高温结构材料发展现状. 铸造高温合金论文集 [ C ] . 北京: 中国科技出版社, 1993 年 .

[4] 涡轴 8 用高温合金标准汇编. 中国南方航空动力机械公司、航空工业总公司和航空材料热工艺标准化归口单位, 1994 年 .

[5] K. Harris, et al. USP 4721540, 1988.

[6] 俄罗斯 ЖС6У– ВИ 和 ЖС26У– ВИ 合金技术条件, 编号: ТУ 1 – 595– 2– 420—92.

[7] В В 谢多洛夫. 俄国镍基铸造高合金的理论和实践. 北京航空材料研究院翻译, 1997.

[8] 美国 TELEDYNE PICCO 公司合金锭标准, 1986.

[9] 英国 DONCASTERS 公司 IN738LC 合金锭技术条件, 2000.

[10] 俄罗斯航空材料标准译文集. 航空材料热工艺标准化归口单位, 1996, 3.

[11] 韩雅芳. 铸造 Ni3Al 基合金 IC6 及其应用研究报告. 北京航空材料研究院, 1996.

[12] 北京航空材料研究院标准. Q/6S1053—96, IC6 合金锭, 1996.

[13] Jay M rris, La rie Str m. REDUCED OXIDE FORMATION SIMPLY by REDUCING THE REYNOLDS NUMBER with RETICULATED CERAICS, 43rd Ann al Technical Meeting f the Investment Casting Instit te, Dallas TX, 1995 .

收稿日期: 2001-09-21; 修订日期: 2002-01-16  
作者简介: 桂忠楼 (1963-), 男, 汉, 研究员, 主要从事真空熔炼方面的研究, 联系地址: 北京 81 信箱 78 分箱 (100095)。