

# 7050合金波音锻件用铸锭铸造工艺研究

段玉波 唐剑 黄平 杨荣东 刁文武

**【摘要】**通过严格控制波音7050合金 $\varnothing 550\text{mm}$ 铸锭的化学成分和熔铸工艺,解决了铸锭成型极易产生裂纹的问题,获得了小于一级晶粒度的细小晶粒和达到双一级要求的优良冶金质量,锻件探伤合格率为100%,使波音7050合金锻坯生产实现国产化。

**关键词:**波音7050合金  $\varnothing 550\text{mm}$  成分控制 熔铸工艺 铸锭成型 冶金质量

## Study on Foundry Process of 7050 Alloy Ingot Used for Boyin Forging

DUAN Yu-bo TANG Jian HUANG Ping YANG Rong-dong DIAO Wen-wu

**Abstract:** With Control the composition and melting & casting process of Boyin 7050 alloy  $\varnothing 550\text{mm}$  ingot strictly. Resolved the problem of form of ingot that crack easily in or after the casting process. The quality of ingot can be gained finally with crystal grain fineness which less than one grade and meritorious metallurgical quality up to double one grade. Percentage of acceptability detecting is up to 100%. It makes it homemade a reality that product the 7050 alloy ingot used for Boyin forging.

**Keyword:** Boyin 7050 alloy;  $\varnothing 550\text{mm}$ ; composition control; melting & casting process; ingot forming metallurgical quality

### 前言

随着铝加工技术的日益发展,对用于航空、航天的铝材的质量要求越来越高。目前的趋势朝着高纯、高强度和高韧性方向发展,不仅要求高性能,也要求化学成分高纯度。因此,对合金材料的杂质尤其是Fe、Si的控制范围越来越严。

广泛用于生产飞机起落架等受力件的波音7050合金,由于要求其具有较高的抗压强度、抗冲击性和韧性等综合力学性能,因而对材料的化学成分纯洁度、冶金质量等要求非常严格。其Fe、Si控制含量( $\text{Fe} \leq 0.15\%$ ,  $\text{Si} \leq 0.12\%$ )远低于7075普通合金,铸锭要求一级晶粒度,氢含量控制在 $1.5\text{ml/kg}$ 以下,锻坯必须100%A级探伤,要达到这些要

求,难度极大。

由于波音7050合金铸锭Cu、Zn元素含量高,Fe、Si含量低,铸锭规格较大,其铸造成型性很差,裂纹倾向性比普通7050合金大,极易在铸造时产生裂纹。同时,由于成型困难,给铸锭冶金质量控制带来不利影响。由于熔体流动过程中的二次污染,也容易产生氧化膜、探伤废品。因为含有Zr,容易使Al-Ti-B晶粒细化剂中毒,造成晶粒粗大和出现羽毛状晶。在试制过程中,着重研究波音7050合金的化学成分控制、铸锭成型和冶金质量控制等问题。

### 1 试制工艺

#### 1.1 化学成分设计

由于波音7050合金的铸造成型性很差,因此将

段玉波,等.西南铝业(集团)有限责任公司熔铸厂,401326 重庆  
收稿日期:2000-10-19

Si含量控制在 $\leq 0.04\%$ 的很低范围,炉前将Fe补到 0.12%~0.13%。化学成分见表1。

表1 波音7050合金的化学成分(质量分数)

%

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	单个
标准	0.12	0.15	2.0-2.6	0.10	1.9-2.6	0.04	-	5.7-6.7	0.06	0.08-0.15	0.05
内标	0.04	0.13	2.00-2.60	0.08	2.20-2.5	0.04	-	6.00-6.50	0.05	0.10-0.13	0.05
配料			2.3		2.4			6.3		0.11	

## 1.2 原材料的选择

由于要求波音7050合金的Si、Fe以及Cr、Mn等杂质元素的含量低,因此配料时必须选用杂质元素含量低的A199.7及以上的专用铝锭和不超过50%的同种合金一级大块废料,并保证原材料的清纯度。

## 1.3 工艺流程

原料验收→配料→熔炼合金化→炉前化学成分快速分析→炉内处理、氩精炼静置→Al-Ti-B晶粒细化→陶瓷过滤、旋转喷头除气(HDA快速测氢),化学成分最终分析→铸锭成形→铸锭均匀化处理→锭坯加工→金相检验→锭坯验收

晶粒细化处理是采用熔体倒炉时在流槽加入Al-Ti-B块和铸造时在旋转除气装置前的流槽均匀加入Al-Ti-B丝的方法进行的。在线处理装置简图见图1。

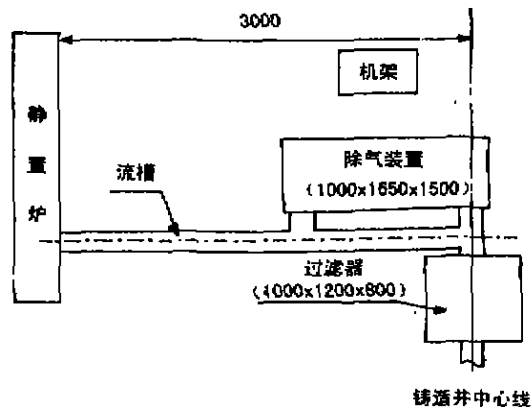


图1 在线处理装置平面布置简图

采用同水平铸造,供流后及时封闭各落差点,减少熔体的二次污染。铸造工艺参数见表2。铸成 $\varnothing 550\text{mm}$ 圆锭。

本试验共生产了六个熔次,除4-711熔次外,其余熔次进行变速铸造,即铸造开头和收尾速度采用下限,铸造过程中速度采用上限。

## 1.4 铸锭低倍检验

在所有铸锭上切取试片进行低倍检验,并在试片的边部和中心部位分别取样观察晶粒度。

表2 铸造工艺参数及铸锭成型情况

熔次	铸造温度 /℃	冷却水压 /MPa	铸造速度 /mm·min <sup>-1</sup>	铸锭成型情况
4-711	760	0.038	18.8	收尾时-1横裂,-3中心裂纹,-2未裂
4-712-1	755	0.030	18	开头未干成
4-712-2	760	0.038	*	-1,-2未裂,-3收尾时横裂
4-713	760	0.046	*	-1,-2,-3未裂
4-718	745	0.042	*	-1横裂,-2,-3未裂
4-810	745	0.040	*	-1,-2,-3未裂
4-811	755	0.040	*	-1,-2,-3中心裂纹

\* 18~22mm/min范围内变速铸造。

## 2 试验结果

### 2.1 铸锭成型情况

从表2可以看出,波音7050合金铸锭的铸造成型性很差,有很大的裂纹倾向性。铸造温度超过755℃以后,铸锭裂纹倾向增大。铸造温度控制在740~750℃范围内有利于铸锭成型。除4-711熔次外,其余熔次均采用变速铸造,变速铸造对降低铸锭的裂纹倾向是有利的。减小冷却水压可以降低裂纹倾向,一般控制在0.038~0.042MPa较好。

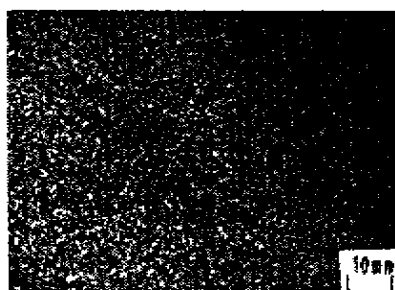
### 2.2 铸锭检测结果

从表3可以看出,波音7050合金铸锭毛料多数有边部裂纹,其深度在15~20mm范围内,可以通过车皮,车掉这些边部裂纹。所有铸锭都达到了一级疏松要求,而且没有光晶出现。氧化膜检测,除

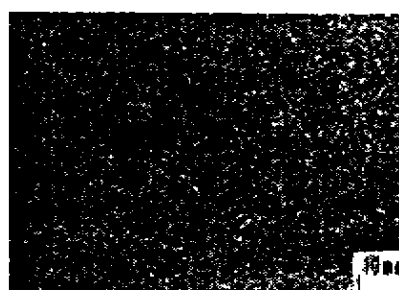
4—711和4—713熔次氧化膜合格率只有50%外,其余熔次(不含4—811)的氧化膜合格率都达到了100%。熔体的氢含量检测结果都小于1.5ml/kg,满足波音锻件的要求。铸锭锻造后的锻件经过探伤检测100%合格。

表3 铸锭检测结果

熔次	铸锭毛料数	每千克金属的氢含量 /ml	低倍检测	氧化膜检测	毛料合格数	毛料合格率 /%
4-711	2	1.43	2-1,2,3合格	2-3不合格,2-2合格	1	50
4-712	2	1.14	1-1边裂深15mm 2-2边裂深20mm 1-2,2-1合格	1-3,2-3合格	2	100
4-713	6	1.02	1-1,1-3,2-1, 2-3,3-2,3-3裂边 深15~20mm 1-2,2-2,3-1合格	1-3,2-3,3-3不合格 1-2,2-2,3-2合格	3	50
4-718	4	1.33	2-1,2-2, 3-1,3-2裂边 深15~20mm	2-3,3-3合格	4	100
4-810	6	1.19	2-1,2-2、边裂 深15mm 1-1,1-2,3-1,3-2合格	1-3,2-3,3-3合格	6	100
4-811	0				0	



a边部



b中心部位

图2 7050合金铸锭晶粒度

图2是7050合金铸锭试片的边部和中心部位的晶粒度照片。可以看出,7050合金的晶粒非常细小、弥散,晶粒度都小于一级。铸锭中心部位的晶粒度比边部的略大一些。主要原因是铸锭中心部位的冷却强度比边部略小一些,因而晶粒要稍大,但仍然小于一级晶粒度。

### 3 分析讨论

#### 3.1 7050合金波音锻件的化学成分控制

##### 3.1.1 主要强化元素成分控制

7050合金主要强化相是 $\eta$  ( $MgZn_2$ )、T ( $Al_2Mg_3Zn_3$ )和S ( $Al_2CuMg$ )。和7075合金相比,7050合金中的强化元素Zn和Cu的含量均有增加,而Mg含量基本不变。具有高的Zn/Mg比,以保证合金具有较高的强度<sup>[1]</sup>。Cu含量较高,除Cu本身的固溶强化作用外,还改变了合金的沉淀相相态结构,使时效组织更为弥散均匀,即提高了强

度,也改善了塑性,同时提高了合金抗应力腐蚀开裂的能力<sup>[2]</sup>。

### 3.1.2 微量元素的选择及含量控制范围

微量的Cr、Mn、Zr等元素强烈提高合金的再结晶温度。这些元素细小、弥散的金属间化合物,不但能够阻止晶粒长大,而且能够提高合金的抗应力腐蚀能力。但是这类元素尤其是Cr和Mn元素增加了合金对淬火冷却速度的敏感性。用Zr代替Cr或Mn可以增加合金的淬透性,因为Zr加速固溶体分解的作用较小,故Zr能够降低合金对淬火速度的敏感性<sup>[2]</sup>。用Zr代替Cr或Mn的另一个原因是,Cr或Mn与Mg、Cu分别形成 $Al_{12}Mg_2Cr$ 和 $Al_{20}Cu_2Mn_3$ 化合物,Cr和Mn化合物会使强化元素减小,势必增加Mg、Cu元素的含量。而Zr与Al形成 $ZrAl_3$ , $ZrAl_3$ 不含合金强化元素,不会消耗强化元素<sup>[3]</sup>。有关资料介绍Zr含量为0.1%~0.2%时,合金具有高的伸长率和冲击韧性<sup>[4]</sup>。Zr与Al发生包晶反应生成 $ZrAl_3$ ,不但可以细化 $\alpha$ 固熔体晶粒,Zr还可以起固溶强化作用。但当Zr含量超过0.17%时,在铸锭中将形成粗大 $ZrAl_3$ 一次晶金属间化合物,该化合物对合金的塑性和与此有关的其它性能有不利影响<sup>[5]</sup>,故将Zr含量控制在0.15%以下。

### 3.2 降低铸锭裂纹倾向,提高铸锭的成型性

波音7050合金铸造时主要出现的中心裂纹属于热裂纹,横向裂纹属于冷裂纹,二者形成机理有所不同。

热裂纹形成机理通用的是强度理论。该理论认为,所有合金在固相线温度之上的固液区内,都存在一个强度极低、延伸率极小的脆性温度区间,合金在这个区间冷却时,由于收缩受阻而产生的应力如果超过了当时金属的强度,或者由应力而引起的变形超过了金属的塑性,就会导致热裂纹的产生<sup>[6]</sup>。7050合金Zn、Cu含量高,Fe、Si含量低,铸锭规格大,有效结晶区间宽,合金在此区间的线收缩大,产生的应力值高;且脆性区塑性极差,因而热裂纹倾向极大。7050合金的冷裂纹主要是由于铸锭塑性低,在大大低于合金固相线温度时铸造应力超过铸锭塑性所允许的程度而产生的。

化学成分中的Fe、Si杂质元素,结晶组织,铸造工艺条件,合金结晶收缩而产生的应力等因素,都对7050合金铸锭的热裂纹和冷裂纹倾向都有重要的影响。

#### 3.2.1 Fe、Si杂质元素的影响

7050合金中Fe和Si是杂质元素,它们会生成针状 $FeAl_3$ 、 $\alpha$  (Al-Fe-Si)、 $\beta$  (Al-Fe-Si)相等杂质相。 $\alpha$ 相呈骨骼形状或枝条状, $\beta$ 相呈针状,这些化合物对合金的塑性有不利影响, $\beta$ 相更为严重<sup>[2]</sup>。因此,为获得高强、高韧性,7050合金必须将Fe、Si杂质控制得非常低。

由于7050合金的(Fe+Si)总量 $<0.65\%$ ,合金在结晶过程中固液区会有一定数量的共晶体。当共晶体数量为3%~5%时,其脆性最大,铸锭的热裂纹倾向最大。当合金中共晶体数量超过5%时,合金的晶界液膜较厚,具有较好的固液塑性。当合金中共晶体数量小于3%时,液相呈孤立夹杂物的形式分布,合金也具有较好的塑性。控制Fe、Si杂质含量比,可以改变共晶或包晶组成物的数量及分布特征<sup>[6]</sup>。当 $Fe < Si$ 时,主要发生共晶反应,生成游离Si和 $\beta$ 相 (Al-Fe-Si);  $L \rightarrow (Al) + (Si) + \beta$  (Al-Fe-Si)。当 $Si < Fe$ 时,主要发生包晶反应,生成 $\alpha$ 相 (Al-Fe-Si);  $L + FeAl_3 \rightarrow (Al) + \alpha$  (Al-Fe-Si)。发生包晶反应,缩小了结晶温度范围,减少了结晶时固液区的共晶量,提高了合金固液区的塑性,从而降低了热裂纹倾向。在 $\alpha$ 相中Si含量较低,Fe/Si(质量)为5.5~2.75; $\beta$ 相中Si含量较高,Fe/Si为2.25~1.6。Fe/Si比越大,生成的 $\alpha$ 相 (Al-Fe-Si),越有利于合金塑性的提高<sup>[7]</sup>,也越有利于降低铸锭的裂纹倾向。但由于7050合金标准要求Fe含量 $\leq 0.15\%$ ,为提高Fe/Si比,只能尽量降低Si含量,考虑到投料成本,一般控制Si含量 $\leq 0.04\%$ ,此时Fe/Si比还可达3~5左右,可得到较多的 $\alpha$ 相。另外还加入少量的Be来提高合金抗裂纹的能力。

#### 3.2.2 细化组织的影响

细化晶粒能提高脆性温度区间的相对延伸率,降低线收缩开始温度,并减小有效结晶区间的线收缩值,从而降低合金的热裂纹倾向<sup>[6]</sup>。

7050合金中的Zr能够细化晶粒,但Zr和Al-Ti-B同时加入铝熔体,其细化效果反而会降低。因为Zr会使Al-Ti-B产生中毒现象。有关资料<sup>[8]</sup>认为,是溶解的Zr原子扩散到 $TiAl_3$ 化合物亚晶格的Ti地点,形成 $(Ti_{1-x}Zr_x)Al_3$  ( $Ti_{1-x}Zr_x$ ) $B_2$ 相。Zr置换了 $TiAl_3$ 和 $TiB_2$ 中的一些Ti,导致它们的晶格参数改变,并且减弱它们的形核(细化晶粒)特征。Zr含量越高,  $(Ti_{1-x}Zr_x)Al_3$ 相 ( $Ti_{1-x}Zr_x$ ) $B_2$ 相含量也越高,从而减少了形核

质点 $TiAl_3$ 和 $TiB_2$ 的含量,导致晶粒粗化。为了减轻Zr对Al-Ti-B中毒作用,增加形核质点 $TiAl_3$ 和 $TiB_2$ 的数量,一方面将Zr按下限0.10%~0.13%控制,另一方面采用同时加入Al-Ti-B块和Al-Ti-B丝的方法,并且适当增加Al-Ti-B的用量,以达到加强晶粒细化的目的。细小的晶粒组织对获得优良的铸锭冶金质量也是十分重要的。

### 3.2.3 工艺参数对裂纹倾向的影响

当铸造速度、温度偏高时,合金脆性区范围增大,固液态塑性降低;铸锭的液穴变深,形状变陡。铸锭中心层收缩受已凝固外层阻碍而产生的径向拉应力增大,使中心裂纹倾向增大。由于7050合金铸锭的热裂纹倾向特别大,因而将铸造速度降得特别低。但是进一步降低铸造速度会增大轴向温度梯度,使轴向拉应力增大,从而增加横向裂纹倾向性。铸造温度也不能控制得太低,否则将对铸锭冶金质量产生不良影响,容易产生氧化膜、夹渣和光晶等冶金缺陷。另外,由于铸造开头和收尾时正常的铸造条件遭到破坏,金属收缩不均匀,很容易导致裂纹产生。故在铸造开头和收尾时速度采用下限,降低合金在结晶区间的线收缩速率,从而减少产生的径向热应力值。冷却水压过大扩大了合金的脆性温度范围,并且使铸锭收缩产生的热应力增大,为降低裂纹倾向,将冷却水压控制在较低的范围之内。

### 3.3 冶金质量控制

波音7050合金冶金质量控制的重点是氧化膜、探伤废品的防治。

氧化膜是铸锭中一种特有的属于非金属夹杂物类型的缺陷。7050合金中主要出现片状氧化膜<sup>[6]</sup>,它是由固态非金属夹杂物或具有氧化表面的气泡疏松所形成的分层。主要是熔体被水分、氢和氧所污染以及熔体在转注过程中二次污染而造成的。因而,首先必须确保熔炼前原材料的清洁度。

在静置炉内用氩气进行炉内除气,并采用先进的旋转喷头除气装置,由于从旋转喷头中喷出的氩气更加细小、弥散,因而除气效率更高、更稳定。并且使用除渣效果良好的进口过滤板进行过滤除渣。另外,由于在线净化装置带有保温装置,减小了熔体在转注过程中的降温。因此,可以将铸造温度由原来770~775℃降为740~750℃,同样能够确保铸造流槽熔体温度达到695~710℃。减少了

熔体温度的波动,既减少了熔体的二次污染,又有利于降低铸锭的裂纹倾向。而且由于降低铸造温度而减少了熔体的吸气量,有利于降低氢含量,从而获得了冶金质量优良的铸坯。

4-711、4-713这两个熔次的氧化膜合格率偏低,其原因可能是因为熔体从流盘经喇叭嘴流入分配漏斗时存在一个落差点,熔体在此处产生冲击和翻滚产生的氧化膜卷入铸锭内。为减少熔体的二次污染,应注意在正常供流后保证分配漏斗中熔体平稳流动。

## 4 结论

4.1 为保证7050合金波音铸锭的成型性和冶金质量,应控制 $Si \leq 0.04\%$ ,炉前Fe补到0.12%~0.13%。合理的铸造工艺参数是铸造温度740~750℃,冷却水压0.035~0.06MPa,18~22mm/min范围内的变速铸造。

4.2 同时使用Al-Ti-B块Al-Ti-B丝进行晶粒细化,使7050合金波音铸锭晶粒度小于一级。

4.3 为防止氧化膜、探伤废品,应注意减少熔体在转注过程中的二次污染,尤其是避免熔体在分配漏斗处的翻滚,使之平稳流动。

### 参考文献

- [1] 刘静安. 航天航空用新型高强高韧性7050铝合金. 铝加工, 1993 (6)
- [2] 编写组. 有色金属及热处理. 北京: 国防工业出版社, 1981
- [3] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册. 中南工业大学出版社, 1989
- [4] 吕杰等. 高强韧铸造铝合金. 铸造, 2000 (2)
- [5] X. H. 科瓦索夫, N. N. 弗里德良捷尔, 韩秉诚等译. 工业铝合金. 北京: 冶金工业出版社, 1981
- [6] 周家荣. 铝合金熔铸问答. 北京: 冶金工业出版社, 1985
- [7] 张静, 彭建, 潘复生. 工业纯铝中的化合物相. 轻合金加工技术2000 (5)
- [8] Ahmed A. Abdel-Hamid. 其他元素对Ti或Ti+B细化铝晶粒效果的影响 (2). 张君尧译. 轻合金加工技术, 1991 (2)

(李编张校)