

Φ-3736

# 废气涡轮 增压器叶片材料

国防工业出版社

# 废气涡轮增压器叶片材料

上海交通大学等 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书包括两篇文章，第一篇《低镍奥氏体铸造耐热钢(731合金)》是介绍一种可在650℃下长期工作的增压器铸造涡轮材料，即731合金。它具有含镍低、不含钴、工艺简单等优点，便于推广使用。文中主要介绍了此合金的成分、性能、铸造参数对合金的组织 and 性能影响，以及合金的熔炼、重熔、焊接新工艺等问题。

另一篇是《船用废气涡轮增压器叶片材料的选择》，文中就废气涡轮增压器的关键——涡轮叶片的选材和工艺问题进行了探讨。介绍了涡轮叶片工作条件、叶片对材料性能要求和国内外叶片选材情况等问题。

本书可供从事柴油机增压器生产、科研的技术人员参考。

## 废气涡轮增压器叶片材料

上海交通大学等 编

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092 1/32 印张3 1/2 73千字

1979年5月第一版 1979年5月第一次印刷 印数：0,001—5,500册

统一书号：15034·1773 定价：0.38元

(限国内发行)

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 一、低镍奥氏体铸造耐热钢 (731 合金).....    | 1  |
| (一) 前言.....                   | 1  |
| (二) 合金的成分.....                | 2  |
| (三) 合金的性能.....                | 11 |
| (四) 铸造参数对合金的组织 and 性能的影响..... | 20 |
| (五) 合金的热处理及长期稳定性.....         | 31 |
| (六) 合金的熔炼及重熔铸造.....           | 48 |
| (七) 合金的焊接.....                | 55 |
| (八) 合金的切削加工.....              | 72 |
| (九) 合金的应用与试车.....             | 72 |
| (十) 参考资料.....                 | 77 |
| 二、船用废气涡轮增压器叶片材料的选择.....       | 78 |
| (一) 前言.....                   | 78 |
| (二) 涡轮叶片的工作条件.....            | 79 |
| (三) 涡轮叶片对材料性能的要求.....         | 82 |
| (四) 国内外增压器涡轮叶片选材情况.....       | 87 |
| (五) 涡轮叶片生产及运行中的故障情况.....      | 96 |
| (六) 涡轮叶片选材及材质控制等问题的探讨.....    | 99 |

# 一、低镍奥氏体铸造耐热钢(731合金)

上海交通大学 上海材料研究所

上海内燃机研究所

## (一) 前 言

采用废气涡轮增压器进行增压,是提高(或在高原地带作为恢复)柴油机功率,减轻单位马力重量、降低燃油消耗和净化废气以减少对大气污染的一项有效措施。从一九五八年我国开展了涡轮增压技术的研究工作,近二十年来,我国增压器已从无到有,从仿制到自行设计制造,取得了很大的成绩。目前以柴油机为动力的舰船、坦克、汽车、内燃机车、电站、工程机械及拖拉机等,均先后采用增压器,它对我国国民经济的发展,起了一定的作用。

为了适应柴油机动力普遍实现增压化和增压技术不断发展的要求,对增压器废气涡轮材料进行研制,实现少、无切削,发展铸造合金,实为重要。我国航空工业应用的镍基铸造高温合金(如K<sub>3</sub>、K<sub>17</sub>、K<sub>18</sub>等)和几种铁镍基铸造高温合金(如GH130B、GH302等)含镍量均较高,而目前应用于制作增压器涡轮叶片的耐热钢,又多数为仿苏的早期牌号材料(ЭИ69、ЭИ388、ЭИ481、ЭИ572等),真正适宜于铸造涡轮叶片特别是整铸径流式增压器涡轮的耐热钢还很少。

根据有关部一九七一年先后下达的研制增压器涡轮铸造耐热合金的任务，上海内燃机研究所、上海材料研究所和上海交通大学三个单位一起，于一九七二年开始，进行了低镍奥氏体铸造耐热钢（以下简称 731 合金）的研制工作，认为，作为增压器涡轮材料的耐热钢，应满足下列要求：

1. 合金成分应考虑含镍少，不含钴，符合我国资源条件；
2. 工艺过程简单，如可用一般铁合金做原料，无需真空熔炼，产品不必经 $1000^{\circ}\text{C}$ 以上的高温热处理，在使用条件下，不需要涂（渗）层保护等；
3. 工艺性能，特别是铸造性能和焊接性能良好，适宜于涡轮精密铸造和涡轮轴的焊接生产；
4. 根据中高参数柴油机增压器的工作条件，即长期工作温度达 $650^{\circ}\text{C}$ ，涡轮旋转线速度达 $350\sim 400$ 米/秒的要求，合金必须具有较好的室温和高温机械性能。

按上述要求，通过小炉试炼和合金基本性能测定，确定了合金成分、产品对象和工艺路线，一九七三年一月，在 200 公斤中频感应炉中，正式炼成第一炉母合金，故定名为 731 合金。

## （二）合金的成分

镍和钴是重要的战略物资，亦是比较稀缺的元素，要求研制少镍无钴的奥氏体耐热钢，必然会考虑到 Fe-Cr-Ni-Mn 系合金，即以锰代镍，但锰对稳定奥氏体的作用不如镍，必须辅之以碳、氮这一类稳定奥氏体能力较强的元素，然后再加入钨、钼、铌、硼等，给予进一步强化。

Fe-Cr-Ni-Mn 系耐热钢的研究和使用，已有三十余年

的历史。含碳较低的钢种，强度往往较低，在提高含碳量后，又容易出现强度和锻造塑性间的矛盾，而对铸造合金来说这方面的矛盾就较少。美国克莱西勒（Chrysler）汽车公司从一九六四年到一九六五年，因汽车燃气轮机涡轮材料的需要而发展起来的 CRM 系列铁基合金，它可在  $800^{\circ}\text{C}$  以上高温下工作，是一种高碳的 Fe-Cr-Ni-Mn 系铸造耐热钢，它的机械性能较高，而含镍量较低，不需要真空熔炼，我们根据洋为中用的原则，参考 CRM-6D 合金的成分，进行 731 合金的研制工作，731 合金的名义成分及成分范围如表 1-1 所示。

### 1. 合金元素的作用

（1）碳 碳是碳化物强化相的主要形成元素，碳和铌等形成高度稳定的 MC 型碳化物或碳氮化物，又与铬等形成  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  型碳化物，要求碳化物在奥氏体基体中呈半连续地细密分布，以获得较高的强度和一定的塑性。731 合金的碳份定为 1.0%，碳份过高，组织中莱氏体多，碳化物容易连成一片对塑性不利；碳份过低，强化相不足，持久强度降低。对铸造合金，含碳高的流动性好，而且碳也是强的稳定奥氏体元素。

（2）铬 合金抗氧化或抗燃气腐蚀的能力，靠铬来保证。含铬量为 20% 的镍基高温合金在  $800\sim 900^{\circ}\text{C}$  高温下工作，抗氧化和耐腐蚀性能较好。731 合金含铬量亦为 20%，虽然有百分之几的铬和碳化合，但由于增压器涡轮工作温度较低，故抗氧化和耐腐蚀性能将不成问题。铬在奥氏体中亦起一些强化作用，但过高的铬会使奥氏体不稳定，故含铬量以 20% 为宜。

## (3) 镍与锰

研制731合金时, 要求低的含镍量, 但由于合金中还含有较多使奥氏体不稳定的元素, 且含镍量低于3~5%时, 加氮后铸件易出现气孔, 故认为5%的含镍量是必要的。至于锰, 它的作用并不完全在于稳定奥氏体, 而在于和铬一起提高合金中氮的溶解度, 不过高碳的731合金, 加氮量不多, 故含锰量不必过高, 亦定为5%。

(4) 钨、钼与铌 钨、钼固溶在耐热钢的奥氏体基体中有效地提高高温强度, 它们也出现在碳化物中。

表1-1 731合金的成分

| 合金元素          |                   | C            | Cr    | Ni          | Mn          | W           | Mo          | Nb            | Si          | N             | B     | Fe |
|---------------|-------------------|--------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------|----|
| 名义成分<br>(重量%) | 731A <sup>①</sup> | 1.0          | 20.0  | 5.0         | 5.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0           | 0.60        | 0.15          | 0.005 | 余  |
|               | 731B              | 0.8          |       |             |             |             |             | 0.7           |             |               | 加入量   |    |
| 成分范围<br>(重量%) | 731A              | 0.9~<br>1.1  | 18~21 | 4.5~<br>5.5 | 4.5~<br>6.0 | 0.8~<br>1.2 | 0.8~<br>1.2 | 0.85~<br>1.15 | 0.3~<br>1.0 | 0.10~<br>0.20 | 0.005 | 余  |
|               | 731B              | 0.75~<br>0.9 |       |             |             |             |             | 0.55~<br>0.85 |             |               | 加入量   |    |

①731A、731B两种成分, 均能满足中高参数增压器涡轮的工作要求, 731A强度较高, 731B冲击韧性较好, 用户可根据增压器的具体要求予以选用。



而铌则较多地和碳生成 MC 碳化物或碳氮化物，所以铌的强化作用，在高碳含氮的 731 合金中将更为显著。据报道耐热钢特别是多元合金化的耐热钢中，加入 1~1.5% 铌，可提高持久强度，同时也提高塑性。731 合金的钨、钼、铌含量均为 1%。

(5) 硅 731 合金在大气中造渣熔炼，硅是常用的脱氧元素，重熔铸造时也用硅钙作脱氧剂，故合金含硅量范围要较宽。统计了性能较好的十炉母合金（每炉 200 公斤）其含硅量为 0.36~0.79%，也统计了性能较好的四十炉小炉（每炉 6~8 公斤）熔炼或重熔的情况，其含硅量为 0.32~0.97%。硅对高温合金来说，降低延伸性及高温持久性能，但某些铁基或铁镍基高温合金要求一定的含硅量，以增进焊接性能及抗氧化性能。介绍  $Y_{A_2}B-C$  合金的有关资料中谈到：硅的存在使  $M_{23}C_6$  碳化物不易集聚，所以  $Y_{A_2}B-C$  合金的含硅量在 1% 左右。731 合金硅的成分范围定为 0.3~1.0%，为了满足返回料多次重熔加硅钙脱氧的要求，母合金的含硅量应控制在中下限范围内。

## 2. 成分调整试验

为了研究 731 合金的成分，对不同炉次在熔炼过程中都测试了各种成分，现选其中较典型的结果列于表 1-2。从表 1-2 可以得出下列几点结论：

(1) 氮的作用是明显的，用九炉 731 A 合金与八炉无氮的 731 A 合金作比较，前者的高温抗拉和室温抗拉强度比后者高出 2~3 公斤/毫米<sup>2</sup>。

(2) 提高冲击韧性的研究。731 A 合金的冲击韧性  $a_k$  较低，室温  $a_k=0.5\sim0.7$  公斤·米/厘米<sup>2</sup>，650°C  $a_k=1.0\sim1.3$

表1-2 合金成

| 炉号 合金成分特点                                  |                                 | 成 分 (重量%)   |       |           |             |             |             |             |             |                    |                   |
|--------------------------------------------|---------------------------------|-------------|-------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|-------------------|
|                                            |                                 | C           | Cr    | Ni        | Mn          | W           | Mo          | Nb          | Si          | B                  | N                 |
| 35、39、<br>63、64、<br>76、82<br>87、88、<br>138 | 731A                            | 0.9<br>/1.1 | 19/21 | 45/<br>55 | 4.5<br>/5.5 | 0.9<br>/1.1 | 0.9<br>/1.1 | 0.9<br>/1.1 | 0.3<br>/1.0 | (加入<br>量)<br>0.003 | (加入<br>量)<br>0.10 |
| 26、27、<br>65、68、<br>69、85、<br>131、<br>148  | 无 N                             | ①           |       |           |             |             |             |             |             |                    | 0                 |
| 72                                         | 增Nb                             |             |       |           |             |             |             | 1.5         |             |                    |                   |
| 98                                         | 增 <sup>Nb</sup> <sub>N</sub>    |             |       |           |             |             |             | 2.2         |             |                    | (加入<br>量)<br>0.20 |
| 147                                        | 降C                              | 0.80        |       |           |             |             |             |             |             |                    |                   |
| 129、<br>144                                | 降C                              | 0.70        |       |           |             |             |             |             |             |                    |                   |
| 104                                        | 增 <sup>Nb</sup> <sub>N</sub> 降C | 0.83        |       |           |             |             |             | 1.76        |             |                    | (加入<br>量)<br>0.20 |
| 106                                        | 增 <sup>Nb</sup> <sub>N</sub> 降C | 0.69        |       |           |             |             |             | 1.95        |             |                    | (加入<br>量)<br>0.20 |
| 155                                        | 增 <sup>Nb</sup> <sub>N</sub> 降C | 0.66        |       |           |             |             |             | 2.05        |             |                    | (加入<br>量)<br>0.20 |
| 154                                        | 降 <sup>C</sup> <sub>Nb</sub>    | 0.89        |       |           |             |             |             | 0.82        |             |                    |                   |
| 114                                        | 降 <sup>C</sup> <sub>Nb</sub>    | 0.78        |       |           |             |             |             | 0.76        |             |                    |                   |
| 103                                        | 降 <sup>C</sup> <sub>Nb</sub>    | 0.80        |       |           |             |             |             | 0.66        |             |                    |                   |
| 93                                         | 增Ni                             |             |       | 6.82      |             |             |             |             |             |                    |                   |
| 95                                         | 降Ni                             |             |       | 3.54      |             |             |             |             |             |                    |                   |
| 165                                        | 增W、Mo<br>Nb、N、Si                | 1.0         |       |           |             | 1.66        | 1.91        | 1.92        | 1.39        |                    | (加入<br>量)<br>0.20 |
| 168                                        | 增W、Mo<br>Nb、N、Si                | 0.99        |       |           |             | 1.69        | 1.80        | 1.96        | 1.12        |                    | (加入<br>量)<br>0.20 |
| 156                                        | 增W、Mo<br>Nb、N 降C                | 0.69        |       |           |             | 2.26        | 1.92        | 1.87        |             |                    | (加入<br>量)<br>0.20 |
| 157                                        | 大幅度降C                           | 0.50        | 20.24 | 5.84      | 7.06        | 1.21        | 1.24        | 0.76        | 0.60        | (加入<br>量)<br>0.003 | 0.26              |
| A-11<br>(日本)                               | YA2B-C                          | 0.53        | 19.83 | 9.71      | 8.02        | 1.44        | 1.25        | 0.45        | 1.55        | 0.015              | 0.35              |

① 成分栏内空白处，表示该组元含量与上面731A合金的成分范围同。

② 各项机械性能均属铸态性能，抗拉和持久均用铸成的  $\phi 7$  毫米成型试样

# 分变动的影响

| ②室温抗拉性能                             |                 | 650℃抗拉性能                            |                 | 650℃<br>43公斤/毫米 <sup>2</sup><br>持久寿命<br>(小时) | 冲击性能 $a_k$<br>(公斤·米/厘米 <sup>2</sup> ) |              |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| $\sigma_b$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\delta$<br>(%) | $\sigma_b$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\delta$<br>(%) |                                              | 室 温                                   | 650℃         |
| 83.4                                | 6.0             | 58.5                                | 12.0            | 150~250                                      | 0.5~0.7                               | 1.0~1.3      |
| 80.5                                | 6.0             | 56.3                                | 12.0            | 150~250                                      | 0.6 0.7                               |              |
| 83.7                                | 7.0             | 56.7                                |                 | 196, 210                                     |                                       |              |
| 89                                  | 9.0             | 60.2                                | 12.0            | 126, 262, 265                                | 0.4 0.5                               | 1.5<br>1.5   |
| 79.6                                |                 | 51                                  | 10.0            | 127, 178                                     | 0.3 0.5                               | 1.4<br>1.4   |
| 77                                  | 7.0             | 51                                  | 13.0            | 136, 21, 9                                   | 0.65<br>0.75                          | 1.65<br>1.75 |
| 85.7                                | 10.0            |                                     |                 | 155, 187                                     | 0.6<br>1.0                            | 1.4<br>1.7   |
|                                     |                 | 54.5                                | 10.0            | 87                                           | 0.6<br>0.75                           | 1.7<br>2.3   |
| 80.5                                | 9.0             | 57.4                                | 14.0            | 43, 29                                       | 0.45<br>0.65                          | 1.65<br>1.90 |
| 79.5                                | 9.0             |                                     |                 | 187, 116                                     | 0.9<br>1.0                            | 1.8<br>1.9   |
| 81.1                                | 8.0             |                                     |                 | 123                                          | 0.75<br>1.0                           | 2.3<br>3.6   |
| 78                                  | 9.0             | 54.5                                | 20.0            | 141, 133, 79                                 | 0.75<br>1.0                           | 2.6<br>2.7   |
| 82                                  | 6.0             | 56.8                                | 10.0            | 117, 132                                     |                                       |              |
| 82.2                                | 5.0             | 59.6                                | 12.0            | 126, 354                                     |                                       |              |
| 81.8                                | 3.0             | 58.2                                | 8.0             | 48, 52                                       |                                       |              |
| 80.2                                | 3.0             |                                     |                 | 87, 69                                       |                                       |              |
| 79.5                                | 6.0             | 56                                  | 9.0             | 85, 94                                       | 0.50<br>0.75                          | 1.63<br>1.25 |
| 78.5                                | 10              | 58.8                                | 18              | 18, 88                                       | 1.31<br>1.80                          | 2.50<br>3.13 |
| 78.2                                | 5.4             | 49.2                                | 8.2             | 650℃ $\delta_{1000}>$                        | $>2.5$                                | $>4.0$       |
| 79.9                                | 6.1             | 51.7                                | 8.3             | 16公斤/毫米 <sup>2</sup>                         |                                       |              |

加工成45毫米的标准试棒测定。

公斤·米/厘米<sup>2</sup>，为了提高冲击韧性，在合金成分方面，我们进行了一系列试验，首先是降低含碳量，当含碳量从 731A 合金的 1.0% 降到 0.80%（第 147 炉）和 0.70%（第 120、144 炉）时，合金的强度降低，而冲击韧性提高不多。接下去是从增铌增氮的合金中降低碳分，如降低碳分到 0.83%（第 104 炉）、0.69%（第 106 炉）和 0.66%（第 155 炉），虽然抗拉强度与 731 合金接近，且塑性较好，但冲击韧性仍比 731A 合金高出不多，上述两种情况中，当含碳量降到 0.70% 左右时，650°C，43 公斤/厘米<sup>2</sup>的持久寿命均不到 100 小时。因此认为，要使合金保持较高的持久强度，合金含碳量不宜降至 0.75% 以下。

当较多的提高冲击韧性，是靠降碳降铌来获得，即合金的含碳量从 731A 合金的 1.0% 降到 0.80% 左右，而含铌量从 1.0% 降到 0.70% 左右，对这样成分的合金，定名为 731B 合金（见表 1-1）。731B 合金的冲击韧性比 731A 高一倍，即室温  $\alpha_k = 1.0$  公斤·米/厘米<sup>2</sup>，650°C 的  $\alpha_k = 2.5 \sim 3.0$  公斤·米/厘米<sup>2</sup>。室温抗拉强度和高温持久寿命比 731A 合金稍低，但仍维持着较高水平，塑性亦较好。用 731B 合金铸成的径流式增压器涡轮受到铁块撞击时，叶片弯曲而不碎裂，这点证明 731B 合金的冲击韧性有一定的提高。

降碳降铌，必然使合金组织中的 MC 碳化物即碳化铌（或碳氮化铌）的数量减少，这类碳化物是脆硬质点，（经测定 HV=1100~1200，载荷 P=30 克）对提高 731 合金的强度，有一定作用，但它亦是最先和最易出现裂缝的地方，所以这类碳化物（或碳氮化物）的数量和分布，对冲击韧性表现较敏感。而降碳降铌后，合金的  $\alpha_k$  值提高较多。

731 A 合金的  $\sigma_k$  值虽然较低, 但从 731 A 合金铸造的 各种增压器涡轮, 经长期配机运转结果来看, 是完全可以胜任工作的。731 A 合金强度较高, 731 B 冲击韧性较好, 对这两种成分的合金用户可根据增压器的具体要求予以选用。

(3) 其他值得探索的成分。要把奥氏体铸造耐热钢的室温  $\sigma_k$  值提高到 1.0 以上, 它的含碳量只能在 0.5% 左右或更低一些, 在探索过程中, 又熔炼了几炉称为“731 合金大幅度降碳”的炉次, 典型的成分如表 2 中的 157 炉, 从稳定奥氏体这点考虑, 成分中加多了镍、锰和氮的含量, 它的室温  $\sigma_k$  值, 在 1.5 公斤·米/厘米<sup>2</sup> 左右, 650°C  $\sigma_k$  值可达 3.0 公斤·米/厘米<sup>2</sup> 或更高一些。为了作比较, 表 1-2 亦列入了日本研究的熔炼  $YA_2B-C$  合金的碳份较高、性能较好的炉次 A-11, 可以看出, 大幅度降碳的 731 合金的强度与塑性均比  $YA_2B-C$  合金好, 而合金中镍和氮的含量, 均比  $YA_2B-C$  低, 所以它是值得探索的一种合金成分。

另外, 在表 2 中也可看到合金的含铌量从 1.0% 增至 1.5% (第 72 炉), 或增铌到 2.0% 的同时, 再把氮的加入量从 0.10% 提高到 0.20% (第 98 炉), 这时合金的室温抗拉和高温抗拉强度及塑性均提高, 650°C, 43 公斤/毫米<sup>2</sup> 的持久寿命, 达到较高的水平, 所以增铌增氮可能是 731 合金提高强度的一个方向。

对 731 合金中其它元素含量亦进行过一些调整, 如曾将三炉 731 A 合金成分中的钨、钼、铌、氮含量增加一倍左右 (即 W、Mo、Nb 增到 2.0%, N 增到 0.20%), 其中两炉 (165、168 炉) 又把硅提高到 1.0% 以上, 另外一炉 (156 炉) 则把碳降低到 0.69%。比较这三炉和 106 炉的结果, 可以

看到：增加钨、钼含量，对 731 合金 650℃的持久性能并无增益，而当硅含量提高到 1.0% 以上时，合金的抗拉塑性和 650℃持久性能均下降较多，这些事实，说明目前所确定的 731 合金的成分范围是适宜的。

### 3. 杂质元素的影响

(1) 硫 731 合金中因含锰量较高 (5%)，故含硫量必然较低。熔炼时用石灰造渣起脱硫作用，感应搅拌有助于提高脱硫速率。根据分析用中频感应熔炼母合金的 17 个性能较好炉次的含硫量，均在 0.002~0.007% 范围内。而三相炼钢电弧炉熔炼的 731 合金，含硫量为 0.003% 和 0.004%。所以说，要求 731 合金含硫量  $\leq 0.01\%$  是不难得到的。参考目前一般高温合金规范，规定 731 合金的含硫量为  $\leq 0.02\%$ 。由于硫是有害杂质，偏析亦较大，含量应尽可能达到  $\leq 0.01\%$ 。

(2) 磷 磷对耐热钢的塑性起不利作用，但据有关资料报道，类似 731 合金的耐热钢，加入磷的好处是容易通过热处理来达到高的热强性。不过加入过多，如含磷为 0.1% 时，对含氮的合金来说，抗拉强度和持久强度均有些下降。目前，中频感应熔炼的母合金，有时以金属锰代替锰铁，并用纯铁和碳钢作基料，故合金含磷量较低，大部分均在 0.03% 以下，而三相炼钢电弧炉熔炼的母合金，含磷量为 0.04%。为此规定 731 合金的含磷量为  $\leq 0.04\%$ 。

(3) 低熔点金属杂质 731 合金中低熔点金属杂质的含量，目前未作规定，但低熔点杂质对耐热钢高温持久性能的影响，是很显著的，为此选择了性能较好且稳定的九个重熔炉次，取样进行了光谱定性分析，结果如表 1-3 所示：

表1-3 731合金中低熔点金属杂质含量情况

| 杂 质 名 称    | Pb  | Sn   | As   | Cd  |
|------------|-----|------|------|-----|
| 杂质含量 (ppm) | ≤10 | >100 | >100 | <30 |

注: Sb、Bi、Ag、Te的谱线与主要合金元素谱线相干扰, 故无法分析。

熔炼原料铁合金中低熔点杂质的存在情况, 经光谱定性分析, 如表 1-4 所示。

表1-4 铁合金中低熔点金属杂质存在情况

| 铁合金名称 | 低熔点杂质含量高→低         |
|-------|--------------------|
| 钨 铁   | Cd, Sn, Cu, Sb     |
| 钼 铁   | Pb, As, Sb, Cu     |
| 铬 铁   | Cu, As             |
| 锰 铁   | As, Sb, Cu, Zn, Bi |
| 铈 铁   | 未 发 现              |

从表 1-3 和表 1-4 可以看到, 731 合金中的铅主要来自钼铁, 镉和锡来自钨铁, 砷来自锰铁、铬铁和钼铁, 根据表 1-3 所示, 731 合金中的锡和砷的含量偏高, 若能精选铁合金, 使锡和砷的含量控制在 100ppm 内, 合金的性能还可能进一步提高。

### (三) 合金的性能

#### 1. 机械性能

(1) 抗拉性能 731 合金的抗拉性能如表 1-5 和表 1-6 所示, 所用试样均用精铸的  $\phi 7$  毫米成型试棒加工成  $\phi 5$  毫米的标准试棒。除铸态外, 所指热处理态均为  $700^{\circ}\text{C}$ 、24 小

表1-5 731 A合金 (铸态) 的抗拉性能

| 试验温度<br>(°C) | $\sigma_b$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\sigma_{0.2}$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\delta$ (%) |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------|
| 室温           | 83.4                                |                                         | 6.2          |
| 200          | 69.5                                | 37.4                                    | 10.2         |
| 300          | 64.5                                |                                         | 10.0         |
| 400          | 60.5                                |                                         | 10.2         |
| 550          | 60.5                                | 33.0                                    | 12.0         |
| 600          | 59.5                                | 33.0                                    | 9.2          |
| 650          | 58.5                                |                                         | 12.0         |
| 700          | 55.8                                | 30.0                                    | 15.9         |
| 750          | 45.5                                | 29.0                                    | 13.5         |
| 815          | 38.5                                |                                         | 18.4         |

表1-6 731 B合金的抗拉性能

| 试验温度<br>(°C) | 铸 态                                 |                                         |                 | 热 处 理 态                             |                                         |                 |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
|              | $\sigma_b$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\sigma_{0.2}$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\delta$<br>(%) | $\delta_5$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\sigma_{0.2}$<br>(公斤/毫米 <sup>2</sup> ) | $\delta$<br>(%) |
| 室温           | 81.0                                |                                         | 8.0             |                                     |                                         |                 |
| 室温           | 82.5                                | 51.0                                    | 5.2             | 91.0                                | 69.0                                    | 2.2             |
| 200          | 69.7                                | 38.5                                    | 8.9             | 81.5                                | 53.5                                    | 6.4             |
| 300          | 65.5                                | 39.3                                    | 7.6             |                                     |                                         |                 |
| 400          | 65.3                                | 41.0                                    | 10.8            |                                     |                                         |                 |
| 550          | 59.4                                |                                         | 13.2            |                                     |                                         |                 |
| 600          | 60.8                                | 29.5                                    | 13.0            |                                     |                                         |                 |
| 650          | 56.0                                |                                         | 15.0            |                                     |                                         |                 |
| 650          | 60.5                                | 31.3                                    | 11.6            | 60.8                                | 40.8                                    | 9.6             |
| 700          | 55.3                                | 29.0                                    | 14.8            |                                     |                                         |                 |
| 750          | 46.8                                | 27.0                                    | 16.6            |                                     |                                         |                 |

时时效热处理态, 在其他性能试验时亦同。

将表 1-5 与表 1-6 中的数据绘成曲线如图 1 所示。

(2) 高温持久性能 731合金的高温持久性能, 均用精



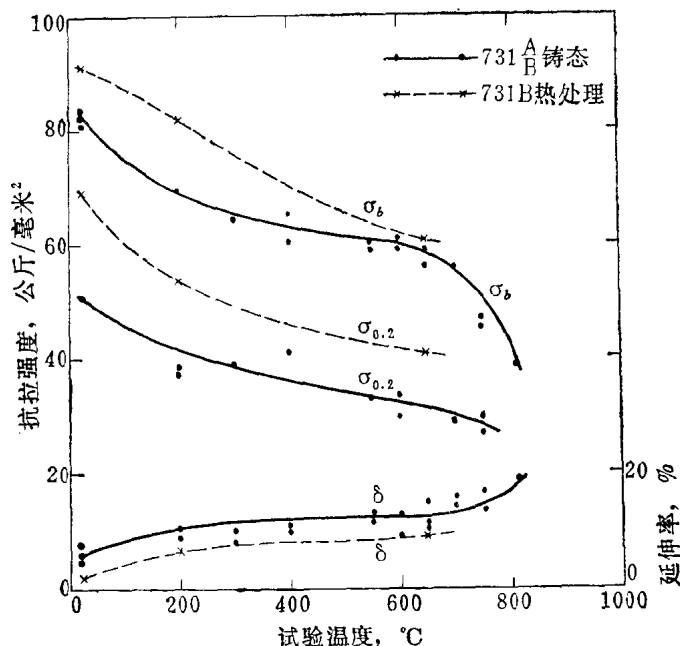


图1 731合金的抗拉性能 (φ 5毫米标准试棒)

铸的φ 7毫米成型试棒加工成φ 5毫米的标准试棒测定, 结果如表 1-7 和表 1-8 所示。

将表 1-7 及表 1-8 中所列数据, 绘成图表如图 2 所示。

731A 与 731B 合金铸态的高温持久性能基本相同, 但就 650°C、43公斤/毫米²应力下的持久性能来说, 根据大量试验结果统计两者间略有差别, 如表 1-9 所示。

合金经 700°C、24 小时时效热处理后, 除 550°C 性能外, 各温度高应力下的持久寿命均有所下降, 但低应力的长期性能即更接近于使用条件下的持久性能, 并不降低, 可从图 2