

# 高铅铜合金水冷铜模铸造组织特征

刘雪, 李聪玮, 卢鑫

(中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西西安 710077)

**摘要:** 采用水冷铜模铸造方法制备ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜合金铸件, 通过扫描电镜和光谱分析等研究了铜合金铸件的组织和偏析。结果表明: 铸件中铅相分布存在差异, 铸件外壁和底部铅相细小均匀, 靠近中心和顶部铅相尺寸变大。铸件合金元素分布差异较小, 铅成分差异较大, 越晚凝固铅含量越高。水冷铜模铸造可以得到成分和组织均匀的高铅铜合金。

**关键词:** 高铅铜合金; 快速凝固; 微观组织; 宏观偏析

高铅铜合金摩擦系数小, 具有良好的自润滑性和耐磨性。随着我国航空航天和机械制造行业的快速发展, 航空发动机和高速轴承等部件对高强耐磨耐蚀耐热的高铅铜合金的性能要求和需求量显著提高<sup>[1-3]</sup>。

铜(Cu)的熔点为1 083 °C, 密度为8.93 g/cm<sup>3</sup>, 铅(Pb)的熔点为326 °C, 密度为11.37 g/cm<sup>3</sup>。液态时Pb和Cu有限溶解, 不形成化合物, Pb是以小的单质颗粒状分布于Cu的晶粒之间。在摩擦过程中, 由于摩擦热及变形挤压共同作用, 低熔点且质软的游离相Pb会逐渐被挤出铜合金材料表面, 并在摩擦副表面形成软质铅润滑膜, 优化合金的耐磨性。铅相的存在能改善铜合金的切削加工性和耐磨性<sup>[1]</sup>。传统的铜合金采用离心铸造或重力浇注, 容易产生成分偏析, 组织不均匀、缩孔和缩松等质量问题<sup>[4-7]</sup>, 因而很难用传统的铜合金铸造方法制备高铅铜合金。采用快速冷却凝固的铸造方法, 能够解决这些问题。本文采用快速冷却凝固的水冷铜模方法生产高铅铜合金铸锭, 并对其微观组织和成分进行研究。

## 1 试验过程

### 1.1 试验材料

本文选取的高铅铜合金牌号为ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P, 含Pb量18.0%~22.0%, 属于高含量铅青铜。合金主要元素成分范围见表1。

表1 ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P合金的化学成分  
Tab. 1 Chemical composition of ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P alloy

| 合金牌号              | Sb   | Pb      | Zn        | Ni      | P       | Cu       |    |
|-------------------|------|---------|-----------|---------|---------|----------|----|
| ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P | 标准范围 | 3.0~4.0 | 18.0~22.0 | 3.0~4.0 | 3.0~4.0 | 0.15~0.3 | 余量 |
|                   | 配料成分 | 3.6     | 20        | 3.9     | 3.5     | 0.3      | 余量 |

### 1.2 试验方法

铜合金熔炼采用中频熔炼炉, 熔炼使用的主要原材料为电解铜板、铜镍合金、铈锭、锌锭和磷铜。熔炼前, 将铜镍中间合金和电解铜放入炉内, 当炉料完全熔化, 熔体温度达到1 120~1 200 °C时, 加入约70%磷铜进行脱氧, 依次加入铈、铅和锌, 然后用剩余磷铜进行脱氧。静置1~3 min, 温度达到1 080~1 100 °C后开始浇注。

作者简介:

刘雪(1986-), 女, 工程师, 硕士生, 研究方向为金属型铸造及熔模铸造。电话: 13384953561, E-mail: xue-mail@163.com

中图分类号: TG146.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

08-1107-05

收稿日期:

2025-04-17 收到初稿,

2025-05-29 收到修订稿。

金属铸锭的制备采用水冷铜模铸造方法。水冷铜模铸造方法是将紫铜模放置在流动水中，利用流动水快速冷却铜模，使金属液迅速冷却凝固。铸造方法如图1所示，其中冒口砂套、浇口杯由壳芯砂压制而成，起到导流和保温的作用。浇口杯套为硬铝合金，保证浇注过程中浇口杯不发生溃散。雨淋式浇口杯上面放置堵片，堵片与浇注材料成分相同，能延缓浇口杯内金属液进入铜模型腔，使金属液内杂质有一定时间上浮。使用前，铜模内腔需喷乙炔烟，利用乙炔的不完全燃烧，在模具工作面喷涂一定厚度的碳黑，利于铸件的脱模。浇注前，铜模、冒口砂套、浇口杯和堵片均经充分烘烤，保证干燥。浇注时，按图1组合模具摆放在水槽中，同时打开流动水，流动水水压为0.3~0.4 MPa。浇注完成后仍在流动水中冷却10~15 min，铸件完全凝固，得到最小外圆75 mm、高度80 mm（不含冒口）的铸件。

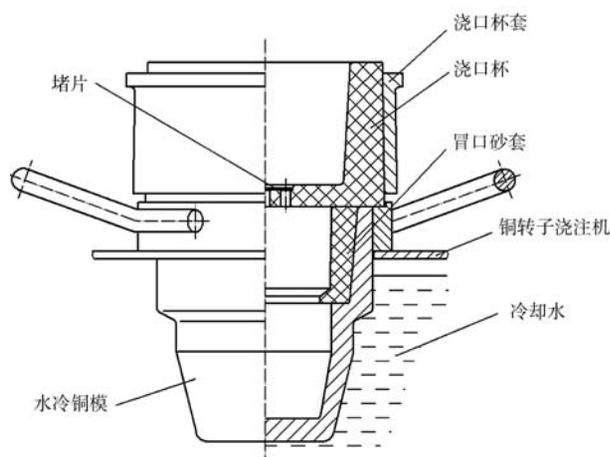


图1 水冷铜模铸造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the water-cooled copper mold casting

粗车去除铸件表面氧化皮及冒口。沿铸件径向，用线切割的方式切取试样，径向从外到内依次编号D、E、F，同时沿轴向将试样切割，从上（近冒口端）到下（模具底部），依次编号1、2、3。样品位置及编号如图2所示。对各试样底部横截面抛光后，在扫描电镜下观察铅相分布及微观组织，利用光谱分析方法，对试样截面各取两个点做成分分析，并求平均值。

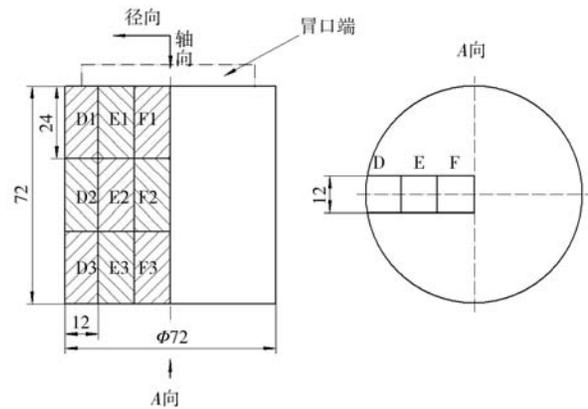


图2 取样位置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the sampling position

## 2 试验结果

### 2.1 宏观组织特征

铸件的内部截面的宏观组织特征如图3所示，各试样检测位置也在图3中标出。从图中可以看出：铸件的宏观组织形貌沿铸件轴向对称，同时宏观组织可分为3个明显不同的区域：铸件外壁的氧化皮区（Ⅰ区）、中间的细柱状晶区（Ⅱ区）和靠近铸件中部和上部的等轴晶区（Ⅲ区）。这三个区的组织特征如表2所示。

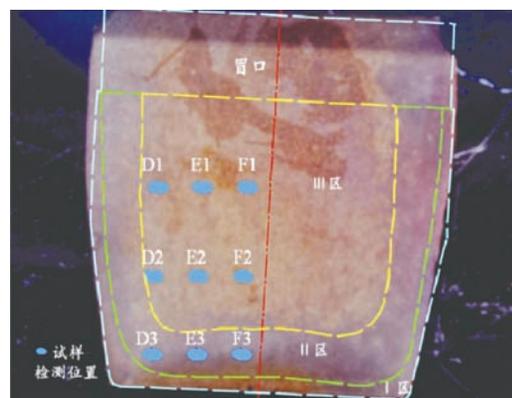


图3 铸件纵截面的宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of the longitudinal section of the casting

表2 铸件不同位置的宏观组织特征

Tab. 2 Macroscopic structure characteristics of the castings at different positions

| 区域编号 | 位置                 | 组织形貌              | 截面上的面积百分数/% |
|------|--------------------|-------------------|-------------|
| I    | 铸件外壁，紧靠模具3~5 mm范围内 | 含有气孔、氧化皮          | 约10         |
| II   | 靠近铸件外壁             | 细柱状晶，沿垂直于外壁方向向内生长 | 约20         |
| III  | 铸件中间               | 等轴晶               | 约70         |

## 2.2 微观组织特征

图4是铸件不同位置对应的显微组织，其中白色相为铅相。

从图3、图4中可见，接近模具底部的D3、E3、F3检测位置属于铸件Ⅱ区，在凝固过程中晶粒极细，游离分布的铅相呈现弥散点状，一般约20~50 μm。其中位于铜模底部中间（E3、F3）的组织明显比同时受底部与侧面交接的部位（D3）的组织更细小均匀，应该与散热更快相关。其他试样基本位于铸件Ⅲ区，截面中的晶粒明显略大，铅相尺寸增大，呈现棒状分布，大小在100 μm左右。靠近铸件中部（F2）及冒口部位（E1、F1），部分富Pb相异常粗化或偏聚呈现团球状。一般来说，富Pb区自润滑性较好，细晶区综合力学性能更好<sup>[8]</sup>。

## 2.3 铸件的成分偏析

通过对铸件试样不同位置的横截面成分分析，获得表3铸件不同位置元素含量，绘制成图5所示的合金主要成分的二维分布情况。从图中可以看出，Pb含量宏观偏析较明显。该铜合金材料Pb含量要求18%~22%，铸件的Pb最高含量在靠近冒口位置为21.7%，最低处含量在靠近模具底部为19.1%。由于合金中Cu和Pb两相熔点和密度相差很大，很容易产生重力偏析，一般来说Pb会在铸件底部含量更高<sup>[5]</sup>。但通过水冷铜模生产铸件的Pb含量变化基本与凝固顺序一致，最先凝固的部位含量最低，最后凝固部分含量较高。说明强制水冷可有效抑制铅偏析，最先凝固部位试样枝状晶尺寸细小且生长迅速，Pb相被“挤压”聚集到后凝固部分。通过控制冷却速率，可以改变Pb在铸件中的分布和形态。

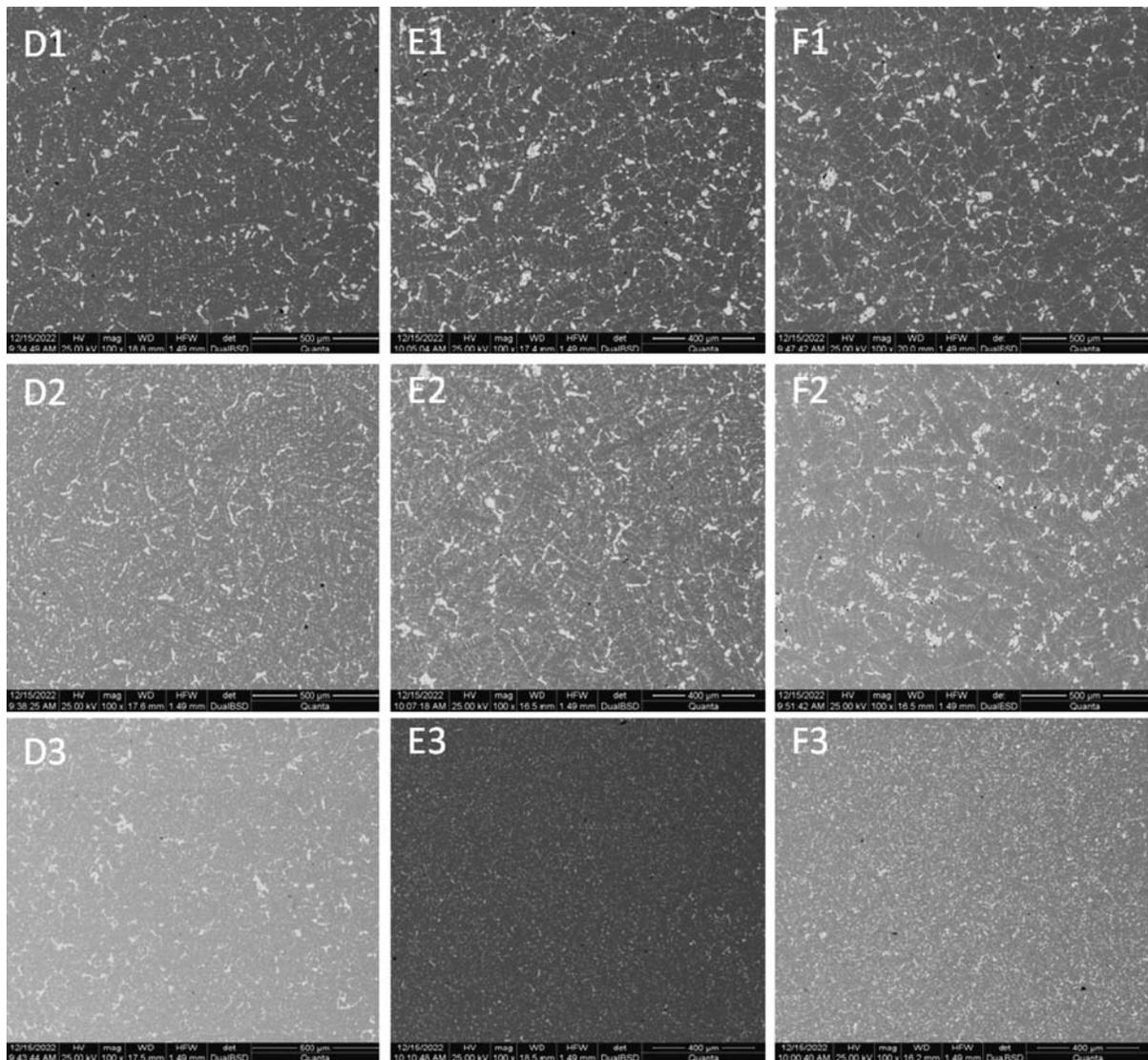


图4 不同位置横截面扫描电镜图像

Fig. 4 SEM images of the cross sections at different locations

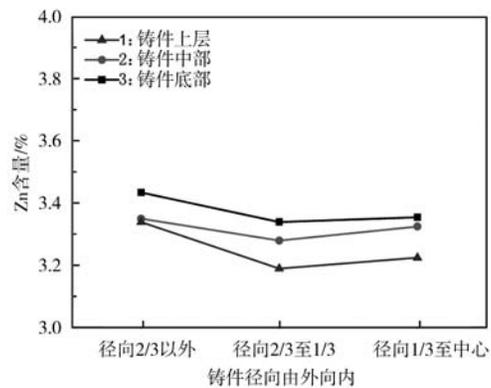
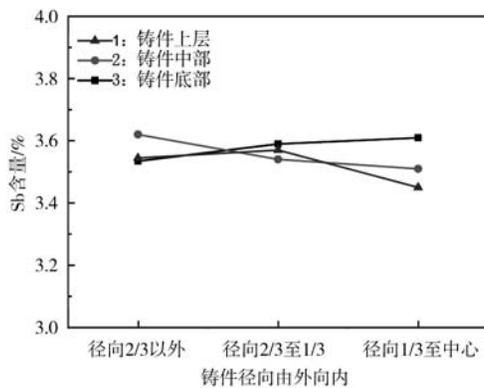
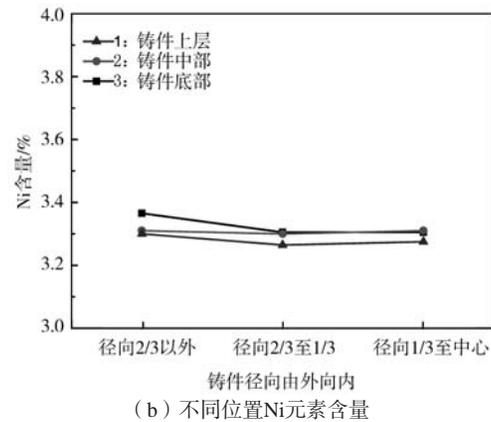
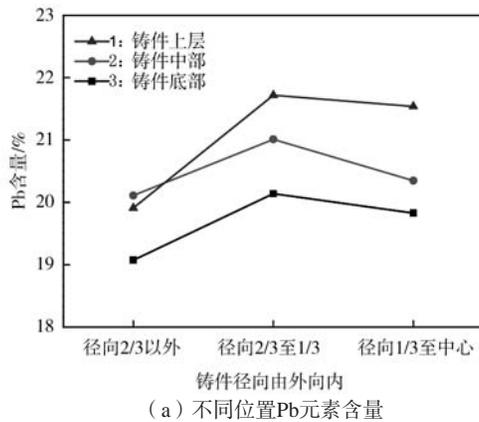
表3 铸件不同位置元素含量  
Tab. 3 Chemical compositions of the castings at different positions  $w_B / \%$

| 试样编号 | Ni    | P     | Pb     | Sb    | Zn    | Cu |
|------|-------|-------|--------|-------|-------|----|
| D1   | 3.3   | 0.2   | 19.91  | 3.55  | 3.34  | 余量 |
| D2   | 3.31  | 0.2   | 20.11  | 3.62  | 3.35  | 余量 |
| D3   | 3.365 | 0.2   | 19.075 | 3.535 | 3.435 | 余量 |
| E1   | 3.265 | 0.205 | 21.72  | 3.57  | 3.19  | 余量 |
| E2   | 3.3   | 0.2   | 21.01  | 3.54  | 3.28  | 余量 |
| E3   | 3.305 | 0.2   | 20.14  | 3.59  | 3.34  | 余量 |
| F1   | 3.275 | 0.2   | 21.54  | 3.45  | 3.225 | 余量 |
| F2   | 3.31  | 0.2   | 20.35  | 3.51  | 3.325 | 余量 |
| F3   | 3.305 | 0.205 | 19.83  | 3.61  | 3.355 | 余量 |

从图中还可以看到, Ni、Sb、Zn元素在标准范围内偏差均不大。结合熔化前各元素配比, 发现Ni烧损量在0.1%、Sb烧损量约0.1%、Zn烧损量在0.6%左右。

### 3 分析讨论

铸件凝固组织与其传热过程密切相关。利用水冷铜模铸造, 流动的冷却水在紫铜模外壁可以带走大量热量。金属液充满型腔后, 金属液和导热能力很强的紫铜模接触, 通过流动水快速冷却, 铸件在外表面区域迅速冷却, 因此在铸件外表面可获得晶粒细小的组织。随着凝固层厚度的增加, 内部液体金属的冷却速度降低, 导致合金凝固速度降低。使得合金沿着铸件的径向、轴向向液体内部生长。由于Pb相在金属液中



(c) 不同位置Sb元素含量

(d) 不同位置Zn元素含量

图5 合金元素沿铸件轴向和径向变化曲线

Fig. 5 Curves of axial and radial changes of the alloying elements along the casting

呈游离分布, 且密度更小、熔点更低, Pb相更容易在未凝固的金属液中富集。从而随着凝固时间的推迟, 铅相尺寸逐渐粗大。最后凝固的部位位于金属冒口部位, 晶粒最为粗大, 铅相的尺寸也最大。铸件各部位组织特征及其形成机理与常规铸件的组织特征和形成

机理基本一致。位于铜模底部中间的组织比靠近模具转接部位的组织更细, 这是因为底部铜模受水冷降温迅速, 而转接处液体两侧均与金属模接触, 模体相对包裹金属液, 转接处散热效果不如模具底面。

铸件不同部位的成分有一定差异, 但差异不大。

利用水冷铜模快速凝固方法可以得到符合要求的铸件。

## 4 结论

(1) 采用水冷铜模的方法制备了直外圆75 mm、高度80 mm (不含冒口)的铸件。铸件存在3个明显不同的区域: 外侧氧化皮区、靠近外侧的细小柱状区和

中部的等轴晶区。

(2) 铸件不同部位合金元素Pb的含量和形态有一定差异。随凝固顺序延迟, 铅含量逐渐升高, 形态也逐渐增大, 其余主要元素不存在明显宏观偏析。各元素含量均没有超出合金的成分范围。水冷铜模铸造可以得到成分和组织均匀的高铅铜合金。

### 参考文献:

- [1] 刘佳, 郭子豪, 李皓琪, 等. 铜材料应用现状及发展建议 [J]. 科技创新与应用, 2022, 16: 140-143.
- [2] 陈超. 高铅锡青铜合金离心铸造工艺及摩擦磨损性能的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [3] 任冰冰, 王元龙, 张吉贤, 等. 熔铸工艺对铜钢双金属复合材料组织性能作用规律 [J]. 铸造, 2021 (5): 515-520.
- [4] 罗宗强, 辛保亮, 周毅, 等. 离心铸造Cu-17Ni-3Al-X合金铸件的组织和宏观偏析 [J]. 热加工工艺, 2012, (17): 31-34.
- [5] 历长云, 王英, 张锦志, 等. 铅青铜轴瓦离心铸造工艺及组织性能分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33 (7): 653-655
- [6] 李海兰, 王鹏华, 董峰, 等. 高铅青铜摩擦环的工艺设计 [J]. 铸造, 2016 (12): 1228-1230, 1233.
- [7] 孙业成, 王超宁, 孔见. Cr微合金化铸态铝青铜合金组织与性能研究 [J]. 有色金属工程, 2021, 11 (1): 17-26.
- [8] 杨世豪, 尹延国, 方小亮, 等. 振动对铜钢双金属熔铸复合材料凝固组织的影响 [J]. 铸造, 2024 (1): 17-24.

---

## Microstructure Characteristics of High Leaded Copper Alloy with Water-Cooled Copper Mould Casting

LIU Xue, LI Cong-wei, LU Xin

(AECC Xi'an Aero-Engine Control Technology Co., Ltd., Xi'an710077, Shaanxi, China)

### Abstract:

ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P copper alloy castings were prepared by water-cooled copper mould. The microstructure characteristics and macroscopic segregation of the copper alloy castings were investigated by scanning electron microscope and electronic probe micro-analyzer. The results showed that there were differences in the distribution of lead phase in the castings. The lead phase was fine and uniform on the outer wall and bottom of the castings, and the size of lead phase increased near the center and top. The alloying element distribution difference was small, the lead composition difference was large, and the late solidification lead content was higher. High lead copper alloy with uniform composition and structure was obtained by water cooled copper casting.

### Key words:

high leaded copper alloy; rapid solidification; microstructure; macroscopic segregation