

# 高强度铸造铝合金的熔体过热处理<sup>①</sup>

耿浩然 马家骥 王拥军

(山东工业大学铸造教研室, 济南 250014)

## 摘要

针对 Al-Cu 系高强度铸造合金, 研究了一种高温过热快速处理新工艺。对过热温度、冷料形式和搅拌时间等工艺参数进行了试验, 从而确定了最佳工艺规程, 使合金获得了优良的机械性能。从合金熔体存在着多晶转变及组织遗传性的理论观点出发, 根据差热分析曲线探讨了该工艺的作用机理, 认为该工艺提高合金的机械性能与其熔体结构及凝固组织有关。

**关键词:** 铝合金熔炼 热速处理工艺 Al-Cu 系合金

Al-Cu 系合金由于其优良的机械性能和耐热性能, 应用日益扩大, 如何使合金获得稳定、更优的机械性能具有现实意义。传统观点认为, 铝合金采用较高的熔炼温度将恶化合金的性能, 所以一般熔炼温度小于 760℃。然而, 近年来一些试验结果已使这种观念受到很大冲击<sup>[1, 2]</sup>。笔者根据组织和性能遗传理论, 从熔体处理出发, 针对 Al-Cu 系合金设计了一种过热变质热速处理新工艺, 简称为 SMT 工艺。该工艺主要由熔体过热、激冷和搅拌三个环节组成, 可以明显提高合金的性能和质量。

## 1 试验方法

试验合金的化学成分 (wt.-%) 为 5Cu、0.35Mn、0.2Cd 及 Ti、B 等微量元素和 Al。合金采用电阻坩埚炉熔炼, 炉温由 XMT 数字式指示控制仪控制, 合金熔体实际温度采用 DM-6801 数字温度仪测定。机械性能试验采用单铸金属型试样, 经热处理后在 ME-60 型液压式万能材料试验机上进行。合金采用的 T5 热处理工艺为: 538±3℃保温 12h→水淬→165℃保温 6h→空冷。合金液采用 0.4% C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> 精炼

处理, 静置 5~10 min 后浇注成形。

## 2 试验结果

### 2.1 过热温度试验

常规合金液过热仅仅是从熔体有足够的流动性、便于加入熔剂或为其它后期处理需要而确定的。一般认为, 铝合金液的过热温度不应超过液相线 200℃。我们从提高合金性能出发, 采用 SMT 工艺, 考察了过热温度对合金机械性能的影响, 结果如表 1 所示。可见, 在 870℃时, 抗拉强度达到最高值, 且延伸率也较高, 920℃时延伸率达到最高值。由此可见, 合金经适当过热处理后, 产生了变质效果, 明显地提高了合金的机械性能。这证明了将熔体进行过热处理, 不仅是工艺的需要, 而且是改善合金性能和质量的一条重要技术途径。

### 2.2 冷料激冷试验

试验结果表明, 仅仅将熔体过热, 合金的机械性能并没有很大的改善 (见表 2); 同时, 还会造成合金熔炼后期精炼等处理的不便, 必须采用一定方式将合金液快速冷却至正常熔炼温度范围内。本试验采用各种炉料作熔体激冷

<sup>①</sup> 收稿日期: 1993年9月15日; 修回日期: 1993年10月23日

表1 熔体过热温度对机械性能的影响

| 过热温度 / °C | 冷料  | $\sigma_b$ / MPa | $\bar{\sigma}_b$ / MPa | $\delta_5$ % | $\bar{\delta}_5$ % |
|-----------|-----|------------------|------------------------|--------------|--------------------|
| 740       | —   | 359              | 356                    | 8.8          | 8.6                |
|           |     | 348              |                        | 8.7          |                    |
|           |     | 362              |                        | 8.2          |                    |
| 820       | 1/3 | 365              | 362                    | 8.9          | 8.7                |
|           |     | 358              |                        | 9.1          |                    |
|           |     | 362              |                        | 8.8          |                    |
| 870       | 1/3 | 394              | 401                    | 9.7          | 9.8                |
|           |     | 404              |                        | 10.0         |                    |
|           |     | 401              |                        | 9.8          |                    |
| 920       | 1/3 | 383              | 385                    | 10.8         | 12.9               |
|           |     | 390              |                        | 12.6         |                    |
|           |     | 381              |                        | 15.2         |                    |
| 970       | 1/3 | 385              | 370                    | 12.3         | 10.3               |
|           |     | 365              |                        | 10.5         |                    |
|           |     | 360              |                        | 8.7          |                    |

物,进行了对比试验。试验中,熔体温度均定为 870 °C,炉料预热温度 250~350 °C,以便去除表面水分。试验结果如表 2 所示。可见,仅仅将熔体过热时,合金的机械性能很低。不同形式的炉料(除 Cu 粒料外)对合金性能均产生有利的作用;其中以采用现场浇注炉料、1/3 回炉料和坩埚冷却炉料的作用效果为最好。将合金中 Cu 以粒料加入时,合金性能最差。为了考察是否为 Cu 未熔化所致,将该炉重熔后,合金性能仍很低。上述结果表明,将过热熔体

表2 不同炉料激冷熔体对机械性能的影响

| 冷料形式                          | $\sigma_b$ / MPa | $\delta_5$ % |
|-------------------------------|------------------|--------------|
| 10%回炉料 <sup>1)</sup>          | 368              | 14.3         |
| 30%回炉料                        | 401              | 9.8          |
| 覆盖 5%切屑料+20%回炉料               | 370              | 11.1         |
| 搅入 5%切屑料+20%回炉料               | 385              | 14.6         |
| 5%Al 粒炉料+20%回炉料 <sup>2)</sup> | 357              | 11.8         |
| 5%Cu 粒炉料+20%回炉料 <sup>2)</sup> | 244              | 16.8         |
| 30%Al 锭料                      | 383              | 9.8          |
| 30%现场浇合金料                     | 415              | 10.5         |
| 30%坩埚冷却液料 <sup>3)</sup>       | 402              | 11.7         |
| 不加冷料                          | 342              | 4.6          |

注: 1) 各试验中用回炉料均为金属型料;

2) 粒状炉料采用氮气雾化法制取,粒度 1~3 mm;

3) 为同炉合金液浇入另一冷坩埚后接近凝固的液料。

进行激冷处理是本工艺中必要的环节之一。考虑到生产实践的便利,采用加入回炉料和现场浇注炉料的形式是可取的。冷料合适的加入量范围为全部炉料重量的 1/4~1/2,具体加入量

应以降低熔体温度的要求来确定,以炉料激冷后,熔体温度在 720~760 °C 温度内为宜。

### 2.3 搅拌时间试验

激冷炉料加入后,应立即对合金液施加强烈的搅拌,这是元素和热量须扩散的能量补充和强制手段,但搅拌波浪高度应避免破坏液面氧化膜的完整性。不同搅拌时间对合金机械性能的影响试验表明:搅拌时间过长对机械性能不利。原因可能是搅拌时间过长造成合金液吸气、氧化夹杂,以及搅拌铁具使合金液增铁、造成合金的杂质增加所致。因此,搅拌时间应尽量短,以固体料熔清 10s 左右为宜。

### 2.4 合金重熔试验

采用严格相同的熔铸工艺,将同炉合金进行多次重熔试验,结果如图 1 所示。可见,过热温度 870 °C 时,合金经一次重熔后, $\sigma_b$  最高,随后保持在较高值状态。经四次重熔后,变化不大。过热温度在 920 °C 时也是重熔一次的  $\sigma_b$  最高,随后逐渐降低。延伸率是逐渐降低的,870 °C 时的  $\delta$  除在第一次重熔略低外变化不大。试验结果表明,两种过热熔体为新料状态时性能较低。笔者认为,重熔炉料全部是金属型结晶,其中部分为热处理后回炉料,由于金属型的急冷效果,使得回炉料晶粒细化。热处理后炉料的机械性能亦优良,根据组织和性能的遗传性规律<sup>[3]</sup>,由于优质炉料的遗传效应,使重熔合金的机械性能提高。870 °C 过热后,合金新料与一次重熔的金相组织如图 2 所示。可见,重熔后合金的晶粒较细。920 °C 过热时,多次重熔后合金性能的下降,与其熔体吸气、增铁的倾向较大和细化元素的失效有关。大量试验证明,每次回炉料用量不超过 2/3 时,合金的机械性能是稳定的,证明了 SMT 工艺用于实际生产是可行的。

### 2.5 SMT 工艺处理对合金质量的影响

当铝合金液过热至 800 °C 以上时,我们对其铸造质量进行了考察,将同成分合金液在不同过热温度下保温 10 min,浇入  $d 35 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  干砂型中,将试样剖开,磨光,于 5% NaOH 溶液中侵蚀后观察气孔情况。采用流体

静力学的天平称量法测定合金的密度<sup>[4]</sup>。试验结果如表3所示。可以看到，过热温度较高时，气孔增多，尺寸较大，密度也随之降低，这是由于温度随合金液的升高，气体的溶解度升高造成的<sup>[5]</sup>。但是，合金采用 C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> 精炼处理后，气孔度明显减少，同 740℃ 正常冶炼时的相

处理的合金很少出现夹杂现象。

### 2.6 SMT 工艺总结

经过反复、系统的试验，确定新工艺最佳程序如图3所示。整个工艺由四个阶段组成：

正常铸造条件下的工艺与 SMT 工艺处理的合金机械性能的对比如表4所示。可见，T6 热处理后，采用新工艺合金的  $\sigma_b$  比正常工艺提高了 10%， $\delta$  提高了 300%，且性能稳定，表明新工艺对提高合金的机械性能效果非常明显，尤其在 T6 处理的情况下。由图4可见，SMT 处理的试样，其晶粒得到明显的细化。

### 2.7 差热分析试验

为了深入了解 SMT 工艺作用的机理，对合金进行了差热分析。试验在日本产 DT-2B 型

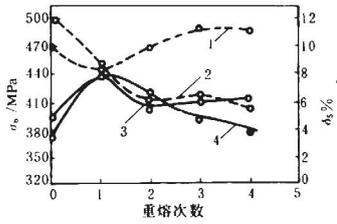


图1 重熔次数对合金的机械性能的影响

1— $\sigma_s$ ，过热温度 870℃；2— $\delta_s$ ，过热温度 920℃；3— $\sigma_s$ ，过热温度 870℃；4— $\delta_s$ ，过热温度 920℃

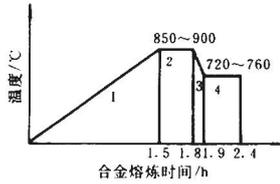


图3 SMT 工艺程序示意图

1—熔化阶段；2—过热处理阶段；3—微冷处理阶段；4—精炼、静置和浇注阶段

表3 熔体过热状态对铸件气孔和密度的影响

| 试样编号 | 合金过热温度 /℃ | 精炼处理                                | 平均气孔数 /cm <sup>2</sup> (剖面) | 孔径 /mm | 密度 /g·cm <sup>-3</sup> |
|------|-----------|-------------------------------------|-----------------------------|--------|------------------------|
| 1    | 740       | 0.4% C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> | 3                           | <0.2   | 2.7626                 |
| 2    | 870       | —                                   | 5                           | <0.25  | 2.7509                 |
| 3    | 870       | 0.4% C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> | 3                           | <0.2   | 2.7624                 |
| 4    | 970       | —                                   | 7                           | <0.27  | 2.7421                 |

表4 不同工艺与合金机械性能的关系

| 熔铸工艺   | 热处理工艺 | $\sigma_b$ /MPa | $\sigma_s$ /MPa | $\delta_5$ /% | HB   | 性能稳定性 |     |
|--------|-------|-----------------|-----------------|---------------|------|-------|-----|
| 正常工艺   | T5    | 401             | 389             | 12.0          | 8.1  | 112   | 不稳定 |
|        | T6    | 3.71            | 376             | 7.2           | 6.4  | 105   |     |
|        | T5    | 448             | 435             | 1.8           | 2.8  | 123   |     |
|        | T6    | 451             | 431             | 1.7           | 2.7  | 126   |     |
| SMT 工艺 | T5    | 420             | 421             | 15.1          | 16.8 | 105   | 稳定  |
|        | T6    | 425             | 413             | 15.0          | 18.3 | 104   |     |
|        | T5    | 487             | 487             | 5.5           | 6.3  | 124   |     |
|        | T6    | 491             | 482             | 6.0           | 5.8  | 128   |     |

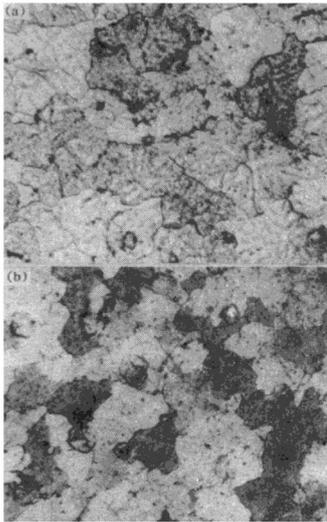


图2 重熔对合金晶粒度的影响

(a)—新材料，×100；(b)—完成一次重熔，×100

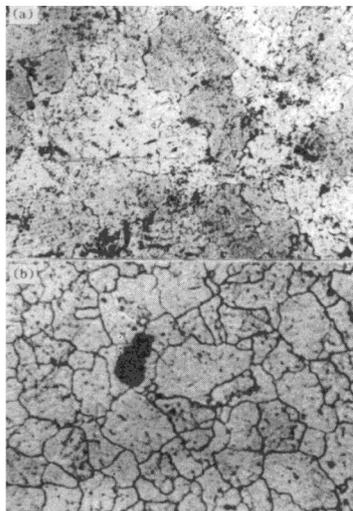


图4 不同工艺处理的合金相组织

(a)—740℃过热正常熔炼, ×100;

(b)—SMT工艺处理, ×100

差热分析仪上进行。将试验合金放入  $Al_2O_3$  坩锅中, 以  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的速度从室温升温至  $990\text{ }^\circ\text{C}$ , 记录下  $\Delta T$  (试样温度与标样温度差) 与炉温 ( $T$ ) 的关系曲线。结果表明:  $600\sim 660\text{ }^\circ\text{C}$  温度突变区为固-液转变所致; 第二个温度突变区出现在  $890\sim 923\text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 表明熔体在高温下产生了组织或结构状态的变化。

### 3 讨论

试验结果证明, Al-Cu 系合金经 SMT 处理后, 性能和组织发生了明显变化。据液态金属结构理论和差热分析结果, 这与合金熔体的高温状态有关, 在原子间相互作用力较弱及方向性不强的情况下, 合金熔体的近程有序结构在高温时会发生变化<sup>[5]</sup>。金属熔化后, 仍由许多原子集团组成, 其平均尺寸、游动速度都与温

度有关<sup>[7]</sup>, 这样, 低温下尺寸较大的原子集团在高温下将由原子结合力较弱和方向性不强的位置裂解成更为细小的原子集团。差热分析结果证明, 当合金熔体加热至高温时, 确实存在与固液转变相似的温度突变, 只是这种突变的幅度较小。高温下的合金原子集团性质与低温下的存在着差异。在金属熔体中, 虽然许多动力学和扩散过程有较大的进行速度, 但它们的组织转变速度却相当低。当过热至高温的熔体与低温炉料混合时, 在机械搅拌作用下, 过热熔体与冷却炉料同时存在, 互相扩散, 冷却炉料迅速吸热与高温熔体迅速冷却同时进行。在这种非平衡条件下, 熔体以很大的速度冷却, 使原始熔体中的某些原子集团来不及转变, 其过热状态被保持下来。同时, 冷却炉料的急速熔化会产生许多微粒悬浮体, 这些微粒的尺寸微小, 沉淀可作为晶粒, 阻碍相邻晶粒的长大; 微粒还起微型冷铁作用, 改善成核条件, 形成更大的成分起伏和能量起伏, 有助于形成细晶粒组织。熔体高温组织的保留和微粒的作用使合金的机械性能发生了较大变化, 因此, SMT 工艺处理的效果可解释为熔体高温过热以及随后的冷料激冷综合作用的结果。

### 4 结论

(1) 采用的 SMT 工艺主要为: 合金熔体在  $850\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$  下保温  $10\sim 15\text{ min}$  后, 加入  $1/4\sim 1/2$  的回炉料或现场浇注炉料, 快速搅熔。

(2) 本工艺处理合金熔体, 能明显提高 Al-Cu 合金的力学性能。经 T6 热处理后的合金, 与采用正常熔炼工艺制得的合金相比,  $\sigma_b$  提高  $10\%$ ,  $\delta$  提高  $300\%$ , 且性能稳定, 其晶粒也产生了细化。

(3) 采用 SMT 工艺生产合金时, 经  $C_2Cl_6$  精炼处理后, 能够保证铸件的铸造质量。

(4) 在适当的过热温度下, SMT 工艺处理的合金具有良好的重熔性能。

(5) 差热分析结果表明, 合金熔体在  $890\sim 923\text{ }^\circ\text{C}$  范围内出现温度突变。

## 参考文献

- 1 Bian X F. Cast Metals, 1992, 5(1): 39—41.
- 2 Таран Ю Н et al. Литейный прои́з-во, 1985, (7): 8.
- 3 Никин В П. Литейный прои́з-во, 1984(5): 13—15.
- 4 中国金属学会, 中国有色金属学会. 金属材料物理性能手册. 北京: 冶金工业出版社, 1987, 18—20.
- 5 铸工编写组. 铸造有色合金手册. 北京: 机械工业出版社, 1987, 54.
- 6 邦达列夫 В Н(著), 王永海等(译). 变形铝合金的细化处理. 北京: 冶金工业出版社, 1988, 95.
- 7 安阁英. 铸件形成理论. 北京: 机械工业出版社, 1989, 12.

## ·企业简介·

## 株 洲 冶 炼 厂 概 况



火炬牌

株洲冶炼厂地处中国“有色金属之乡”湖南省境内的株洲市, 水陆交通便利。工厂现有职工8000余人, 以生产锌、铅、铜及其延伸产品为主, 综合回收铜、铅、锌、金、银、铋、镉、铟、锗、镓、硒、碲等多种有价金属。

16种主产品中铅锭、锌锭、镉锭、热镀锌合金锭获国优金奖, 铋锭获国优银奖 其余分获部省优质产品称号, “火炬牌”铅锭、锌锭均在伦敦金属交易所注册。以“火炬牌”命名的产品行销全国各地, 并免检远销至西欧、美国、日本、澳大利亚、南朝鲜、香港、台湾及东南亚等16个国家和地区, 工厂成为全国铅锌出口基地。

工厂设计能力为年产铜、铅、锌18万吨, 实际能力已达21万吨, 年销售收入15亿元, 年创利税2亿元, 出口创汇1亿美元。目前, 工厂正在改扩建一个10万吨锌生产系统, 届时将形成33万吨生产能力。

工厂本着“质量第一, 信誉第一, 社会效益第一”的宗旨, 欢迎国内外客户与经济贸易界人士光临指导, 交流技术, 使用“火炬牌”产品, 我们将竭诚为用户服务。

地址: 湖南省株洲市清水塘

邮码: 412004

电话: (0733)391240

传真: (0733)391244、391303