

## LY12 合金的挤压铸造微观偏析及改善方法\*

钟 勇 阎德胜 苏国跃 杨 柯

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

**摘 要** 研究了 LY12 合金在挤压铸造中不同压力以及后续扩散退火制度对铸锭微观偏析的影响。结果表明, 微观偏析在挤压铸造的 LY12 铸锭中呈有规律分布: 合适的挤压铸造工艺和后续扩散退火参数能明显减轻偏析程度, 提高铸锭的机械性能, 使之达到或接近同种合金的锻件水平。

**关键词** LY12 合金, 挤压铸造, 微观偏析, 扩散退火

**中图分类号** TG146.2, TG292 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)01-0042-05

### MICROSEGREGATION AND IMPROVING METHOD OF A SQUEEZE CAST LY12 ALLOY

ZHONG Yong, YAN Desheng, SU Guoyue, YANG Ke

Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: ZHONG Yong, Tel: (024)23843531-55410, Fax: (024)23891320, E-mail: zy@imr.ac.cn

Manuscript received 2000-03-17, in revised form 2000-06-08

**ABSTRACT** Squeeze casting of an LY12 (2024) alloy was carried out to investigate the effect of applied pressure and followed diffusion annealing on microsegregation in the alloy. The experimental results indicate that there exists a regular distribution of microsegregation in the cast and a proper squeeze casting followed by a proper diffusion annealing process can markedly reduce the degree of microsegregation and improve the mechanical properties that can be close to the level of forged LY12 alloy.

**KEY WORDS** LY12 alloy, squeeze casting, microsegregation, diffusion annealing

挤压铸造作为一种同时具有铸造与锻造两者优点的工艺, 已广泛应用于高质量铸件的生产。挤压铸造过程中高压的作用消除或减轻了由于金属液中的气体和凝固过程中的收缩所引起的气孔和疏松, 并且增加了金属液的冷却速度和过冷度, 这两方面都有利于形成细晶结构<sup>[1]</sup>。然而, 在挤压铸造过程中仍不能避免产生各种偏析。材料中的偏析按偏析的尺度范围可分为宏观偏析和微观偏析。根据 Hong 等<sup>[2]</sup>的研究, 在挤压铸造中, 铸件的宏观偏析可通过降低浇铸温度和控制比压来消除, 但未见关于挤压铸造中铸件的微观偏析改善方法的详细报道。一般认为, 挤压铸造 LY12 合金中微观偏析的产生是由于在凝固过程中, 凝固前沿溶质富集的低熔点液相在压力作用下被挤向铸件热节处形成的, 通常称这种偏析为“挤压铸造的异常偏析”<sup>[3,4]</sup>。该种偏析产生在晶界处, 弱化了晶界的结

合强度, 降低了基体的溶质含量, 因此严重影响了铸件的强度和塑性。

本文通过研究铸造压力、扩散退火温度和时间对偏析的影响, 了解挤压铸造 LY12 合金中微观偏析的分布规律, 探索较佳的铸造和扩散退火工艺, 以达到减轻偏析, 提高铸件机械性能的目的。

#### 1 实验方法

本实验使用的 LY12 合金属于高强度硬铝合金(相当于美国合金牌号 2024), 合金成分(质量分数, %)为: Cu 4.2, Mg 1.7, Mn 0.6, Si 0.2, Fe 0.1, 余量为 Al。

将铝合金在电阻炉里熔化后精炼除气, 浇铸温度为 710 ℃, 铸模预热至 300 ℃左右, 从浇铸到加压开始时间不超过 4 s, 保压时间约为 100 s, 比压范围在 40—140 MPa。考虑到消除偏析的一般方法是使偏析相在高温下扩散溶解<sup>[5]</sup>, 故实验中采用扩散退火方法, 温度范围从 420—500 ℃, 时间为 3—12 h。为了比较不同退火温度及时间对铸锭偏析的影响, 扩散退火试样全部取自比压为 75 MPa 的铸锭。由于 LY12 合金为可扩散退火强化合

\* 辽宁省科委“青年人才基金”资助项目

收到初稿日期: 2000-03-17, 收到修改稿日期: 2000-06-08

作者简介: 钟 勇, 男, 1974 年生, 硕士

金, 因此扩散退火后的冷却速度对合金的机械性能影响极大。为使实验结果具有可比性, 所有机械性能测定用试样均在退火后进行 T4 处理, 即淬火后自然时效, 制度为 505 °C 保温 45 min 后水冷, 自然时效 96 h<sup>[6]</sup>。铸锭是高约为 200 mm, 外径为 85 mm, 壁厚 22.5 mm, 底部厚 20 mm 的杯形件, 金相试样沿铸锭的横截面切取以观察偏析沿径向的分布规律, 腐蚀剂为 Keller 混和酸溶液, 晶内和晶界的成分分析利用电子探针进行。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 微观偏析的分布规律及比压的影响

图 1 为在不同比压 ( $p$ ) 下 LY12 (2024) 铸锭的显微组织。  $p=40$  MPa 时, 合金的晶粒组织极易成为类似重力铸造状态下的发达的枝晶结构 (图 1a), 大量的化合物聚集在枝晶间隙处 (图 1b), 扫描电镜能谱分析结果表明其主要为 Cu 和 Al 的化合物。  $p=75$  MPa 时, 晶粒组

织为近似等轴晶 (图 1d), 对铸锭晶界和晶内的成分分析表明, 偏析主要表现为 Cu, Fe, Mg 和 Mn 等元素以化合物的形式聚集在晶界上, 从而造成晶界和晶粒间的成分不均, 其中 Cu 和 Fe 的偏析尤为明显, Cu 和 Fe 在晶界上和晶内的成分可相差几十倍, 如图 2a, b 所示。在晶界处还有规律地分布着条带状化合物, 能谱分析其成分主要为 Al, Cu, Fe 和 Mn 等组成的化合物, 根据文献 [7,8] 分析应为  $(\text{FeMnSi})\text{Al}_3$ ,  $\text{FeAl}_3$  及  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ , 其分布规律是化合物以条带状平行分布于铸件与模具的接触面, 并且由铸件表面至芯部逐渐减少 (图 1c), 由此推测此种偏析系低熔点相在高压下被挤入已凝固的枝晶间隙所致。  $p=140$  MPa 时铸件中的偏析分布与 75 MPa 时类似, 但条带的宽度则细得多, 数量也比 75 MPa 时略少 (图 1e), 可见在 140 MPa 下铸件的偏析程度较 75 MPa 下轻, 晶粒明显变细, 原因是在压力的作用下, 金属液和模壁之间的传热系数大大改善; 另外压力提高了金属的凝固点, 增加了

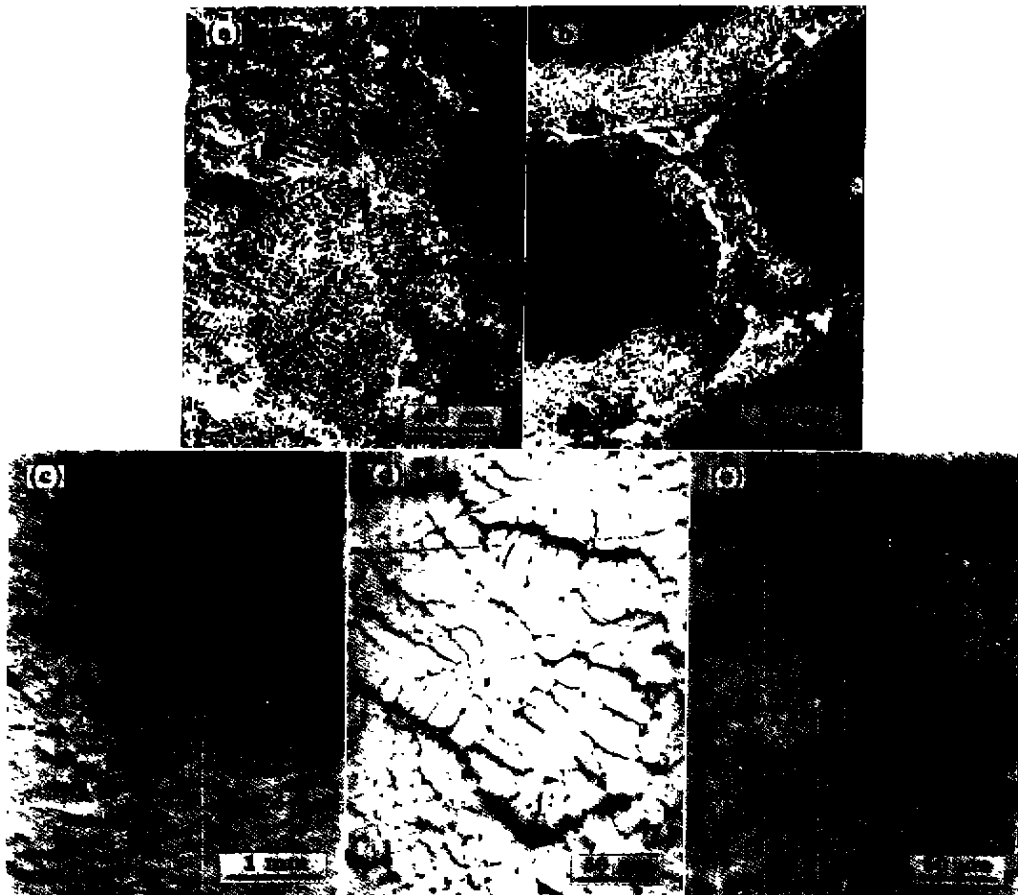


图 1 不同比压下 LY12 (2024) 铸锭的显微组织

Fig.1 Microstructures of squeeze cast LY12 (2024) alloy under various applied pressures ( $p$ )

- (a), (b)  $p=40$  MPa, SEM images showing dendritic structure and compound aggregation between dendrites ( (b) being the magnified image of (a) )
- (c), (d)  $p=75$  MPa, optical micrographs showing equiaxial structure and segregation weakening from surface (top) to interior (bottom) ( (d) being magnified image of (c) )
- (e)  $p=140$  MPa, optical micrograph showing decrease of the width and amount of segregation band (dark regions)

液相的过冷度、提高了凝固的形核率，凝固过程加快，来不及产生大量的高成分液相<sup>[3]</sup>。

2.2 扩散退火对偏析的影响

实验测得未经扩散退火的 70 MPa 挤压铸造铸锭的拉伸性能为： $\sigma_{0.2}=145$  MPa,  $\sigma_b=260$  MPa,  $\delta=7\%$ 。LY12 合金挤压棒材淬火及自然时效 (T4) 状态下的标准机械性能<sup>[9]</sup> 为： $\sigma_{0.2}=275$  MPa,  $\sigma_b=422$  MPa,  $\delta=10\%$ 。

扩散退火对铸锭偏析状况的改善见图 2。考虑到未经扩散退火的铸锭晶界与晶内成分差异很大，因此分别测定了未处理铸锭晶界与晶粒的成分分布。经 500 °C, 6 h 处

理后铸锭中的合金元素分布趋于均匀，铸锭的晶界网络基本消失，故合金元素的测定不再区分晶界与晶内。

由图 3 所示的扩散退火处理对铸锭机械性能的影响可知，420 °C 退火对铸锭机械性能的影响较小，而且随处理时间的延长，断裂强度  $\sigma_b$  的增加不如屈服强度  $\sigma_{0.2}$  明显。延长退火时间至 12 h 后，铸锭的  $\sigma_{0.2}$  接近挤压棒材的标准值，但  $\sigma_b$  仍有较大差距。485 °C 退火对铸锭机械性能的改善效果很明显，可见 485 °C 处理比 420 °C 处理时合金中的元素扩散速度明显加快。在 500 °C 下退火，效果与 485 °C 相似，由于温度提高，扩散速度更快，处理

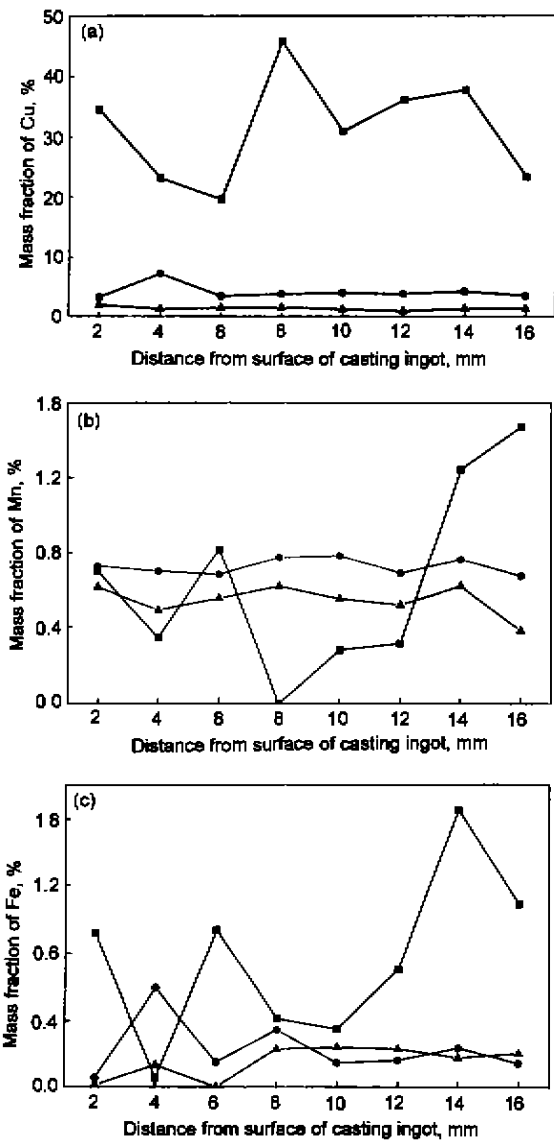


图 2 扩散退火处理前后 75 MPa 挤压铸锭中 Cu, Mn 和 Fe 元素的分布

Fig.2 Distributions of Cu (a), Mn (b) and Fe (c) in squeeze casting LY12 ingot ( $p=75$  MPa)

- at grain boundary of untreated ingot
- ▲ in grain interior of untreated ingot
- in ingot treated at 500 °C for 3 h

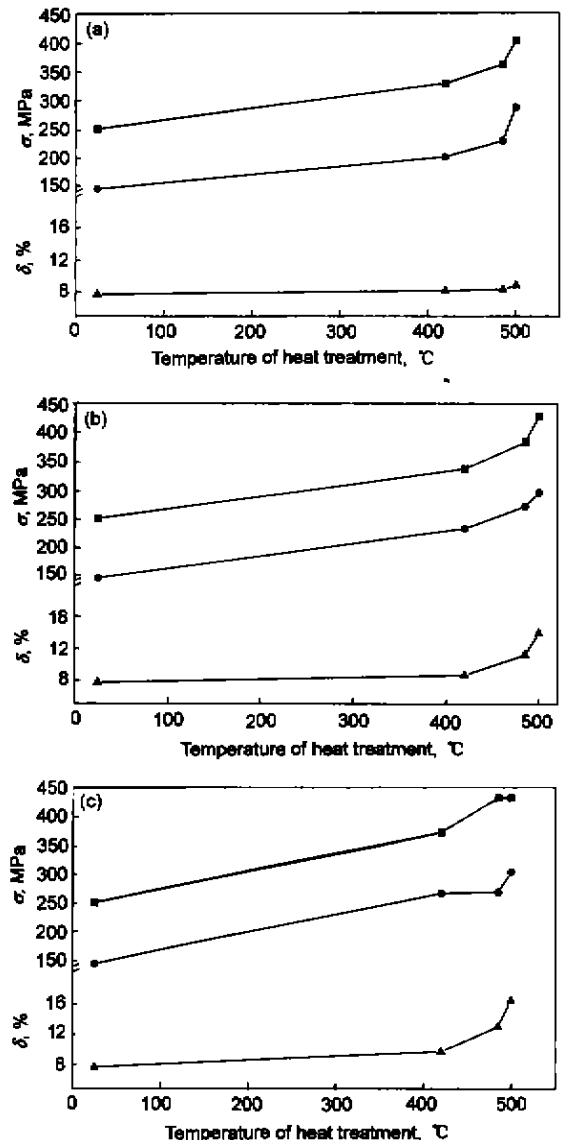


图 3 扩散退火处理温度和时间对挤压铸造 LY12 合金机械性能的影响

Fig.3 Mechanical properties vs annealing temperature for squeeze cast LY12 ingot annealed for 3 h (a), 6 h (b) and 12 h (c)

- $\sigma_b$
- $\sigma_{0.2}$
- ▲  $\delta$

后的性能更好。

退火 3 h 时, 铸锭的强度和塑性都有所提高, 但还不理想, 偏析的改善也不明显。500 ℃退火后铸锭的强度已接近同种合金的锻件水平, 退火时间为 6 h 时, 485 ℃退火后机械性能有较大提高, 偏析状况改善, 晶界网络部分固溶 (图 4a,b), 但塑性指标仍有较大差距, 断裂机制仍为脆性断裂, 断面上可见解理断裂特征, 如图 4c 所示。退火 12 h 后, 偏析条带基本消失, 但基体上仍可见偏析相溶解后留下的痕迹 (图 4d,e), 铸锭的机械性能达到同种合金的锻件水平, 此时铸锭的断裂机制为典型的韧性断裂 (图 4f)。500 ℃退火下偏析改善所需时间缩短, 退火 6 h 后的铸锭显微组织和机械性能与 485 ℃, 12 h 相近; 扩散退火时间延长到 12 h, 铸锭的强度与 485 ℃, 12 h 相当, 但塑性有较显著的提高。因此 485 ℃, 12 h 退火和 500 ℃, 6 h 退火对铸锭中偏析的改善效果可从图 3 的

机械性能变化中反映出来。

以上结果表明, 经过适当的扩散退火后, 比压为 75 MPa 的 LY12 合金挤压铸锭的机械性能已达到同种合金的挤压棒材或轧材水平, 塑性指标还有所超过。

由此可见, 提高扩散退火温度和延长扩散退火时间都有利于挤压铸造中偏析的消除, 但提高扩散退火温度的作用更大。明显的性能改善都发生在退火温度超过 485 ℃及退火时间超过 6 h 以后。500 ℃, 6—12 h 及 485 ℃, 12 h 退火后铸锭的机械性能已接近极限水平。对于只要材料强度, 而对塑性要求不高的应用场合, 500 ℃, 3 h 退火后 T4 处理已可基本满足; 对综合机械性能有较高要求时可采用 500 ℃, 6 h 退火后 T4 或 485 ℃, 12 h 退火后 T4 处理; 对塑性有严格要求时可考虑采用 500 ℃, 12 h 退火后以不大于 30 ℃/h 的冷速缓冷, 这种方式处理是为了消除固溶处理效应的影响, 防止材料发生空

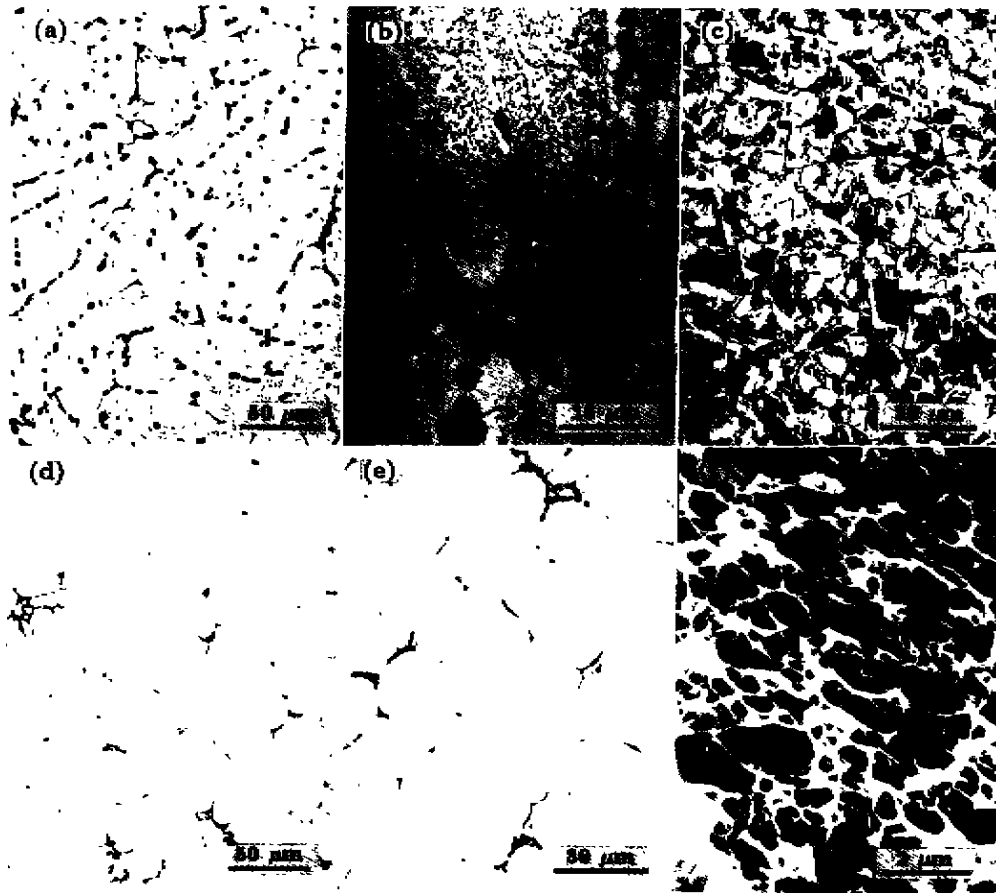


图 4 扩散退火处理对 LY12 (2024) 铸锭偏析状况及断口形貌的影响

Fig.4 Microsegregation and fractography of squeeze cast LY12 alloy annealed at 485 °C for different times  
 (a), (b) optical micrographs of alloy treated for 6 h showing part dissolution of boundary segregation nets  
 ((b) being the magnified image of (a) )  
 (c) SEM image of fracture surface of alloy treated for 6 h showing brittle rupture  
 (d), (e) optical micrographs of alloy treated for 12 h showing disappearance of boundary segregation  
 ((e) being the magnified image of (d) )  
 (f) SEM image of fracture surface of alloy treated for 12 h showing ductile rupture

气淬火以及使强化相质点充分聚集球化<sup>[9]</sup>。考虑到 LY12 合金的过烧温度和工艺的实用性, 500 ℃, 6 h 处理是较为合适的扩散退火工艺。

### 3 结论

(1) 挤压铸造 LY12 合金中存在着微观偏析, 偏析相形状为狭长带状, 方向平行于铸件表面, 分布规律是从铸锭表面至芯部逐渐减少。

(2) 提高挤压铸造的压力, 有助于减轻铸锭中的偏析程度。

(3) 采用合适的扩散退火方法可改善挤压铸造铸锭中的微观偏析, 大幅度提高铸锭的机械性能。

### 参考文献

- [1] Peng Q F, Luo S Q, Sun Z Y. *Mach Forge*, 1985; (3): 21  
(彭其凤, 罗守清, 孙宗玉. 锻压机械, 1985; (3): 21)
- [2] Hong C P, Shen H F, Cho I S. *Metall Mater Trans*, 1998; 29A: 341
- [3] Qi P X. *Squeeze Casting*. Beijing: National Defence Industry Press, 1984: 256  
(齐丕璜. 挤压铸造. 北京: 国防工业出版社, 1984: 256)
- [4] Wang Y, Li D, Gao M. *Abnormal Segregation in Squeeze Aluminum Alloy*. International Academic Publishers, 1990: 299
- [5] Dobatkin V I. Translated by Hong Y X, Xie J S et al. *The Microstructure and Properties of Semimanufactures of Aluminum Alloy*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984: 10  
(Добаткин В И 主编. 洪永先, 谢继三等译. 铝合金半成品的组织与性能. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 10)
- [6] American Society for Metals. *Metals Handbook Ninth Edition*. Vol. II, Metals Park, Ohio: ASM, 1978: 74, 28
- [7] Editorial Group of Metallography Atlas. *Metallography Atlas of Deformable Aluminum Alloy*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1975: 95  
(金相图谱编写组. 变形铝合金金相图谱. 北京: 冶金工业出版社, 1975: 95)
- [8] Kvasov F I, Fridlianzner N I. Translated by Han B C, Jiang X Q et al. *Industrial Aluminum Alloys*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981: 91  
(Квасов Ф И, Фридлианцер И Н 编. 韩秉诚, 蒋香泉等译. 工业铝合金. 北京: 冶金工业出版社, 1981: 91)
- [9] Li Z F. *Handbook of the Composition and Properties of World Non-ferrous Metal*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 143  
(李震复主编. 世界有色金属材料成分与性能手册. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 143)