

电磁铸造与普通连续铸造 2024 铝合金的组织性能对比

Microstructures and Mechanical Characteristics of EMC and DCC 2024 Aluminum Alloys

曹志强¹, 贾 非¹, 张兴国¹, 金俊泽¹, 郝 海^{1, 2}, 金锡元²

(1 大连理工大学铸造工程研究中心, 大连 116024; 2 韩国全北大学新材料研究所)

CAO Zhi-qiang¹, JIA Fei¹, ZHANG Xing-guo¹, JIN Jun-ze¹, HAO Hai^{1, 2}, JIN Xi-yuan²

(1 Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2 Division of New Materials Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, South Korea)

摘要: 采用电磁铸造技术和普通连续铸造技术铸造了 2024 变形铝合金, 采用光学显微镜和扫描电镜分析了其显微组织, 而且对其进行了固溶处理加人工时效。结果表明电磁铸造锭内部组织细小均匀, 有高的硬度和良好的疲劳性能, 电磁铸造试样的硬度大约是普通连续铸造铸坯的 2 倍, 疲劳性能是普通连续铸造铸坯的 3 倍。电磁铸造铸坯还有良好的耐磨性, 磨损失重量是普通连续铸造的一半。

关键词: 电磁铸造; 显微组织; 硬度; 耐磨性; 疲劳

中图分类号: TG249.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2002) 06-0037-03

Abstract: The 2024 aluminum alloys made by EMC and DCC were analyzed by optical microscope and scanning electron microscope. T6 treatment was given to investigate the mechanical properties such as hardness, wear resistance and fatigue. It is shown that EMC ingots have fine and uniform grain structure, which make the EMC ingots have high hardness and good fatigue. The hardness of EMC specimens is two times as high as DCC ones and the fatigue three times in as-cast state. The EMC specimens also expresses an excellent characteristic in wear resistance; the weight loss is only a half of DCC specimens.

Key words: electromagnetic casting; microstructure; hardness; wear resistance; fatigue

电磁铸造技术是铸造工程和电磁流体力学相结合的一门技术。电磁铸造利用电磁力约束液体金属, 感应器内通过交变电流, 交变电流产生交变电磁场。交变电磁场与液体金属表面产生的感应电流相互作用, 产生电磁体积力^[1]。电磁铸造技术的优势在于其熔体内部能产生电磁搅拌作用, 电磁搅拌导致铸坯内部晶粒的显著细化。

此外, 由于是无模铸造, 其表面和亚表面性能也得到改善, 通常可以直接用于热轧, 而普通连续铸造铸坯表面则不可避免地要进行铣面处理^[2, 3]。除了细化内部组织外, 电磁铸造还使内部合金元素分布更均匀, 降低了内部缩松和显微偏析, 消除了内部微裂纹^[4]。正是由于电磁铸造技术的这些特性, 世界上许多科学家们都在从事这方面的研究^[5]。

以往的研究工作主要集中于电磁铸造的成型稳定性和磁流体力学方面, 而对电磁铸造的显微组织和力学性能研究较少。与普通连续铸造法相比, 电磁铸

造有更加良好的显微组织和优良的力学性能。本工作针对 2024 合金进行了电磁铸造和普通连续铸造的对比研究。2024 铝合金的名义成分为 Al 4.3 Cu 1.6Mg 0.7Mn, 其主要相为 $\alpha + S + \theta$ 是硬铝中应用最广、强度最高的一类。主要用于飞机的蒙皮、壁板等, 也可用于制作高温下工作的航空发动机内的压气机叶片、盘等。

1 实验过程

1.1 电磁铸造过程

生产时采用的工艺条件是: 感应器电流 4800A, 液柱高度 40mm, 凝固前沿位于感应器底部上方 10mm, 浇注温度为 710 ~ 730 °C, 冷却水流量为 3m³/h, 铸造速度为 0.3 ~ 1.5mm/s。最终成功地铸造出了 $\phi 74$ mm 的电磁铸造铝坯^[6]。普通连续铸造采用的工艺参数与电磁铸造相同。

除了铸态外, 2024 合金还要经过固溶处理和人工时效 (T6 处理), 具体是先将试样在盐浴中加热到 495 并保温 1h, 然后在冰水里淬火, 淬火后样品马上在 190 的硅油中保持一定时间进行时效硬化。

1. 2 力学性能测试

1. 2. 1 硬度测量

为了比较两种铸造方法生产的铸坯的力学性能, 反映热处理效果, 实测了热处理前后试样的硬度, 采用洛氏硬度计测量, 载荷为 60kg, 每个点测量 7 次, 然后取平均值。

1. 2. 2 磨损实验

在 PLINT TE88 多功能磨损机上测定了试样的耐磨性。测量时载荷为 60N, 滑移距离 200m, 滑移速度 1m/ s。摩擦副采用的是经过淬火的 AISI1055 钢。圆柱状试样被加工成长 15mm、直径 8mm。称量试样磨损前后的重量。

1. 2. 3 疲劳实验

样品沿轴向放置, 在 Instron8516 水压疲劳试验机上进行。实验温度为 23 , 正弦波形加载, 应力比 $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = -1$, 频率为 20Hz, 载荷为 100MPa。

2 结果与讨论

2. 1 显微组织

图 1 显示了 2024 铝合金铸态横截面的显微组织。显然 EMC 铸坯从边部到中心都是均匀细小的等轴晶, 化合物相 S+ θ 断续状沿 α 枝晶分布, 而 DC 法 α 枝晶粗大, 不够均匀, 尤其是靠近铸锭心部, S+ θ 相以网状沿 α 枝晶分布, 有积聚状, 而普通连续铸造铸坯的晶粒度从表面到中心逐渐增大。局部的凝固时间可能因为热传导减慢而延迟, 这样晶粒在熔池中就有充分的时间生长、粗化。枝晶组织因奥斯托沃德成熟理论而粗化^[7]。

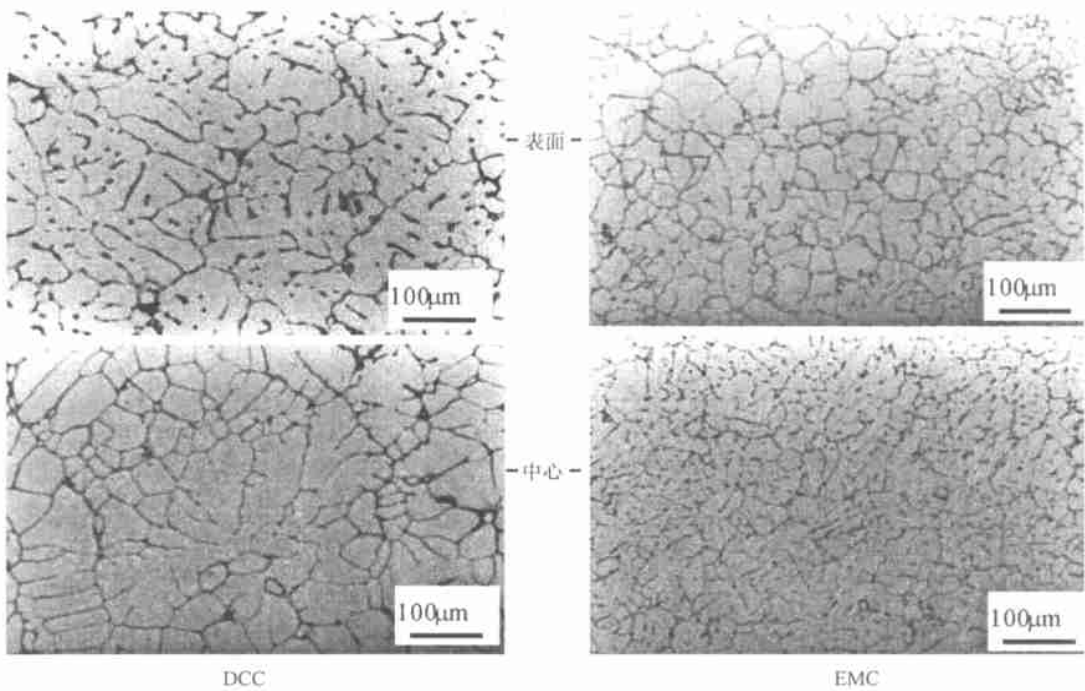


图 1 普通连续铸造和电磁铸造铝合金铸态的显微组织对比
Fig. 1 Microstructure comparison of DCC and EMC ingots at as-cast state

电磁铸造过程中强烈的电磁搅拌作用, 使枝晶组织细化、均匀化。流动加速了过热的驱散并打碎枝晶臂, 从而导致晶粒的倍增。凝固前沿附近悬浮的晶核很容易被带走, 并重新分布于过热的液体中。最终整个液体中因大量悬浮晶核的存在, 几乎同时结晶, 从而形成了细小的等轴晶。这样形成的晶粒从边缘到铸坯中心均匀分布。

2. 2 力学性能

2. 2. 1 硬度

如表 1 所示, 电磁铸造铸坯的宏观硬度比普通连续铸造铸坯的硬度高 2 倍多。固溶处理后材料的硬度提高大约 30%。细小的晶粒结构导致硬度的大幅度增加。

图 2 显示了固溶处理后 2024 铝合金经过不同时

间人工时效时硬度的变化。显然，电磁铸造铸坯经过

表 1 铝合金的宏观硬度对比

Table1 Microhardness comparison of aluminum alloys

合金种类	DCC	EMC	DCCT 6	EMCT 6
硬度	16.0	31.7	20.6	37.0

12h 处理后就达到其峰值，而普通连续铸造铸坯在经过 36h 后才达到其峰值，这说明电磁铸造铸坯较普通连续铸造铸坯具有更显著的时效硬化特性。经过热处理后 2024 铝合金的强化相 S (Al_2CuMg) 变为过渡相 S" + G.P. 区，而 $\theta(Al_2Cu)$ 相变为过渡相 θ' + G.P. 区。过渡相附近存在应变场引起的应力场，阻碍着位错的运动，从而使合金的硬度、强度显著增加。

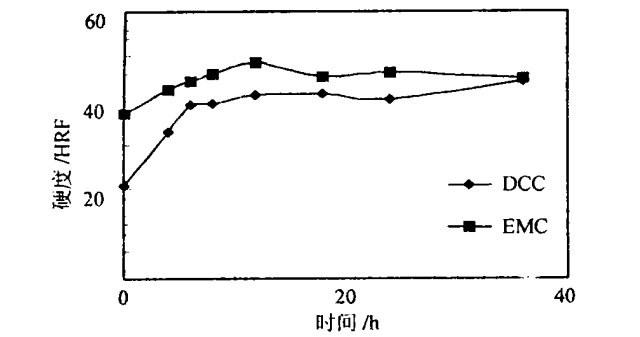


图 2 固溶处理后合金的人工时效硬化曲线
Fig.2 Artificial aging curves of alloys after solution heat treatment

2.2.2 耐磨性能

试样经过 200mm 的滑移后磨损失重量如表 2 所示，电磁铸造铸坯热处理前后的耐磨性均好于普通连续铸造的，前者大约是后者的一半。热处理后材料的磨损量明显降低。

表 2 铝合金的磨损失重量对比

Table 2 Weight loss comparison of aluminum alloys

合金种类	DCC	EMC	DCCT 6	EMCT 6
失重量/mg	3.0	1.6	2.0	1.0

电磁铸造铸坯耐磨性的显著提高主要缘于其非常细小的枝晶结构和均匀致密的显微组织。小的晶粒结构有利于抵抗磨损面的摩擦力。热处理后的耐磨性提高，则主要与沉淀强化相的析出有关，沉淀强化相的析出提高了 T6 处理后试样的硬度。

2.2.3 疲劳试验

表 3 显示了合金的疲劳试验结果。电磁铸造铝合金的循环次数大约是普通连续铸造合金的 3 倍。无论是铸态还是热处理状态都如此。热处理后材料的疲劳

性能明显升高。电磁铸造铝合金表面光滑、无缩松、几乎无亚表面的化学成分偏析，这都有利于其疲劳性能的提高。

表 3 铝合金的疲劳性能对比

Table 3 Fatigue properties comparison of aluminum alloys

合金种类	DCC	EMC	DCCT 6	EMCT 6
循环次数	37484	94674	128536	735567

3 结论

(1) 电磁搅拌的存在导致了电磁铸造铸坯有细小均匀的显微组织，这有利于其铸态和热处理状态力学性能的提高，并使得电磁铸造铸坯的热处理时间缩短。

(2) 电磁铸造铸坯的疲劳性能大约是普通连续铸造铸坯铸态时的 3 倍，硬度和耐磨性也提高了 1 倍，电磁铸造铸锭表面光滑、无显微缩松，这些均有利于其疲劳性能的提高。

参考文献

[1] GETSELEV Z N. Casting in an electromagnetic field [J]. J Metals, 1971, 23 (10): 38—39.

[2] GARNIER M. Present and future prospect in electromagnetic processing materials [A]. International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials [C]. 1994, Nagoya, ISIJ, Japan, 1—8.

[3] PRASSO D C, EVANS J W and WILSON I J. Heat transport and solidification in the electromagnetic casing of aluminum alloys: part I. Experimental measurements on a pilot-scale caster [J]. Metall Trans B, 1995, 26B: 1243—1251.

[4] LI B Q. Solidification processing of materials in magnetic fields [J]. JOM, 1998, 50 (2): 1—10.

[5] ASAI S. Birth and recent actions of electromagnetic processing of materials [J]. ISIJ International, 1989, 29 (12): 981—992.

[6] ZHANG Xingguo, JIN Junze, CAO Zhiqiang. Control of formability of EMC liquid metal column [J]. Trans Nonferrous Metals Society China, 1996, 6 (2): 117—122.

[7] BRYSON N. Direct chilleasting in got: progress in control [A]. F Weiberg, edited. International Symposium on Solidification Processing [C]. Hamilton, Ontario, Canada, 1990, 69—73.

基金项目：国家自然科学基金资助项目（59901001，59995442）
收稿日期：2001-01-02
作者简介：曹志强（1965—），男，副教授。1987 年毕业于湖南大学机械系，1998 年获大连理工大学材料系博士学位，长期从事电磁复合铸造和电磁连续铸造的教学和科研工作，承担完成了国家自然科学基金青年基金、重点项目和国家 973 项目、辽宁省科委重点项目等多项研究，发表论文 40 余篇，联系地址：辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学铸造中心（116024）。