

水冷铜模对添加 Mn 和 Zr 的 6061 铝合金微观组织及力学性能的影响

申 华^{1,2}, 史建超¹, 穆永亮¹, 罗洪杰¹, 姚广春¹

(1. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 沈阳化工大学, 辽宁 沈阳 110142)

摘 要: 研究了水冷铜模铸造对添加 Mn 和 Zr 元素的 6061 铝合金的微观组织及力学性能的影响。利用金相显微镜、扫描电镜和 EDS 能谱, 分析合金的微观组织; 结合 X 射线衍射分析及 Vegard 定律, 估算铸态及均匀化处理后 Mg、Si 和 Mn 元素在合金中的固溶度; 通过拉伸试验测试含 Mn 和 Zr 的 6061 铝合金力学性能。结果表明: 水冷铜模亚快速凝固铸造降低了溶质元素 Mg、Si、Mn 在铸态合金中的偏析, 减少了合金的均匀化处理时间; Mn 和 Zr 元素的添加, 使晶粒细化明显; 水冷铜模使铸态析出相由骨骼状和条状的 β 铁相转变为颗粒状的 α 铁相, 均匀化处理后主要以颗粒状的 α -Al₃(MnFe)₂Si 和 α -Al₃(MnFeCr)₂Si 相存在。采用水冷铜模铸造的含 Mn 和 Zr 的 6061 铝合金, 其拉伸性能得到明显改善。经均匀化处理后其抗拉强度达到 286 MPa、屈服强度 127 MPa, 延伸率 17.84%。

关键词: 6061 铝合金; 水冷铜模; 亚快速凝固; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)01-0300-09

6061 铝合金是 Al-Mg-Si (6xxx) 系铝合金最重要的合金之一, 是一种可进行时效热处理的中等强度铝合金。因具有良好的塑性、耐蚀性、可焊接性及着色性能, 广泛应用于机械零件、建筑、通讯、交通运输及航空等领域^[1-7]。铸造过程是 6061 铝合金生产的重要步骤, 具有遗传性, 影响合金的铸造性能及后续加工的力学性能^[8,9]。亚快速凝固是介于近平衡低速生长和远离平衡快速生长间的过渡区, 其冷却速度在 $10 \sim 10^3$ K/s 范围内^[10]。亚快速凝固可以细化晶粒、减小第二相尺寸以及提高合金溶质元素在基体中的固溶度^[11]。且设备简单, 容易实现工业化^[12]。

提高合金力学性能大多采用改变材料微观组织结构的方式, 例如添加微量元素、改变热处理方法以及大塑性变形制备超细晶结构等。其中添加微量元素可以改善合金析出相类型和结构, 降低晶粒尺寸以及提高再结晶温度^[13-16]。在实际生产过程中, 采用普通铸造过程制备的合金要进行几十小时、甚至上百小时的热处理, 消耗了大量的时间和能源, 增加了生产成本^[8]。而采用水冷铜模的亚快速凝固技术, 可以得到晶粒细小的微观组织, 同时降低溶质元素在凝固过程中的枝晶偏析, 减少均匀化处理时间。本实验采用水冷铜模铸造添加微量 Mn, Zr 元素的 6061 合金, 研究水冷铜模铸造和微量元

素对合金的微观组织和力学性能的影响。

1 实 验

实验所用的材料为: 商用 6061 铝合金铸锭 (其主要成分如表 1)、Al-6%Zr 和 Al-9%Mn (质量分数) 中间合金。

将 6061 铝合金放入高纯石墨坩埚内, 采用中频电磁感应真空熔炼炉熔炼。加热至 750 °C, 分别加入 Al-6%Zr、Al-9%Mn 中间合金。用石墨棒搅拌 1 min, 静置冷却, 使炉内温度降低到 720 °C, 保温 10 min。添加六氯乙烷, 用石墨棒轻轻搅拌 1~2 min。将温度升温至 780 °C, 静止保温 10 min。扒渣后分别在水冷铜模及铁模内浇铸, 得到铸锭。

水冷铜模铸锭尺寸为 100 mm×30 mm×150 mm, 铁模铸锭尺寸为 $\Phi 40$ mm×100 mm。铜模铸锭沿横截面剖开 (距底部 30 mm), 在截面中心截取 10 mm×10 mm×10 mm 及拉伸试样。铁模铸锭沿圆心纵截面剖开, 在截面中心截取试样。拉伸性能测试在 SANS 100 kN 电子万能材料试验机上进行, 拉伸速度为 0.5 mm/s。每个状态测定 3 个样品取平均值。

铸态合金的实际成分采用全谱直读型电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP, Per-kin Elmer, Plasma 400) 测试, 结果如表 1 所示。均匀化处理制度为 560 °C, 3 h。

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51301109)

作者简介: 申 华, 女, 1971 年生, 博士, 副教授, 沈阳化工大学应用化学学院, 辽宁 沈阳 110142, E-mail: yywddssh@sina.com

表 1 实验合金的实测化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental alloys ($\omega/\%$)

Alloy	Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	Fe	Zr	Al
6061	0.901	0.737	0.010	0.240	0.014	0.128	0.008	0.192	-	Bal.
6061-0.15Mn-0.05Zr	0.750	0.615	0.147	0.170	0.013	0.110	0.009	0.320	0.043	Bal.

通过金相显微镜和 SEM 对铸态和均匀化处理后的合金的微观组织、形貌进行观察, 并结合其附件能谱仪(EDS)对表面微区成分进行分析。通过 X 射线衍射仪(XRD)分析合金的相组成。

对铸态和均匀化试样进行室温拉伸, 标距为 25 mm, 应变率为 $6.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 水冷铜模铸造含 Mn、Zr 的 6061 铝合金铸态微观组织

图 1 是 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金分别通过铁模和水冷铜模浇铸的铸态合金金相照片。

对比图 1a 和 1b, 铁模铸造试样平均晶粒尺寸约 278 μm , 而铜模铸造试样的平均晶粒尺寸为 195 μm 。铁模铸造试样晶间第二相和晶内颗粒状化合物数量明显多于铜模铸造试样。由图 1c 可知, 铁模铸造

6061-0.15Mn-0.05Zr 试样的晶粒尺寸为 216 μm , 金属间化合物数量增多, 颗粒变大、条状变宽。图 1d 为添加 0.15% Mn 和 0.05% Zr 水冷铜模铸造试样, 其晶粒尺寸为 177 μm , 金属间化合物数量减少, 细小颗粒均匀分布在晶体内。由以上分析可知: Mn、Zr 的加入, 使晶粒尺寸减小, 但金属间化合物数量增加。而采用水冷铜模铸造, 晶粒尺寸减小, 同时金属间化合物数量也降低, 且分布均匀。

图 2 是 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金通过铁模和水冷铜模浇铸的铸态合金 SEM 照片。

图中可观测到 3 种形貌的金属间化合物结晶相: 颗粒状、条块状和骨骼状。结合 EDS 能谱(表 2)及文献[4, 5, 16], 颗粒状相为 $\alpha\text{-Al}_8(\text{MnFe})_2\text{Si}$ 和 $\alpha\text{-Al}_8(\text{MnFeCr})_2\text{Si}$ (图 2a~2d 点 2); 条块状相为 $\alpha\text{-Al}_9(\text{MnFe})_3\text{Si}_2$ (图 2b~2d 点 3); 骨骼状相为 $\text{Al}_5(\text{MnFe})\text{Si}$ 和 $\text{Al}_5(\text{MnFeCr})\text{Si}$ (图 2a 点 1 和图 2c 点 1)。

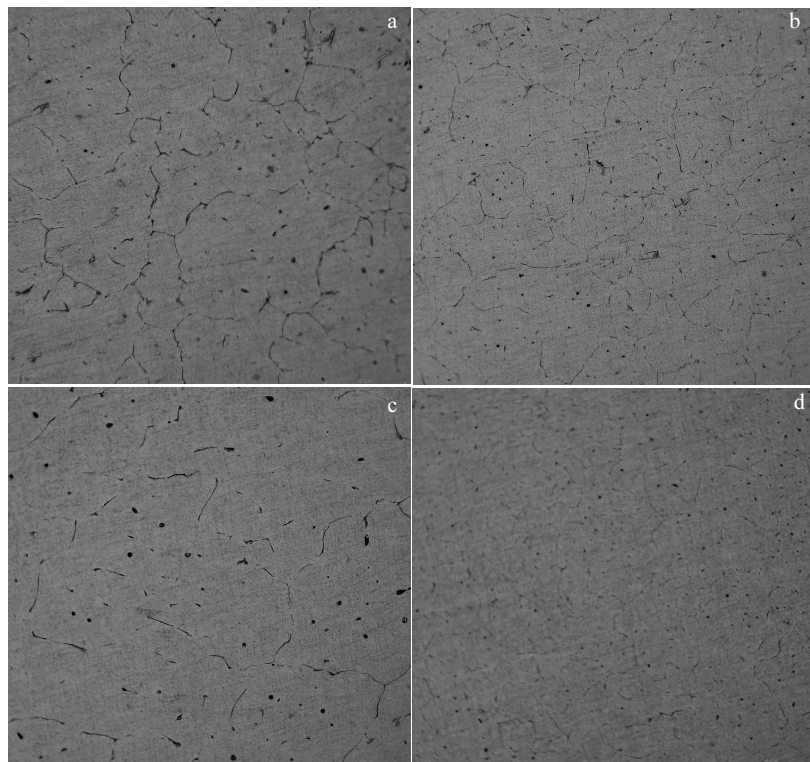


图 1 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造铸态的金相显微组织

Fig.1 Metallographic microstructures of as-cast 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

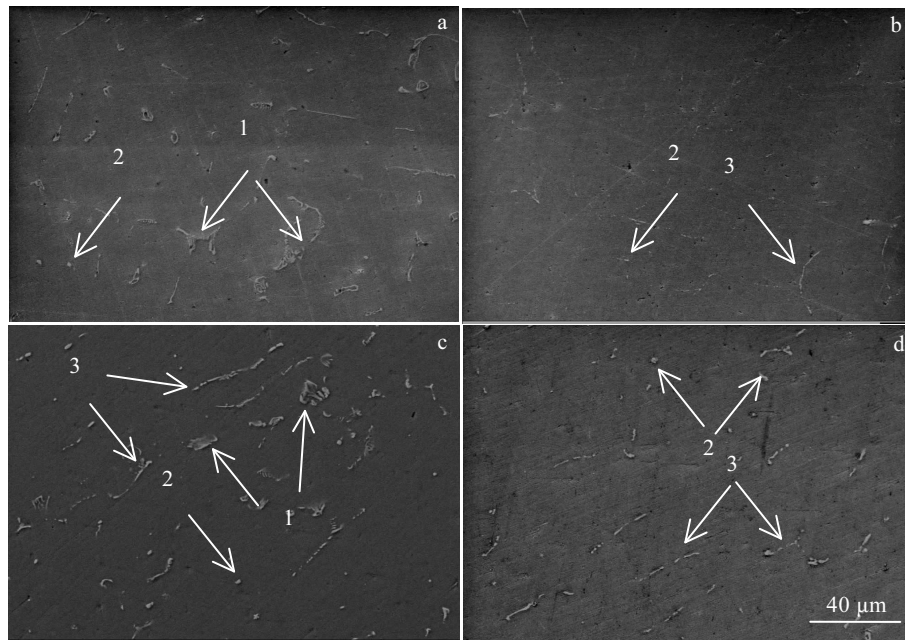


图 2 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造铸态的 SEM 照片

Fig.2 SEM images of as-cast 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

表 2 合金铸态结晶相成分的 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of compositions of as-cast alloy in Fig.2 (at%)

Point	Al	Si	Fe	Mn	Cr	Mg	Zr	Phase
1 in Fig.2a	89.19	4.44	2.16	3.66	0.16	0.39	-	Al ₅ (MnFe)Si
2 in Fig.2a	85.47	5.94	7.63	0.19	0.47	0.30	-	α -Al ₈ (MnFe) ₂ Si
2 in Fig.2b	85.27	5.52	2.79	5.44	0.47	0.51	-	α -Al ₈ (MnFe) ₂ Si
3 in Fig.2b	88.44	3.73	6.73	0.26	0.35	0.49	-	α -Al ₉ (MnFe) ₃ Si
1 in Fig.2c	86.72	5.74	4.15	2.65	0.30	0.41	0.03	Al ₅ (MnFe)Si
2 in Fig.2c	73.19	10.28	5.94	9.12	0.75	0.69	0.03	α -Al ₈ (MnFe) ₂ Si
3 in Fig.2c	86.18	4.57	5.08	3.32	0.30	0.48	0.07	α -Al ₉ (MnFe) ₃ Si
2 in Fig.2d	77.78	8.48	6.17	7.05	0.39	0.05	0.08	α -Al ₈ (MnFe) ₂ Si
3 in Fig.2d	85.22	5.28	5.65	3.18	0.22	0.39	0.06	α -Al ₉ (MnFe) ₃ Si

水冷铜模铸造使粗大的第二相形貌发生改变,同时使析出相数量减少、尺寸减小,析出相由骨骼状和条状的 β 铁相转变为颗粒状的 α 铁相。Mn 和 Zr 的加入,增加了第二相数量,但细化了晶粒,出现了条块状相 α -Al₉(MnFe)₃Si₂ (图 2c 点 3)。析出相中还存在少量的 Mg 元素, Mg 析出相主要是以 Mg₂Si 相的形式析出^[6]。

铸态 6061 铝合金的 XRD 图谱 (图 3) 显示,除 α -Al 的衍射峰,没有检测到其它物相的衍射峰,表明合金中金属间化合物的含量很低。凝固过程中,由于采用水冷铜模浇铸,熔体冷却速度较快,过冷度较大,

溶质元素扩散困难,大量合金元素以固溶形式固溶于基体中,导致合金中只生成少量的金属间化合物,无法在 XRD 图谱上呈现出相应的衍射峰。另外,由于 6061 铝合金中 Mg 的含量低 (<0.90%),即使铸态合金中存在 Mg₂Si 相通常其含量也低于 XRD 的检出限,因此图谱中无 Mg₂Si 相衍射峰^[8]。

为了进一步分析水冷铜模凝固过程中 Mg、Si 和 Mn 元素在固溶体铝中的溶解程度,可以先通过 XRD 测试结果得到 Al 的晶格常数,再根据 Vegard 定律估算 Mg、Si 和 Mn 元素在合金中的固溶度。Vegard 公式:

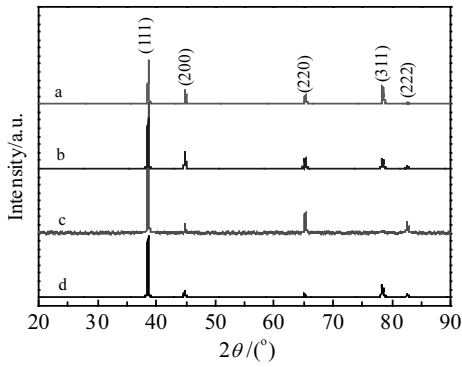


图 3 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造铸态的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of as-cast 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

$$a = a_1x + (1 - x)a_2 \tag{1}$$

其中： a 、 a_1 、 a_2 分别为合金的晶格常数以及两种纯金属的晶格常数， x 为合金的固溶度。

通过 XRD 结果得到 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造铸态合金中 Al 的晶格常数，结果见图 4。从图 4 铸态合金晶格尺寸可以看出，水冷铜模铸造及 Mn、Zr 的添加使铸态铝合金中 Al 的晶格常数减小。6061 铝合金铁模铸造中，铝的晶格常数为 0.40 444 nm，而铜模铸造中铝的晶格常数减小为 0.404 376 nm；6061-0.15Mn-0.05Zr 铸态铝合金铁模铸造中铝的晶格常数为 0.404 362 nm，而铜模铸造中铝的晶格常数为 0.404 331 nm。

6061 铝合金铜模铸造比铁模铸造晶格常数减小 0.000 064 nm；6061-0.15Mn-0.05Zr 铸态合金与 6061 铝合金比较：铁模铸造减小 0.000 078 nm，铜模铸造减小 0.000 045 nm；而对于同时添加 Mn 和 Zr 的 6061 铸态合金的铁模和铜模比较：铜模比铁模的晶格常数减小 0.000 031 nm。这些数据表明：水冷铜模铸造比普通铁模铸造的 6061 铝合金 Al 晶格常数减小，而添加 Mn 和 Zr 后的 6061 铸态合金，晶格常数减小更明显。

图 5 是铁模铸造和水冷铜模铸态 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金中 Mg、Si 和 Mn 元素在合金中的固溶度。图 5 表明，水冷铜模铸造使 Mg、Si、Mn 元素在 6061-0.15Mn-0.05Zr 合金中的过饱和度增加。在铁模铸造过程中，原子扩散迁移速率快，导致合金中析出相增多。铜模铸造使原子扩散迁移速率减慢，溶质元素析出较少，而形成过饱和固溶体。研究表明，经过水冷铜模铸造的 6061 合金中 Mg 和 Si 大

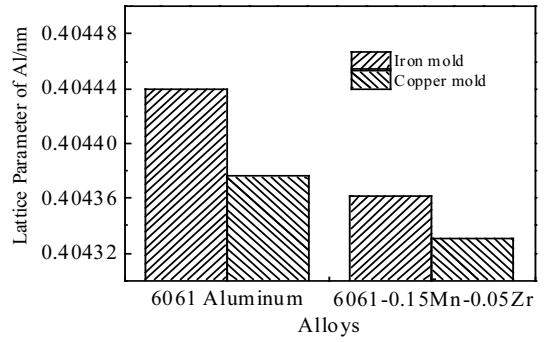


图 4 6061 铸造合金中 Al 的晶格常数

Fig.4 Lattice parameter of Al in as-cast 6061 alloys

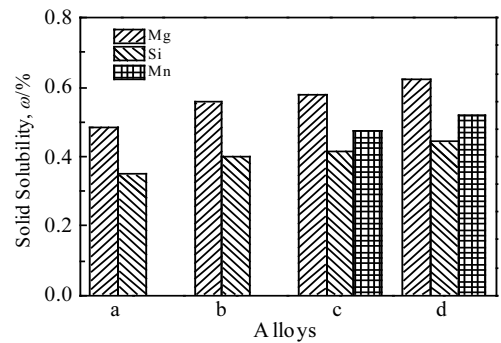


图 5 6061 铝合金和 6061-0.15 Mn-0.05Zr 铝合金铁模和铜模铸造铸态中 Mg、Si 和 Mn 元素的固溶度

Fig.5 Solid solubility of Mg, Si and Mn in as-cast 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

部分溶于 Al 液中，而 Mn 部分溶解。根据 Vegard 定律估算，铁模铸造的 6061 合金约有 0.5%Mg 元素固溶在 Al 基体中，Mn、Si 的过饱和度也升高。6061 合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 合金在水冷铜模浇铸时，由于水冷铜模中铜的导热系数（401 W/m·K）较高，并且在冷却水循环冷却的条件下，使合金在凝固过程中具有较高的过冷度，导致合金固/液界面快速推向液相。因此，水冷铜模凝固可以提高 6061 合金铸造均匀性。在凝固过程中，由于 Mg、Si、Mn 元素未充分扩散，所以降低了铸造合金的偏析程度，同时降低了合金在晶界上的金属间化合物数量。故水冷铜模铸造合金的金属间化合物较铁模铸造减少。

2.2 均匀化处理对合金微观组织的影响

在 6061 铝合金中，水冷铜模铸造较铁模铸造明显改善元素偏析，但仍析出少量金属间化合物。尤其是在 6061 铝合金中添加 Mn、Zr 后，粗大的金属间化合物析出更明显。因此 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-

0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造铸态合金均进行均匀化处理。

图 6 是 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造经过均匀化处理后的金相显微照片。合金经过均匀化处理后，晶界处析出的金属间化合物相对于铸态合金已大幅度减少，晶粒内部枝晶组织消除。说明均匀化制度合理，均匀化处理充分。

图 7 是 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 合金

铁模铸造和水冷铜模铸造经均匀化处理后的 SEM 照片。

由 SEM 照片可以看出，经过均匀化处理后，合金中仍然有少量的金属间化合物未溶解，主要呈条状和颗粒状分布。与铸态合金 SEM 比较，条状金属间化合物宽度降低，颗粒状金属间化合物尺寸减小，金属间化合物的数量也明显减少。结合 EDS 能谱（表 3），均匀化处理后未溶解的金属间化合物主要是由 Al、Si、

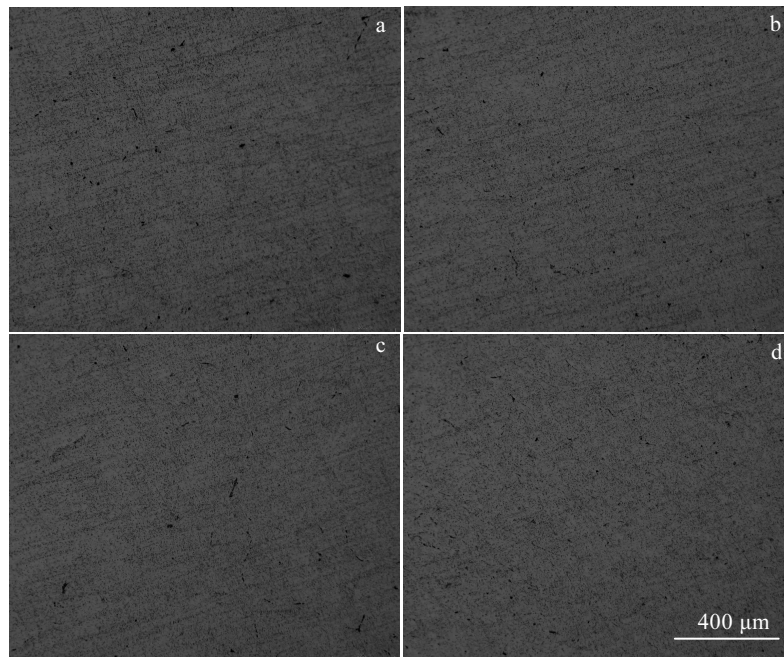


图 6 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造均匀化处理后的金相显微组织

Fig.6 Metallographic microstructures of homogenization-treated 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

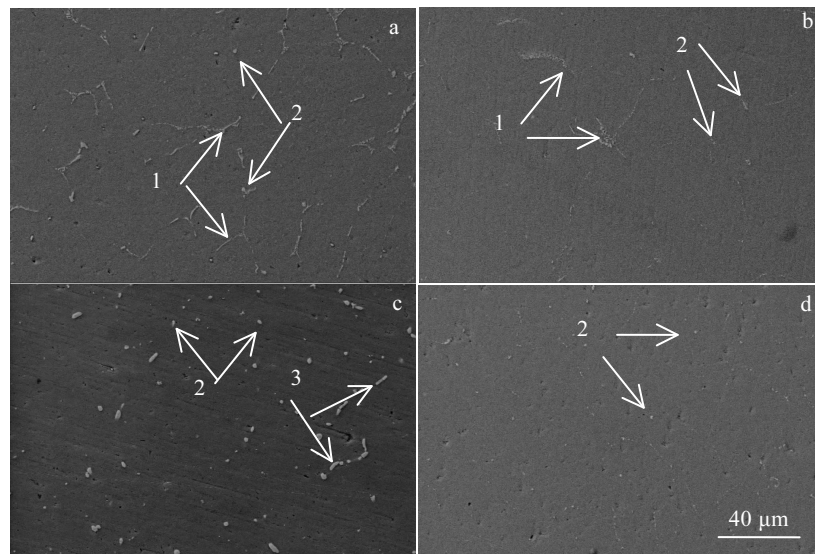


图 7 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造均匀化处理后的 SEM 照片

Fig.7 SEM images of homogenization-treated 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

表 3 图 7 中均匀化处理后合金结晶相成分的 EDS 分析结果

Table 3 EDS analysis results of homogenized alloys in Fig.7a~7d

Point	Al	Si	Fe	Mn	Cr	Mg	Zr	Possible phase
1 in Fig.7a	95.64	1.57	1.56	0.13	0.22	0.88	-	β -Al ₉ Fe ₂ Si ₂
2 in Fig.7a	85.06	5.01	8.69	0.35	0.22	0.67	-	α -Al ₈ (FeMnCr) ₂ Si
1 in Fig.7b	92.15	3.29	3.67	0.21	0.16	0.52	-	β -Al ₉ Fe ₂ Si ₂
2 in Fig.7b	83.65	5.32	9.62	0.38	0.66	0.37	-	α -Al ₈ (FeMnCr) ₂ Si
2 in Fig.7c	86.96	4.44	3.17	5.07	0.26	0.05	0.05	α -Al ₈ (FeMnCr) ₂ Si
3 in Fig.7c	83.63	6.13	5.78	3.86	0.03	0.54	0.03	α -Al ₈ (FeMnCr) ₂ Si
2 in Fig.7d	87.34	3.96	3.10	4.30	0.68	0.57	0.05	α -Al ₈ (FeMnCr) ₂ Si

Mn、Fe 和 Mg 元素组成。其中条状金属间化合物为 β -Al₉Fe₂Si₂ 相 (图 7a 点 1 和 7b 点 1); 颗粒状金属间化合物为 α -Al₈(FeMnCr)₂Si 相 (图 7a~7d 点 2); 随着均匀化处理的进行, 条状金属间化合物 β 相向 α 相转变。Mn、Zr 的加入, 使未溶解的块状 Al₉(MnFe)₃Si 相增多 (图 7c 点 3) [5,16]。其中图 7c 的点 3 出现条状金属间化合物熔断现象, 其原因是均匀化处理后与 Fe、Mn、Zr 元素一起析出的 Mg 和 Si 元素溶解到基体合金中。水冷铜模铸造合金在均匀化处理后, 主要以颗粒状 α -Al₈(FeMnCr)₂Si 相存在。这是由于水冷铜模冷却速度较快, 使得部分 Mg、Mn 元素与 Fe、Si 析出困难。所以在较短时间的均匀化处理后, Mg 和 Mn 部分固溶到晶粒内部, 而铝合金中固溶度低的 Fe 和 Si 元素仍保留在原来的位置。铁模具铸造过程中冷却速度较低, 较多的溶质元素在晶界析出, 均匀化处理时间较短, 只有部分 Mg 和 Si 元素溶解, Fe 和 Mn 等元素组成的金属间化合物未来的转变呈 α 相, 所以在基体中依然呈长条状分布。

图 8 是 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造经过均匀化处理后的 XRD 图谱。

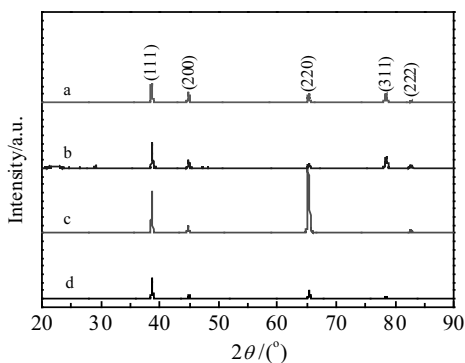


图 8 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造均匀化处理后的 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of homogenization-treated 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

通过 XRD 图谱发现, 只有 α -Al 衍射峰, 没有检测到其他相的衍射峰。由于在合金中化合物数量少, XRD 结果未能有效检测出第二相。

图 9 是根据 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造经过均匀化处理后的 XRD 结果分析得到的 4 种铸造合金中 Al 的晶格常数。

经过均匀化处理后, 4 种 6061 铝合金 Al 的晶格常数均比铸态降低。这是因为经均匀化处理后, Mg、Si、Mn 元素在合金中固溶更加充分, 消除了晶内偏析。Mn、Zr 的加入, 也降低了 Al 的晶格常数。Mn 元素的原子半径小, 所以 Mn 的加入, 导致 Al 晶格常数降低。

图 10 是根据 Vegard 公式计算 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造均匀化处理后 Mg、Si 和 Mn 元素的固溶度。

均匀化处理后, 4 种 6061 铝合金中 Mg 元素的固溶度分别为 0.67%, 0.71%, 0.61%, 0.75%, 与铸态合金相比固溶度提高 30%左右。同时, Si 元素的固溶度也超过 50%。对于 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金, 均匀化处理后 Mn 元素的固溶度提高也超过 50%。因此, 4 种铸态合金均匀化制度为 560 °C, 3 h, 可达到理想

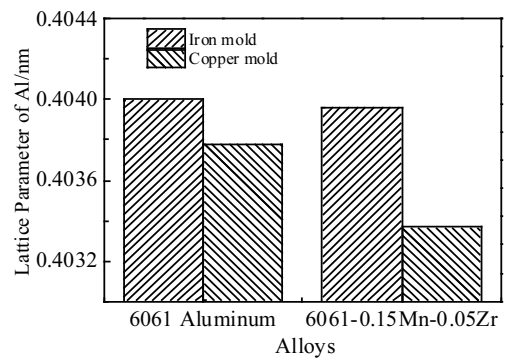


图 9 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造均匀化处理后 Al 的晶格常数

Fig.9 Lattice parameter of Al in homogenization-treated 6061 alloys and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys

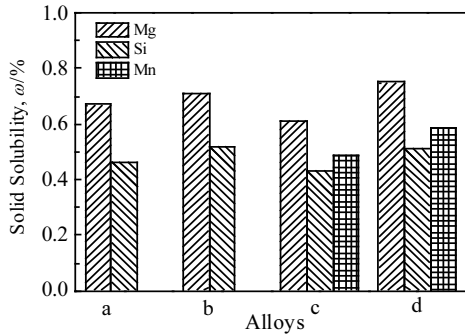


图 10 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造均匀化处理后 Mg、Si 和 Mn 固溶度

Fig.10 Solid solubility of Mg, Si and Mn in homogenization-treated 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

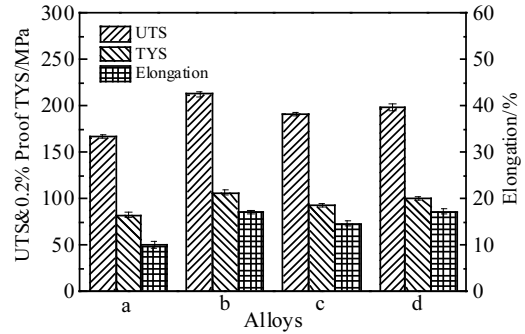


图 11 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造的室温拉伸性能

Fig.11 Tensile properties of as-cast 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

的处理效果。经过水冷铜模铸造的 6061 铝合金，采用亚快速凝固方式降低了 Mg、Si、Mn 溶质元素晶内偏析程度，减少了这些溶质元素的晶界偏析，因此大大降低了均匀化时间。而此类合金通常在 510~560 °C 均匀化 10~16 h^[5,17,18]。

2.3 合金力学性能

2.3.1 铸态合金力学性能

图 11 是 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造的铸态室温拉伸性能。

图 11 反映了水冷铜模铸造及复合添加 Mn、Zr 对 6061 铝合金室温拉伸性能的影响。对于铸态的 6061 铝合金，水冷铜模铸造比铁模铸造的抗拉强度 (UTS) 提高 46 MPa、屈服强度 (TYS) 提高 24 MPa、延伸率提高 7%；复合添加 0.15% Mn 和 0.05% Zr 后，铜模铸造与铁模铸造的 6061 合金相比较，抗拉强度 (UTS) 提高 7 MPa、屈服强度 (TYS) 提高 7 MPa、延伸率提高 3%；而复合添加 0.15% Mn 和 0.05% Zr 的铜模铸造与 6061 合金的铜模铸造相比，抗拉强度 (UTS)、屈服强度 (TYS) 分别降低了 15、7 MPa，

延伸率略增加 0.15%。采用水冷铜模的亚快速凝固方式，改变了组织的形态和分布，改善了合金的力学性能。但是复合添加 0.15% Mn 和 0.05% Zr 的同时采用水冷铜模铸造，抗拉强度和屈服强度略下降，可能的原因是添加 Mn、Zr 后，导致合金中金属间化合物增多，在受到应力的情况下产生应力集中，由于金属间化合物较脆，所以容易产生裂纹源，并且裂纹容易沿着金属间化合物与晶粒直接扩展，使合金的抗拉强度、屈服强度降低。

图 12 为实验合金铸态拉伸试样 SEM 断口形貌。从图中可以看出，该系列合金断口形貌均是典型的韧性断裂，且韧窝尺寸均匀。铁模铸造的 6061 合金韧窝深，在韧窝边缘能观察到滑移痕迹 (图 12a, 12c)，这是由于韧窝边缘的塑性变形是由滑移产生的。而铜模铸造的 6061 合金 (图 12b, 12d)，韧窝尺寸小且浅，这是由于在水冷铜模作用下，原子扩散速度慢，第二相析出困难。进行拉伸变形时，滑移位错受阻，形成位错塞积，沿着界面形成裂纹并扩展，最终导致韧窝型断裂。Mn、Zr 的加入，增加了第二相粒子 (图 12c, 12d) 且不断

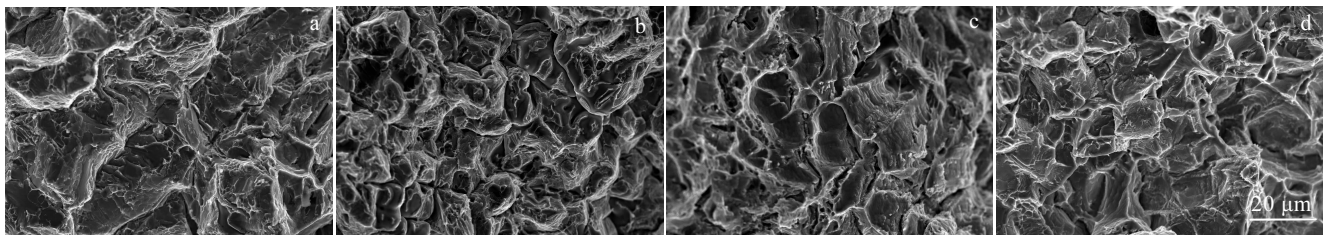


图 12 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造室温拉伸断口形貌

Fig.12 Fracture morphologies of as-cast 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

长大，因而形成的韧窝尺寸也较大^[19, 20]。水冷铜模铸造提高了合金强度，与力学拉伸性能分析结果一致。

2.3.2 均匀化处理对合金力学性能的影响

图 13 是均匀化处理后的 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造的室温拉伸性能。经过均匀化处理后，6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 合金铁模铸造和水冷铜模铸造的合金抗拉强度及屈服强度大幅提高，而延伸率下降。尤其是水冷铜模铸造的 6061-0.15Mn-0.05Zr 合金，其抗拉强度达到 286 MPa、屈服强度为 127 MPa、延伸率为 17.84%。因为经过均匀化处理后，未溶解的金属间化合物在晶界处呈不连续地分布，而 Mg、Mn 等溶质元素均匀分布在合金内部，导致合金强度提高，而延伸率下降。

图 14 为实验合金均匀化处理后拉伸试样断口形貌。

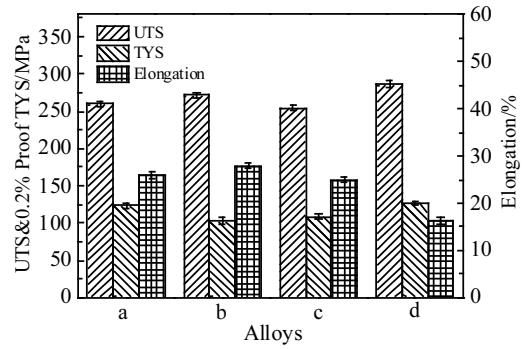


图 13 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造均匀化后的室温拉伸性能

Fig.13 Tensile properties of homogenization-treated 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

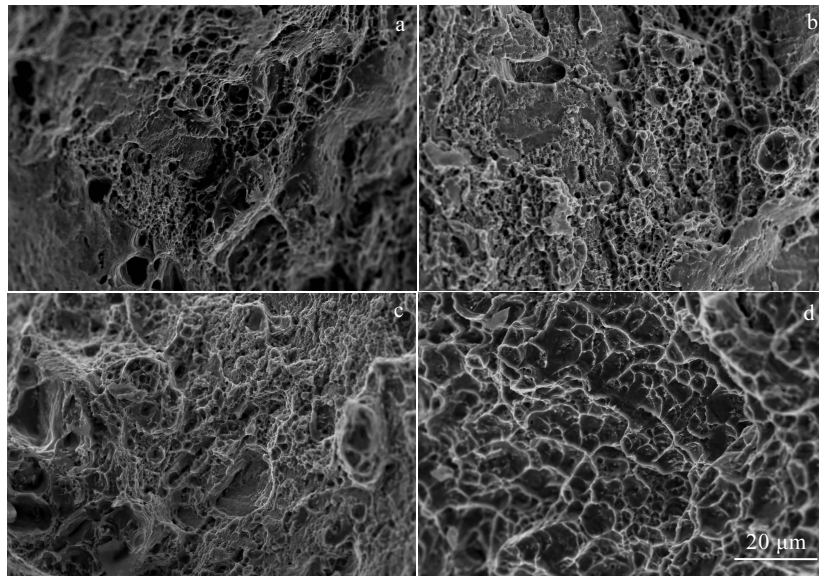


图 14 6061 铝合金和 6061-0.15Mn-0.05Zr 铝合金铁模铸造和水冷铜模铸造均匀化后的室温拉伸断口形貌

Fig.14 Fracture morphologies of homogenization-treated 6061 alloys (a, b) and 6061-0.15Mn-0.05Zr alloys (c, d): (a, c) cast by iron mold and (b, d) copper mold

合金均匀化处理后，形成的韧窝尺寸更均匀。从图中可以看出，水冷铜模铸造合金(图 14b,14d)比铁模铸造合金(图 14a,14c)韧窝尺寸均匀，添加 Mn,Zr 元素的合金(图 14c,14d)韧窝尺寸小。这是因为合金均匀化处理后，溶质元素均匀分布在合金内部，残留的第二相粒子大大减少。韧窝形核后有充分的空间扩展，因而形成的韧窝尺寸均匀。尤其是水冷铜模铸造的 6061-0.15Mn-0.05Zr 合金，韧窝均匀且细小，与力学性能一致。

3 结 论

1)合金采用水冷铜模的亚快速凝固方式可以降低铸造合金中溶质元素 Mg、Si 和 Mn 的偏析程度。通过 Vegard 公式估算，Mg、Si 和 Mn 元素在 6061 铝合金中的固溶度增加。

2) 铸态合金锭在 560 °C，3 h 制度下进行均匀化处理后，铸造合金中的 Mg、Si 和 Mn 元素大部分固溶到 Al 合金晶粒内部，达到了较理想的均匀化效果。

3)添加 0.15% Mn 和 0.05% Zr 且采用水冷铜模铸造的 6061 铝合金，经均匀化处理后其抗拉强度达到 286 MPa、屈服强度为 127 MPa，延伸率为 17.84%。

参考文献 References

- [1] Gong Wenyuan(龚文源), Jiang Long(姜龙), Zheng Xiaoping(郑小平) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2017, 42(7): 80
- [2] Barnwal V K, Raghavan R, Tewari A *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 679: 56
- [3] Chen Rui(陈瑞), Xu Qingyan(许庆彦), Liu Baicheng(柳百成). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2016, 52(8): 988
- [4] Du Peng(杜鹏), Yan Xiaodong(闫晓东), Li Yanli(李彦利) *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(5): 981
- [5] Zhang Xinming(张新明), Ke Bin(柯彬), Tang Jianguo(唐建国) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2013, 27(4): 337
- [6] Eisaabadi G B, Davami P, Kim S K *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 558(15): 134
- [7] Maisonnette D, Suery M, Nelias D *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(6): 2718
- [8] Liu Yingzhuo(刘颖卓), Dang Bo(党波), Liu Feng(刘峰). *Journal of Xi'an Technological University*(西安工业大学学报)[J], 2013, 33(2): 128
- [9] Mohanty P S, Gruzleski J E. *Acta Materialia*[J], 1996, 4(9): 3749
- [10] Fu Hengzhi, Geng Xingguo. *Science and Technology of Advanced Materials*[J], 2001, 2(1): 197
- [11] Zhu Shijie(朱世杰), Yang Qing(杨卿), Bai Xiaobo(白小波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(7): 1157
- [12] Wang Chengquan(王成全), Yu Yan(于艳), Fang Yuan(方园) *et al. Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2005, 17(5): 11
- [13] Lodgaard L, Ryum N. *Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 283(1-2): 144
- [14] Eideh W, Tezuka H, Sato T. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2008, 24(1): 21
- [15] Han Y, Ma K, Li L *et al. Materials & Design*[J], 2012, 39: 418
- [16] Liu Hong, Liu Yanhua, Zhao Gang *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2004, 14(11): 1906
- [17] He Lizi(何立子), Chen Yanbo(陈彦博), Cui Jianzhong(崔建忠). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(9): 1638
- [18] He Lizi(何立子), Chen Yanbo(陈彦博), Cui Jianzhong(崔建忠) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(12): 1337
- [19] Li Shenlan(李慎兰), Huang Qizhi(黄志其), Jiang Fuli(蒋福利) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 738
- [20] Li Caiwen(李彩文), Pan Xuezu(潘学著), Liu Lulu(刘露露) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2010, 35(6): 62

Effects of Water-Cooling Cu Mould on Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloys with Mn and Zr Addition

Shen Hua^{1,2}, Shi Jianchao¹, Mu Yongliang¹, Luo Hongjie¹, Yao Guangchun¹

(1. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(2. Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 100142, China)

Abstract: Effects of sub-rapid solidification by water-cooling Cu mold on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy with Mn and Zr addition were investigated. Microstructure of the alloys was analyzed by optical microscopy, scanning electron microscopy and EDS energy spectrum. Solubilities of Mg, Si and Mn elements in as-cast and homogenized Al alloys were estimated by X-ray diffraction and Vegard's Law. Tensile tests were conducted to investigate the mechanical properties of 6061 aluminum alloy. Results show that both the segregation of Mg, Si and Mn elements and homogenization time are decreased by sub-rapid solidification. The grain sizes are refined significantly by adding Mn and Zr elements. As-cast precipitated phase is transformed into α -Fe phase of granulate from β -Fe of bone and strip by water-cooling Cu mold, and they are mainly granular α -Al₈(MnFe)₂Si and α -Al₈(MnFeCr)₂Si after homogenization treatment. Tensile properties of Al alloy with Mn and Zr addition cast by water-cooling Cu mold are improved. The UTS, YS and elongation of the homogenized alloy reach to 286 MPa, 27 MPa and 17.84%, respectively.

Key words: 6061 aluminum alloy; water-cooling Cu mold; sub-rapid solidification; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Shen Hua, Ph. D., Associate Professor, School of Applied Chemistry, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, P. R. China, E-mail: yywwdssh@sina.com