

# Sn 对 AZ80 合金电磁半连续铸造坯料凝固质量的影响

赵大志<sup>1,3</sup>, 马登民<sup>2</sup>, 贾永辉<sup>1,3</sup>, 乐启焱<sup>1,3</sup>

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 山西银光华盛镁业股份有限公司, 山西闻喜 043800; 3. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110819)

**摘要:** 采用电磁半连续铸造工艺, 利用探伤技术结合坯料的组织分析, 研究了Sn对AZ80合金坯料凝固质量的影响, 探讨了合金组织的演变及对凝固质量的改善。结果表明: 随着Sn含量的增加, 合金组织逐渐细化, 缩孔形成趋势降低, 金属间化合物及夹杂物偏聚程度减小, 且分布趋于均匀。结合熔体精炼中适当提高净化温度和延长净化时间并采用陶瓷过滤装置, 可有效降低熔体中夹杂物的残留量, 改善合金坯料的凝固质量。

**关键词:** 微合金化; 凝固质量; 夹杂物; 半连续铸造

镁合金作为轻质结构材料, 由于其密度小、比强度和比刚度高、导热性和导电性好、抗冲击性好、资源丰富等优点, 在汽车、轨道交通、国防军事以及航空航天等领域的轻量化方面有着巨大的潜在应用市场和价值, 尤其是AZ系(Mg-Al-Zn)镁合金<sup>[1-2]</sup>。

AZ系合金中的Al、Zn元素主要起强化作用, 不仅使合金具有良好的铸造性能、耐蚀性能及力学性能, 适用于具有一定复杂形状的薄壁压铸件的生产, 而且当合金中Al的含量达到8%, 接近铸造镁合金的Al含量, 且Zn含量较低时, 合金具有较高的强度、很好的延展性和抗氧化性能<sup>[3-4]</sup>。AZ合金中主要的强化相为Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, 经固溶时效处理, 可使Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相从过饱和基体中析出, 其中呈六棱柱状和短棒状的析出相由于与镁基面{0001}垂直, 起到良好的强化效果。Zn在镁合金中固溶度很高, 且随温度的降低而显著减小, 可通过固溶时效处理起到一定的强化效果<sup>[4-5]</sup>。此外, Zn还可以提升液态金属的流动性, 提高合金的铸造性能, 以获得高品质的铸件。铸态镁合金中, Al含量超过8%时, Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相会以共晶形式呈粗大的网状分布在晶界位置, 严重影响到合金的强韧性及塑性变形能力, 同时Zn含量会直接影响到合金凝固时的热稳定性<sup>[5-7]</sup>。此外, 镁合金在生产熔炼过程中, 会形成大量的细小氧化物并夹带在熔体中随之凝固, 形成偏聚或夹杂物等缺陷, 严重影响到合金的成形及后续加工质量。因此, 通过工艺手段或微合金化对AZ系镁合金进行凝固过程及组织的调控, 成为改善合金凝固质量的必要手段之一<sup>[8-9]</sup>。

研究表明, AZ镁合金中添加Sn, 可明显细化凝固组织, 改善合金的组织及力学性能。添加Sn的AZ镁合金经塑性变形后, 由于再结晶晶粒的细化及析出相Mg<sub>2</sub>Sn的强化作用, 可使合金的强度得到明显的提升。如Sn的添加量在1%~2% (质量分数) 时, AZ80镁合金表现出优异的力学性能, 合金锻造态抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为420 MPa、290 MPa和5%。由此可见, 通过Sn的合金化可以有效改善AZ镁合金的成形性, 并提升合金的性能, 具有重要的研究意义<sup>[10-12]</sup>。本研究以AZ80镁合金为研究对象, 分析合金在半连续铸造生产中添加Sn, 通过微合金化对合金凝固组织及缺陷形成的影响。

## 作者简介:

赵大志(1970-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为镁合金、铝合金凝固过程及其加工成形过程的组织性能控制。电话: 13840333117, E-mail: zhaodz@smm.neu.edu.cn

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

10-1034-05

## 基金项目:

国家自然科学基金面上项目(51974082)。

收稿日期:

2020-08-06。

## 1 试验方法

试验合金坯料由生产企业经电磁半连续铸造工艺生产制备成直径300 mm、长6 m的圆棒坯料。合金在浇注凝固过程中，在结晶器内施加频率20 Hz、低频电流34 A的电磁搅拌。在浇口处设置熔渣过滤网以起到熔体净化的目的。生产用设备如图1所示。对合金坯料取样进行化学成分分析，确定试验合金坯料的化学成分如表1所示。分别对合金试验坯料切取试样进行凝固质量分析，试样横截面经精车加工后结合探伤技术进行表面凝固缺陷的分析，探伤设备采用型号为OmniScan MX2便携式探伤仪。利用宏观组织体视镜及扫描电镜对试样进行宏观组织及缺陷进行观察，并通过能谱进行物相分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 合金铸坯的凝固缺陷分析

图2为采用电磁半连续铸造工艺制备的不同Sn含量AZ80合金坯料的横截面。当合金中不含Sn时，在合金坯料横截面上可以看到明显的缩孔及白色斑点的偏聚区（图2a）；当合金中添加0.12%的Sn时，可以看到缩孔变得细小，白色斑点区偏聚程度减弱（图2b）；Sn含量达到0.42%时，合金坯料横截面上缩孔已经基

表1 试验合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of AZ80 alloy samples containing Sn

合金	Al	Zn	Sn	Mn	Fe	Si	Mg
A1	8.54	0.61	—	0.16	0.01	<0.04	余量
A2	8.38	0.74	0.12	0.23	0.01	<0.01	余量
A3	8.39	0.66	0.42	0.17	0.01	<0.01	余量

本看不到，白色斑点较为均匀地分布在横截面上（图2c），合金坯料的凝固质量得到明显改善。

对合金坯料横截面进行探伤分析（图3）可以看到，随着合金中Sn含量的逐渐增加，坯料截面上的缩孔逐渐变得细小，当合金中Sn含量为0.42%时，缩孔已经非常稀少；从探伤显示的横向细线分布可以说明，在坯料横截面上由于白色斑点分布引起的成分偏差程度逐渐减小，分布逐渐均匀，表明AZ80合金中加入Sn可有效改善AZ80合金半连续铸造坯料的凝固质量。

### 2.2 合金铸坯的凝固组织分析

图4为采用电磁半连续铸造工艺制备的不同Sn含量AZ80合金坯料横截面的宏观组织。从图中可以看出：随着Sn含量的增加，合金的宏观组织逐渐细化，在晶界处存在明显的白色形成相，如图4中箭头所示。白色

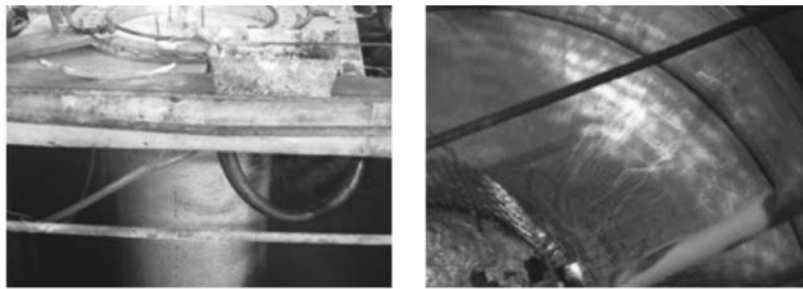
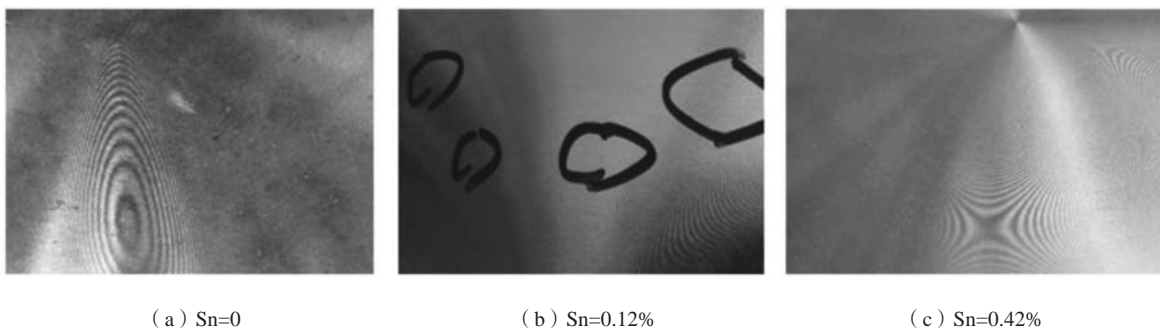


图1 AZ80合金半连续铸造设备

Fig. 1 Equipment of semi-continuous casting for AZ80 alloy



(a) Sn=0

(b) Sn=0.12%

(c) Sn=0.42%

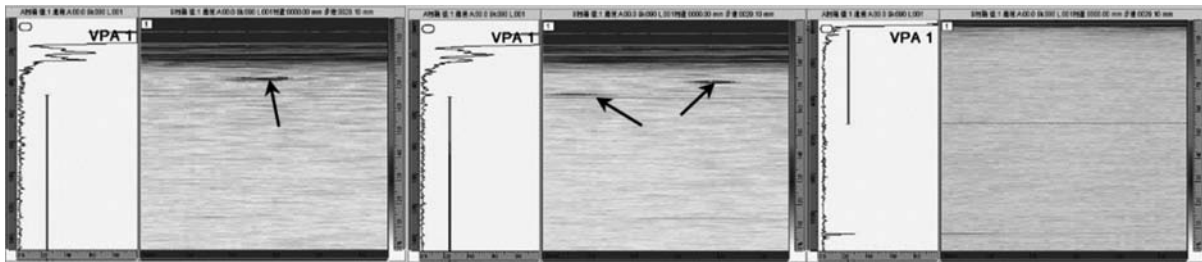
图2 不同Sn含量AZ80合金坯料的横截面质量

Fig. 2 Cross-sectional quality of AZ80 alloy billets with different amount of Sn

形成相随Sn含量的增加尺寸逐渐减小,形状由团块状逐渐转变成沿晶界分布的弯曲蠕虫状,有明显的细化效果,分布也趋于均匀,如图4c所示。说明合金在凝固过程中,由于Sn对合金组织的细化作用,使晶粒数量明显增多,有效分散了白色形成相的富集,降低了其在凝固组织中的偏聚倾向。

选取Sn含量为0.42%的AZ80合金坯料进行横截面的微观组织观察,可以看到:白色生成物沿晶界断续分布,在枝晶臂间存在着明显的显微疏松,如图5a所示。这是由于合金在凝固过程中,枝晶生长到后期,枝晶臂相互搭接,将剩余的熔体分割形成独立细小的

熔池,当这些细小的熔池最后凝固收缩时由于枝晶臂搭接无法得到其他熔体的补充而形成了枝晶臂间的显微疏松,弥散的分布在枝晶臂间,避免了由于枝晶粗大,枝晶臂相互搭接后依然会在枝晶臂间存在一定的间隙,当枝晶凝固收缩时就会挤压剩余的熔体通过枝晶臂间隙向其他区域流动,在原有位置形成明显的缩孔。同样,由于合金组织的细化,使白色形成相更加均匀地分布在细长的晶界处,避免了偏聚的分布。因此,通过细化组织不仅可以减少缩孔的形成,而且可以使合金中白色形成相相对均匀地分布在晶界上,避免了偏聚的形成以影响到合金的后期成形效果。



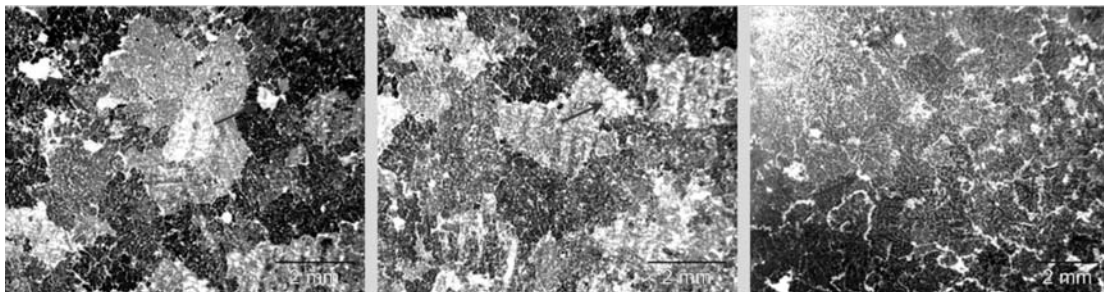
(a) Sn=0

(b) Sn=0.12%

(c) Sn=0.42%

图3 AZ80合金不同Sn含量坯料横截面探伤结果

Fig. 3 Flaw inspection results at cross section of AZ80 alloy billets with different amounts of Sn



(a) Sn=0

(b) Sn=0.12%

(c) Sn=0.42%

图4 AZ80合金不同Sn含量坯料横截面的宏观组织

Fig. 4 Cross-sectional macrostructure of AZ80 alloy billets with different amounts of Sn

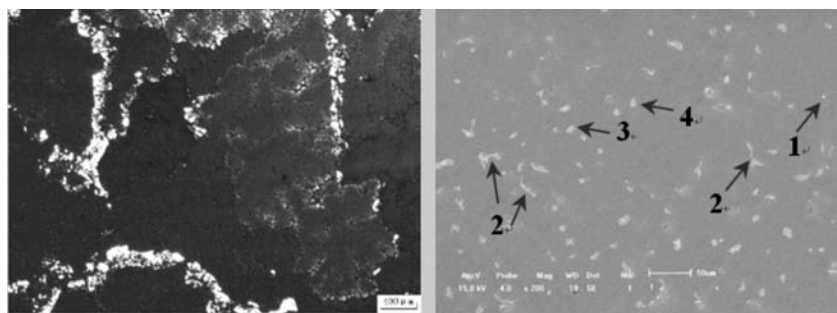


图5 含Sn 0.42% AZ80合金坯料横截面的微观组织及其SEM

Fig. 5 Cross-sectional microstructure of AZ80 alloy billet with 0.42% Sn

对图5中合金组织中的白色形成相通过扫描电镜进行能谱分析,可以确定箭头1为MgO,其主要在熔炼过程中形成,精炼过滤时通常会有少量残留在熔体中,浇注时熔体液面会有少量氧化形成MgO并夹带进入凝固的熔体中;箭头2为 $Mg_{17}Al_{12}$ 金属间化合物,主要在合金凝固过程中形成;箭头3和4分别为Al-Mn金属间化合物: $Al_8Mn_5$ 、 $Al_{11}Mn_5$ ,主要在合金熔炼及精炼除铁中形成并在熔体中会有部分残留,合金在凝固过程中也会有少量形成。对图6中箭头所指的聚集物进行能谱分析,可以看到主要由Mg、Al、O、Fe、Na、K等组成,应为熔炼中残留的熔剂、夹杂物以及氧化镁等组成,这主要是在精炼除渣时残留物净化不够充分所致。

### 3 工艺改进措施

从合金坯料的凝固质量分析可以确定:AZ80合金

在实际生产中,通过Sn的微合金化,不仅可以细化合金的凝固组织,而且可以通过晶粒细化有效降低缩孔的形成趋势,削弱金属间化合物、夹杂物等的偏聚程度。

为提高合金坯料的凝固质量,减少坯料中夹杂物的残留,可采取以下措施:①加强对合金熔体的精炼处理,适度提高精炼温度以降低熔体粘度,确保减小熔体中夹杂物的上浮或下沉阻力,同时适当延长静置时间以保证夹杂物有足够的时间充分上浮或下沉;②精炼处理时,尽量提高熔剂的流动性,降低熔剂中的萤石类含量,以减少熔体中的残留量;③在浇口处设置陶瓷过滤装置替代过滤网以强化对熔体的过滤效果,达到尽量降低熔体中夹杂物残留量的目的;④浇注中,确保熔体液面的平稳,避免夹杂物卷入熔体内并残留在熔体中形成凝固缺陷。

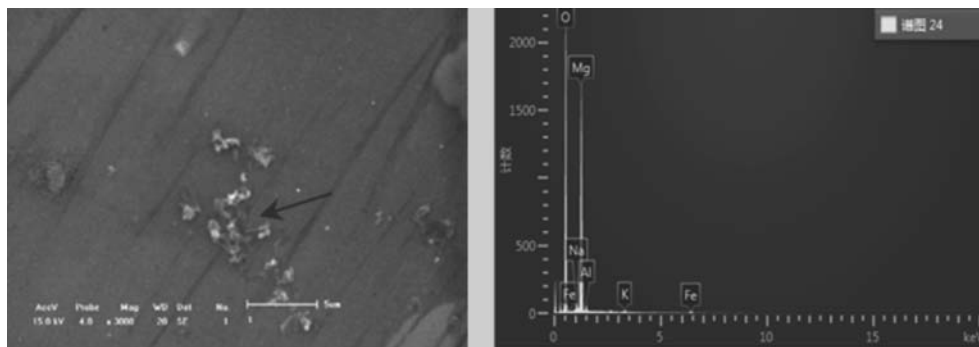


图6 含Sn 0.42% AZ80合金坯料微观组织能谱分析

Fig. 6 Microstructure and energy spectrum analysis of AZ80 alloy billet with 0.42% Sn

### 4 结论

(1) AZ80合金在生产中通过Sn的微合金化,可细化组织,降低缩孔的形成趋势,减小金属间化合物及夹杂物的偏聚程度,并使之细化,分布趋于均匀,有效地改善了合金半连续铸造坯料的凝固质量。

(2) 合金在精炼过程中,通过强化精炼工艺,适当提高熔体的静置温度和延长静置时间,采用陶瓷过滤装置的方式尽量降低夹杂物在熔体中的残留,提高合金坯料的凝固质量。

#### 参考文献:

- [1] VIEHWEGER B, KARABET A, DÜRING M, et al. Forging of Mg-alloys AZ31 and AZ80 [J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2005, 36: 211-217.
- [2] WANG Q, ZHANG Z M, ZHANG X, et al. New extrusion process of Mg alloy automobile wheels [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010 (20): 599-603.
- [3] 胡晓菊, 高洪吾, 李长茂, 等. 微量元素对Mg-Al-Zn系合金铸态组织及性能的影响 [J]. 上海有色金属, 2004, 25 (3): 100-105.
- [4] 肖晓玲, 罗承萍, 聂建峰, 等. AZ91Mg-Al合金中 $\beta$ - ( $Mg_{17}Al_{12}$ )析出相的形态及其晶体学特征 [J]. 金属学报, 2001, 37 (1): 1-7.
- [5] 罗承萍, 肖晓玲, 刘江文, 等. AZ91Mg-Al合金中 $\gamma$ - $Mg_{17}Al_{12}$ 析出相的多重位向关系及 $\{112\}$   $\gamma$ 伪孪晶关系 [J]. 金属学报, 2002, 38 (7): 709-714.

- [6] 张世军, 黎文献, 余琨, 等. 镁合金的晶粒细化工艺 [J]. 铸造, 2001, 50 (7): 373-375.
- [7] GUO S J, LE Q C, CUI J Z. Effect of a low frequency electromagnetic field on the direct-chill (DC) casting of AZ80 magnesium alloy ingots [J]. International Journal of Materials Research, 2006, 97 (11): 1539-1544.
- [8] GUO S J, LE Q C, ZHAO Z H, et al. Microstructural refinement of DC cast AZ80 Mg billets by low frequency electromagnetic vibration [J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 404 (1): 323-329.
- [9] SHAO Z W, LE Q C, ZHANG Z Q, et al. Effect of ultrasonic power on grain refinement and purification processing of AZ80 alloy by ultrasonic treatment [J]. Metals & Materials International, 2012, 18: 209-215.
- [10] 王伟. Ce和Sn对AZ80镁合金显微组织和力学性能及耐蚀性能的影响 [D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [11] 孙扬善, 翁坤忠, 袁广银. Sn对镁合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9 (1): 55-60.
- [12] 孙翠翠, 周吉学, 赵东清, 等. Sn对镁及镁合金显微组织和性能影响的研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2017, 31 (19): 60-65.

---

## Effect of Sn on Solidification Quality of AZ80 Billets Cast by Electromagnetic Semi-Continuous Casting

ZHAO Da-zhi<sup>1,3</sup>, MA Deng-min<sup>2</sup>, JIA Yong-hui<sup>1,3</sup>, LE Qi-chi<sup>1,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Shanxi Yinguang Huasheng Magnesium Co., Ltd., Wenxi 043800, Shanxi, China; 3. Key Lab of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

### Abstract:

The billets of AZ80 alloy containing Sn were cast by electromagnetic semi-continuous casting. The effect of Sn content on the solidification quality of the AZ80 billets was studied by means of chemical composition analysis, X-ray analysis, scanning electron microscope observation, etc. The macrostructure evolution of the alloy and the improvement of the solidification quality were analyzed. The results show that the addition of Sn element to AZ80 alloy, can refine the grain structure of the alloy, decrease the tendency to shrinkage formation, and the segregation degree of intermetallic compounds and inclusions in the alloys. Hence, their distribution is nearly uniform. Moreover, the residual inclusions in the melt could be effectively reduced by increasing the refining temperature and time and by using the ceramic filtration system.

### Key words:

micro-alloying; solidification quality; inclusions; semi-continuous casting