doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2020.10.007

熔体过热处理对 Mg-5Si 合金组织与性能的影响

武改林,范晋平,蒋一锋,裴 镖,郭丽娜
(太原理工大学 材料科学与工程学院,太原 030024)

摘 要:采用质量分数为 99.9%的纯镁锭和 99.9%的粒度为 45 μm 的硅粉,制备了质量分数为 5%的 Mg-5Si 合金,研究了熔体过热温度和保温时间对 Mg-5Si 合金铸态组织和力学性能的影响。研究实现了 Mg_2Si 相尺寸由处理前的 27 μm 减小到 20 μm,此时初生 Mg_2Si 相的平均尺寸最小,分布趋于均匀,形貌逐渐向树枝状转变,甚至溶解为较为圆整的颗粒,且共晶 Mg_2Si 相层片间距较小,并采用抗拉强度、屈服强度和伸长率表征其力学性能。研究结果表明:熔体过热温度为 770 ℃、保温时间为 30 min 时,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 152 MPa、84 MPa 和 6.5%,合金的力学性能得到明显改善。

关键词:镁合金;Mg_2Si;熔体过热温度;保温时间
中图分类号:TG146.2 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-1744(2020)10-0040-07

Effect of Melt Superheating Treatment on Microstructure and Properties of Mg-5Si Alloy

WU Gailin, FAN Jinping, JIANG Yifeng, PEI Biao, GUO Lina
(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The Mg-5Si alloy with 5% mass fraction was made by using a pure magnesium ingot with 99.9% mass fraction and silicon powder with 99.9% mass fraction which particle size is 45 μm. The effects of melt superheating temperature and holding time on casting structure and mechanical properties of Mg-5Si alloy were studied. The size of Mg_2Si is decreased from 27 μm to 20 μm and the average size of primary Mg_2Si phase is the smallest. The morphology of primary Mg_2Si phase gradually changes to dendrite, and even dissolves into some round particles with uniform distribution. The lamellar spacing of eutectic Mg_2Si phase is small. Furthermore, the tensile strength, yield strength and elongation were employed to characterize the mechanical properties. The result shows that when the melt superheating temperature is 770 ℃ and holding time is 30 min, the mechanical properties of alloy are improved obviously and the tensile strength, yield strength and elongation of the alloy are 152 MPa、84 MPa and 6.5% respectively.

Key words: Mg alloy; Mg_2Si; melt superheating temperature; holding time

随着工业发展对产品环保要求的提高,产品的轻量化受到了极大的重视,研究高性能镁合金迫在眉睫[1-3]。作为最轻的商用金属结构材料,镁合金具有诸多优点,低密度,高强度和高刚度,有利于环境保护等,发展潜力无穷,引起了人们的普遍关注[4-5]。在铸造镁硅合金中,Mg_2Si 相的晶粒大小、分布和组

收稿日期:2020-02-27
基金项目:山西省科技厅自然基金项目(2013011014-2)
Fund: Supported by Natural Foundation of Science and Technology Department of Shanxi Province(2013011014-2)
作者简介:武改林(1995—),女,硕士研究生,主要从事先进镁合金研究。
通信作者:范晋平(1974—),女,博士,讲师,主要从事耐热镁合金研究。
引用格式:武改林,范晋平,蒋一锋,等. 熔体过热处理对 Mg-5Si 合金组织与性能的影响[J]. 有色金属工程,2020,10(10):40-46.
WU Gailin, FAN Jinping, JIANG Yifeng, et al. Effect of Melt Superheating Treatment on Microstructure and Properties of Mg-5Si Alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(10): 40-46.

织形貌对合金的力学性能影响很大。由于 Si 在 Mg 中的固溶度很小,在 Mg 中添加 Si 可以在合金中原位生成 Mg_2Si 相[6-7],但常规熔炼方法制备过共晶镁硅合金时原位生成的 Mg_2Si 相较为粗大,一般以多边形状和粗大汉字状存在于 α-Mg 基体中,不利于生成性能优良的镁合金,故优化镁合金的熔炼工艺条件是很有必要的。张蓉等[8-13]研究表明,金属材料的铸态组织不仅与其凝固条件有关,还与熔体温度有关。钟特等[14-17]研究表明 Mg_2Si 相的尺寸和形貌等铸态显微组织都会影响到合金的整体组织和性能。

本文在前人研究的基础上,以过共晶 Mg-5Si 为研究对象,考察了熔体过热温度和保温时间对合金铸态组织和力学性能的影响,对于今后提高该类合金的性能,降低其生产成本,深度发掘这类材料的潜能提供便利。

1　实验

实验采用工业纯镁锭(99.9%),硅粉(99.9%,粒度 $D_{50}=45$ μm),其化学成分如表 1 和表 2 所示。于配有数显调节测温仪的 SG2-5-10 井式坩埚电阻炉(额定功率为 5 kW,额定温度为 1 000 ℃)中制备 Mg-5Si 合金。

表 1　镁锭的化学成分

Table 1　Chemical composition of Mg ingot　　/%

Elements	Mg	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Other
Content	99.90	0.005 5	0.004 9	0.001 8	0.002 2	0.006 1	0.000 4	0.000 1	Bal.

表 2　硅粉(粒度 $D_{50}=45$ μm)的化学成分

Table 2　Chemical composition of Si powder(particle size $D_{50}=45$ μm)　　/(mg·kg^{-1})

Elements	Fe	Al	Ca	B	P	Co	Cu	Ni	Mg	Si
Content	120	116	10	8	16	1	2	2	2	Bal.

原料去除氧化皮,熔炼前进行干燥处理。将切割完整的纯镁锭和硅粉放入钢制坩埚中,在坩埚中升温至过热温度(720、770、820 ℃),进行搅拌,用 RJ-6 进行精炼除渣,然后在各个过热温度下保温一定的时间(0、30、60 min),最后将熔体浇注到预热至 250 ℃的金属模型中。待金属模型冷却后将铸锭取出,在铸锭同一部位(距离试样底端 10 mm 处)截取金相试样,对该端面经标准程序制备金相试样,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液作为腐蚀剂浸蚀 20～30 s;利用配备有能量色散光谱仪(EDS)的 TESCAN MIRA3 型场发射扫描电子显微镜(SEM)和 ZeissA1 光学显微镜(OM)观察试样铸态显微组织形貌,并使用图像分析软件 Image Pro-plus 测定 Mg_2Si 相的平均尺寸;在数显式电子万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速率为 1.08 mm/min;利用 RAX210X 射线衍射仪(辐射源 Cu Kα 射线,扫描速度为 2°/min,扫描范围 10°～90°)分析物相组成。

2　结果与讨论

采用 X 射线衍射仪对过热处理过的合金铸锭进行了物相分析,结果见图 1。由图 1 可见,试样中主要包括 α-Mg 相和 Mg_2Si 相,与熔体过热温度为 720 ℃,保温 30 min 时得到的结果与文献[18]中的衍射图谱结果一致。可见,熔体过热处理前后 Mg-5Si合金的物相组成并未发生变化。

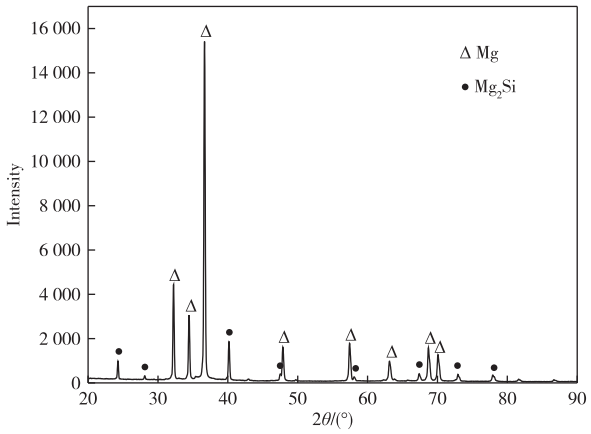


图 1　Mg-5Si 合金的 XRD 谱图

Fig. 1　XRD pattern of Mg-5Si alloy

为了研究熔体过热温度和保温时间对合金铸态组织的影响,采用 SEM 和 OM 观察不同熔体过热温度下的试样组织。图 2 为熔体过热温度为 720 ℃、保温时间为 30 min 时,试样的铸态显微组织。结合图 1 可知,黑色多边形状为初生 Mg_2Si 相,黑色汉字状为共晶 Mg_2Si 相,颜色明亮的枝晶状为基体 α-Mg 相。

2.1　熔体过热温度对合金铸态显微组织的影响

2.1.1　熔体过热温度对初生 Mg_2Si 相的影响

图 3 为不同熔体过热温度、保温时间为 30 min 时合金的铸态显微组织。可以看出,采用不同的熔

体过热温度，合金的铸态组织有着明显区别。熔体过热温度为 720 ℃时，如图 3(a)所示，大部分初生 Mg_2Si 相呈多边形状，部分组织有向树枝状转变的趋势，平均晶粒尺寸为 27 μm；熔体过热温度提高到 770 ℃时，如图 3(b)所示，初生 Mg_2Si 相开始转变为球状及树枝状，尖角有所钝化，平均晶粒尺寸为 20 μm，分布趋于均匀；熔体过热温度为 820 ℃时，如图 3(c)所示，初生 Mg_2Si 相不仅尺寸增大，而且部分转变为树枝状，平均晶粒尺寸为 103 μm。可见在保温时间为 30 min 时，初生 Mg_2Si 相的生长形态为多面体和树枝状，并且随着熔体过热温度的升高，初生 Mg_2Si 的尺寸先减小后有所增大，降低幅度约为 35%。

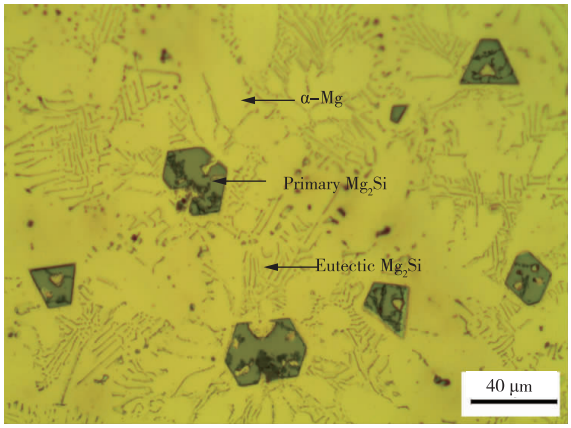


图 2 Mg-5Si 合金铸态显微组织

Fig. 2 As-cast microstructure of Mg-5Si alloy

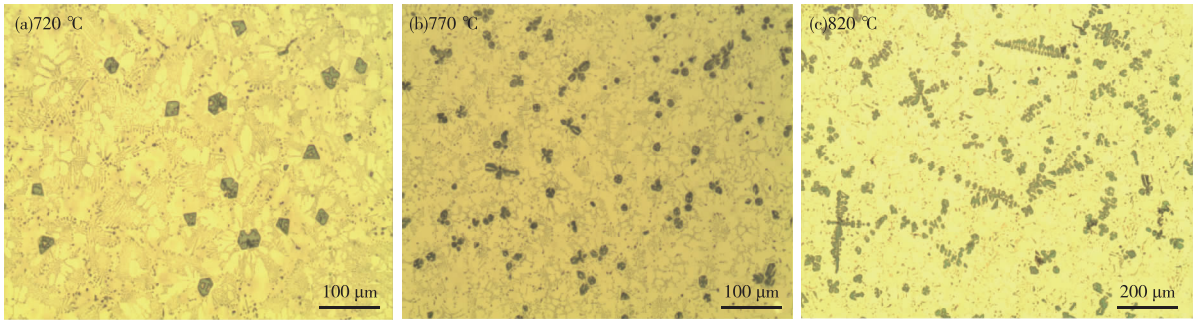


图 3 不同熔体过热温度下(30 min)Mg-5Si 合金铸态显微组织

Fig. 3 As-cast microstructures of Mg-5Si alloy at different melt super-heating temperatures(30 min)

2.1.2 熔体过热温度对共晶 Mg_2Si 相的影响

熔体过热温度为 720 ℃时，如图 4(a)所示，共晶 Mg_2Si 相呈典型的汉字状。熔体过热温度为 770 ℃时，如图 4(b)所示，共晶 Mg_2Si 相转变为树枝状，枝晶程度减弱，枝晶状完全断开，二次以上枝晶减少，呈规律的块状，与 720 ℃时相比层片间距细化虽不明显，但其枝晶状共晶 Mg_2Si 相的断开对合金性能也应有一定的改善。随着熔体过热温度继续升高为 820 ℃时，如图 4(c)所示，共晶 Mg_2Si 相呈粗大的短杆状均匀分布在基体中，部分呈颗粒状。

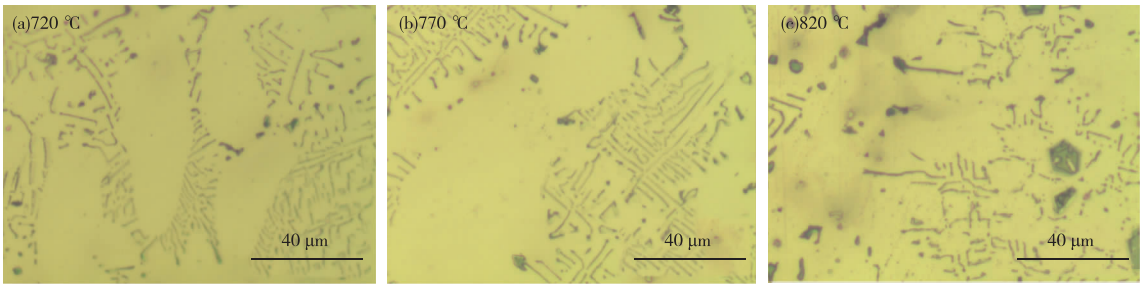


图 4 不同熔体过热温度下(30 min)Mg-5Si 合金铸态显微组织

Fig. 4 As-cast microstructures of Mg-5Si alloy at different melt super-heating temperatures(30 min)

为了进一步研究不同熔体过热温度对合金的细化情况,利用扫描电子显微镜进一步观察了不同熔体过热温度下共晶 Mg_2Si 相的变化,如图 5 所示。能够看到 720 ℃时,共晶 Mg_2Si 相呈典型的汉字状,部分呈杆状、点状分布于基体中;770 ℃时,随着熔体过热温度的升高,共晶 Mg_2Si 相明显转变为规整的细纤维状,纤维状共晶 Mg_2Si相层片间距也明显减小,约为 1 μm;当熔体过热温度升高到 820 ℃时,共晶 Mg_2Si 相反而变得更为粗大。由此可以得出,熔体过热温度为 770 ℃保温时间为 30 min 时,共晶 Mg_2Si 相组织细小,分布均匀。

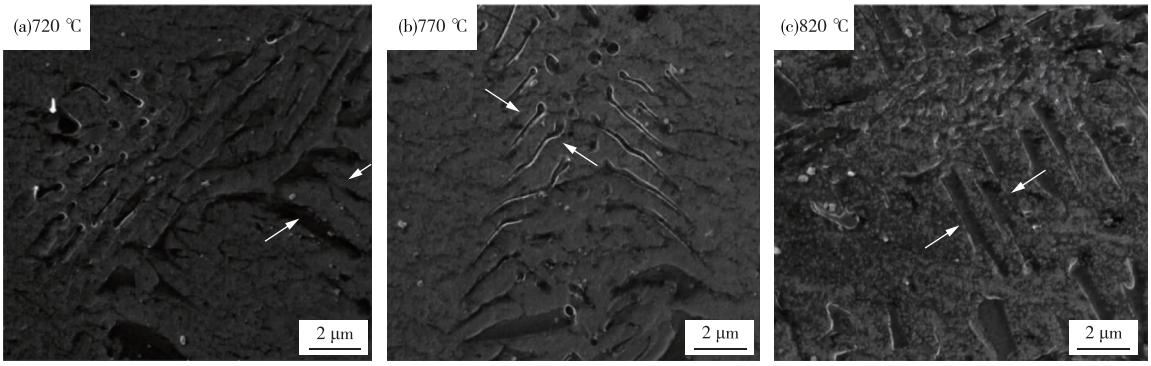


图 5　不同熔体过热温度下(30 min)Mg-5Si 合金的 SEM 照片

Fig. 5　SEM micrograph of Mg-5Si alloy at different melt super-heating temperatures(30 min)

综上所述,熔体过热温度对 Mg-5Si 合金铸态组织的影响较为明显。初生 Mg_2Si 相经熔体过热处理之后尖端明显钝化,并且有溶解现象;共晶 Mg_2Si 相经熔体过热处理之后枝晶明显断开,汉字、树枝状的共晶 Mg_2Si 相转变为细小纤维状。总体来说,熔体过热处理能够改变合金组织形貌,提高合金的组织均匀性,从而对合金性能也有一定影响。

2.2　保温时间对合金铸态显微组织的影响

2.2.1　保温时间对初生 Mg_2Si 相的影响

图 6 为熔体过热温度为 770 ℃时,不同保温时间下合金的铸态显微组织。可以看出,在 770 ℃时初生 Mg_2Si 相呈多边形状,保温时间为 0 min 时,如图 6(a)所示,初生 Mg_2Si 相析出数量较少,且分布不均匀;随着保温时间的延长,多边形状的初生 Mg_2Si 相析出数量先增多后减少。当保温时间为 60 min 时,如图 6(c)所示,初生 Mg_2Si 相的析出数量明显减少,初生 Mg_2Si 相的析出受到明显抑制。由此可得,在过热温度为 770 ℃下、保温 30 min 时,熔体内原位生成的初生 Mg_2Si 相析出数量最多,分布较为均匀,有利于提高合金的整体组织性能。

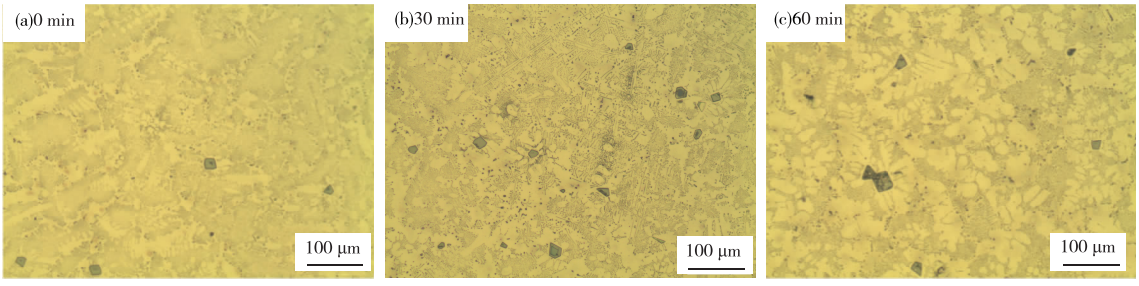


图 6　不同保温时间下(770 ℃)Mg-5Si 合金铸态显微组织

Fig. 6　As-cast microstructures of Mg-5Si alloy at different holding times(770 ℃)

2.2.2　保温时间对共晶 Mg_2Si 相的影响

为了进一步说明保温时间对合金组织形貌的影响,进行了光学显微观察,如图 7 所示。保温时间为 0 min 时,如图 7(a)所示,共晶 Mg_2Si 相呈典型的枝晶状,枝晶并未断开;保温时间为 30 min 时,如图 7(b)所示,枝晶状共晶 Mg_2Si 相明显断开,转变为规律的块状,且层片间距明显细化;保温时间为 60 min 时,如图 7(c)所示,可以看到枝晶状共晶 Mg_2Si 相粗化,且有向汉字状转变的趋势。

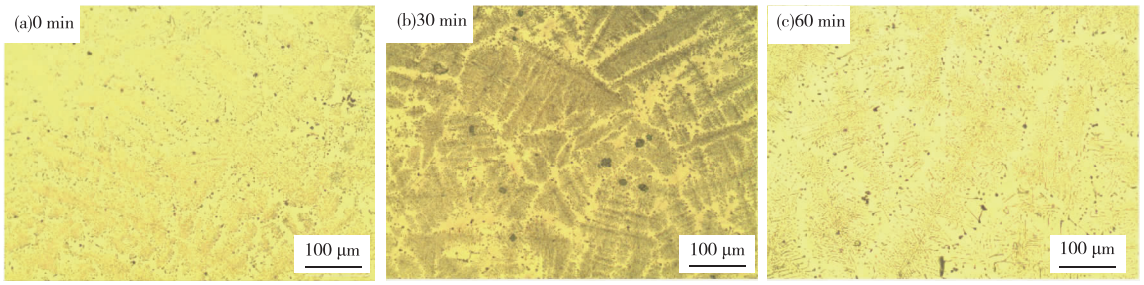


图 7 不同保温时间下(770 ℃)Mg-5Si 合金铸态显微组织

Fig. 7 As-cast microstructures of Mg-5Si alloy at different holding time(770 ℃)

综上所述,熔体过热温度为 770 ℃,保温时间为 30 min 时,初生 Mg_2Si 相分布均匀,共晶 Mg_2Si 相组织细小。但相比熔体过热温度,保温时间对合金的铸态显微组织影响较小,熔体过热处理对合金的铸态显微组织影响更为明显。

2.3 熔体过热温度对合金力学性能的影响

为了研究不同熔体过热温度对 Mg-5Si 合金力学性能的影响,将铸锭按照 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸实验方法》标准准备拉伸试样,并采用数显式电子拉伸试验机在室温条件下对试样进行拉伸试验,最终获得的 3 组试样的拉伸数据如表 3 所示。从表 3 可以看出,熔体过热温度为 770 ℃、保温时间为 30 min 时,该合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率均获得明显提高。相比 720 ℃,熔体过热温度为 770 ℃时,合金的抗拉强度明显增大。随着熔体过热温度的进一步升高,合金的抗拉强度反而减小,当过热温度为 820 ℃时,合金的抗拉强度和 720 ℃时相比相差不大。由此可以看出,在本实验条件下,熔体过热温度为 770 ℃、保温时间为30 min 时,合金的性能得到明显提升。

表 3 不同熔体过热温度下(30 min)Mg-5Si 合金的抗拉强度(σ_b),屈服强度($\sigma_{0.2}$)伸长率(δ)

Table 3 Tensile strength(σ_b),yield strength($\sigma_{0.2}$)and elongation(δ) of Mg-5Si alloys at different melt super-heating temperature(30 min)

Melt super-heating temperature / ℃	720	770	820
Tensile strength /MPa	117	152	116
Yield strength /MPa	62	84	58
Elongation /%	2.5	6.5	4.1

在本实验条件下,对 Mg-5Si 合金进行过热处理使其晶粒细化的最佳过热温度为 770 ℃,保温时间为 30 min。此时,Mg-5Si 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率最高,分别为 152 MPa、84 MPa 和 6.5%。其主要原因是熔体过热处理使得粗大初生 Mg_2Si 相的尖角得到钝化,减小了局部应力集中,减少了裂纹源,减缓了裂纹扩展速度,使得合金的抗拉强度升高。

熔体过热处理 Mg-5Si 合金,熔炼过程中析出的第二相 Mg_2Si 的数量、形状及分布状态是优化镁合金性能的主要机理。合金中初生 Mg_2Si 相的晶粒大小随温度升高和保温时间的延长呈现先减小后增大的规律。由蔡英文等[19]研究可知,当合金液的温度超过一定值后,合金液中原子团簇由近程有序向无序化发展,原子集团由大到小逐渐分裂直至所有的固相颗粒和原子集团完全消失,而当温度低于该特定值时,合金液中的原子集团则被保留下来,作为形核质点,影响最终凝固组织的大小和形貌。在本实验中,随着熔体过热温度的升高,熔融合金的熔体组织发生变化。当熔体过热温度为 770 ℃时,树枝状初生 Mg_2Si 相有溶解现象,即树枝状初生 Mg_2Si 相溶解为多个圆形初生 Mg_2Si 相,晶粒尺寸也由此减小。由先前的铸态显微组织观察也可知,与保温时间相比,熔体过热处理对合金铸态显微组织的影响效果较大。其原因在于熔体中存在的 Mg_2Si 晶体的原子团平衡数目和原子团尺寸随保温时间的延长逐渐减小,但原子团尺寸的减小速度逐渐减慢,达到一定温度后,原子团尺寸趋于稳定,不再受保温时间影响,此规律直接导致 Mg_2Si 相的因子减小,从而 Mg_2Si 相以小平面生长的趋势减弱,晶粒最终随着保温时间的延长形貌越来越趋于圆整。熔融的合金在 720 ℃时存在一些微观不均匀结构,不均匀结构在 770 ℃下保温静置 30 min 后逐渐发生分解。熔体过热温度由 720 ℃升高到 770 ℃时,熔体中有

序的原子基团尺寸变小,无序区变大,不均匀结构减少,合金中的元素分布越广泛。当熔体从 770 ℃降温冷却凝固时,高温熔体中的这种无序、均匀的结构进行反向转变的速度很缓慢,容易保持到固态结构中,使凝固组织结构也变得均匀,促进了组织的均匀性[20]。熔体的过热温度越高,合金液越混乱,越无序,在凝固形核时,将无序运动的原子变成有序排列,需要做的功越大,所以,形核的过冷度增大,过冷度越大,合金临界晶核的尺寸越小,形核率越大,使熔体凝固后初生 Mg_2Si 相得到细化,导致共晶 Mg_2Si相转变为细小纤维状[21]。但随着熔体过热温度继续提高至 820 ℃时导致共晶温度提高,使共晶 Mg_2Si 相粗大。

3　结论

1)熔体过热处理改变了合金的预结晶状态,从而改变了过共晶 Mg-5Si 合金中初生 Mg_2Si 相的大小及析出数量,初生 Mg_2Si 相尺寸随熔体过热温度的升高呈现大→小→大的规律,析出数量先增多后减少。共晶 Mg_2Si 相由典型的汉字状转变为层片纤维状。随着熔体过热温度的继续升高,导致共晶温度提高,使共晶 Mg_2Si 相粗大。

2)在本实验条件下,当熔体过热温度为 770 ℃、保温时间为 30 min 时,Mg_2Si 相尺寸由处理前的 27 μm减小到 20 μm,此时初生 Mg_2Si 相的平均尺寸最小,形貌逐渐向树枝状转变,甚至溶解为部分较为圆整的颗粒,分布均匀,且共晶 Mg_2Si 相层片间距较小。此时合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率随着合金晶粒尺寸的减小而增大,分别为 152 MPa、84 MPa和 6.5%。

3)熔体过热处理后,Mg-5Si 合金的抗拉强度和伸长率得到很大提高,具有一定的实际应用价值。

参考文献:

[1] 李宜达,梁敏洁,廖海洪,等.高性能镁合金及其在汽车行业应用的研究进展[J].热加工工艺,2013,42(10):12-16.
LI Yida, LIANG Minjie, LIAO Haihong, et al. Research progress of advanced magnesium alloys and its application in auto industry[J]. Hot Working Technology,2013,42(10):12-16.

[2] 弥宁,屠涛.含 Si 耐热镁合金中 Mg_2Si 相的研究进展[J].陇东学院学报,2016,27(1):32-36.
MI Ning,TU Tao. The research status on Mg_2Si phase in the heat-resistant magnesium alloys containing Si[J]. Journal of Longdong University,2016,27(1):32-36.

[3] 屠涛,李保卫,罗光彩,等.含 Si 耐热镁合金中 Mg_2Si 相的研究进展[J].铸造技术,2015,36(3):600-603.
TU Tao,LI Baowei,LUO Guangcai,et al. The research status on Mg_2Si phase in Si-contained heat-resistant magnesium alloy[J]. Foundry Technology, 2015, 36(3):600-603.

[4] AGHIONE, BRONFIN B. Magnesium alloys development towards the 21st century[C]. Materials Science Forum,2000,350-351:19-30.

[5] 曾荣昌,柯伟,徐永波,等.Mg 合金的最新发展及应用前景[J].金属学报,2001,37(7):673-685.
ZENG Rongchang,KE Wei,XU Yongbo,et al. Recent development and application of magnesium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica,2001,37(7):673-685.

[6] 沙明红,郭庆涛,李娜,等.金属材料凝固原理与技术[M].北京:冶金工业出版社,2018:156-320.
SHA Minghong, GUO Qingtao, LI Na, et al. Solidification principle and technology of metal materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018:156-320.

[7] GUO E J,MA B X,WANG L P. Modification of Mg_2Si morphology in Mg-Si alloys with Bi[J]. Journal of Materials Processing Technology,2008,206(1/2/3):161.

[8] 张蓉,沈淑娟,刘林.过热处理对 Al-Si 过共晶合金耐磨性能的影响[J].摩擦学报,2000,20(5):344-347.
ZHANG Rong, SHEN Shujuan, LIU Lin. Effect of overheating treatment on the wear characteristics of hypereutectic Al-Si alloy[J]. Tribology,2000,20(5):344-347.

[9] 周振平,李荣德.合金熔体过热处理研究的国内发展状况[J].铸造,2003,52(2):79-83.
ZHOU Zhenping, LI Rongde. Development status of study on melt superheat treatment[J]. Foundry,2003, 52(2):79-83.

[10] 裴忠冶,李俊涛,田彦文,等.合金熔体过热处理的研究进展[J].材料导报,2006,20(9):83-85.
PEI Zhongye, LI Juntao, TIAN Yanwen, et al. Development of study on alloy melt superheat treatment[J]. Materials Reports,2006,20(9):83-85.

[11] 耿浩然,马家骥,王拥军.高强度铸造铝合金的熔体过热处理[J].中国有色金属学报,1994,4(4):73-77.
GENG Haoran, MA Jiaji, WANG Yongjun. Melt superheating treatment of high strength cast aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1994,4(4):73-77.

[12] 王连登,朱定一,陈永禄,等.熔体温度处理及变质对

Al-20%Si合金凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报,2011,21(9):2075-2083.
WANG Liandeng, ZHU Dingyi, CHEN Yonglu, et al. Effects of melt thermal treatment and modification on solidification microstructure of Al-20%Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2075-2083.

[13] 常芳娥,高玉社,坚增运,等. 熔体过热处理对亚共晶Al-Si合金凝固特性和组织的影响[J]. 西安工业大学学报,2009,29(2):148-151.
CHANG Fang′e, GAO Yushe, JIAN Zengyun, et al. Effect of melt superheating on the solidification behavior and structure of hypoeutectic Al-Si alloy[J]. Journal of Xi′an Technological University, 2009, 29(2): 148-151.

[14] 钟特,钱鑫,成志刚,等. 熔体过热处理对 Mg_2Si/Al-Si复合材料显微组织的影响[J]. 铸造技术,2016,37(10):2067-2071.
ZHONG Te, QIAN Xin, CHENG Zhigang, et al. Effects of melt superheating treatment on microstructures of Mg_2Si/Al-Si compositematerials[J]. Foundry Technology, 2016, 37(10): 2067-2071.

[15] 孟宏杰,董天顺,叶校瑛,等. 细晶Mg-Al-Ti-C中间合金的制备及其对AZ91D组织和性能的影响[J]. 有色金属(冶炼部分),2019(2):55-59.
MENG Hongjie, DONG Tianshun, YE Xiaoying, et al. Preparation of fine-grained Mg-Al-Ti-C master alloy and its effect on microstructure and properties of AZ91D alloy [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(2): 55-59.

[16] 黄正华,郭学锋,张忠明,等. Si对AZ91D镁合金显微组织与力学性能的影响[J]. 材料工程,2004(6):28-32.
HUANG Zhenghua, GUO Xuefeng, ZHANG Zhongming, et al. Effects of Si on microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Material Engineering, 2004(6): 28-32.

[17] 孔凡校. 钆对AZ91合金组织和性能的影响[J]. 有色金属(冶炼部分),2017(2):55-58.
KONG Fanxiao. Effect of gadolinium addition on microstructure and property of AZ91 alloy [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2017(2): 55-58.

[18] 范晋平,王浩,武改林,等. Ce对Mg-5Si合金中初生 Mg_2Si 相变质的影响[J]. 材料研究学报,2019,33(9):683-690.
FAN Jinping, WANG Hao, WU Gailin, et al. Modification of Mg_2Si in Mg-5Si alloy with cerium[J]. Chinese Journal of Material Research, 2019, 33(9): 683-690.

[19] 蔡英文,范新会,李建国,等. 原子簇在熔体晶体生长中的作用[J]. 西北工业大学学报,1996,14(2):323-324.
CAI Yingwen, FAN Xinhui, LI Jianguo, et al. Effect of clusters on crystal growth from the melt[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1996, 14(2): 323-324.

[20] MORANDO R, BILONlH, COLE GS, et al. The development of macrostructure in ingots of increasing size[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1970, 1(5): 1407-1412.

[21] QIN Q D, ZHAO YG, LIANG Y H, et al. Effects of melt superheating treatment on microstructure of Mg_2Si/Al-Si-Cu composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 399(1/2): 106-109.

[22] 李克,李健,胡斐,等. Ce对Mg-3Al-2.5Si合金中初生 Mg_2Si 相的变质作用与机理[J]. 有色金属工程,2019,9(1):19-24.
LI Ke, LI Jian, HU Fei, et al. Metamorphism and mechanism of Ce on primary Mg_2Si phase in Mg-3Al-2.5Si alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(1): 19-24.

[23] 陈淑英,邵秉川,陈智麟,等. 铋含量对原位自生 Mg_2Si/AZ91D复合材料组织与性能的影响[J]. 有色金属工程,2016,6(3):21-25.
CHEN Shuying, SHAO Bingchuan, CHEN Zhilin, et al. Influences of Bi content on microstructure and mechanical property of in-situ Mg_2Si/AZ91D composites[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(3): 21-25.

[24] 谢敏. 熔体过热处理对过共晶Al-Si-Mg合金中的 Mg_2Si相的影响[D]. 赣州:江西理工大学,2011.
XIE Min. Effect of melt superheating treatment on microstructure and properties of Mg_2Si phase in Al-Si-Mg alloy [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2011.