

外加能量场在镁合金铸造过程中的晶粒细化行为研究进展

李喜阔, 程广奎, 孙明, 康泽, 罗英波, 王赛豪, 吴胜富

(上海理工大学材料与化学学院, 上海 200093)

摘要: 晶粒细化是改善镁合金微观组织及综合力学性能的重要手段。外加能量场逐渐被应用于镁合金的晶粒细化过程, 展现了细化效果良好、绿色环保、易自动化等优势, 因而得到了广泛关注。本文总结了近年来借助超声场、电场、磁场等外加能量场进行镁合金晶粒细化的研究现状, 分析了能量场主要工艺参数对镁合金晶粒细化的影响规律, 探讨了相关细化机制, 并对未来的发展方向进行了展望。

关键词: 镁合金; 外场; 晶粒细化; 凝固

镁合金因具有低密度、高比强度、良好的减震性能和节能减排效应等优点, 在航空航天和汽车等领域展现出广阔的应用潜力^[1-4]。然而, 镁合金的绝对强度较低, 且由于密排六方结构(HCP)导致塑性较低, 成为制约其大规模应用的重大瓶颈。在镁合金铸造过程中, 晶粒细化有助于提高组织均匀性、综合力学性能及后续塑性变形能力, 因而成为最基础且重要的技术环节^[5-7]。

目前, 镁合金晶粒细化方法大致包括热控制法、化学细化法、外场细化法等^[8-12]。热控制法主要是通过提高冷却速率以及降低过热度等工艺措施实现; 化学细化法主要是通过添加细化元素实现成分过冷细化作用, 或通过外加或原位自生相实现异质形核细化作用; 而外场细化法主要是借助外加能量场(例如超声、脉冲电流、电磁场)的微观效应起到细化作用。关于热控法和化学细化法, 有诸多综述文献可以参考^[8-12]; 但关于外场细化法, 目前尚缺乏较全面系统的总结。众所周知, 外加能量场具有绿色环保、易于自动化等技术优势, 且在镁合金组织细化领域已展现了良好的细化效果, 因此其在镁合金中的研究与应用有望在未来得到持续关注^[13]。基于此背景, 本文总结了近年来外场细化镁合金晶粒的研究现状, 并对其发展前景进行了展望, 从而为高性能镁合金的组织细化研究领域提供重要的参考。

1 超声场细化法

1.1 作用机理

超声波在金属熔体中所产生的空化效应(图1a)和声流效应(图1b)^[14], 是其细化合金晶粒的重要理论基础。如图1a所示, 超声波在传播过程中存在着正负压强的周期交变。在负周期内, 熔体分子之间的距离会超过分子保持稳定的临界距离, 从而产生空化气泡; 空化气泡在生长过程中会吸收金属熔体的热量, 在气泡界面发生局部过冷, 促进气泡表面成核。而在正周期内, 当空化气泡发生收缩塌陷时, 释放的高温与冲击力使得树枝晶破碎, 有利于晶核数量的增加^[15-16]。如图1b所示^[14], 当超声波在金属熔体中传播时, 由于熔体的粘滞力和超声的衰减, 使熔体内形成了一定的声压梯度, 从而引发声流效应。声流效应将树枝晶破碎所形成的大量晶核分散至熔体的各个部分, 从而促进晶粒细化^[17]。

作者简介:

李喜阔(2000-), 男, 硕士, 主要研究方向为镁合金晶粒细化。E-mail: 202342961@st.usst.edu.cn

通讯作者:

孙明, 男, 讲师, 博士, 硕导。E-mail: ssm@usst.edu.cn

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

06-0629-12

基金项目:

国家自然科学基金项目(51701124)。

收稿日期:

2022-09-28 收到初稿,

2022-11-22 收到修订稿。

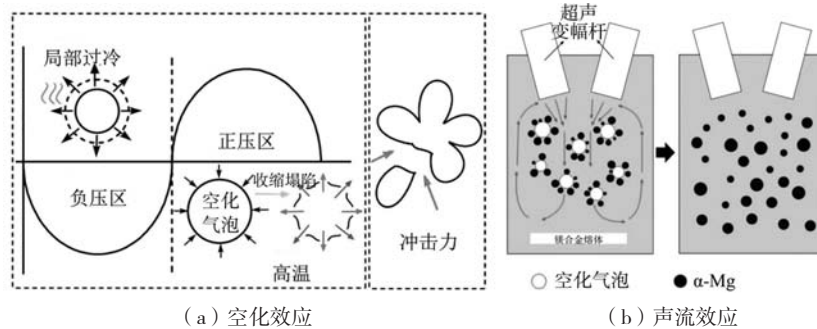


图1 超声场细化晶粒的作用机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the grain refining mechanism by the ultrasonic field

熔体超声处理 (Ultrasonic treatment, UST) 实验装置示意图如图2所示^[18], 主要由压电换能器、超声波发生器、空气冷却单元、变幅杆、调节手柄、温度采集系统等组成。超声频率与功率由内部模块及软件控制。超声变幅杆一般由钛合金制成, 在超声处理前需预热。

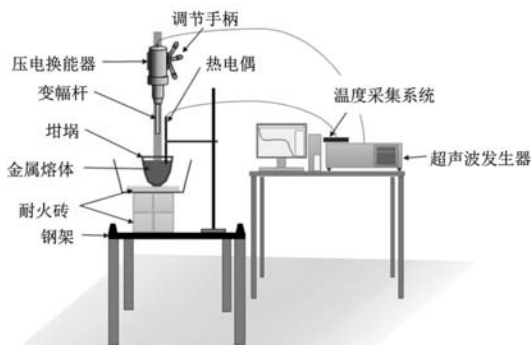


图2 熔体超声处理实验的典型装置示意图

Fig. 2 Typical schematic diagram of the melt ultrasonic treatment device

1.2 影响因素

超声已被应用于Mg-Al、Mg-Zn、Mg-RE-Zr^[19-21]等诸多镁合金的组织细化过程。为了便于理解超声细化镁合金的共性规律, 本节将按照超声细化效果的影响因素进行总结, 包括超声施加方式、超声输出功率、熔体温度和合金成分等。

1.2.1 超声场施加方式

超声场的传统施加方式主要是单频超声场 (Single-frequency ultrasonic field, SUF), 但近年来双频超声场 (Dual frequency ultrasonic field, DUF) 也逐渐得到应用。二者主要区别是, 双频超声场装置拥有两个压电换能器, 能够对合金熔体同时施加两个不同频率的超声波。表1总结了DUF的典型应用实例, 表明DUF能显著细化镁合金晶粒。

进一步的研究表明, 在总功率相同的情况下, DUF比SUF表现出更优良的晶粒细化效果^[24]。例如,

表1 双频超声场对部分镁合金晶粒细化效果的影响
Table 1 Effect of dual frequency ultrasonic field (DUF) on the grain size of the Mg alloys

镁合金	晶粒尺寸/ μm		文献
	未处理	双频超声场处理	
ZK60	183 ± 8	72 ± 6	[14]
ZW61	568 ± 51	89 ± 9	[22]
ZW101	519 ± 20	106 ± 8	[23]
AZ80	175 ± 20	78 ± 3	[23]

Chen等人^[14]对比发现, ZK60 (Mg-6Zn-0.5Zr) 镁合金在未经超声处理、经1 200 W单频超声场处理、经600 W双频超声场处理之后, 晶粒尺寸分别为 (183 ± 8) μm 、(125 ± 6) μm 、(72 ± 6) μm , 表明DUF效果最佳。这是因为, 根据如图3所示的数值模拟结果可知, DUF不仅可以减弱超声衰减, 增大空化面积^[23], 而且能产生较大的空化气泡和更多的瞬时气泡数^[14], 从而增强非均质成核和枝晶破碎效果。

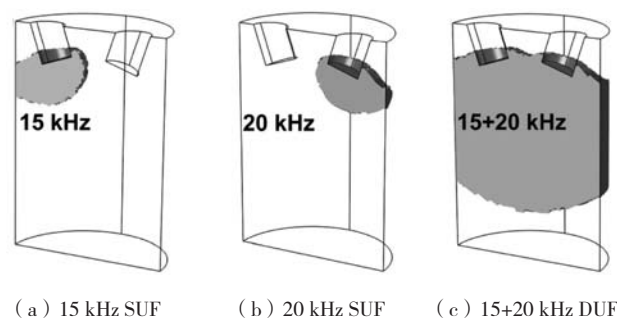


图3 不同超声施加方式下空化区域模拟结果

Fig. 3 Simulation results of the cavitation region under different ultrasonic application modes

1.2.2 超声功率

超声功率是影响镁合金晶粒细化效果的重要因素。功率过低, 无法起到良好的振荡作用; 功率过高, 则容易造成熔体飞溅、氧化和缩孔等缺陷。在生产实践中, 由于不同镁合金在熔体性质、浇注工艺等

方面的差异,其最佳超声功率也存在差异。因此,在超声施加过程中,进行工艺优化工作极其重要。

一般地,超声功率对于晶粒细化效果的影响规律为非线性,即存在一个功率阈值^[25],表现在两个方面。一方面,当超声功率未超过功率阈值且逐渐增加时,细化效果逐渐增强^[26-27]。例如,Aghayani等人^[28]对AZ91合金熔体分别施加了功率为120 W、240 W、360 W的超声,发现360 W时的晶粒细化效果最好。类似的,对Mg-12Zn-2Y和Mg-3.0wt.%Ca合金熔体施加超声场后,晶粒细化结果也显示出大致相同的规律^[27, 29]。这主要是因为,增大超声功率能够提高声强与声压,这不仅有利于增大空化泡尺寸^[30]及过冷度,也有利于增强冲击力^[31]和声流效应^[32-33],从而促进晶粒细化。另一方面,当超过功率阈值之后,由于空化气泡坍塌引起加热效应,导致熔体冷却速度降低,晶粒生长加速,从而削弱超声细化晶粒效果^[25, 29, 34]。例如,Wang等人^[34]对Mg-5Zn-2Er合金分别施加了功率为300 W、600 W、900 W的超声,发现当功率超过600 W时,晶粒开始粗化。Shao等人^[25]对AZ80合金熔体分别施加0~1 400 W的超声,晶粒尺寸变化如图4所示,也证实当功率超过阈值600 W时,晶粒尺寸逐渐增大。

此外,也有研究发现添加少量稀土元素(RE)会影响超声功率阈值的大小。例如,王红玲等人^[35]分别对ZK60-1Y、ZK60-0.2Nd合金进行超声处理,发现ZK60-1Y合金在600 W超声处理后,相较于200 W超声处理时的晶粒反而粗化,但ZK60-0.2Nd合金却不存在此种晶粒粗化现象;推测认为,可能是由于含不同稀土元素的镁合金熔体对超声处理热效应的敏感性存在一定的差异。

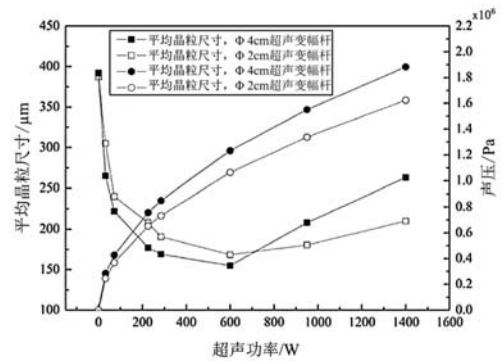


图4 超声功率对AZ80镁合金晶粒尺寸和声压的影响

Fig. 4 Effect of the ultrasonic power on the grain size and sound pressure of the AZ80 alloy

1.2.3 超声施加温度

超声施加温度也是影响晶粒细化效果的重要因素之一^[36],它决定了过热度、冷却速度,从而影响空化效应和声流效应,最终影响晶粒细化效果。这里,过热度为当前熔体温度与合金液相线温度的差值。一般地,超声施加温度区间可粗略分为液相区间和凝固区间。

当在液相区间施加超声时,能够起到充分搅拌熔体、分散细化剂颗粒及改善颗粒表面性质等作用。例如,Zhang等人^[37]在650 °C等温条件下对Mg-3.0%Ca合金熔体施加超声处理,超声持续时间为60 s,发现最终凝固晶粒尺寸由约300 μm 显著细化至75 μm ,这主要是因为超声增强了熔体中金属夹杂颗粒的润湿性,促进了异质形核细化作用。Nagasivamuni等人^[20]在液相线以上分别选取了两组过热温度(100 °C和40 °C),对纯Mg和Mg-6Zn合金熔体进行超声处理至完全凝固,并将两种超声处理方式依次命名为UST-S1和UST-S2(图5)。

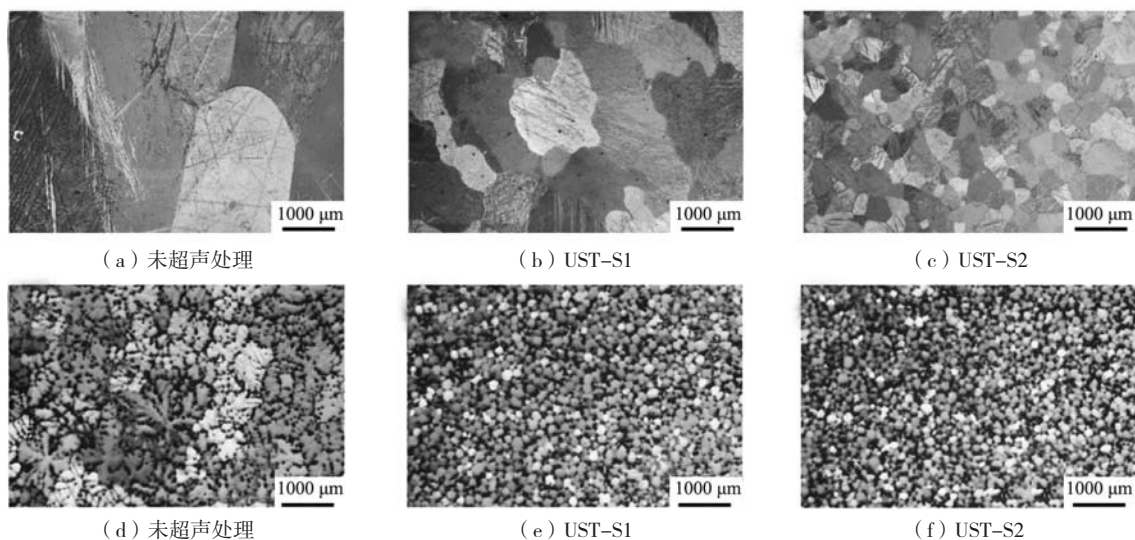


图5 不同处理方式的纯Mg(a-c)和Mg-6Zn合金(d-f)偏光显微组织

Fig. 5 Optical micrographs under polarized light of the pure Mg (a-c) and Mg-6Zn alloy (d-f) under different treatment methods

其晶粒细化对比结果如图5所示^[20],表明过热温度为40℃时的超声细化效果更好。类似的,在过热温度为40℃时对Mg-1Zr-0.2Al-0.01Be镁合金施加超声,会得到良好的细化效果^[38]。这主要是因为,在低过热温度下,超声变幅杆附近熔体存在更高的过冷度,因此在空化区中产生的晶粒更易存活下来,并被声流效应分布到熔体中,从而促进晶粒细化。

当在凝固区间施加超声时,能够提高异质形核数目以及破碎枝晶,从而增强晶粒细化效果。例如,Liu等人^[39]在液相线之下(595~590℃)对AZ91D镁合金熔体施加超声处理并降温凝固,发现相较于未进行超声处理的合金,晶粒变得更为细小;而Bhingole和Chaudhari^[40]在液相线温度以下(590℃等温)对AZ91合金施加4 kW/cm²的高强度超声,获得了近乎均匀的等轴晶粒,平均晶粒尺寸从300 μm(无UST)急剧细化至17 μm。类似的,如表2所示,在低于液相线温度对Mg、AS41和AZ80合金熔体施加超声处理,均能够得到良好的细化效果。然而,李克^[41]等人在液相线温度以下对AZ91D和AZ31B合金熔体进行超声处理,却发现相较于未超声处理时,两种合金的平均晶粒尺寸变化都不大(分别约为212 μm和277 μm),这主要是因为,在液相线以下,合金熔体粘度和凝固枝晶比例都显著增加,造成声流搅拌作用减小,空化气泡的长大和溃灭变慢,从而大幅度降低晶粒细化效果。

表2 凝固区间施加超声对部分镁合金晶粒尺寸的影响
Table 2 Effect of UST on the grain size of some Mg alloys during solidification process

镁合金	超声温度-持续时间	晶粒尺寸/μm		文献
		未处理	超声处理	
纯Mg	650℃-60 s	2 800	220	[42]
	650℃-120 s	2 800	340	
AS41	605℃等温-90 s	375	92	[43]
AZ80	650℃-50 s	340	130	[44]

1.2.4 合金溶质成分

溶质元素具有成分过冷作用,其含量对镁合金晶粒细化效果具有重要影响^[45]。当施加超声之后,溶质元素含量对晶粒细化效果的影响也同样显著。如图6所示,Qian等人^[46]总结了当超声功率密度固定为1700 W·cm²时,溶质元素含量对镁合金超声晶粒细化起到正相关作用。而Nagasivamuni和Ravi^[47]的研究也证实如此,其在Mg-3Al合金之中分别添加0.3%、0.5%和1% Al-Ti中间合金并进行超声处理(功率为5 kW),使得平均晶粒尺寸由(846±247) μm分别细化至(602±147)、(539±133)和(515±125) μm,表明增大溶质含量有利于提高晶粒细化效果。

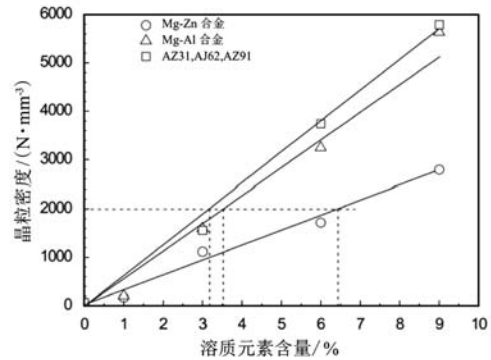


图6 在1700 W·cm⁻²的超声强度下镁合金晶粒数量密度与溶质元素含量的关系

Fig. 6 Relationship between grain number density and solute content of the Mg alloys under ultrasonic intensity of 1700 W·cm⁻²

此外,Eskin^[48]的研究表明,溶质含量对镁合金超声细化的影响作用与超声振幅相关。当超声振幅小于6.5 μm时,高Al含量的Mg-Al合金的晶粒细化效果更显著;而当超声振幅大于6.5 μm时,Al含量对晶粒细化的影响并不明显,这可能是因为在高振幅下,超声振动作用更强,使得异质形核数目得以显著增加,此细化贡献远远高于溶质含量本身^[49]。

1.2.5 超声与细化剂协同应用

添加细化剂能够实现镁合金晶粒细化,在此基础上施加超声处理能够进一步增强细化效果。镁合金中的两大类细化剂主要是C质细化剂^[50]和Zr细化剂^[51],分别应用于Mg-Al系合金、不含Al的镁合金(尤其是高强度镁合金)。然而,无论是C质细化剂还是Zr细化剂,均存在一定的细化工艺难题。对于C质细化剂,其颗粒难以分散,细化效果不稳定^[52];而对于Zr细化剂,其密度大、团聚严重、尺寸不均匀,会引起沉降、损耗和衰退等问题^[53-54]。因此,必须通过合理的技术措施改善或消除这些工艺难题。表3总结了超声增强镁合金细化剂细化效果的实例,表明超声在破碎颗粒团聚、活化颗粒表面、延缓沉降等方面具有显著优势。例如,对于Mg₉₇Y₂Cu₁合金(at.%,对应的wt.%成分约为Mg-6.84Y-2.46Cu),相较于单独添加Zr细化剂或单独施加超声处理,Zr和超声复合处理对其晶粒细化效果最佳^[58]。

综上,镁合金超声处理已展现了良好的细化效果,其主要受到超声施加方式、功率、超声施加温度和溶质含量等因素影响。然而,超声处理尚存在一些难点亟待解决:一方面,由于超声波在金属熔体中衰减较严重,导致细化作用范围局限于超声探头附近及下方特定区域^[60-61];另一方面,在实际生产中,受制于熔体质量大及铸锭尺寸大等工程因素,开发合理便捷、处理效果稳定且损耗低的超声熔体处理复合设备

表3 借助超声处理提升镁合金细化剂的细化效果实例
Table 3 Examples of UST improving the refining effect of the grain refiner for the Mg alloys

合金	晶粒细化方法	晶粒细化结果	改善原因	文献
Mg	超声与Al-Al ₄ C ₃ 细化剂联合使用	相较于单独使用细化剂, 晶粒进一步细化	超声促进异质形核核心Al ₄ C ₃ 分散, 提高了形核率	[55]
AZ91	超声和SiC添加剂联合使用	晶粒分布更细小均匀	超声可以更均匀地分散SiC颗粒	[56]
Mg-3Zn、Mg ₉₇ Y ₂ Cu ₁	Zr和超声联合使用	合金晶粒更细小	超声打散Zr团簇, 增加活性Zr粒子数目	[57、58]
AZ91、AZ61、AZ31	纳米炭黑孕育与超声联合使用	晶粒尺寸细化70%~80%	超声能够润湿和分散炭黑纳米颗粒	[59]

也是重要的研究难点。

2 脉冲电流细化法

电流场细化镁合金所使用的电源可分为直流电源、交流电源和脉冲电源。虽然直流电源和交流电源所产生的电流均能够细化金属凝固组织, 但若要产生较大的能量, 其功耗又比较大, 因此从安全和经济角度考虑, 并不利于工业应用和推广。而脉冲电源具有瞬时释放能量高、功耗小等优点, 因而被广泛应用^[62]。本节主要对镁合金脉冲电流处理 (Pulse current treatment, PCT) 细化的研究进行总结。

2.1 作用机理

电流通过金属熔体产生的电磁力效应和孕育变质效应, 是其细化金属凝固组织的主要作用机理^[63-65]。脉冲电流处理熔体的过程及其放电循环如图7所示, 脉冲电流通过金属熔体会生成强脉冲磁场, 二者相互作用, 从而在金属熔体内形成很强的电磁压强^[65]。一方面, 电磁压强随着脉冲电流的周期性变化而变化, 金属熔体被周期性压缩, 促进金属熔体传热传质和枝晶破碎, 有利于增加金属熔体过冷度, 提高形核率^[66]。另一方面, 熔体中晶胚外部存在着一层分布均匀的电

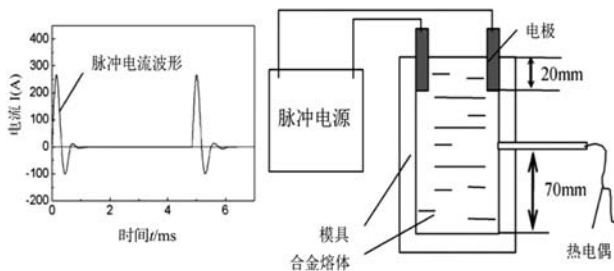


图7 脉冲电流放电循环及其应用于熔体处理的过程示意图^[67]

Fig. 7 Schematic diagram showing pulse current discharge cycle and the process of the melt pulse current treatment^[67]

荷, 阻碍晶胚与原子结合形成晶核。当将脉冲电流引入合金熔体后, 可以使晶胚外部的电子层发生畸变, 从而促进晶胚与原子结合进而重组长大, 最终成为稳定的形核核心。因此, 电流场处理对合金熔体具有显著的孕育作用, 能够提高形核率, 使合金晶粒得到细化^[63]。

2.2 影响因素

为了便于理解脉冲电流细化镁合金的共性规律, 本节主要总结脉冲电流施加方式、脉冲电压和脉冲频率等因素对镁合金晶粒细化效果的影响。

2.2.1 施加方式

脉冲电流的施加方式主要有两种, 即平行电极 (图7^[67]) 和上下电极 (图8^[68])。根据安培定律可知, 相较于上下电极模式, 平行电极模式下的脉冲电流会集中在上部熔体中, 因此熔体上表面与空气之间的热交换比熔体与模具壁之间的热交换慢, 脉冲电流对金属熔体的作用时间更长, 晶粒细化效果更好, 这

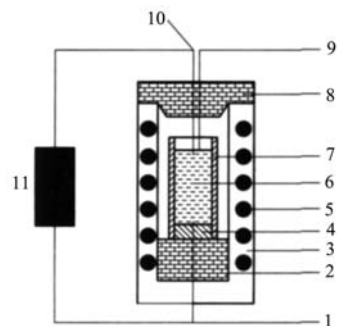


图8 上下电极模式的脉冲电流凝固装置示意图
1. 下电极 2. 衬底 3. 炉体 4. 耐火材料 5. 加热元件 6. 合金熔体 7. 刚玉管 8. 炉盖 9. 热电偶 10. 上电极 11. 低压脉冲电流发生系统

Fig. 8 Schematic diagram of the pulse current solidification device under up-down electrodes mode

Fig. 8 Schematic diagram of the pulse current solidification device under up-down electrodes mode

在Al细化中已得以证实^[67]。因此，在相同的脉冲电流参数和冷却条件下，优选平行电极模式，且平行电极的安装更为便捷，更有利于大规模工业生产。

2.2.2 脉冲电压

脉冲电压是影响电流场对镁合金晶粒细化效果的重要因素。在工业生产之中，不同镁合金因合金成分不同而具有不同的电流响应特性，最佳脉冲电压值便存在着差异。因此，应针对不同合金进行系统研究。

一般情况下，脉冲电压值对晶粒细化效果的影响规律可分为两个方面。一方面，在脉冲电压值未超过阈值时，随着脉冲电压的增加，细化效果逐渐增强^[68-70]。例如，周全^[68]对Mg-9Al-0.6Zn-3Ca合金分别施加100 V、200 V、300 V和400V的脉冲电流，当脉冲电压达到400 V时，晶粒细化效果最好，发达的树枝晶转变为球状或蔷薇晶。类似的，对Mg-9Al-0.6Zn-0.3Mn和AZ91合金熔体施加脉冲电流后，晶粒细化结果显示大致相同的规律^[69-70]。这是因为随着脉冲电压的增加，脉冲电流的峰值也随之增大，进而增强电磁力效应，从而使合金的晶粒得到显著细化。另一方面，当脉冲电压值超过阈值后，此时较高的脉冲电压会增强脉冲电流的热效应，从而使合金冷却速度变慢，晶粒细化效果减弱^[71]。例如，Yang^[71]等人在制备半固态AZ91D合金的过程中，分别施加100 V、200 V、300 V和400 V的脉冲电流，对晶粒尺寸的影响如图9所示，表明当脉冲电压为300 V时，晶粒细化效果最好，而当脉冲电压为400 V时，晶粒尺寸并未得到进一步细化。

2.2.3 脉冲频率

脉冲频率也是影响电流场对镁合金晶粒细化效果的重要因素之一。在脉冲电压不变的前提下，脉冲频率对晶粒细化效果的影响可分为两个方面。一方面，当脉冲频率不超过阈值而逐渐增大时，合金的平均晶粒尺寸逐渐减小^[72-73]。例如，陈红等人^[72]对AZ80-4Sn合金熔体施加0~600 Hz的脉冲电流，发现脉冲频率为

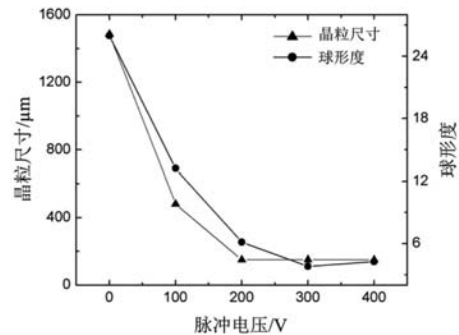
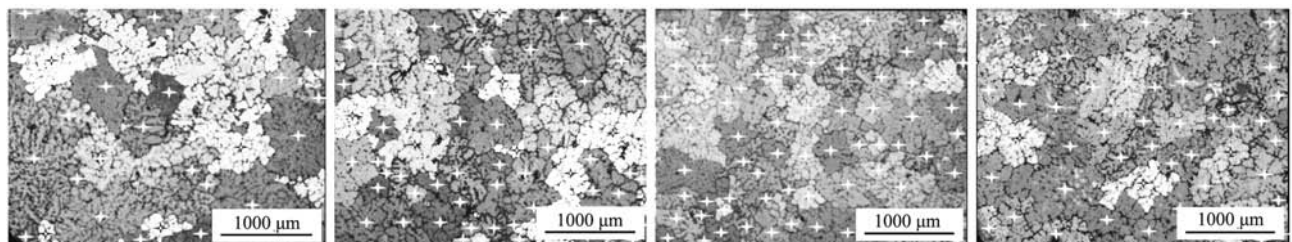


图9 脉冲电压对AZ91D合金晶粒尺寸和球形度的影响^[71]

Fig. 9 Effect of pulse voltage on the grain size and sphericity of the AZ91D alloy^[71]

600 Hz时，晶粒变得最为圆整、均匀。庞松^[73]对Mg-10Gd-3Y合金熔体施加脉冲电流，发现随着脉冲频率由0增加到500 Hz，如图10所示，晶粒尺寸由340 μm减小到226 μm^[73]。这是因为随着脉冲频率的增大，脉冲电流对金属熔体的电磁力增大，增强了金属熔体的传热传质，降低了温度梯度，减少了晶核的重熔，提高了合金的形核率；合金熔体的流速差也会变大，从而产生更大的剪切应力，更容易使枝晶破碎。另一方面，当脉冲频率超过阈值后，若继续增大，平均晶粒尺寸却不再减小，甚至反而增大^[74]。例如，Jia等人^[74]对AZ80合金施加20 Hz、30 Hz和40 Hz的脉冲电流，发现当频率超过30 Hz之后，合金的晶粒尺寸增大，这是因为随着电脉冲频率的增大，脉冲电流的热效应会使得小晶粒逐渐长大、甚至发生重熔，因而使得晶粒变得粗大。

综上，镁合金电流处理已展现了良好的细化效果，其细化效果受到脉冲电流施加方式、脉冲电压和脉冲频率等因素的综合影响。然而，脉冲电流处理仍然存在着一些问题待解决：一方面，脉冲电流的细化效果并不稳定；另一方面，高密度的电流对设备、现场操作及安全的要求较高。因此，目前脉冲电流细化技术在工业生产中仍难以大规模应用。



(a) 0

(b) 100 Hz

(c) 300 Hz

(d) 500 Hz

图10 脉冲频率对Mg-10Gd-3Y合金晶粒形貌的影响

Fig. 10 Effect of pulse frequency on the grain morphology of the Mg-10Gd-3Y alloy

3 脉冲磁场细化法

细化镁合金所使用的磁场可以分为直流磁场、交流磁场和脉冲磁场。相较于直流磁场和交流磁场，脉冲磁场（Pulse magnetic field, PMF）能够对金属熔体产生更强的电磁震荡作用，而且脉冲磁场具有输出峰值高、设备负荷小、细化效果显著以及无污染等优点^[75]，因此在外场细化镁合金的研究中，脉冲磁场处理逐渐成为热点之一。本节主要对脉冲磁场细化镁合金的研究进行总结。

3.1 作用机理

脉冲磁场熔体处理过程如图11所示^[76]。当外部线圈通入脉冲电流后，金属熔体内会产生脉冲磁场，进而会产生快速变化的脉冲涡流。由于脉冲涡流和脉冲磁场随着时间不断变化，二者之间相互作用产生的电磁力也随之不断变化，导致金属熔体中产生强烈震荡，促使枝晶破碎，从而形成大量的结晶核心，实现晶粒细化。尤为重要的是，震荡引起的对流不仅促进初始晶核游离运动至熔体各部分，而且使得过冷熔体的结晶能够在各部分同时进行^[77]，从而贡献于组织细化。此外，震荡还能够加快熔体的传热速度，降低熔体的温度梯度，使得熔体温度趋于均匀化，抑制初生晶核重熔的可能性^[78]。

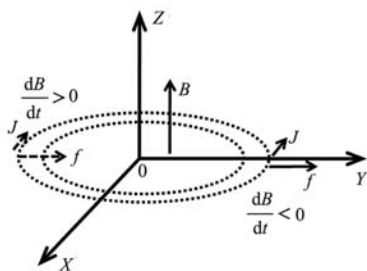


图11 熔体脉冲磁场处理的过程示意图

Fig. 11 Schematic diagram showing the melt treatment by the pulsed magnetic field

典型的脉冲磁场熔体处理实验装置示意图如图12所示^[79]，主要由脉冲电源、线圈和模具等组成。通过控制输入线圈中的脉冲电流，能够控制脉冲磁场的各种参数，进而控制合金熔体在脉冲磁场中的凝固过程。

3.2 影响因素

本节主要按脉冲磁场施加方式、脉冲频率和脉冲电压等影响因素总结脉冲磁场细化镁合金晶粒的研究进展，并对脉冲磁场与其他晶粒方法联合使用的细化效果规律进行总结。

3.2.1 脉冲磁场施加方式

脉冲磁场的传统施加方式主要是单一脉冲磁场

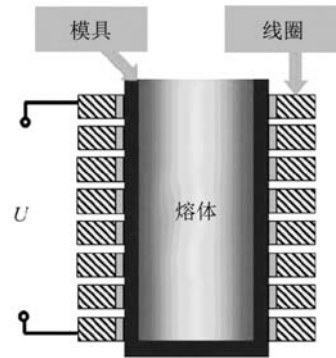
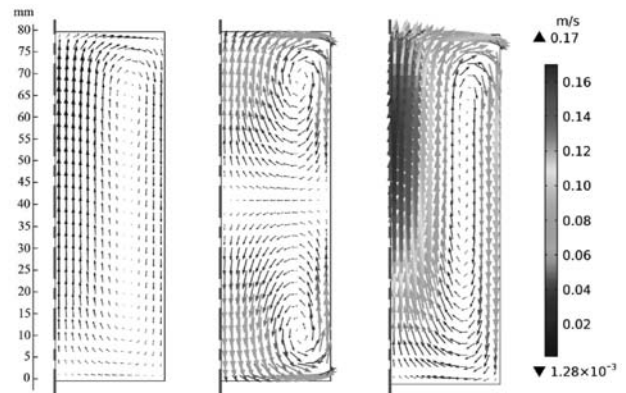


图12 熔体脉冲磁场处理装置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the melt pulse magnetic field treatment device

（Single pulsed magnetic field, SPMF），但近年来差相脉冲磁场（Out-of-phase pulsed magnetic field, OPPMF）逐渐得到应用。二者主要区别是，差相脉冲磁场使用多组线圈，在不同组线圈中通入不同的脉冲电流，其频率与电压大小均可由相关模块及软件进行调节。根据图13所示的不同磁场施加方式对AZ80合金熔体流场影响的数值模拟结果可知，相较于SPMF，OPPMF可以使熔体内部产生更强的对流作用，从而促进熔体温度均匀化，获得更优的晶粒细化效果^[80-81]。



(a) 未处理 (b) SPMF处理 (c) OPPMF处理

图13 不同磁场施加方式下AZ80合金熔体的流场模拟结果

Fig. 13 Flow field simulation results of the AZ80 alloy melt under different magnetic fields

3.2.2 脉冲频率

脉冲频率是影响磁场细化镁合金晶粒效果的重要因素之一。在工业生产中，不同种类的镁合金因元素组成、微观结构和铸造方式等差异，具有不同的最佳脉冲频率值。因此，在脉冲磁场的施加过程中，需要了解脉冲频率对晶粒细化的影响规律，从而优选磁场处理工艺。

脉冲频率对于合金晶粒细化效果的影响主要表现在两个方面。一方面，当脉冲频率未超过阈值而逐渐

增大时, 细化效果逐渐增强^[82-84]。例如, Wang等人^[82]对AZ31镁合金施加脉冲磁场, 发现合金晶粒尺寸变化如图14所示, 当脉冲频率为0~5 Hz时, 随着脉冲频率的不断增大, 平均晶粒尺寸逐渐减小。这是因为脉冲频率可以决定一段时间内脉冲磁场的平均能量大小, 脉冲频率越高, 脉冲磁场的平均能量越大, 即在一定时间内金属熔体的震荡越强, 合金熔体内部传热传质更为均匀, 晶粒细化效果显著^[82-83]。另一方面, 当脉冲频率超过阈值后, 晶粒细化效果逐渐减弱^[82]。例如, Jia等人^[84]对AZ31B镁合金熔体施加脉冲磁场后, 发现当脉冲频率超过15 Hz时, AZ31镁合金晶粒尺寸却逐渐增大。这是因为随着脉冲频率的不断升高, 电磁场的趋肤深度不断变小, 使电磁力主要集中于熔体的表面附近^[85], 熔体震荡仅发生在局部范围内, 内部的强制对流作用也随之相对减弱, 因而合金的晶粒细化效果变差。

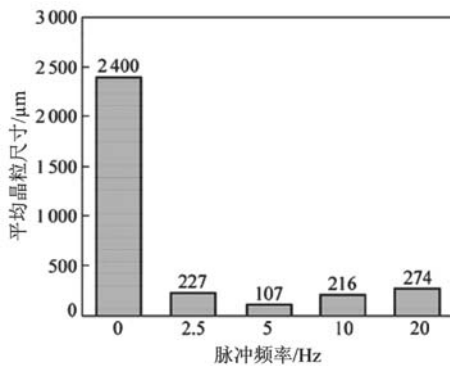


图14 脉冲磁场频率对AZ31合金平均晶粒尺寸的影响

Fig. 14 Effect of pulsed magnetic frequencies on the average grain size of the AZ31 alloy

3.2.3 脉冲电压

脉冲电压也是影响镁合金晶粒细化效果的重要因素之一, 其对于晶粒细化效果的影响规律也主要表现在两个方面。一方面, 当脉冲电压未超过阈值而逐渐增大时, 细化效果逐渐增强^[86]。例如, Wang等人^[86]对纯Mg施加0~200V的脉冲磁场处理, 发现随着脉冲电压的增大, 粗大的柱状晶逐渐转变为细小的等轴晶。类似的, 对AZ31和AZ91D镁合金凝固过程施加脉冲磁场, 晶粒细化效果也显示存在脉冲电压阈值(图15)^[79]。

这是因为随着脉冲电压的逐渐增大, 电磁振荡作用更加充分, 合金熔体对流加强, 使枝晶破碎更加充分, 从而细化合金晶粒。另一方面, 当脉冲电压超过阈值后, 镁合金的晶粒反而粗化。例如, 杨院生等人^[79]对AZ31、AZ91D合金熔体施加脉冲磁场, 当脉冲电压超过200 V后, 晶粒尺寸却逐渐增大。这是因为随着脉冲电压的继续增加, 产生的焦耳热会降低熔体的冷却速度, 使熔体的过冷度降低, 进而降低形核率。此外, 过高的脉冲电压还会使得电磁振动和电磁搅拌作用增强, 导致液面剧烈波动, 从而导致吸气而产生夹杂, 恶化铸锭质量^[87]。

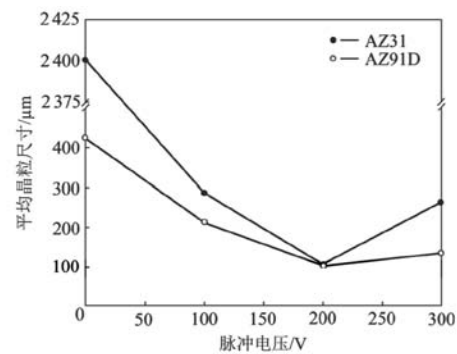


图15 脉冲电压对AZ31和AZ91D镁合金晶粒尺寸的影响

Fig. 15 Effect of pulsed voltage on the average grain sizes of the AZ31 and AZ91D Mg alloys

3.2.4 脉冲磁场与其他晶粒细化法协同应用

相较于单独使用细化剂或单一细化方法, 两种细化方法的联合使用也得到了大量关注。表4总结了脉冲磁场与其他晶粒细化方法的联合使用实例。例如, 对 $Mg_{97}Y_2Cu_1$ (at.%) 合金联合使用脉冲磁场和机械振动, 晶粒细化效果更好, 主要归功于二者产生了更强的振动作用^[88]; 而对 $Mg-5Y-2.5Zn-1.2Ca-Zr$ 合金施加脉冲磁场, 其能够更好地打散Zr细化剂颗粒团簇, 使Zr颗粒分布更均匀, 从而进一步提高Zr细化效果^[90]。

综上, 磁场处理作为镁合金晶粒细化的一种方法, 已展现了一定效果和前景。但是由于电磁力大小的局限性, 其应用在大型铸件中, 存在等轴晶率不高以及细化效果不稳定的问题, 导致其工业应用受限^[91-92]。此外, 冷却水的频繁使用也会对磁场线圈造成一定程

表4 脉冲磁场与其他细化法联合作用对部分镁合金的细化作用实例
Table 4 Examples showing combined effects of the PMF with other refinement methods

镁合金	晶粒细化方法联用	晶粒细化效果	优点	文献
$Mg_{97}Y_2Cu_1$ (at.%)	脉冲磁场+超声场	细小等轴晶或蔷薇晶	能够提供更大的过冷度	[88]
	脉冲磁场+机械振动	细小的等轴晶	熔体产生更强烈振动	
AZ31	脉冲磁场+交流磁场	等轴晶比例由55.8%提高至97%	电磁震荡作用更强	[89]
$Mg-5Y-2.5Zn-1.2Ca$	Zr+脉冲磁场	晶粒尺寸由1700 μm细化至150 μm	脉冲磁场打散Zr团簇	[90]

度的腐蚀^[92],增加了维护成本,因此磁场细化技术仍有待进一步研究与发展。

4 结论与展望

经过近几十年的发展,超声场、脉冲电场、脉冲磁场等外加能量场逐渐被应用在镁合金铸造过程中,并成为熔体绿色加工新手段。其主要是基于各种微观效应机制而产生相应的促进形核、抑制生长等作用,从而实现晶粒细化效果。已有的研究表明,外场晶粒细化效果主要受到处理工艺参数(超声功率、脉冲电压、脉冲电流、施加方式及处理温度等)和合金性质(溶质元素含量等)的影响,存在一定的工艺窗口。因此,应根据实际工程需求进行合理的工艺调整。

然而目前,外场细化技术尚存在如下几个问题亟待研究并解决。

(1) 超声传播的衰减特性,导致其细化作用范围受限,因此应针对此问题,量化表征其衰减规律与晶粒细化规律,并开发更高效的超声设备,从而尽量

减少衰退区域。此外,超声探头目前多为钛合金,其在熔体中易损伤损耗,需定期维修或更换探头,增加了超声处理的成本,因此未来应着重开发耐高温、低成本探头。

(2) 相较于易施加的超声场,脉冲电场和脉冲磁场由于其设备较复杂,在镁合金细化方面的研究依然不足。已有的研究表明,趋肤效应及细化效果不均匀等问题明显,因此有必要针对其开发稳定高效的复合处理设备。

(3) 在外场细化镁合金的机理方面,虽然借助经典的细化理论均可以得到合理解释,但目前尚存在诸多争议以及缺乏统一的实验证据。未来应加强对于实验证据的观察及分析,例如,可借助原位同步辐射先进表征技术,捕获熔体中更细微的形核生长证据,从而进一步丰富外场细化镁合金技术的理论体系。此外,应加强对于外场组织细化方面的数值模拟研究,为丰富其细化理论提供物理模型支撑。

参考文献:

- [1] KUBÁSEK J, MINÁRIK P, HOSOŤ K, et al. Novel magnesium alloy containing Y, Gd and Ca with enhanced ignition temperature and mechanical properties for aviation applications [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 877: 160089.
- [2] ATRENS A, LIU M, ABIDIN N I Z. Corrosion mechanism applicable to biodegradable magnesium implants [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2011, 176 (20): 1609–1636.
- [3] TEKUMALLA S, GUPTA M. An insight into ignition factors and mechanisms of magnesium based materials: A review [J]. *Materials & Design*, 2017, 113: 84–98.
- [4] PRASAD A, SHI Z, ATRENS A. Influence of Al and Y on the ignition and flammability of Mg alloys [J]. *Corrosion Science*, 2012, 55 (2): 153–163.
- [5] CHENG Y, QIN T W, WANG H M, et al. Comparison of corrosion behaviors of AZ31, AZ91, AM60 and ZK60 magnesium alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19 (3): 517–524.
- [6] JI H. Grain refinement and the microstructure evolution of Mg–9Al–5Ca alloy solidified under permanent magnetic stirring [J]. *Materials Research Express*, 2020, 7 (9): 096516.
- [7] RUBAIYA F, SHAOWN M R N, RASHED H M M A. Effects of calcium on hot compression behavior of Mg–Al–Zn alloy[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2021, 2324 (1): 030019.
- [8] ALI Y, QIU D, JIANG B, et al. Current research progress in grain refinement of cast magnesium alloys: A review article [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 619: 639–651.
- [9] BAMBERGER M. Structural refinement of cast magnesium alloys [J]. *Materials Science and Technology*, 2001, 17 (1): 15–24.
- [10] KARAKULAK E. A review: Past, present and future of grain refining of magnesium castings [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7 (3): 355–369.
- [11] STJOHN D H, EASTON M A, MA Q, et al. Grain refinement of magnesium alloys: a review of recent research, theoretical developments, and their application [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44 (7): 2935–2949.
- [12] EASTON M A, MA Q, PRASAD A, et al. Recent advances in grain refinement of light metals and alloys [J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2016, 20 (1): 13–24.
- [13] 刘欢, 龚文邦, 高辉武, 等. 金属熔体超声细化处理技术及其应用 [J]. *铸造*, 2015, 64 (10): 1013–1016.
- [14] CHEN X, NING F, HOU J, et al. Dual-frequency ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 433–441.
- [15] JIAN X, XU H, MEEK T T, et al. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy [J]. *Materials Letters*, 2005, 59 (2–3): 190–193.
- [16] MOUSSA M E, WALY M A, EL-SHEIKH A M. Effect of high-intensity ultrasonic treatment on modification of primary Mg₂Si in the hypereutectic Mg–Si alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 577: 693–700.

- [17] FENG X, ZHAO F, JIA H, et al. Effect of temperature conditions on grain refinement of Mg-Al alloy under ultrasonic field [J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2017, 30 (6): 341-347.
- [18] BALASUBRAMANI N, STJOHN D, DARGUSCH M, et al. Ultrasonic processing for structure refinement: An overview of mechanisms and application of the interdependence theory [J]. *Materials*, 2019, 12 (19): 3187.
- [19] GOMES I V, PUGA H, ALVES J L. Ultrasonic treatment as the route for grain refinement of Mg-Al alloys: A systematic review [J]. *Metals*, 2021, 11 (10): 1529.
- [20] BALASUBRAMANI N, WANG G, EASTON M A, et al. A comparative study of the role of solute, potent particles and ultrasonic treatment during solidification of pure Mg, Mg-Zn and Mg-Zr alloys [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9 (3): 829-839.
- [21] 张宏. 熔体超声处理对Mg-12Gd-xY-0.5Zr合金组织与性能的影响 [D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [22] CHEN X, NING S, WANG A, et al. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of quasicrystal-reinforced Mg-Zn-Y alloy subjected to dual-frequency ultrasonic field [J]. *Corrosion Science*, 2020, 163: 108289.
- [23] CHEN X, JIA Y, LE Q, et al. Understanding dual-frequency ultrasonic melt treatment on grain refinement and mechanical properties improvement of AZ80 magnesium alloy: experiment and simulation [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 4758-4767.
- [24] YIN Z, LE Q, CHEN X, et al. The grain refinement of Mg alloy subjected to dual-frequency ultrasonic melt treatment: a physical and numerical simulation [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 1554-1569.
- [25] SHAO Z, LE Q, ZHANG Z, et al. Effect of ultrasonic power on grain refinement and purification processing of AZ80 alloy by ultrasonic treatment [J]. *Metals and Materials International*, 2012, 18 (2): 209-215.
- [26] FANG X, WU S, ZHAO L, et al. Effect of ultrasonic power on microstructure and mechanical properties of Mg-3RE-3Zn-0.7 Y alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45 (1): 7-12.
- [27] LIU J, DONG B, FANG X, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg-12Zn-2Y alloy containing quasicrystal phase fabricated by different casting processes [J]. *China Foundry*, 2021, 18 (2): 147-154.
- [28] AGHAYANI M K, NIROUMAND B. Effects of ultrasonic treatment on microstructure and tensile strength of AZ91 magnesium alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509 (1): 114-122.
- [29] ZHANG Z Q, LE Q C, CUI J Z. Ultrasonic treatment of magnesium alloy melts and its effects on solidification microstructures [J]. *Materials Science Forum*, 2007, 546: 129-132.
- [30] XI X, CEGLA F B, LOWE M, et al. Study on the bubble transport mechanism in an acoustic standing wave field [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51 (8): 1014-1025.
- [31] FANG X, WU S, LÜ S, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of quasicrystal-reinforced Mg-Zn-Y alloy subjected to ultrasonic vibration [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 679: 372-378.
- [32] MADELIN G, GRUCKER D, FRANCONI J M, et al. Magnetic resonance imaging of acoustic streaming: Absorption coefficient and acoustic field shape estimation [J]. *Ultrasonics*, 2006, 44 (3): 272-278.
- [33] FRENKEL V, GURKA R, LIBERZON A, et al. Preliminary investigations of ultrasound induced acoustic streaming using particle image velocimetry [J]. *Ultrasonics*, 2001, 39 (3): 153-156.
- [34] WANG Z H, WANG X D, WANG Q F, et al. Effects of ultrasonic treatment on microstructure and mechanical properties of Mg-5Zn-2Er alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21 (4): 773-777.
- [35] 王红玲, 乐启焱, 张志强, 等. 超声处理对ZK60-X合金凝固组织的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2012, 32 (10): 962-964.
- [36] BALASUBRAMANI N, WANG G, STJOHN D H, et al. Current understanding of the origin of equiaxed grains in pure metals during ultrasonic solidification and a comparison of grain formation processes with low frequency vibration, pulsed magnetic and electric-current pulse techniques [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 65: 38-53.
- [37] ZHANG Z Q, LE Q C, CUI J Z. Effect of ultrasonic treatment on microstructures of Mg-Ca binary alloy [C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2010, 139: 677-680.
- [38] BALASUBRAMANI N, WANG G, STJOHN D H, et al. The poisoning effect of Al and Be on Mg-1wt.% Zr alloy and the role of ultrasonic treatment on grain refinement [J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 322.
- [39] LIU X, OSAWA Y, TAKAMORI S, et al. Grain refinement of AZ91 alloy by introducing ultrasonic vibration during solidification [J]. *Materials Letters*, 2008, 62 (17-18): 2872-2875.
- [40] BHINGOLE P, CHAUDHARI G. Effect of ultrasonic treatment on the grain refinement and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy [J]. *Materials Science Forum*, 2012, 710: 463-468.
- [41] 李克, 高挺, 毕秋, 等. 熔体超声处理温度区间对镁合金凝固组织的影响 [J]. *铸造技术*, 2010, 31 (3): 320-320.
- [42] BALASUBRAMANI N, WANG G, STJOHN D H, et al. Mechanisms of grain formation during ultrasonic solidification of commercial purity magnesium [M]. *Light Metals*, 2019: 1579-1586.
- [43] PATEL B, CHAUDHARI G P, BHINGOLE P P. Microstructural evolution in ultrasonicated AS41 magnesium alloy [J]. *Materials Letters*,

- 2012, 66 (1) : 335-338.
- [44] ZHANG Z Q, LE Q C, CUI J Z. Microstructures and mechanical properties of AZ80 alloy treated by pulsed ultrasonic vibration [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18: s113-s116.
- [45] BALASUBRAMANI N, VENEZUELA J, YANG N, et al. An overview and critical assessment of the mechanisms of microstructural refinement during ultrasonic solidification of metals [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022: 106151.
- [46] MA Q, RAMIREZ A, DAS A, et al. The effect of solute on ultrasonic grain refinement of magnesium alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 2010, 312 (15) : 2267-2272.
- [47] BALASUBRAMANI N, RAVI K R. Discussions on the mechanism of grain refinement in ultrasonic treated Ti containing Mg-Al alloys [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2015, 68 (6) : 1161-1165.
- [48] ESKIN G I. Ultrasonic treatment of light alloy melts [M]. Amsterdam: Gordon & Breach, 1998: 290-302.
- [49] StJohn D H, Easton M, Ma Q. Controlling the semisolid grain size during solidification [J]. Solid State Phenomena, 2008, 141: 355-360.
- [50] 杨明波, 潘复生, 李忠盛, 等. 镁合金铸态晶粒细化技术的研究进展 [J]. 铸造, 2005 (4) : 314-319.
- [51] SUN M, EASTON M A, STJOHN D H, et al. Grain refinement of magnesium alloys by Mg-Zr master alloys: the role of alloy chemistry and Zr particle number density [J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15 (5) : 373-378.
- [52] 陈欣, 秦建军, 欧耀辉, 等. Al_2C_3 对AM60A镁合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2012, 61 (2) : 203-207.
- [53] MA Q, ZHENG L, GRAHAM D, et al. Settling of undissolved zirconium particles in pure magnesium melts [J]. Journal of Light Metals, 2001, 1 (3) : 157-165.
- [54] 孙明, 吴国华, 戴吉春, 等. Zr在镁合金中晶粒细化行为研究进展 [J]. 铸造, 2010, 59 (3) : 255-259.
- [55] 高声远. AZ系镁合金铸态组织细化工艺与理论研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [56] PUCINA E, LOOZE G D, TOMUS D, et al. Practical considerations on the application of ultrasonic treatment to Mg-Al shape castings [J]. Materials Science Forum, 2013, 765: 255-259.
- [57] RAMIREZ A, MA Q, DAVIS B, et al. Potency of high-intensity ultrasonic treatment for grain refinement of magnesium alloys [J]. Scripta Materialia, 2008, 59 (1) : 19-22.
- [58] 刘峰, 周全, 黄曼青, 等. Zr和超声对 $Mg_{97}Y_2Cu_1$ 合金凝固组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (10) : 1107-1111.
- [59] BHINGOLE P P, CHAUDHARI G P. Synergy of nano carbon black inoculation and high intensity ultrasonic processing in cast magnesium alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556: 954-961.
- [60] SHAO Z, LE Q, ZHANG Z, et al. Numerical simulation of acoustic pressure field for ultrasonic grain refinement of AZ80 magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (11) : 2476-2483.
- [61] QIAN M, RAMIREZ A, DAS A. Ultrasonic refinement of magnesium by cavitation: Clarifying the role of wall crystals [J]. Journal of Crystal Growth, 2009, 311 (14) : 3708-3715.
- [62] 仲红刚, 高玉来, 翟启杰. 脉冲电流细化金属凝固组织研究综述 [J]. 现代铸铁, 2008, 28 (6) : 27-32.
- [63] WANG J, XUE Q, CHANG G, et al. Effects of electric pulse on microstructure of Al-Si alloy in liquid and solid states [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2004, 11 (2) : 123-126.
- [64] LI F, REGEL L L, WILCOX W R. The influence of electric current pulses on the microstructure of the MnBi/Bi eutectic [J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 223 (1-2) : 251-264.
- [65] NAKADA M, SHIOHARA Y, FLEMINGS M C. Modification of solidification structures by pulse electric discharging [J]. ISIJ International, 1990, 30 (1) : 27-33.
- [66] BARNAK J P, SPRECHER A F, CONRAD H. Colony (grain) size reduction in eutectic Pb-Sn castings by electroplusing [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 32 (6) : 879-884.
- [67] LI J, MA J, GAO Y, et al. Research on solidification structure refinement of pure aluminum by electric current pulse with parallel electrodes [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490 (1-2) : 452-456.
- [68] 周全. 低压脉冲电流对ZM5-3Ca合金组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29 (7) : 611-614+583.
- [69] 高德明. Mg-Al合金铸态组织细化技术基础研究 [D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [70] 丘永福, 高德民, 陈磊, 等. 脉冲电流对AZ91镁合金凝固组织和力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2007 (8) : 633-635, 573.
- [71] YANG Y S, ZHOU Q, HU Z Q. The influence of electric current pulses on the microstructure of magnesium alloy AZ91D [J]. Materials Science Forum, 2005, 488: 201-204.
- [72] 陈红, 孙昕, 邢志辉, 等. 电脉冲频率对AZ80-4Sn镁合金显微组织及力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (11) : 1169-1172.
- [73] 庞松. 砂型铸造Mg-Gd-Y合金凝固行为与晶粒细化机制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [74] JIA Y, LE Q, LIAO Q, et al. The effect of frequency on solidification characteristics of AZ80 alloy during electromagnetic DC casting

- [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6 (12) : 126549.
- [75] 梅国宏, 朱立光, 张庆军, 等. 脉冲磁场细晶化技术的研究现状 [J]. *铸造技术*, 2015, 36 (2) : 403–406.
- [76] JI H M, LUO T J, WANG C, et al. Direct chill casting of magnesium alloy under pulsed magnetic field [J]. *Materials Science and Technology*, 2017, 33 (1) : 33–39.
- [77] GRIFFITHS W D, MCCARTNEY D G. The effect of electromagnetic stirring on macrostructure and macrosegregation in the aluminium alloy 7150 [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1997, 222 (2) : 140–148.
- [78] GRIFFITHS W D, MCCARTNEY D G. The effect of electromagnetic stirring during solidification on the structure of Al-Si alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 216 (1–2) : 47–60.
- [79] 杨院生, 付俊伟, 罗天骄, 等. 镁合金低压脉冲磁场晶粒细化 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21 (10) : 2639–2649.
- [80] DUAN W, YIN S, LIU W, et al. Numerical and experimental studies on solidification of AZ80 magnesium alloy under out-of-phase pulsed magnetic field [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9 (1) : 166–182.
- [81] JIA Y, CHEN X, LE Q, et al. Macro-physical field of large diameter magnesium alloy billet electromagnetic direct-chill casting: A comparative study [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8 (3) : 716–730.
- [82] WANG B, YANG Y S, SUN M L. Microstructure refinement of AZ31 alloy solidified with pulsed magnetic field [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20 (9) : 1685–1690.
- [83] TAN S L, ZHOU Q, FU J B, et al. Grain refinement of $Mg_{97}Y_2Cu_1$ alloy solidified with pulsed direct current magnetic field [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 842: 279–283.
- [84] JIA Y, HOU J, WANG H, et al. Effects of an oscillation electromagnetic field on grain refinement and Al_8Mn_5 phase formation during direct-chill casting of AZ31B magnesium alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 278: 116542.
- [85] GUO S, LE Q, ZHAO Z, et al. Microstructural refinement of DC cast AZ80 Mg billets by low frequency electromagnetic vibration [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 404 (1–2) : 323–329.
- [86] WANG B, YANG Y S, ZHOU J, et al. Structure refinement of pure Mg under pulsed magnetic field [J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 27 (1) : 176–179.
- [87] 周全, 杨院生, 马建超. 脉冲磁场对AZ91D镁合金凝固组织的影响 [J]. *铸造*, 2007 (2) : 148–151.
- [88] 张浩. 复合场处理对长周期结构增强Mg-Y-Cu合金凝固组织及力学性能的影响 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [89] 胡世平, 陈乐平, 周全, 等. 脉冲-交流磁场AZ31镁合金组织及力学性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38 (3) : 303–308.
- [90] 李鹏, 周全, 陈舸, 等. Zr和脉冲磁场对Mg-Y-Zn-Ca合金组织及压缩性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40 (4) : 431–435.
- [91] 陈国军. 低频脉冲磁场金属凝固晶粒细化机理研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [92] 贾征, 李又佳, 席玖瑞, 等. 镁合金晶粒细化技术研究进展之一——物理细化技术 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40 (6) : 607–613.

Research Progress in Grain Refinement of Magnesium Alloys by External Energy Field

LI Xi-kuo, CHENG Guang-kui, SUN Ming, KANG Ze, LUO Ying-bo, WANG Sai-hao, WU Sheng-fu
(School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract:

Grain refinement is an important means to modify the microstructure and the comprehensive mechanical properties of magnesium (Mg) alloys. The external energy field has been gradually applied to the grain refinement process of the Mg alloys, due to the advantages of good refining effect, green environmental protection and easy automation. This paper summarizes the research status of the grain refinement of the Mg alloys using ultrasonic field, electric field and magnetic field in recent years. The influences of main process parameters of energy field on the grain refinement of the Mg alloys have been analyzed, whilst the related refining mechanisms have been discussed. Moreover, the future development direction has also been prospected.

Key words:

magnesium alloys; external energy field; grain refinement; solidification
