

# 振动条件下金属凝固过程的研究现状与展望

杨宝<sup>1</sup>, 张慧<sup>1</sup>, 王明林<sup>1</sup>, 赵文博<sup>1</sup>, 刘斌<sup>1</sup>, 刘帅<sup>1,2</sup>

(1. 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081; 2. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要:**介绍了振动被引入金属凝固过程的发展历程, 重点归纳了机械振动技术、振动激发形核技术、超声振动技术和脉冲磁致振荡技术运用于金属凝固过程控制的振动方式、应用领域、冶金效果及优缺点, 总结了四种振动产生的方式和机理, 概述了振动对金属液凝固的影响及具体形式, 总结了现有振动改善凝固组织的机理和振动技术在金属凝固过程中的研究现状, 最后对几种控制金属凝固的振动技术做了简要分析, 并对其后续发展做了简单的展望, 为以后研究振动技术在凝固过程中应用的学者提供一个参考。

**关键词:**连铸; 振动; 凝固过程; 细化晶粒; 铸坯质量

中图分类号: TF777

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)01-0135-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.01.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Review on development of metal solidification process under vibration

Yang Bao<sup>1</sup>, Zhang Hui<sup>1</sup>, Wang Minglin<sup>1</sup>, Zhao Wenbo<sup>1</sup>, Liu Bin<sup>1</sup>, Liu Shuai<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology of Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The development of vibration introduced into the metal solidification process was reviewed and the vibration methods, application fields, metallurgical effects, and advantages/disadvantages of mechanical vibration technology, vibration excitation nucleation technology, ultrasonic vibration technology and pulsed magnetic oscillation technology used for controlling metal solidification process were mainly summarized. Meanwhile, the modes and mechanisms of four kinds of vibration techniques were explored, and the impact of vibration on the solidification of molten metal and the specific forms were discussed. The mechanism of the existing vibration techniques improving solidification structure was discussed, and recent development of vibration technology used in the metal solidification process were summarized. A brief analysis and prospect of several vibration technologies for controlling metal solidification were also presented.

**Key words:** continue casting, vibration, solidification process, grain refinement, quality

## 0 引言

金属的凝固过程包含流体流动状态的改变、内部热量的传输及溶质的重新分布等过程, 而这些过程的改变与金属的质量有着密切的关系, 所以如何

控制金属的凝固过程成为冶金学者最关注的话题<sup>[1]</sup>。

近年来, 电磁搅拌技术已经被成熟地运用于连铸过程中, 该技术能扩大铸坯等轴晶率, 改善铸坯的偏析和疏松缩孔, 有效地提升铸坯质量。然而, 电磁搅拌

收稿日期: 2021-07-07

作者简介: 杨宝(1991—), 男, 在读博士生, 主要研究方向: 连铸过程工艺研究及铸坯质量控制。E-mail: ybvip1991@163.com。

产生的白亮带对铸坯的质量产生较大的影响,同时电磁搅拌高昂的设备费用及维护费用促使专家学者探索出了新的铸坯质量改善的手段。

1868年,前苏联的切尔诺夫在研究钢锭的凝固过程时,外加了机械振动手段,待钢锭完全凝固后做了低倍检测,发现外加机械振动能细化晶粒<sup>[2]</sup>。此后,外加振动作用于金属凝固过程的研究被众多学者所关注。1933年,德国的容汉斯在连铸结晶器中添加振动装置,该装置的添加不仅使得结晶器与铸坯之间产生相对位移且容易脱模之外,还能使得保护渣更容易卷入,从而起到润滑、保温及脱氧的作用,这使得现代连铸技术的发展开启了新的篇章<sup>[3]</sup>。

随着冶金技术的发展,对金属凝固过程的作用不仅限于机械振动,还包括振动激发形核、超声波振动及磁场振动等。虽然上述振动技术有了一定程度的工业应用,但是其应用价值、范围、动力源的改进及设备的优化还需进一步提升。因此,笔者总结

了几种振动技术的特点、原理、作用方式及研究现状,为振动技术的进一步开发提供研究基础。

## 1 用于金属凝固过程中振动技术的特点

用于控制金属液凝固过程的主要振动技术特点如表1所示,包含机械振动技术、振动激发形核技术、超声振动技术和脉冲磁致振荡技术。这四种技术均能改善铸件的凝固组织,并且都被运用于钢锭模铸生产过程中<sup>[4-7]</sup>。现阶段,大多数钢材的凝固成型均是依靠连铸工艺,控制好凝固过程就能有效地提升铸坯质量,然而上述4种振动工艺,仅仅只有脉冲磁致振荡技术在连铸结晶器区、二冷区有一定程度的工业应用<sup>[8]</sup>,而机械振动技术则仅被用于连铸结晶器区。但是对比几种技术的冶金效果和缺点,从经济效益的角度出发,发展机械振动技术的作用形式,优化机械振动的工艺参数,该技术将会具有很好的工业应用价值。

表1 振动技术的特点  
Table 1 Characteristics of vibration technology

类型	动力源	振动方式	接触类型	振动频率级别	应用项目	冶金效果	优点	缺点
机械振动	电、液压或压缩气体驱动	间歇或连续式	接触或间歇接触	中低频振动	模铸,连铸结晶器	细化晶粒;改善铸件力学性能;消除铸件疏松缩孔,减少渣气孔和裂纹;改变微观相的形貌	设备简单,易于操作,能耗低	频率较低,对铸件力学性能提升不明显,晶粒细化作用较弱
振动激发形核	电驱动	间歇式	接触	高频振动	模铸	促进金属液形核、细化晶粒	形核效果明显,适用于钢锭组织改善	应用面窄,设备造价高,易引起金属液污染,能耗高
超声振动	电驱动	间歇式或连续式	非接触	高频振动	模铸	改善铸件的耐腐蚀性、拉伸率和拉伸强度;消除残余应力,提效降本;细化晶粒	对钢液无污染、细晶效果明显	设备造价高,能耗高
脉冲磁致振荡	电驱动	间歇式	非接触	高频振动	模铸,连铸结晶器,二冷区	提高等轴晶区占比,降低铸坯中心偏析和缩孔;提升铸坯中心致密度	操作便利,应用面较广	设备复杂,造价高,能耗较高

## 2 振动的方式及产生的机理

### 2.1 机械振动的方式及原理

机械振动可分为一维振动和多维振动,机械振动的动力源主要来源于装置中做圆周运动的偏心轮及偏心块。当带有偏心块的偏心轮做圆周运动时,由于偏心轮和偏心块的质量均不可忽略,偏心轮会产生一个离心惯性力,这就导致振动台随着偏心轮的圆周运动做简谐振动,与振动台相连接或一体的铸型就受到由外力提供的振动作用,该作用以谐波

的形式作用于内部的金属液,金属液的凝固过程随着振动的频率和振幅发生变化,最终改善铸件的质量。

根据达朗伯原理<sup>[9]</sup>,可以得到简易偏心轮在竖直方向上的运动方程,如式(1)。通过该运动方程,发现离心惯性力的大小会随着转子偏心质量  $m$  的改变而发生改变,由此可采用改变转子偏心质量而达到改变激振力的目的。

$$(M - m) X - md^2/dt^2(X + e\sin\omega t) + cX + rX = 0 \quad (1)$$

式中,  $M$  为总质量, kg;  $m$  为转子偏心质量, kg;  $e$  为偏心距, m;  $\omega$  为转子的角速度, rad/min;  $X$  为旋转装置到平衡位置的垂直距离, m;  $d$  为转子在旋转面内的最高点和最低点之间的距离, m;  $t$  为时间, s;  $c$  为偏心轮的质量, kg;  $r$  为偏心块的质量, kg。

### 2.2 振动激发形核的方式及原理

振动激发形核技术由钢铁研究总院赵沛等<sup>[10]</sup>提出, 其物理试验模拟装置如图 1 所示。当金属液中插入具有高频振动和冷却结构的晶核发生器时, 由于发生器中冷却液与金属液存在巨大温差, 与发射器表面密切接触的金属液迅速形核并长大, 待一定时间后迅速开启高频振动器, 在高频振动的作用下, 在发射器表面形成的晶核被快速剥离并且连续的弹射到金属液中, 使得金属液中晶核密度迅速增加, 致密的晶核限制了其长大, 从而达到细化晶粒的目的。

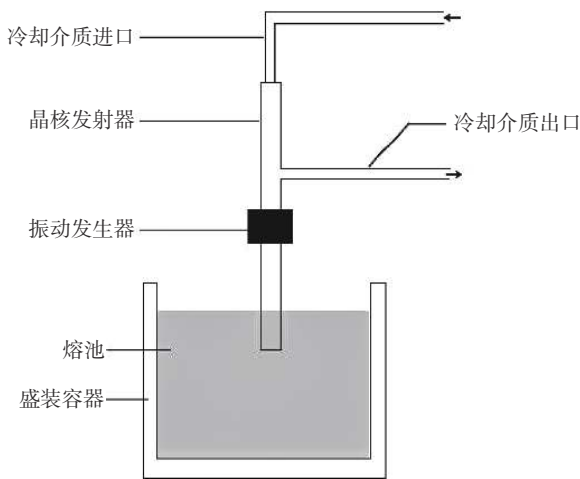


图 1 振动激发形核物理模拟装置

Fig. 1 Diagram of physical simulation apparatus for vibration excitation nucleation

### 2.3 超声振动的方式及原理

根据振动方向, 超声振动分为垂直式、水平式和旋转式振动。以垂直式超声振动(图 2)为例, 将高频电压加在超声换能器上, 经换能器的高频电压转换为高频超声振动, 高频振动经变幅器传至超声波探头, 通过调节电源电压及变幅器可改变超声振动的频率和振幅, 调节后的超声振动作用于不锈钢型壁内的金属液, 金属液中形成空化效应, 空化效应导致金属液中异相形核、枝晶破碎和晶粒模壁分离, 破碎的枝晶和从型壁分离下来的枝晶充当了二次形核的基底或晶核, 使得金属溶液中的晶核数量增加, 达到细化晶粒, 改善凝固组织的目的。

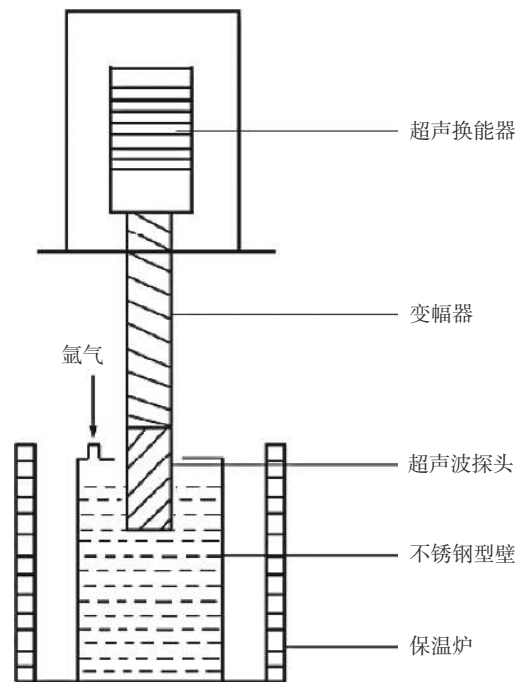


图 2 钢水超声处理试验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for ultrasonic treatment of molten steel

### 2.4 脉冲磁致振荡的方式及原理

脉冲磁致振荡技术是由上海大学翟启杰团队提出的金属液控制技术, 如图 3 所示, 其原理是: 脉冲电流自电容器经导电铜线到达环绕于铸坯表面的感应线圈上, 通电线圈内部产生磁场, 该磁场作用于金属熔体时, 二者相互作用产生电磁力, 而较窄的脉宽使得感应电磁力作用于铸坯表层区域, 由于在表层区域内有很强的过冷度, 因此该范围内可以大量形核, 表层晶核在具有振荡形式的脉冲感应电磁力的作用下脱落, 脱落后晶核在电磁力和金属液流动的共同作用下扩散至液芯内, 这就为液芯提供了大量的晶核, 提升了等轴晶率, 并且振动的电磁力在金属液内以压力波的形式由外向内传递, 均匀了温度, 降低了铸坯的疏松和缩孔<sup>[11]</sup>。

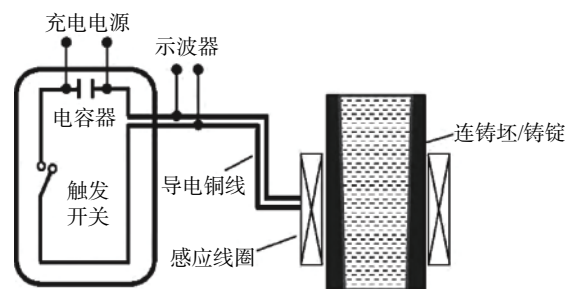


图 3 脉冲磁致振荡技术原理

Fig. 3 Technical schematic of pulsed magnetic oscillation

### 3 振动对钢液凝固的作用及细晶机理

#### 3.1 外加振动场后钢液的凝固方式及特点

非振动条件下,由于金属液与铸型或结晶器壁存在较大温差,金属液沿温降方向温度梯度较大,其凝固形式属于中间凝固。当凝固过程施加振动后,振动能均匀金属液的温度分布,降低各部分之间的温度梯度,使得凝固区域变宽,金属液的凝固方式由中间凝固转变为糊状区凝固,使得等轴晶区的范围扩大。

对金属液施加振动后,一方面,激振力迫使金属液做对流运动,流动的熔体冲刷固液界面处枝晶,使得界面处的晶体周期性脱落且增殖,为非均质形核提供形核基底及质点。同时,受迫流动的熔体均匀了金属液的温度场,增强了金属液的导热能力,促进了金属液的均质形核;另一方面,对金属液施加的振动引起内部各部之间产生相对滑移,进而由于其速度差产生粘性剪切,而型壁处的枝晶及金属液中漂浮的枝晶在该作用下被破碎并分布熔池内,阻碍了型壁处柱状晶生长的优势,而且振动对金属液产生了空化效应,提升了形核过冷度,促进了金属液的形核。

#### 3.2 振动改善凝固组织的机理

随着振动技术被逐步应用于凝固过程的控制,国内外专家学者对振动改善凝固组织的机理进行了研究,主要有以下几种理论<sup>[12-19]</sup>:

1) 枝晶破碎理论:枝晶存在一个固有的频段或频率,当外加振动作用于铸型或铸坯壳上时,坯壳内会产生应力波,当该应力波传至凝固前沿时,若波动频率或频带与枝晶的固有属性相符时,引发共振,能最大限度的细化晶粒。

2) 游离晶核理论:在凝固过程中施加振动,激振力作用于凝固前沿,促使前沿晶核的运动在金属液流动作用下,游离的晶核长大,会与原有凝固前沿的晶体或其他游离晶体发生碰撞,使得金属液中游离的晶体数量更多,增加金属液内非均质形核率。

3) 温度均化理论:外加振动促使金属液加速对流,使得金属液由高温处向低温处发生正向扩散,进一步降低温差,均匀温度,为等轴晶的形核与长大提供更好的发育环境,同时,温度的改变使得金属液发生体积凝固,形核质点数量增加,细化晶粒。

### 4 外加振动后金属凝固过程中的研究现状

#### 4.1 对金属凝固过程施加机械振动的研究现状

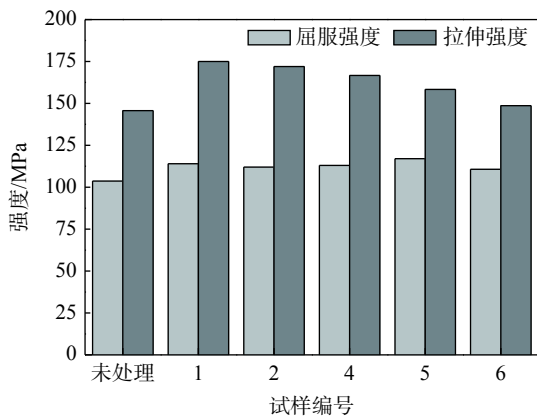
金属液凝固过程施加机械振动后改变了金属液的温度场和流场,使得铸坯的质量得到改善。考虑到金属凝固过程的不可视性,数值模拟的手段则被经常使用于研究凝固过程各种场的变化。Liu等<sup>[20]</sup>采用数值模拟的手段模拟了金属液定向凝固的过程,探讨了旋转振动频率与界面凹度的关系。模拟结果表明:低频时,随着频率的增加,界面凹度减小;高频时,界面凹度随着频率的增加而增加。Lyubimov等<sup>[21]</sup>也模拟了此类振动条件下合金的凝固过程,结果表明,凝固枝晶的均匀性和不稳定阈值随着旋转振动强度的增加而增加。Timeli等<sup>[22]</sup>对A360-10%SiCp合金外加机械振动的凝固过程进行了数值模拟,探究金属液与铸型界面换热系数与机械振动的关系,MAGMASOFT模拟结果显示,界面换热系数与机械振动的强度呈正相关。郭志远<sup>[23]</sup>采用Fluent软件模拟了单侧振动条件下铸轧过程温度场和流场的变化,发现随着振幅和振频的增加,轧辊间的熔池内温度和溶质分布更均匀。

Vadim等<sup>[24]</sup>对Al-Si合金施加振动处理与超细粉改性结合的手段研究振动对机械性能的影响,经检测发现,如图4所示,Al356合金经振动处理后,其屈服强度和拉伸强度分别提升了10%和20%。Numan等<sup>[25]</sup>通过对结晶器施加机械振动来研究振幅对Al-12.5%Si合金凝固后的微观形貌及力学性能的影响,结果表明,在振动幅度未超过临界值时,振幅的增大会减小片层间距,改变硅的形貌,使其纤维化;在该研究的条件下,机械振动对最大伸长率的影响大于对抗拉强度的影响。Gencalp等<sup>[26]</sup>采用固定频率的机械铸型振动和机械斜板振动方法对AlSi-8Cu-3Fe合金溶液进行了试验研究。结果表明,施加振动后,AlSi-8Cu-3Fe合金中铝颗粒呈现球状,同时振动改变了该合金凝固的传热机制。Timeli等<sup>[22]</sup>在A360-10%SiC合金凝固过程中施加振动,结果如图5所示,随着振动强度的增加,SiC弥散的更均匀,凝固组织更加细化。李健等<sup>[27]</sup>的研究表明,力学性能随振动方向的改变而改变,从无振动到水平振动再到垂直振动,试样的力学性能逐渐增强。

#### 4.2 对金属凝固过程施加振动激发形核技术的研究现状

钢铁研究总院张慧等探究了振动激发金属液形

核的机理<sup>[18,28]</sup> 和对金属凝固过程的影响及应用<sup>[5,29-32]</sup>。常雪君等<sup>[33]</sup> 研究了振动激发形核条件下 Cr17 铁素体不锈钢的传热情况, 结果表明, 振动激发形核促进晶核形成且阻碍了晶体长大; 浇注温度对提升等轴晶数量和等轴晶形成影响最大。贾京达等<sup>[34]</sup> 采用 Fluent 对振动激发形核技术的发射器表面结壳过程进行了数值模拟, 讨论了 600、700、800 Hz 三种频率对垂直于振动方向上的结壳时间的影响。如图 6 所示, 随着振动功率的增大, 结壳时间延长, 且同比对照, 800 Hz 为最优的振动频率。

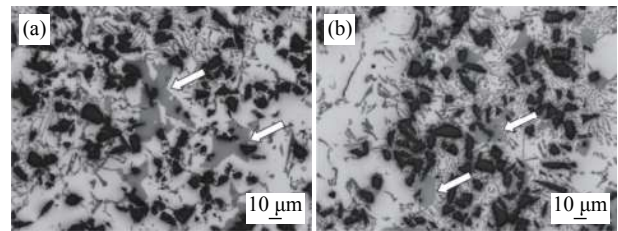


1, 2 号试样振动频率分别为 100 Hz 和 150 Hz; 4 号试样为使用超细粉改性剂; 5, 6 号试样分别为使用超细粉改性剂后再施加频率为 100 Hz 和 150 Hz 的振动

图 4 356 Al 合金力学性能检测结果<sup>[24]</sup>  
Fig. 4 Mechanical properties of Al356 alloy

4.3 对金属凝固过程施加超声振动技术的研究现状  
Shin 等<sup>[35]</sup> 在铸锭冒口位置施加超声振动, 并对 A356 合金在该条件下的凝固过程进行了数值模拟, 模拟结果表明, 超声振动改善铸锭冒口的缩孔提升了金属液的补缩率。蒋日鹏等<sup>[36]</sup> 对纯 Al 金属液施加超声振动, 讨论了熔体温度, 超声功率, 振动位

置和方式对凝固组织的影响。研究表明: 当熔体温度为 800 °C 时, 施加 170 W 的功率, 晶粒细化效果最明显; 间歇式动态振动能够细化晶粒, 然而振动深度不宜过深。毕秋等<sup>[37]</sup> 对在底部水冷条件下铸造 AZ31B 镁合金的凝固过程施加超声振动, 探求功率对凝固组织的影响, 试验结果如图 7 所示, 在 800 W 以内, 增大超声功率, 不仅能细化晶粒, 而且还能促进相形态的转变。



(a) 未振动的微观组织; (b) 振动后的微观组织。箭头所指为  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 粒子

图 5 A360-10%SiC 合金微观组织<sup>[22]</sup>  
Fig. 5 Microstructures of the as-solidified A360-10%SiC composite

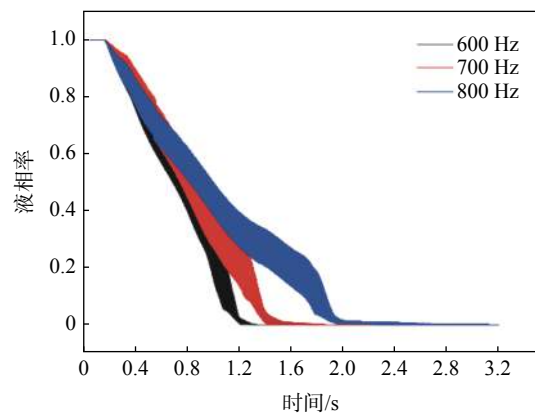


图 6 振动发射器某点液相率随时间变化曲线<sup>[34]</sup>  
Fig. 6 Variation curve of liquid phase ratio with time at a certain point of vibration emitter

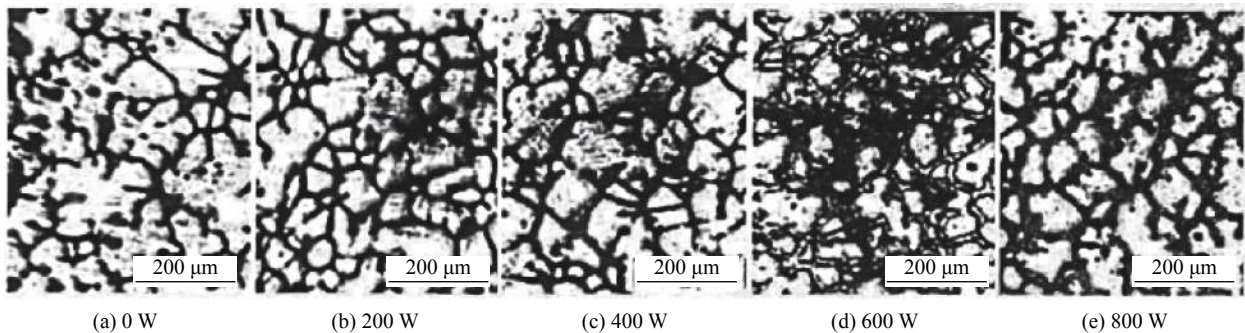


图 7 不同超声功率下 AZ31 镁合金铸锭的微观组织<sup>[37]</sup>  
Fig. 7 Microstructure of AZ31 magnesium alloy ingot produced through vibration under different ultrasonic power

王珊等<sup>[38]</sup> 探讨了超声振动细化 Zn-55Al-1.6Si 合金凝固组织的理想工艺参数。冯丹艳<sup>[39]</sup> 对比了

施加超声振动和未施加超声振动处理 ZL101 铝合金熔体后凝固组织的异同。Yao 等<sup>[40]</sup> 对 Mg-8Li-

3Al 合金熔体凝固过程施加超声振动, 探究了超声振动对该合金力学性能的影响, 结果表明: 施加超声振动后, Mg-8Li-3Al 合金的力学性能得到明显改善, 如图 8、9 所示, 且当超声功率为 170 W 时, 得到了较细的球状组织, 并且还能促进相形态的转变, 作用 90 s 后, 合金的抗拉强度和延伸率分别提高 9.5% 和 45.7%。李晓谦等<sup>[41]</sup> 探讨了超声振动对细化晶粒的机理, 并讨论了振动对金属液冷却时间和组织的影响, 发现超声振动引起的机械效应和声流作用不能折断枝晶臂, 但可以熔断二次枝晶臂根部。

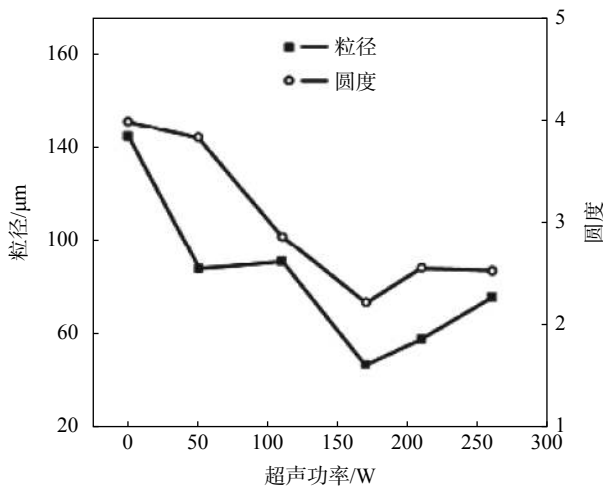


图 8 超声振动功率对  $\alpha$  相粒径和圆度的影响<sup>[40]</sup>

Fig. 8 Effects of ultrasonic vibration power on particle size and roundness of  $\alpha$  phase

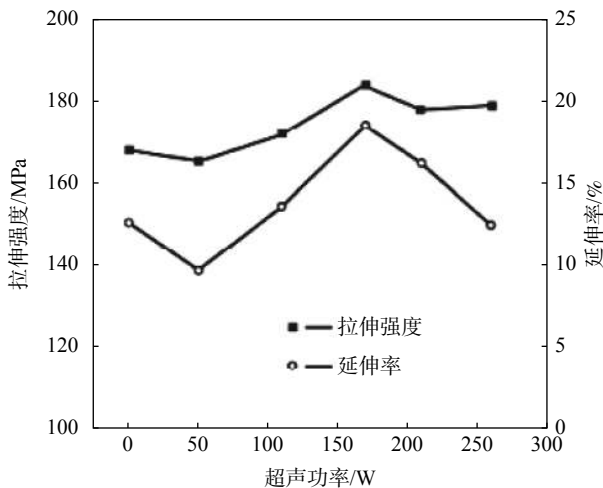


图 9 不同功率下 Mg-8Li-3Al 合金力学性能<sup>[40]</sup>

Fig. 9 Mechanical properties of Mg-8Li-3Al alloys by ultrasonic vibration treatment

#### 4.4 对金属凝固过程施加脉冲磁致振荡技术的研究现状

为了探究金属凝固过程在脉冲磁致振荡条件下

的变化, 刘芳等<sup>[42]</sup> 模拟了纯 Al 在脉冲磁致振荡 (PMO) 作用下凝固过程中的流场和磁场的分布, 发现在脉冲磁致振荡 (PMO) 作用下, 金属液受迫运动, 使得熔池中的温度和溶质分布更均匀。同时由于熔体表面受到交变电磁力的振荡作用, 其面上析出的晶核变成游离晶核, 提升了熔池中的形核率。Li-ang D 等<sup>[43]</sup> 对小高径比的纯铝铸锭进行了模拟研究, 发现 Joule 效应能细化晶粒, 但是却缩小了细晶区。Zhao 等<sup>[44]</sup> 采用 ANSYS 对 30Cr2Ni4MoV 铸锭凝固过程中的流场和电磁场进行了数值模拟, 结果表明, 脉冲磁致振荡的 Joule 热能延长合金铸锭的凝固时间, 这就使得熔池内长时间处于保温状态, 从而减小了铸锭的缩孔; 施加脉冲磁致振荡后, 受迫流动均匀了熔池内的溶质, 改善了铸锭的碳偏析。

Zhao 等<sup>[45]</sup> 模拟发现施加脉冲磁致振荡后, 金属液受迫流动的原因是该条件下熔池内有循环拉压力产生, 这一观点与刘芳等<sup>[42]</sup> 的类似。同时, 他还发现 Joule 热多存在于金属液表层, 这为晶粒进入熔体内部提供了充足的时间。Liu 等<sup>[46]</sup> 通过模拟脉冲磁致振荡条件下, 过热度对 Al3Ti1B 合金凝固的影响, 得到了与前人所述一致的结论。

翟启杰团队对工业纯 Al<sup>[47-49]</sup>、20 CrMnTi 齿轮钢<sup>[50]</sup>、铝铜合金<sup>[51]</sup> 及 GCr 轴承钢<sup>[52]</sup> 等合金的凝固过程施加脉冲磁致振荡技术, 发现该工艺可以细化晶粒, 并且加速 CET 转变, 提高了中心等轴晶率, Edry 等<sup>[53]</sup> 也得到了同样的结论。如图 10、11 所示, 徐衡等<sup>[54]</sup> 对连铸结晶器施加脉冲磁致振荡技术, 通过对螺纹钢小方坯的质量进行检测发现, 该技术不仅可以细化晶粒, 扩大等轴晶区, 还能使得二次枝晶间距缩短, 改善铸坯的中心偏析及中心缩孔。

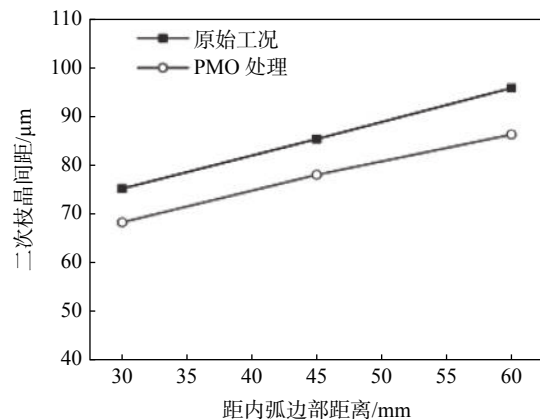


图 10 二次枝晶臂间距的比较<sup>[54]</sup>

Fig. 10 Comparison of the secondary dendrite arm spacing

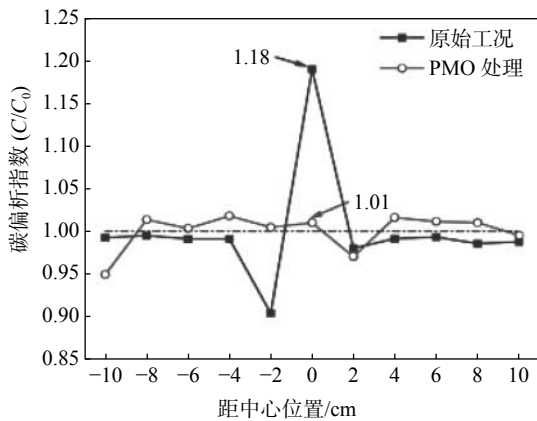
图 11 碳偏析指数分布曲线<sup>[54]</sup>

Fig. 11 Distribution curves of the carbon segregation index

## 5 结论与展望

虽然振动技术在金属凝固过程中的影响已经被众多专家学者所证实,但是振动技术应用主要还是在有色金属凝固及压铸领域,以上海大学翟启杰团队为代表开发的脉冲磁致振荡技术是几种振动技术已经被应用于方坯和矩形坯的连铸生产过程的工艺,

但大断面的铸坯和板坯的生产与方坯不同,厚度的增加使得凝固传热机理更为复杂,宽度的增加容易导致鼓肚的形成,这就为开发新的脉冲磁致振荡工艺设备增加难度。

由于连铸过程空间的限制及动态拉坯这一特性,为振动激发形核技术和超声振动技术在连铸过程的使用增添不可克服的困难,且上述两项振动技术均需高频电流驱动,使得生产成本增加。因此,将这两项技术应用于特种钢锭生产才能发挥其更大的经济效益。

机械振动不仅靠电能驱动,还可以靠液压和压缩气体驱动,若能将钢厂实际生产中的废气作为机械振动的驱动源,则不仅可以变废为宝,还可以节能减排。目前,机械振动仅被应用于连铸结晶器上,其对铸坯质量的改善还不明显,若能开发出适用于连铸二冷区和空冷区的气动机械振动设备,这将会使得未来连铸生产的经济效益进一步提升,因此,开发出适合连铸过程的气动振动装备并且优化振动设备的工艺参数是探索机械振动技术运用于连铸领域的发展方向。

## 参考文献

- [1] Low W, Schieber M, Chalmers B. Principles of solidification[C]// Applied Solid State Physics. Springer, 1995: 161-170.
- [2] Zhi Shui. Influence of mechanical vibration on crystallization process of steel ingot [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1959.  
(知水. 机械振动对钢锭结晶过程的影响[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1959.)
- [3] Fan Jinhui, Zhai Qijie. Effect of physical field on microstructure of metal solidification[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 16(9): 5-6,32.  
(范金辉, 翟启杰. 物理场对金属凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 16(9): 5-6,32.)
- [4] Kang Yan, Mao Weimin, Xu Dusheng, et al. Effect of mechanical vibration on microstructure and properties of investment casting 0Cr17 stainless steel[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2015, 35(10): 1073-1077.  
(康燕, 毛卫民, 许杜生, 等. 机械振动对熔模铸造0Cr17不锈钢组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(10): 1073-1077.)
- [5] Wang Chao, Zhang Hui, Wang Minglin, et al. Application of vibration excitation nucleation technology in 45 tQ345B steel ingot casting process[J]. Special Steel, 2014, 35(4): 20-23.  
(王超, 张慧, 王明林, 等. 振动激发形核技术在45 tQ345B钢锭浇铸过程的应用[J]. 特殊钢, 2014, 35(4): 20-23.)
- [6] Li Kaiye. Study on the experiment of direct induction ultrasonic vibration casting and the kinetic mechanism of solidification [D]. Changsha: Central South University, 2012.  
(李开晔. 直入式超声波施振铸造试验及其凝固动力学机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.)
- [7] Li H C, Liu Y X, Zhang Y H, et al. Effects of hot top pulsed magneto-oscillation on solidification structure of steel ingot[J]. China Foundry, 2018, 15(2): 110-116.
- [8] Zhong Honggang, Liu Haining, Xu Zhishuai, et al. Solidification homogenization technology and equipment of pulsed magnetically oscillated solidification[J]. Iron and Steel, 2019, 54(8): 174-180.

- (仲红刚, 刘海宁, 徐智帅, 等. 脉冲磁致振荡凝固均质化技术及装备[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 174-180.)
- [ 9 ] Wang Hongxia, Zhang Guoping, Xu Chunxiang, *et al.* Effect of mechanical vibration on grain refinement and solidification shrinkage of pure Al[J]. Foundry Equipment Research, 2007, (1): 28-31.  
(王红霞, 张国平, 许春香, 等. 机械振动对纯Al晶粒细化及凝固收缩的影响[J]. 铸造设备研究, 2007, (1): 28-31.)
- [ 10 ] Gan Yong, Zhao Pei, Zhang Hui, *et al.* Physical simulation of in-situ nucleation of metal liquid excited by vibration[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18(8): 9-13.  
(干勇, 赵沛, 张慧, 等. 振动激发金属液原位形核的物理模拟[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(8): 9-13.)
- [ 11 ] Gong Yongyong, Cheng Shumin, Zhong Yuyi, *et al.* Pulsed magnetooscillation solidification technology[J]. *Acta Metall Sinica*, 2018, 54(5): 757-765.  
(龚永勇, 程书敏, 钟玉义, 等. 脉冲磁致振荡凝固技术[J]. 金属学报, 2018, 54(5): 757-765.)
- [ 12 ] Le Q C, Guo S J, Zhang Z Q, *et al.* Study on electromagnetic vibration casting (Evc) of magnesium alloys[J]. Materials Science Forum, 2007, 546-549: 207-210.
- [ 13 ] Jiang Fan, Feng Junming, Wang Yijun, *et al.* Small casting technology for optimization of casting structure parameters based on vibration casting[J]. Foundry Technology, 2014, 35(1): 90-93.  
(江帆, 冯均明, 王一军, 等. 基于振动铸造的铸件结构参数优化小铸造技术[J]. 铸造技术, 2014, 35(1): 90-93.)
- [ 14 ] Wu S, Xie L, Zhao J, *et al.* Formation of non-dendritic microstructure of semi-solid aluminum alloy under vibration[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58(7): 556-559.
- [ 15 ] Zhao Zhong, Fan Zitian, Cheng Ping, *et al.* Microstructure and properties of Al-Si-Mg-Y alloy solidified by vibration pressure in EPC casting[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(8): 1520-1526.  
(赵忠, 樊自田, 成平, 等. Al-Si-Mg-Y合金消失模铸造振动压力凝固的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(8): 1520-1526.)
- [ 16 ] He Deping, Chen Feng. Effect of vibration anthology on dendritic growth[J]. Journal of Artificial Crystals, 1989, 4: 262-266.  
(何德珩, 陈锋. 振动干扰波形对枝晶生长的影响[J]. 人工晶体学报, 1989, 4: 262-266.)
- [ 17 ] Chen Xiang. Mechanical vibration improving microstructure and properties of plasma cladding coating [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2009.  
(陈翔. 机械振动改善等离子熔覆涂层组织及性能的机理与应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009.)
- [ 18 ] Li Feng. Fundamental research on the nucleation theory of liquid metal excited by vibration[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.  
(李峰. 振动激发金属液形核理论基础研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.)
- [ 19 ] Chen Feng. Solidification, microstructure and properties of aluminum alloy under vibration [D]. Nanjing: Southeast University, 1990.  
(陈锋. 振动作用下铝合金的凝固、组织及性能特点[D]. 南京: 东南大学, 1990.)
- [ 20 ] Liu Y C, Yu W C, Roux B, *et al.* Thermal-solutal flows and segregation and their control by angular vibration in vertical Bridgman crystal growth[J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2006, 61: 7766.
- [ 21 ] Lyubimov D V, Lyubimova T P, Parshakova Y N, *et al.* Effect of high-frequency vibrations on oriented crystallization of binary alloys[J]. *J. Surf. Invest. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2009, 3: 116.
- [ 22 ] Timelli G, Della Corte E, Bonollo F. Effect of mechanical mould vibration on solidification behaviour and microstructure of A360-SiCp metal-matrix composites [C]//Materials Science Forum. Zurich: Trans Tech Publications, 2011, 678: 105-114.
- [ 23 ] Guo Zhiyuan. Numerical simulation and experimental research on twin roll thin strip vibration casting [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.  
(郭志远. 双辊薄带振动铸轧数值模拟及实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.)
- [ 24 ] Vadim Selivorstov, Yuri Dotsenko, Konstantin Borodianskiy. Influence of low-frequency vibration and modification on solidification and mechanical properties of Al-Si casting alloy[J]. *Materials*, 2017, 10(5): 560-570.
- [ 25 ] Numan Abu-Dheir, Marwan Khraisheh, Kozo Saito. Silicon morphology modification in the eutectic Al-Si alloy using

- mechanical mold vibration[J]. *Materials Science and Engineering A, Structural Materials*, 2005, A393(1/2): 109–117.
- [26] Gencalp S, Saklakoglu N. Effects of low-frequency mechanical vibration and casting temperatures on microstructure of semisolid AlSi-8Cu-3Fe alloy[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2012, 37(8): 2255–2267.
- [27] Li Jian, Li Yongying, Liu Feiyang. Influence of casting temperature and vibration direction on mechanical properties of aluminum alloy in vibration casting[J]. *Foundry Technology*, 2016, 37(2): 302–305.  
(李健, 李永英, 刘飞扬. 振动铸造中浇注温度及振动方向对铝合金力学性能的影响[J]. *铸造技术*, 2016, 37(2): 302–305.)
- [28] Zhang Hui, Tao Hongbiao, Li Feng, *et al.* Research on mechanism of metal liquid nucleation process excited by vibration[J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(8): 20–24.  
(张慧, 陶红标, 李峰, 等. 振动激发金属液形核过程机理的研究[J]. *钢铁*, 2008, 43(8): 20–24.)
- [29] Tao Hongbiao, Zhang Hui, Wang Mei, *et al.* Effect of vibration excitation on solidification microstructure of zinc[J]. *China Metallurgy*, 2007, 17(11): 45–49.  
(陶红标, 张慧, 王玫, 等. 振动激发金属液形核对锌凝固组织的影响[J]. *中国冶金*, 2007, 17(11): 45–49.)
- [30] Zhang Hui, Tao Hongbiao, Wang Chao, *et al.* Discussion on the application of vibration excitation metal liquid nucleation technology in the solidification process of steel ingot [C]//*Proceedings of the 2012 Ingots Manufacturing Technology and Management Symposium*. Tangshan: CSM, 2012.  
(张慧, 陶红标, 王超, 等. 振动激发金属液形核技术在钢锭凝固过程中的应用探讨[C]//2012年钢锭制造技术与管理研讨会论文集. 唐山: 中国金属学会, 2012.)
- [31] Tao Hongbiao, Zhang Hui, Wang Chao, *et al.* Application of metal liquid nucleation technology excited by vibration in solidification process of ingots and slab[J]. *Special Steel*, 2012, 33(6): 18–21.  
(陶红标, 张慧, 王超, 等. 振动激发金属液形核技术在铸锭和板坯凝固过程中的应用[J]. *特殊钢*, 2012, 33(6): 18–21.)
- [32] Wang Chao, Zhang Hui, Zhu Xinkun, *et al.* Research on heat transfer in metal liquid nucleation process excited by vibration[J]. *Iron and Steel*, 2010, 45(10): 37–40.  
(王超, 张慧, 朱心昆, 等. 振动激发金属液形核过程的传热研究[J]. *钢铁*, 2010, 45(10): 37–40.)
- [33] Chang Xuejun, Wang Wenli, Xu Ruichao, *et al.* Research on heat transfer of ferritic stainless steel during vibration excitation nucleation process[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(3): 104–106.  
(常雪君, 王文礼, 徐瑞朝, 等. 振动激发形核过程中铁素体不锈钢的传热研究[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(3): 104–106.)
- [34] Jia Jingda, Yan Xin, Qiu Yulong. Numerical simulation of liquid metal nucleation and shell formation process excited by vibration[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(15): 78–81.  
(贾京达, 闫新, 邱玉龙. 振动激发金属液形核结壳过程的数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(15): 78–81.)
- [35] Shin S S, Kim W C, Kim K H, *et al.* Improvement of riser efficiency using high intensity ultrasonic treatment in A356 alloy[J]. *Mater. Trans.*, 2015, 56: 1605.
- [36] Jiang Ripeng, Li Xiaoqian, Hu Shicheng, *et al.* Effect of ultrasonic vibration treatment on microstructure of industrial pure aluminum during solidification[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2008, 32(10): 14–18.  
(蒋日鹏, 李晓谦, 胡仕成, 等. 凝固时超声振动处理对工业纯铝显微组织的影响[J]. *机械工程材料*, 2008, 32(10): 14–18.)
- [37] Bi Qiu, Li Ke, Gao Ting, *et al.* Effect of ultrasonic vibration power on solidification microstructure of AZ31B magnesium alloy in ingot[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloying*, 2009, 29(6): 576–581.  
(毕秋, 李克, 高挺, 等. 超声振动功率对AZ31B镁合金铸锭凝固组织的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2009, 29(6): 576–581.)
- [38] Wang Shan, Wu Liangce, Zheng Lijing. Effect of ultrasonic vibration on solidification microstructure of Zn-55Al-1.6Si alloy[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2011, 31(3): 285–289.  
(王姗, 吴良策, 郑立静. 超声振动对Zn-55Al-1.6Si合金凝固组织的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31(3): 285–289.)

- [ 39 ] Feng Danyan. Effect of ultrasonic vibration on solidification structure of ZL101 aluminum alloy melt[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(3): 89–92.  
(冯丹艳. 超声振动对ZL101铝合金熔体凝固组织的影响[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(3): 89–92.)
- [ 40 ] Yao Lei, Hao Hai, Ji Shouhua, *et al.* Effects of ultrasonic vibration on solidification structure and properties of Mg-8Li-3Al alloy[J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2011, 21: 1241–1246.
- [ 41 ] Li Xiaoqian, Li Kaiye, Chen Ming, *et al.* Effect of ultrasonic vibration on cooling time and solidification structure of 7050 aluminum alloy melt[J]. *Materials Science and Engineering*, 2011, 16(2): 249–244.  
(李晓谦, 李开晔, 陈铭, 等. 超声振动对7050铝合金熔体冷却时间及凝固组织的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2011, 16(2): 249–244.)
- [ 42 ] Liu Fang, Zhang Luyun. Numerical simulation of solidification magnetic field and flow field distribution of pure aluminum under pulsed magnetooscillation[J]. *Casting*, 2012, 21: 285.  
(刘芳, 张璐云. 脉冲磁致振荡下纯铝凝固磁场与流场分布的数值模拟[J]. *铸造*, 2012, 21: 285.)
- [ 43 ] Liang D, Liang Z Y, Sun J, *et al.* Grain refinement of commercial pure Al treated by pulsed magneto-oscillation on the top surface of melt[J]. *China Foundry*, 2015, 12: 48.
- [ 44 ] Zhao J, Yu J, Li Q, *et al.* Structure of slowly solidified 30Cr2Ni4MoV casting with surface pulsed magneto-oscillation[J]. *Mater. Sci. Technol.*, 2015, 31: 1589.
- [ 45 ] Zhao J, Cheng Y F, Han K, *et al.* Numerical and experimental studies of surface pulsed magneto-oscillation on solidification[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2016, 229: 286.
- [ 46 ] Liu T Y, Sun J, Sheng C, *et al.* Influence of pulse magneto-oscillation on the efficiency of grain refiner[J]. *Adv. Manuf.*, 2017, 5: 143.
- [ 47 ] Gong Y Y, Luo J, Jing J X, *et al.* Structure refinement of pure aluminum by pulse magneto-oscillation[J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, 497A(1): 147.
- [ 48 ] Yin Z X, Gong Y Y, Li B, *et al.* Refining of pure aluminum cast structure by surface pulsed magneto-oscillation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(12): 2629.
- [ 49 ] Liang D, Sun J, Liu T, *et al.* Enhanced heterogeneous nucleation by pulsed magneto-oscillation treatment of liquid aluminum containing Al3Ti1B additions[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(10): 1465.
- [ 50 ] Liu Haining, Li Renxing, Teng Lihong, *et al.* Application of PMO solidification homogenization technology on 20CrMnTi gear steel[J]. *Iron and Steel*, 2019, 54(6): 69–78.  
(刘海宁, 李仁兴, 滕力宏, 等. PMO凝固均质化技术在20CrMnTi齿轮钢上的应用[J]. *钢铁*, 2019, 54(6): 69–78.)
- [ 51 ] Xu Zhishuai, Li Qixin, Liang Zhuyuan, *et al.* Microstructure morphology of Al-4.5%Cu alloy under pulsed magnetooscillation[J]. *Shanghai Metal*, 2015, (2): 31.  
(徐智帅, 李祺欣, 梁柱元, 等. 脉冲磁致振荡下Al-4.5%Cu合金微观组织形态[J]. *上海金属*, 2015, (2): 31.)
- [ 52 ] Cheng Yong, Xu Zhishuai, Zhou Zhan, *et al.* Application of PMO solidification homogenization technology in production of continuous casting GCr15 bearing steel[J]. *Shanghai Metal*, 2016, 38(4): 54.  
(程勇, 徐智帅, 周湛, 等. PMO凝固均质化技术在连铸GCr15轴承钢生产中的应用[J]. *上海金属*, 2016, 38(4): 54.)
- [ 53 ] Edry I, Mordechai T, Frage N, *et al.* Effects of treatment duration and cooling rate on pure aluminum solidification upon pulse magneto-oscillation treatment[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2016, 47A(3): 1261.
- [ 54 ] Xu Heng, Li Lijuan, Cai Changqing, *et al.* Application of mold PMO to improve the quality of continuous casting billets[J]. *Shanghai Metal*, 2019, 41(4): 75–79.  
(徐衡, 李莉娟, 蔡常青, 等. 应用结晶器PMO提高连铸小方坯质量研究[J]. *上海金属*, 2019, 41(4): 75–79.)