

# 振动技术在金属材料铸造成形中的应用与发展

王成军, 韩董董, 陈 蕾, 蒋远远

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽淮南 232001)

**摘 要:**介绍了振动技术在铝、铜、铁等金属材料铸造成形中的应用研究现状,就振动类型和振动对铸造成形的机理作了阐述,分析了施加振动对金属铸造成形时金属内部组织改善、强度性能提高的原因,指出现有振动技术中存在的不足,介绍了多维振动铸造机的设计思路和研制进展情况。振动铸造实践证实,在金属材料的铸造成形工艺中施加多维振动能明显改善铸件的性能,提高铸造效率,多维振动铸造机的研制为今后多维振动技术的研究和应用提供参考。

**关键词:**振动;铸造成形;组织性能;多维振动铸造机

中图分类号:TQ21 文献标志码:A

## Application and development of vibration technology in metal casting molding

WANG Chengjun, HAN Dongdong, CHEN Lei, JIANG Yuanyuan

(College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** The current research status of vibration technology in aluminum, copper, iron and other metal materials casting molding are introduced. The types of vibration and the vibration mechanism for casting molding are illustrated as well. The reasons of improving metal internal organization and enhancing strength properties are analyzed when applying vibration on metal casting forming. The existing shortcomings in the vibration technology are pointed out. The design idea and development progress of multidimensional vibration casting machine are introduced. Vibration casting practice shows that applying multidimensional vibration in metal casting forming process can significantly improve the performance and the efficiency of casting. The development of the multidimensional vibration casting machine provides the reference for research and application of multidimensional vibration technology in future.

**Key words:** vibration; casting molding; structure property; multidimensional vibration casting machine

在金属铸造成形时,施加不同条件,所得到的铸件晶粒细化程度也不同,致使铸件使用性能良莠不齐。早在 140 多年前,学者切尔诺夫通过对钢锭成形时施加振动,得到了晶粒细化的钢锭铸件<sup>[1]</sup>。之后,振动对铸造成形的影响也被越来越多的学者关注。随着振动技术的发展,振动在很多方面得以应用,如用于挤压成

收稿日期:2014-03-08;修回日期:2014-03-28;责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(51205003);安徽省高校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2012A089)

作者简介:王成军(1978-),男,江苏涟水人,副教授,博士,主要从事智能机械与机器人、多维振动理论与技术等方面的科研与教学工作。

E-mail:cumt1279@163.com

王成军,韩董董,陈 蕾,等. 振动技术在金属材料铸造成形中的应用与发展[J]. 河北科技大学学报,2014,35(3):229-232.

WANG Chengjun, HAN Dongdong, CHEN Lei, et al. Application and development of vibration technology in metal casting molding[J].

Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(3): 229-232.

形、振动焊接、振动消除应力及铸造成形工艺等方面<sup>[2]</sup>。经过各国学者对各种纯金属和金属合金的研究,振动理论及技术也得到较快的发展,但目前仍存在很多不足之处有待进一步改进。

## 1 金属材料铸造成形中常用振动方式

各国学者对金属材料铸造成形中常用的振动方式进行了研究,主要可以分为机械振动、电磁振动和超声波振动等。机械振动频率一般小于 200 Hz,最典型的机械振动为偏心凸轮带动铸型振动;电磁振动频率变化范围较大,若使用变频器,频率可达到 2 kHz;超声波振动按振动方向可分为垂直、水平和旋转振动,按振动是否连续可分为连续振动和非连续振动,而周期振动和随机振动属于非连续振动。大量研究表明,机械振动在工业生产中更容易得到应用和推广。

## 2 振动技术在金属铸造成形中的研究现状

近年来国内外学者对振动技术在金属铸造等工业领域的应用进行了诸多研究,研究表明,在铸造成形过程中施加振动可以改善铸件组织、消除内应力。

### 2.1 振动技术在铝合金铸造成形中的研究现状

铝合金已广泛应用在机械制造等行业中,随着工业技术的发展,对铸造铝合金的性能要求也越来越高,铝合金也成为国内外学者重点研究的对象。

LIMMANEEVICHITR 等对铝合金成形进行了研究,观察在施加振动时铸件的凝固组织,并与半固态铸造法相对比,研究振动铸造是否可以替代半固态铸造<sup>[3]</sup>。MALEKSAEDI 等为了研究振动对过滤速率和毛坯密度的影响,通过对亚微米氧化铝粉施加振动,验证了压力注浆成型法<sup>[4]</sup>。

潘迪等将振动用于 ZL101 铝合金铸造成形中,研究振动对 ZL101 成形的影响<sup>[5]</sup>,结果表明,在静置时,晶粒尺寸较大, $\alpha$  树枝晶在振动作用下破碎,晶粒变的细小,晶粒错位难,抗拉强度高。研究结果还表明,随着频率的增加,合金内部针孔减少,抗拉强度和伸长率会先增大后趋于平稳。赵忠兴等学者利用水模拟实验,探讨了超声波发生器工具头对不同直径的铸件的影响<sup>[6]</sup>。分析超声波对 ZL102 合金结晶的影响,结果表明,超声波功率越大,介质点的振动现象越明显;在不同  $R$  值条件下,超声波产生的效果也不同,当  $R$  接近 1 时,效果最明显, $R$  越小时,熔体的枝晶越大,细化越不明显。

### 2.2 振动技术在铜合金铸造成形中的研究现状

铜具有导电、导热、抗腐蚀性能,在电气、轻工及国防等领域得以应用,同样在机械制造业中也越来越受关注。

杨志杰等以 99.9% 的铜为对象,研究了振动对铸造成形组织的影响<sup>[7]</sup>,结果表明,在静置时铸件内几乎没有等轴晶,随频率的增大,等轴晶逐渐增多,当频率为 100 Hz 时,等轴晶区增大到最大值;当改变振幅时,纯铜凝固组织的平均晶粒面积和等轴晶率呈不规则变化,当振幅为 10 mm 时效果最好;实验结果还表明,振幅对纯铜组织的影响比频率的作用明显。易荣喜等针对斜坡振动浇注工艺,研究不同因素对 Al4.5Cu4Ce 组织的影响<sup>[8]</sup>。实验结果表明,当浇注温度下降时,晶粒尺寸变小,呈球形且变得均匀分布;随着电压的增加,晶粒细化程度越大,位置分布越均匀。李军文等利用 Al-0.8%Cu 研究超声波对合金热裂倾向性的影响<sup>[9]</sup>。观察宏观组织结果显示,经超声波处理的 Al-0.8%Cu 试样,组织内的晶粒细小,随处理时间的增加,细化效果越明显;观察宏观断口显示,经超声波处理,热裂断口变为细小的等轴晶,减小了热裂的可能性。

### 2.3 振动技术在铸铁铸造成形中的研究现状

铸铁的工艺性能主要有铸造性、焊接性和切削性,铸铁的熔点低,铁水流动性好,其铸造性能优于钢,因而通常采用铸造方法制成铸件使用。

肖伯涛等利用 BF-LD-TF 型双向电磁振动台制备白口铸铁和球墨铸铁<sup>[10]</sup>。研究振动对铁合金成形的影响,研究表明,在施加振动时,振动破坏了凝固过程,在熔体内增加了周期性的“拉力-压力”,初生奥氏体破碎,初生奥氏体的尺寸与试样厚度成反比,含量与试样厚度成正比;实验结果还表明,厚度较大的试样在凝固前,振动对液体的作用时间长,使得游离的细小晶粒增多,致使石墨数量增多,且增加了“牛眼状”组织,减少了碳化物。

董学武等实验研究了激振频率对铸件的铸造残余应力的影响<sup>[11]</sup>。研究结果显示,不同的激振频率导致

铸型各个部位的振幅不同,因而消除铸造残余应力水平也不同,静置时,试件有较大残余应力,而采用铸型的固有频率进行振动处理,铸型各部位的振幅达到最大,降低铸造残余应力效果最佳。

李军文等利用超声波振动处理装置对灰铸铁熔体施加超声波,探讨石墨形态的变化<sup>[12]</sup>。实验结果表明,经超声波处理过的组织,主要是由粗大的石墨形成,随处理时间增长,石墨越细小,其硬度及冲击韧度越高,然而超声处理时间不宜过长。

#### 2.4 振动在金属铸造成形中的作用机理

在金属铸造充型过程中,由于金属熔体属于黏性流体,流动分为层流和紊流,层流只出现在充型结束或流动末端,所以一般认为充型为紊流状态。增加振动后,随着振动的增强,导致紊流程度增加;再者,振动本身的周期性会进一步增加紊流速度<sup>[13]</sup>,因此振动增强,流动性增加,但是,同样使由振动产生的垂直于流动方向的脉动和紊流附加阻力增大,增加能量损失,当能量损失过大时,流动性会减弱。

在铸造凝固过程中,施加振动,使金属液各部位之间的速度产生黏性剪切,使已生成的晶粒破碎,获得更细的等轴晶;而且,振动使金属液局部压力增大,使结晶过冷度增加,增大形核率;其次,金属液产生的对流,使界面处枝晶断裂,使析出的晶粒来不及长大,从而形成更多细小的晶粒<sup>[2]</sup>。在凝固结束后,继续施加振动,加速金属内部的原子的振动,可以减少铸件的残余内应力,提高铸件性能。

### 3 多维振动铸造机的研制

目前在金属材料的铸造成形工艺中使用的振动设备比较单一,如振动消除应力和振动凝固设备,且多数采用单自由度激振模式,振动方向无法控制和调节,而在金属材料的铸造成形过程中需根据铸型的不同采用多维振动,且在不同振动方向上采用不同的振幅、频率等振动参数,要求各振动参数的调节相对独立。

安徽理工大学王成军等在国家自然科学基金等项目的资助下,先后设计了四自由度振动铸造机、三维并联振动铸造机<sup>[14-16]</sup>等具有多个振动自由度的振动铸造设备,用于金属材料的铸造成形过程。上述多维振动铸造机可用于金属材料的砂型铸造、消失模铸造、熔模铸造等铸造成形工艺中,如砂型振实、振动凝固、铸件应力消除和落砂等工艺环节。笔者在具有4个振动自由度的多维振动铸造试验台的基础上利用完全解耦的混联机构 2PRRR-P<sup>(2R)</sup> 开发了更实用的三维并联振动铸造机,以同步反向工作的并联双振动电机为驱动单元,驱动砂箱沿 X, Y, Z 3 个方向往复振动,并可通过变频器调节 X, Y, Z 3 个方向的振动幅度、频率,振动电机通过对称布置,实现激振力的叠加。三维并联振动铸造机具有完全解耦的混联结构,控制容易、运动精确、可靠性高<sup>[14-15]</sup>,且成本较低。大量的振动铸造实践证实,在铝合金、铸钢、铸铁等材料的铸造成形工艺中对铸型施加多维振动有利于提高液态金属的充型能力,提高铸件的整体力学性能和铸造效率,降低铸件废品率,简化浇注系统、减少金属浪费;不足之处在于,在非金属型铸造工艺中使用多维振动铸造机时,若振动铸造机的振动强度过大,则铸型易开裂,需改进铸型设计。

图1为多维振动铸造试验台,图2为多维振动铸造机试验台在安徽鑫宏机械有限公司进行现场浇注试验场景。

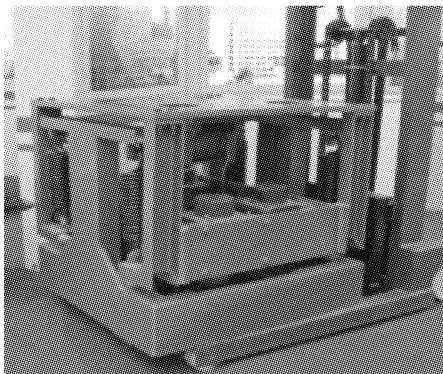


图1 多维振动铸造试验台

Fig. 1 Multidimensional vibration casting testbed

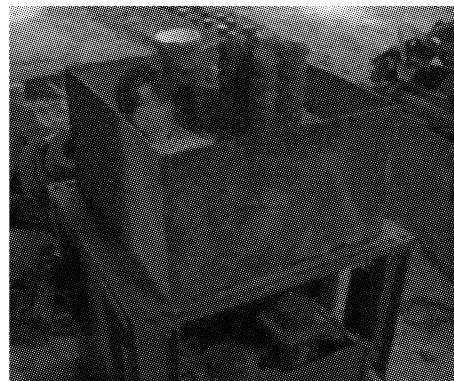


图2 多维振动铸造机及待浇注模型

Fig. 2 Multidimensional vibration casting and casting model

## 4 结 语

随着振动理论和技术的发展,国内外学者对振动技术在金属铸造成形中的应用做了大量研究,振动可以改善铸件组织结构、提高力学性能。通过现场试验可知,与单自由度振动相比,多维振动能有效提高金属的铸造性能、铸造效率,降低铸件废品率,减少铸造工艺中的金属浪费,但是当振动铸造机振动强度过大时,铸型易开裂。将多维振动应用到金属材料的铸造成形中,为今后对多维振动技术的研究和应用提供参考。

## 参考文献/References:

- [1] 陈颖,安萍,赵君文,等. 振动技术在金属凝固中的应用与发展[J]. 新技术新工艺,2007(8):58-61.  
CHEN Ying, AN Ping, ZHAO Junwen, et al. Application and development of vibration technique in solidification process of metal[J]. New Technology & New Process, 2007(8):58-61.
- [2] 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.  
WANG Hongxia, ZHANG Guoping, XU Chunxiang, et al. Effect of mechanical vibration on grain refinement and solidification shrinkage of aluminum[J]. Research Studies on Foundry Equipment, 2007(1):28-31.
- [3] LIMMANEEVICHITR C, PONGANANPANYA S, KAJORNCHAIYAKUL J. Metallurgical structure of A356 aluminum alloy solidified under mechanical vibration: An investigation of alternative semi-solid casting routes[J]. Materials & Design, 2009, 30(9):3925-3930.
- [4] MALEKSAEEDI S, PAYDAR M H, SAADAT S, et al. In situ vibration enhanced pressure slip casting of submicrometer alumina powders[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(16):3059-3064.
- [5] 潘迪,樊自田,赵忠,等. 机械振动对ZL101消失模铸造组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(3):290-292.  
PAN Di, FAN Zitian, ZHAO Zhong, et al. Effects of mechanical vibration on microstructure and properties of lost foam casting(LFC) ZL101 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(3):290-292.
- [6] 赵忠兴,穆玉刚,周广英,等. 超声振动对铸造合金结晶过程的影响[J]. 沈阳工业学院学报, 1997, 16(3):11-15.  
ZHAO Zhongxing, MU Yugang, ZHOU Guangying, et al. The effect of ultrasonic vibration on crystallizing process of casting alloy[J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 1997, 16(3):11-15.
- [7] 杨志杰,苍大强,李宇,等. 机械振动对纯铜凝固组织的影响[J]. 有色金属, 2011, 63(2):58-62.  
YANG Zhijie, CANG Daqiang, LI Yu, et al. Effect of mechanical vibration on solidification structure of pure copper[J]. Nonferrous Metals, 2011, 63(2):58-62.
- [8] 易荣喜,谢世坤,吴文通,等. 振动对稀土Ce铝铜合金组织的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1):75-77.  
YI Rongxi, XIE Shikun, WU Wentong, et al. Influence of vibration on microstructure of the aluminum-copper alloy of rare earth Ce[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(1):75-77.
- [9] 李军文,郝政晔. 超声波振动对Al-8.0%Cu合金抗裂性的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(6):37-40.  
LI Junwen, HAO Zhengye. Effect of ultrasonic vibration on crack resistance of Al-8.0%Cu alloy[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(6):37-40.
- [10] 肖伯涛,樊自田,龙威,等. 振动对消失模铸造铁合金凝固组织的影响[A]. 2012中国铸造活动周论文集[C]. 苏州:中国机械工程学会, 2012. 477-483.  
XIAO Botao, FAN Zitian, LONG Wei, et al. Effect of vibration on microstructures of ferroalloy in lost foam casting [A]. Proceedings of 2012 China Casting Cycle [C]. Suzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2012. 477-483.
- [11] 董学武,胡在帆,詹晋浩,等. 激振频率对振动凝固铸件残余应力的影响[J]. 铸造, 2000, 49(11):816-818.  
DONG Xuewu, HU Zaiji, ZHAN Jinhao, et al. Effect of exciting frequency on the residual stress of the vibrating solidification casting[J]. Foundry, 2000, 49(11):816-818.
- [12] 李军文,岳旭东,陈萌,等. 超声波振动对共晶灰铸铁中石墨形态的影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(19):36-38.  
LI Junwen, YUE Xudong, CHEN Meng, et al. Effect of ultrasonic vibration on graphite morphology in eutectic grey cast iron[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(19):36-38.
- [13] 曾礼. 机械振动对A356铝合金充型及凝固的影响研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.  
ZENG Li. Study on Effect of Mechanical Vibration on A356 Aluminum Filling and Solidification [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [14] 王成军,何涛,陈蕾,等. 三维并联振动铸造机的设计与运动性能分析[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(5):100-102.  
WANG Chengjun, HE Tao, CHEN Lei, et al. Design and motion performance analysis of three-dimensional parallel vibration casting machine[J]. Machine Design and Research, 2012, 28(5):100-102.
- [15] 马卫华,乔京生,李娄山. 强夯振动对复合地基水平冲击作用的模型试验研究[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(2):187-191.  
MA Weihua, QIAO Jingsheng, LI Loushan. Model test study on level impact of composite foundation influenced by dynamic compaction [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(2):187-191.
- [16] 蒋云飞. 振动沉桩机的MATLAB动力学仿真[J]. 河北工业科技, 2012, 29(6):495-498.  
JIANG Yunfei. MATLAB dynamic simulation of the vibratory driving piling machine[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2012, 29(6):495-498.