

1999 年上海大学博士学位论文 I

半固态合金 (A356) 触变成形流变 特性及其浇道系统的研究

作者: 杨湘杰

专业: 机械设计及理论

导师: 刘 谨



215
75712
1999 年上海大学博士学位论文

半固态合金 (A356) 触变成形流 变特性及其浇道系统的研究

作 者: 杨湘杰
专 业: 机械设计及理论
导 师: 刘 谨



上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (1999)

**Study on the Rheological Behavior and
Gates of the Thixoforming of
Semi-Solid Aluminum (A356) Alloy**

Candidate: Yang Xiangjie

Major: Mechanical Design and Theories

Supervisor: Prof. Liu Jin

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体成员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：（工作单位职称）

翁世修 （上海交通大学，教授）

委员：

张直明 **乌国卿**

谢卫华 **毛协民**

导师：

刘 谨

评阅人名单:

孙国雄	东南大学	210018	教 授
谢水生	北京有色金属研究总院	100088	教 授
柳和生	南昌大学	330029	教 授

评议人名单:

冯培恩	浙江大学	310027	教 授
何成宏	南昌大学	330029	教 授
乌国卿	上海富安公司	200020	教授级高工
董 超	上海大学	200072	教 授

答辩委员会对论文的评语

半固态金属触变成形是一门正在发展的新兴的金属成形工艺，是一个前沿性的具有现实意义的应用基础理论课题。论文立题在理论上具有重要的意义，在工业应用上更具有广泛的应用价值。该论文进行了以下几个方面的创新工作：

1. 在实验研究与理论分析的基础上，对半固态合金（A356）触变成形过程建立了基于幂定律的流变本构方程及粘度模型。

2. 从流变学基本方程出发，用 MAGMASoft® Version 3.1 软件对半固态铝合金在压铸环境下，触变成形三维薄壁构件成功地进行了计算机模拟，为分析该类工艺开创了现实途径。

3. 利用布勒（Buhler）压铸机等装置，对所设计的单一壁厚尺寸板类零件和具有不同壁厚尺寸的板类零件进行了系统的半固态铝合金触变成形试验研究。根据试验结果与计算机模拟结果，对比不同工艺条件对试件成形特性性能与机械性能的影响，对有关的工艺参数、浇道内浇口尺寸以及影响制品质量的其他各种因素进行了深入的考察，并提出了压铸环境下触变成形浇道系统的设计思想。

论文研究方法正确，工作有创新性，表明论文作者在本学科领域已经掌握了宽广的基础理论和系统深入的专门知识，具有很强的独立从事科研工作的能力。论文行文流畅，条理清晰，层次分明。在答辩过程中，能正确流利地回答答辩委员们所提出的问题。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决，5 票全票同意通过该生的博士论文答辩，建议授予博士学位。

答辩委员会主席：翁世修

1999 年 6 月 14 日

摘 要

本文致力于半固态 (semi-solid) 铝合金 (A356) 在压铸环境下触变成形的流变特性及其浇道系统设计的研究, 对有关的理论和方法作了深入系统的分析, 围绕半固态铝合金触变成形 (thixoforming) 的流变特性及其良好的成形条件, 进行了大量的试验, 在获得试验数据的基础上, 运用数据处理和数学方法, 针对半固态铝合金触变成形中基于幂定律流动特性的粘度模型以及模具浇道系统的设计对成形零件机械性能的影响展开了研究工作.

本文的主要研究工作及创新点有以下几个方面:

(1) 压铸环境下半固态合金的流变试验

a. 在深入研究半固态合金流变学研究现状的基础上, 针对压铸环境金属熔体的流动为压力流动, 并与毛细管流变仪内流体流动的特征相似的成形特点, 提出并采用基于毛细管流变仪原理的半固态合金触变成形中流变特性测定的试验装置.

b. 首次使用板类零件模具在生产工况下 (大剪切速率、极短成形时间、高固相分数 $f_s=0.5$), 对半固态铝合金 (A356) 触变成形流变特性进行试验, 并获得了正确的认识.

(2) 半固态铝合金流变特性的研究

a. 测定并计算在成形过程各个不同断面 (压室、浇道、型腔) 内, 金属熔体的流动速度, 运用雷诺数判据方式证实, 在压铸生产中, 半固态铝合金的流动为层流状态.

b. 通过不同的充型速度和不同的锭坯二次加热温度 (570

~580°C) 流动试验, 首次得知: 当剪切速率在 $2000 \sim 10\,000\text{ s}^{-1}$ 范围, 金属流体流动呈现伪塑性流变特性; 当剪切速率大于 $100\,000\text{ s}^{-1}$, 金属流体流动呈现胀塑性流变特性. 首次获得大剪切速率(大于 10^6 s^{-1}) 环境下, 半固态金属流动的流变方程, 并用此方程对流动过程进行计算机模拟. 模拟结果与实际效果的吻合性良好.

(3) 浇道系统的研究

a. 以相似性原理为基础, 设计出单扇和双扇两大系列五种浇道系统. 对比不同浇道系统生产试样的抗拉强度、延伸率和微观组织, 获知: 单扇浇道系统生产的试样在上述性能方面优于双扇浇道系统, 其中微弧单扇浇道系统生产的试样性能最好.

b. 在试验数据分析的基础上, 首次提出在高固相分数 ($f_s=0.5$) 时, 半固态铝合金触变成形浇道系统的设计思想.

c. 通过对壁厚为 1mm 断面的充填能力试验, 首次证明, 半固态合金在良好的充型条件下, 具有良好的薄壁充填能力.

关键词 半固态铝合金, 触变成形, 流变特性, 机械性能, 浇道系统

Abstract

The main purpose of this dissertation is to study the rheological behavior of semi-solid aluminum alloys (A356) in die-casting and the effects of gate upon the mechanical properties after the relative theory thoroughly. To study the rheological behavior and the ability of thin wall forming, many experiments are performed. Based on the experiment data, the viscosity model and designing of gate size are carefully studied.

The main contributions of this paper are as follows:

(a) Based on the researching status of semi-solid metals, we use tube viscosity apparatus to measure the shear rate and shear stress, which can calculate the apparent viscosity of fluid in the tube. This is the best way to close the conditions of the industrial operation of die-casting.

(b) It is realized first that under the high shear rate and large solid fraction, the rheological behaviors of semi-solid aluminum alloys on thixoforming are different in the shear rates.

(c) By calculating the Renold number and the apparent viscosity in the plate casting area, it is concluded that the flow of metal mushy in the mould is laminar flow.

(d) From the viewpoint of Poiseuille, during the process of the thixocasting of semi-solid Al alloy, the metal mushy obeys the non-Newtonian fluid's behavior. It is proved that the viscosity derived from this paper is a much better one to describe the metal mush's

flow behavior, rate distribution and temperature scatter.

(e) We initially understand the flow behavior, the rheological behavior and the viscosity model in the thixocasting of semi-solid Al alloy. When the shear rate is $2000\text{s}^{-1}\sim 10000\text{s}^{-1}$, the rheological behavior is a kind of pseudoplasticity. But when the shear rate is over 100000s^{-1} , it is dilatancy. Basing on the experiment data, a new viscosity model in die-casting condition is first proposed.

(f) Using the new viscosity model, some simulation of the die-casting processing of semi-solid aluminum alloys is done. It shows the results of simulation are coincident with the results of experiments.

(g) The effect of gate upon the mechanical properties of semi-solid Al alloy casting is investigated. Comparing the five different gate systems, it is concluded that the single light curve gate system can produce the best castings in both ultimate tensile and elongation.

(h) After analysed effects of the gate upon the piece of casting sample, we first give the ideas of die gate design.

(i) It is sure that semi-solid metal processing can form thin wall pieces thickness in 1 mm.

Key Words semi-solid aluminum alloy, thixoforming, rheological behavior, mechanical property, gate system

目 录

第一章 前 言	1
1.1 课题背景	1
1.2 本文的研究内容	4
1.3 本章小结	5
第二章 文献综述——半固态合金触变成形的发展现状 ...	6
2.1 概 况	6
2.2 半固态金属流变学的研究	7
2.3 半固态合金微观组织的研究	9
2.4 半固态金属成形过程的数值模拟	11
2.5 半固态金属成形原材料的制备	12
2.6 本章小结	14
第三章 半固态金属流变学基础	15
3.1 引 言	15
3.2 流体的流动类型	16
3.3 流变性能的测定	22
3.4 半固态合金流变学研究综合	33
3.5 本章小结	42
第四章 半固态铝合金 (A356) 触变成形的流变试验	44
4.1 引 言	44
4.2 流变试验的基础研究	46
4.3 试验设备及测定装置	48

4.4 试验过程	51
4.5 本章小结	54
第五章 半固态铝合金 (A356) 触变成形的流变特性	56
5.1 引 言	56
5.2 半固态铝合金糊的剪切速率与表观粘度之间的关系	56
5.3 半固态铝合金糊的流动状态	62
5.4 半固态铝合金 (A356) 触变成形中的粘度模型	64
5.5 半固态铝合金糊触变成形过程的充型机理分析	75
5.6 本章小结	78
第六章 半固态铝合金触变成形的流场计算与模拟	79
6.1 引 言	79
6.2 数值计算方法与计算格式	80
6.3 流体运动的表示方法	82
6.4 半固态铝合金触变成形数值模拟的基本方程	83
6.5 半固态铝合金触变成形三维薄壁型腔充型分析基础	86
6.6 计算机数字计算模拟结果与试验结果的对比	86
6.7 本章小结	94
第七章 浇道系统设计对半固态触变成形产品机械性能的影响	96

7.1 浇道系统设计	96
7.2 抗拉强度和延伸率试验结果的分析	104
7.3 微弧双扇浇道系统模拟结果与试验结果 的比较	110
7.4 半固态铝合金高压触变充填能力的研究	116
7.5 半固态铝合金触变成形 (压铸环境) 浇道系统的设计思想	120
7.6 本章小结	121
第八章 结 论	123
主要参考文献	125
致 谢	133

第一章 前 言

1.1 课题背景

1.1.1 课题来源

本文是美国俄亥俄州立大学 (The Ohio State University) 净成形制造工程研究中心 (The Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing) 研究课题“半固态金属成形加工技术”中的部分研究内容, 主要研究半固态铝合金 (A356) 在压铸环境下触变成形的流变特性, 以及模具浇道系统的设计对触变成形板类零件机械性能的影响。

1.1.2 半固态金属成形的特点

半固态金属 (semi-solid metal) 成形是 70 年代新发现的一种凝固现象的应用, 它不是利用凝固结晶过程来控制组织的变化或缺陷的产生, 而是通过金属液搅拌产生的流变性与搅熔性来控制铸件的质量。它对解决高温黑色金属压铸型寿命不高、不能大量生产的问题具有重要作用。因此受到国外有关学者的关注。所谓流变性, 就是在搅拌过程中, 固体成分 (形成直径 $100\ \mu\text{m}$ 的小球体) 不断增加 (甚至达到 60%), 而使固态金属浆料的粘性提高, 但仍能保持流动的特性。用这种半固态金属直接成形为锭坯的方法称为流变成形。所谓搅熔性, 是指流变成形的锭坯在加热到一定程度后, 其粘度随着剪切速率的增加而降低的特性。将

加热到具有搅熔性的流变锭坯送入压射室压铸, 在压射冲头压力的作用下, 锭坯粘度降低并像流体一样充型^[1,2]。

半固态成形能大大改善压型、压射室、冲头的受热条件。因半固态金属中有 50% 左右固体金属的熔化潜热业已散失, 这就从根本上解决了液态金属对压铸型、压射室和冲头的热侵蚀和寿命问题。此外, 半固态金属像粥一样具有一定粘性, 因此压铸时无湍流现象, 卷入空气少, 减少了疏松、气孔等缺陷。一般有色金属液, 如铅等, 在液态下不易掺入填料, 但半固态金属粘度较高, 可在其中加入 30%~40% 左右的填料, 制得复合材料, 如在铅中加碎玻璃、碳化硅或石墨等, 可以提高耐磨性或润滑性, 并降低制件成本。半固态成形不仅适用于有色金属, 而且也适用于黑色金属。其成形方法可以是触变压铸 (thixocasting)、触变锻造 (thixoforging)、触变挤压和触变轧制。

据统计^[3], 目前美国和欧洲的 1.5×10^6 t 铝件、日本的 1×10^6 t 铝件中有 1% 的铝产品是由半固态触变成形方法制造的。并且瑞士、德国、法国、意大利等国都处在该技术的工业应用阶段。

1.1.3 半固态铝合金流变行为的研究现状

国外在 70 年代初就开始了半固态金属流变学方面的研究。Joly 和 Mehrabian 等人^[4]研究了剪切速率对 Sn-15%Pb 合金表观粘度的影响; Fleming 等人^[5]研究了 Al-6.5%Si 合金表观粘度与剪切速率之间的关系及初生相组织结构的演变; Kumer, Murtin 和 Brown^[6]研究了半固态 Sn-15%Pb 合金的动态流变行为。此外, Turn 和 Wang^[7]推导了 Sn-15%Pb 合金中表观粘度 η_a 与固相分数 f_s 和剪切速率 $\dot{\gamma}$ 之间的关系表达式; Hirai 等人^[8]根据悬浮液的一般模型, 提出了表观粘度 η_a 与固相分数 f_s 及材料微观组织的关系式; KaHamis 和 Piccone^[9]对半固态 Al-4.0%Ca-1.5%Mg 合