

中文摘要

摘要: 随着现代铁路交通运输向着高速、重载方向发展,传统的材料和成型技术在机车关键零部件的制造中已经显得难以满足要求。半固态成型技术是二十一世纪最具有广阔前景的近终形金属成型技术。为满足铁路高速重载运输的需求,C级钢正逐步取代传统使用的普通碳素铸钢,成为我国铁路货车配件的主导材料。但C级钢的半固态成型研究尚属空白,本文对车辆用C级钢半固态成型工艺进行了较系统的探索性研究,研究方法和主要成果如下:

使用中频感应炉、浆料制备机,研究了电磁搅拌制浆工艺参数对C级钢半固态浆料组织的影响规律。此方法的机理是:半固态非枝晶组织的形成是一个涉及热量、质量和动量传输,以及界面和界面张力效应的混合作用过程的自由边界的复杂问题。初生固相颗粒与周围熔体做相反方向的相对运动,由于在悬臂梁作用下枝晶臂根部受到的应力最大,这可能给临近的枝晶臂的熔断脱落创造条件。在后续的电磁搅拌作用下,这种枝晶臂经过弯曲,熔断,合并长大的固相,在不断地旋转、滚动、相互之间的碰撞与摩擦,发生熟化,而渐渐地演变为球状晶或近球状晶。

利用2000 kN挤压铸造机和螺旋线试样模具,利用正交试验方法研究了C级钢半固态浆料的充型能力,结果表明:充型压力越大,充型速度越快,模具预热温度越高,充型能力越好;半固态挤压铸造适用于那些结构上符合挤压铸造工艺,形状复杂程度大于或等于砂型铸造的铸钢件。

通过分析半固态流变成型的工艺路线,选定了铁路车辆用铸钢件轴箱体、钩舌作为半固态流变挤压成型的研究对象,摸索出实验室现有条件下半固态流变挤压成型较合理的工艺参数。

采用半固态流变挤压铸造工艺加工出了形状完整、轮廓清晰的C级钢轴箱体工件,试验中发现工件皱褶、气孔、裂纹缺陷较为突出。通过成型试验,研究了成型工艺参数对工件表面质量缺陷的影响规律。以轴箱体零件为例,探讨了缺陷的形成机理,分析了其影响因素。

关键词: C级钢; 半固态; 电磁搅拌; 充型能力; 流变挤压成型; 表面质量缺陷
分类号: TG249.9

ABSTRACT

Abstract: With the development of railway and automobile industry towards lower weight, lower cost and higher quality, conventional materials and forming techniques satisfy hardly the manufacture of key steel casting used in train. Semi-solid metal forming as a new near net shape technology in 21 century generally attracts people's attention. In order to fulfill the demand of high-speed heavily loading transportation on the railway, C grade steel substitutes the common carbon steel gradually and will be the main material for the railway wagon fitting part. However, there are few research reports about the semi-solid process technology of C grade steel at present. The semi-solid process technique of C grade steel used in vehicle was studied systematically in this paper. Research method and main achievements were expressed as follows:

By the medium frequency melting furnace and machine for slurring, the effect of electromagnetic stirring process parameters on semi-solid slurry microstructure of C grade steel was studied. The mechanics of electromagnetic stirring is that under the action of electromagnetic stirring dendritic arms bend, burn out and combine together into bigger solid particles. These particles rotate, roll, collide with each other, cure, and evolve into spherical or near spherical grains gradually with the time extended.

With a 2000KN squeeze casting machine and a helix sample mold, the molding filling ability of semi-solid grade C steel slurry was studied by orthogonal test. Results show that the higher the filling pressure, the faster the filling speed, the higher the preheating temperature of mold, the better the molding filling ability of slurry is. Semi-solid squeeze casting is suitable for the cast steel parts which can be processed by extrusion forging technology in structure, but the shape is more complex than that of sand cast steeling.

By analyzing the semi-solid rheological process route, the axle box body and coupler knuckle were selected as the experimental object, the optimal parameters of semi-solid rheological squeeze casting process were gained at the present condition of the laboratory.

The C grade steel axle box body parts with perfect shape and clear profile were formed through semi-solid rheological squeeze casting process. Experiment results showed that the folding, porosity and crack are the main flaws of parts. By process experiments, the influence of process technology parameters on surface quality of parts

was studied. Taking the axle box body as an example, the mechanics of flaws were discussed, and the influence factors were also analyzed.

KEYWORDS: grade C steel; semi-solid; electromagnetic stirring; mold filling ability; rheological process technology; surface quality flaw;

CLASSNO: TG249.9

致谢

本论文的工作是在我的导师张励忠教授的悉心指导下完成的，张励忠教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢三年来张励忠老师对我的关心和指导。

在论文研究工作中，还要特别感谢邢书明教授，河北科技大学谭建波教授等老师的指导、关心和帮助。他们在实验过程与实验结果的分析 and 论文的撰写中给予了许多有益的帮助和指导。在这里，向诸位老师表示衷心感谢和崇高的敬意。

在实验室工作及撰写论文期间，李海开、陈宇、刘文、何书华、焦众生等同学对我论文中的成型试验研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢家人在精神上和生活上给予的支持和关心，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

1 绪论

1.1 半固态加工技术的发展

金属半固态加工研究始于 20 世纪 70 年代初, 是美国麻省理工大学的学者们在研究铸造合金热撕裂问题时的偶然发现^[1]。

目前, 国际上一些先进国家如美国、法国、意大利、日本对铝合金、镁合金、铅合金、铜合金等半固态组织和性能进行了较为充分的研究, 而且铝合金、镁合金目前已进入工业应用的阶段。

最成功的应用领域主要在汽车领域^[2]。美国 Ormet 公司在 Ohio 州投资 1500 万美元, 用于生产半固态成型用坯料, 并从法国 Pechiney 公司获权在美国、加拿大和墨西哥生产半固态坯料及半固态成型车辆零件。美国 AEMP 公司于 1978 年就建成了生产铝合金车辆零件的半固态压铸生产线, 年生产能力达到了 5000 万件。1992 年又与 Superior 工业公司合资建成了全球首家半固态压铸铝合金轮毂厂。该公司还帮助 AMP 公司新建了一个用来生产电工铝合金零件的专业厂。美国 INLAND 钢实验室自 1995 年以来, 先后进行了多种钢铁材料的半固态连铸与成型的研究与应用, 取得了良好的效果。美国麻省理工学院已生产 AISI304 和 440C 不锈钢、AISI4310 和 M2 工具钢的半固态压铸件 2500 多件。意大利 Stampal-S.P.A 公司利用半固态压铸技术为 Ford 汽车公司生产 Zeta 发动机的油料注射挡、齿轮箱盖和摇臂等零件。瑞士 Buhler、德国 EFU、法国 Pechiney.SA、瑞士 Alusuisse-Lonza、意大利 Fiat、日本宇部等国际知名公司也都实现了半固态坯料及半固态压铸技术的产业化, 目前正在扩大产品品种和生产规模。日本组建了流变技术研究所, 投巨资开发半固态铸造的关键技术并实现了产业化。

国外在钢铁材料的半固态成型方面正在取得突飞猛进的发展。德国在实验室已经生产出多种铸钢件。日本 Hongda 公司建成了一条生产线专门生产跑车用零件, 日本国立工业技术研究所研究成功了高熔点合金半固态铸轧设备, 德国、法国、巴西、韩国等国也利用半固态成型技术生产试制了多种铸钢件, 英国提出了半固态成型合金的初步设计准则^[3-9]。

我国的半固态加工技术起步较晚, 开始于 20 世纪 80 年代后期, 先后有不少高校和科研机构开展了这方面的研究, 半固态技术水平还处于工业生产转化阶段, 整体水平明显落后于发达国家。

北京有色院和北京科技大学等单位在国家“863”计划支持下进行了铝合金汽车零件的半固态压铸研究, 并进行了生产实验。谢水生教授在国家自然科学基金

支持下对半固态成型过程进行了数值模拟研究,并出版了专著,取得了可喜的进展。东南大学的朱鸣芳^[10-14]等人对 Zn-Al 合金的半固态加工成型性,半固态等温处理时对触变组织的影响作了大量的研究工作。中南工业大学对喷射沉积/半固态挤压进行了研究。东北大学与澳大利亚墨尔本大学^[15,16]合作采用液相线铸造法以变形铝合金 2618 和 7075 为例,对半固态浆液的制备、半固态成型、热处理制度及成品机械性能做了系统的研究工作,目前已着手工业应用技术的开发。清华大学在半固态合金的流变模型方面开展了细致的研究,并采用半固态触变压铸工艺试制了 A356 铝合金从动链轮支架;上海大学在国家经贸委的支持下,与上海汽车工业集团联合,正在铝合金汽车零件半固态触变压铸方面进行应用开发;哈尔滨工业大学结合国防与军工行业开展了铝合金及其复合材料的半固态成型的应用研究;北方交通大学通过引进人才,与企业合作正在大力开展钢铁材料半固态流变成型在机车车辆行业的应用开发、铝合金半固态连铸坯料的工业应用及半固态成型专用设备的研制;南昌大学、河北科技大学、625 所等单位也正在半固态成型技术的实验探索和应用研究。到目前为止,可以说我国尚未开展系统的半固态黑色金属及合金的制备和成型方面的研究。

1.2 半固态加工的特点

半固态成型技术是一种介于固态成型和液态成型两种工艺之间的一种崭新的工艺,与传统的铸造和锻造技术相比,半固态成型具有许多独特的优点^[17-20]:

(1) 适用范围广泛。凡具有固、液两相区的合金均可以实现半固态加工,而且可适用于铸造、挤压、锻造、轧制等多种金属加工工艺;

(2) 其成型温度介于固相线和液相线之间,体收缩中基本没有液态收缩,只有部分凝固收缩,因而缩孔体积小,不宜出现集中缩孔;

(3) 在压力下充型和凝固,充型质量高、补缩效果好,可有效减少缩松,组织致密;

(4) 由于充型温度低、充型平稳、成型过程释放的热量小,因此对型腔的热冲击小,不宜卷气,内部气孔发生率低;

(5) 工件外观质量和尺寸精度显著提高,加工余量明显减小;

(6) 半固态浆料具有良好的流变性,可以像普通铸造一样使用砂芯制造出复杂型腔;

(7) 采用金属型生产,所以零件的表观质量和尺寸精度显著提高。可以明显减小加工余量,实现少无切削。

总之,半固态加工技术的出现彻底改变了毛坯制造中非铸则锻的两极格局,

使材料成型技术体系变得更加完善和丰富多彩，原来铸造和锻造都难以生产的许多重要零件有了新的生产方法。

1.3 半固态流变成型原理

利用金属材料在固液共存状态下所特有的半固态组织来进行成型加工的技术称为金属半固态成型 (Semi-Solid Metallurgy, 简称 SSM)。该技术核心是在液态金属的凝固过程中, 对其施加外界控制作用 (如强化对流、控制凝固过程形核、外加物理场、孕育变质处理等), 以改变初生固相的形核与长大过程, 使其不以普通铸造过程中的树枝网络状生长, 而以非枝晶形式存在, 如退化枝晶、球状晶、近球形晶等。从而得到一种液态金属母液中均匀地悬浮着一定非枝状初生固相的固-液混合浆料 (半固态浆料)。众多实验表明, 这种浆料在固相分数高达 60% 的情况下, 在外力作用下仍具有良好的流变性能。根据成型过程中, 对半固态组织浆料处理方式的不同, 半固态成型工艺可分为流变成型 (Rheoforming) 与触变成型 (Thixoforming), 如图 1-1 所示。

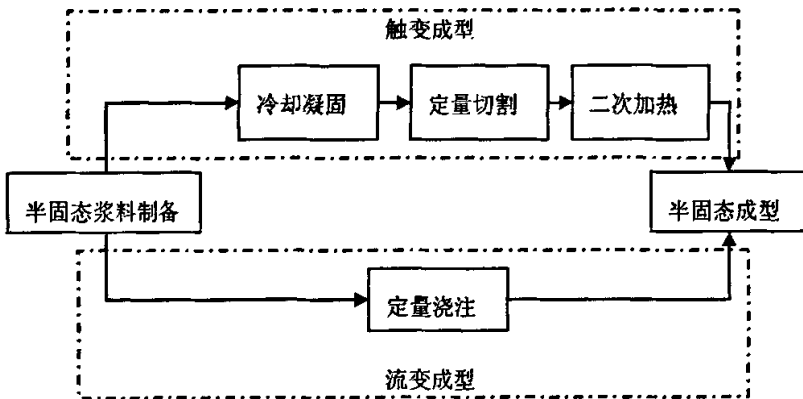


图 1-1 金属半固态成形工艺技术路线
Fig.1-1 The course of semi-solid metal processing

将上述半固态成型技术思想与液态挤压铸造工艺相结合就产生了半固态流变挤压铸造技术 (Semi-Solid Rheologic Squeeze Casting)。其原理是: 将制备好的具有特殊流变性的半固态组织浆料定量注入到敞开的模具型腔内, 随后借助于成型设备的高机械压力作用, 使其强制充型、凝固、补缩并产生少量塑性变形, 从而获得轮廓清晰、表面光洁、尺寸精确、组织致密、晶粒细小、力学性能优良的零件或毛坯。

1.4 半固态成型工艺方法

半固态合金成型适用于很多常规的成型方法,按成型设备不同可分为半固态模锻、半固态挤压铸造、半固态轧制和半固态连接等^[21]。

半固态铸造是指利用铸造方法进行半固态浆料或坯料成型的工艺方法,包括半固态浆料铸造成型和半固态坯料铸造成型两大类。目前常见的有半固态浆料压铸、半固态坯料压铸;半固态浆料挤压铸造和半固态坯料挤压铸造、半固态连铸等^[22]。和液态铸造相比,半固态铸造在铸型中的收缩明显减小,使铸件疏松减少,且半固态合金浆料的粘度大,充型时不易飞溅和卷气,使铸件中的气孔也大大降低,从而使铸件的致密度和性能提高。

半固态锻造是指利用锻造方法进行半固态浆料或坯料成型的工艺方法,利用锻造方法进行半固态浆料成型的工艺方法称为半固态模锻,利用锻造方法进行半固态坯料成型的工艺方法称为半固态坯料锻造。目前主要包括半固态浆料模锻、半固态坯料模锻、半固态浆料挤压、半固态坯料挤压等。与传统的固态锻造相比,由于半固态金属屈服强度相当低,且流动性极好,因此不但可适当减少预锻工序数量,而且可在相对较小的成型压力作用下充填模具型腔,使成型设备吨位大大降低。此外,由于半固态坯料或浆料的粘度较高,在压力作用下使金属形成层流,能均匀地填充模具型腔,因此还可用于薄壁类零件的加工,如各类汽车铝合金轮毂、转向节、底盘悬挂件等复杂形状的锻件。

半固态轧制是指利用轧制方法进行半固态浆料或坯料成型的工艺方法,利用轧制方法进行半固态浆料成型的工艺方法称为半固态浆料轧制;利用轧制方法进行半固态坯料成型的工艺方法称为半固态坯料轧制。

半固态连接是材料连接技术的一种,指利用材料连接方法进行半固态浆料或坯料成型的工艺方法。利用材料连接技术进行半固态浆料成型的工艺方法称为半固态浆料连接,利用材料连接技术进行半固态坯料成型的工艺方法称为半固态坯料连接^[23],这是半固态成型技术领域的一个新方向。

与触变成型相比,流变成型由于直接获得的半固态金属浆料的保存和输送很不方便,因此发展比较缓慢。但与触变成型相比,流变成型具有工艺流程短、节约能源等优点,是半固态成型的一个重要发展方向。

与流变成型相比,触变成型有如下三大问题:

(1) 产品成本高。主要是由于半固态坯料的重新加热带来了大量的能源消耗。此外,坯料的切割、加热等过程会加大材料损耗。

(2) 生产过程控制任务重。在触变成型过程中,除了对半固态浆料和坯料的质量需要严格控制外,还需要对坯料的重新加热过程、成型过程进行有效的控制,

任何一个环节失控，都会导致废品出现。

(3) 设备投资大。在触变成型过程中，半固态浆料制备、坯料的生产、坯料的重新加热和成型都需要专门的设备，这些设备目前都没有达到标准化、系列化生产，所以设备价格昂贵，固定资产投资巨大。

面对这些问题，人们开始重新对流变成型与触变成型进行比选。早期认为流变成型工艺控制困难、生产组织不够灵活的问题在大工业生产条件下并不突出，而其流程短、能耗低、设备投资小、连续性强、生产率高等优点更加诱人，于是流变成型的研究和应用悄然兴起，目前已经成为半固态加工技术领域的新热点。

与低熔点有色合金的蓬勃发展相比，钢铁材料半固态成型由于工艺温度高、浆料制备困难、成型设备缺乏和工艺控制严格等因素一直发展缓慢。理论上讲，适用于有色合金的半固态成型工艺都可能用于钢铁材料，但实际上，目前见到的用于钢铁材料半固态成型工艺主要是触变成型，如触变锻造、触变挤压、触变压铸。在钢铁材料的流变成型中目前只有流变铸轧的报道。这主要是由于触变成型可以将坯料制备和成型分解，便于进行实验研究。实际上，由于触变成型必须要求对坯料进行重新加热，而钢铁材料的高温氧化现象严重，而且其导热系数小，重新加热的温度均匀性难以保证，流变成型将更加合适。

随着半固态成型技术的不断发展，钢铁材料的半固态成型也逐步引起了人们的重视。在刚刚结束的第 7 届国际半固态会议上，黑色金属半固态成型作为一个专题进行了学术交流，交流论文数量约占会议论文的 10%。论文涉及钢铁材料半固态坯料的质量表征、半固态焊接、半固态合金的流动性、及重新加热过程的组织变化等方面。涉及的合金材料既有铸钢，也有铸铁。试制出了多种钢铁材料汽车零件，显示了强劲的发展势头^[24-27]。

1.5 半固态流变成型技术的关键

半固态加工的几个技术关键包括浆料制备技术、工艺参数控制、工艺装备的配套等^[28]。这就需要我们加快工业化研究的步伐，重点放在以下三个方面：①专用设备的研制；②模具的设计；③工艺参数的优化。

就钢铁材料半固态成型而言，其成型工艺较低熔点合金更困难。到目前(2005年)为止，国际上共召开了 8 次半固态成型方面的专题国际学术会议，共发表关于高熔点钢铁材料半固态成型的研究论文 30 余篇。所涉及的材料有 M2 工具钢、H11 钢、HS6-5-2 高速钢、100Cr6 轴承钢、60Si2Mn 弹簧钢、304 不锈钢、C80 工具钢、普碳钢、高铬铸件、可锻铸铁、灰铸铁等。长期以来，制约钢铁材料半固态成型

发展的主要难点是：

- (1) 高温半固态熔体难以连续稳定的制备；
- (2) 高温半固态熔体的输送和保持困难；
- (3) 高温半固态熔体的流动变形规律(流变性)和其成型性尚未充分掌握；
- (4) 成型温度高，工具材料的高温性能难以保证。

1.6 本课题研究的目、意义及内容

1.6.1 本课题研究的目、意义

(1)选材意义

随着环境与能源问题的日益突出，可持续发展问题越来越受到重视，未来工业生产的发展方向将具有两个主要特征：①不断地追求高效率、高质量；②节省资源、能源与无公害化。钢铁材料与其它材料相比，在价格、环保、节能和节材等方面都表现出明显地优势，所以在今后相当长时期内仍将是主要工业原材料。

尽管我国是钢铁大国，但与发达国家相比，我国钢铁工业在工艺、装备、技术等方面还存在相等差距。实现钢铁生产的短流程、低能耗、高质量必将成为 21 世纪我国钢铁工业的主要发展方向。面对国外半固态加工技术的迅猛发展，我们应该不遗余力地、深入地进行半固态加工技术的研究。

(2)实际意义

由于钢铁材料在铁路列车生产中应用极为广泛，有着其它材料不可替代的重要作用，其成型研究应倍受重视。面对铁路机车向高速和重载方向发展实际，迫切要求机车零件有较高的性能和可靠性。而提高零件性能的途径主要有两种：一是选用新材料；另外一个就是新工艺，实现零件的高性能化。自 1998 年以来，铁道部已下大力气着手进行了大量机车零件材料和工艺的升级，如原碳素钢摇枕、侧架、钩舌、钩尾框等升级为采用美国标准的 B 级钢、C 级钢等。工艺升级方面有：P63 上芯盘由铸造改为锻造；取消铸钢件的水爆清砂工艺，采用树脂砂或干法回收；贝氏体斜楔造型工艺由煤粉砂手工造型提升为铁型覆砂机器造型，外观质量和尺寸精度有了质的提高，其热处理工艺升级（等温淬火）使材料由 QT400-15 提高到 ADI1050-7。

北京交通大学机电学院邢书明教授和张励忠副教授成立了半固态成型研究中心，并从 2002 年开始同中国南车集团石家庄车辆厂和中国北车集团长春客车厂合作研究用半固态流变挤压工艺生产铁路车辆用铸钢件。

C 级钢(ZG25MnCrNiMo)轴箱体、钩舌分别是轨道客车转向架、刹车系统上的重要零件,在客车运行、刹车时,车身摇晃、振动使它们承受很大交变载荷,故其性能要求很高。原采用砂型铸造来生产,工艺出品率,对其进行失效分析后发现夹砂、气孔、渣孔、缩孔等缺陷是造成零件报废的主要原因。而半固态成型的产品具有内部缺陷少、晶粒细小、组织致密、力学性能优良等优点已人所共知。本文采用半固态流变挤压成型轴箱体零件,旨在提高其性能。为半固态成型技术在车辆用 C 级钢领域的应用奠定一定基础。

(3)学术意义

自 20 世纪 70 年代,金属半固态成型技术 (Semi-solid Metal Forming, SSM) 问世以来,国内外学者对此进行了大量研究。迄今为止,其研究对象绝大多数是低熔点合金。其中,绝大多数又是针对半固态的浆料制备、微观组织、力学性能等方面的研究。与低熔点合金相比,高熔点合金的半固态流变成型面临着金属型激冷作用,非枝晶获得困难和浆料的保温输送困难等诸多难题,上述研究相对较少,而成型方面的研究更少^[29-35],可以说高温钢铁材料的半固态直接成型是当今金属成型领域的最前沿且最有意义的课题。

1.6.2 本课题研究内容

车辆用铸钢件的半固态成型必需首先解决两个基本问题:一是流变成型用半固态浆料的制备,二是这种浆料的充型能力和成型性。结合前文分析,本文的研究内容为:

(1) C 级钢半固态浆料制备

采用电磁搅拌法制备半固态浆料,探究高熔点合金电磁搅拌制浆工艺参数对浆料组织的影响规律,掌握电磁搅拌法制备高熔点合金半固态浆料的机理和技术关键。

(2) 半固态流变挤压铸造的充型能力

C 级钢浆料的挤压铸造成型能否获得具有一定复杂程度的优质零件,取决于该浆料在挤压铸造工艺下的充型能力。研究外界因素主要是挤压铸造工艺中的充型压力、充型速度、模具温度、涂料等对半固态浆料充型能力的影响规律。

(3) C 级钢半固态流变挤压成型工艺的研究

以车辆用 C 级钢轴箱体、钩舌为研究对象,进一步探究 C 级钢半固态流变挤压的成型性,并找出现有实验室条件下较合理的成型工艺参数。

(4) 通过试验研究成型工艺参数对工件表面质量缺陷的影响规律。

2 C 级钢半固态浆料制备工艺研究

2.1 半固态浆料的制备方法

半固态合金浆料的制备是半固态成型技术的基础，世界各国都先后投入大量的人力和物力对半固态合金浆料制备方法进行了研究。国内外学者已经研究开发出了十余种半固态浆料制备方法。

从理论上讲，低熔点金属的浆料制备方法均可以用于高熔点金属的浆料制备。但高熔点金属的浆料制备对制浆设备的要求很高，并不是所有制浆方法均能在实际中应用。目前，曾采用过的钢铁材料的制浆方法有机械搅拌法^[36,37]、电磁搅拌法^[38]、应变激活法^[39]、近液相线铸造法^[40]、喷射沉积法、单辊旋转法^[41]、粉末冶金法^[42]、熔体冷却法^[43]等，可将这些方法分为搅拌法(机械搅拌法、电磁搅拌法、单辊旋转法)、控制凝固法(近液相线法、斜坡法)和其它方法(应变激活法、喷射沉积法、粉末冶金法)。

2.1.1 搅拌法

(1) 机械搅拌法

机械搅拌法是制备半固态金属最早使用的方法，其设备构造简单，如图2-1。该方法利用机械旋转的叶片或搅拌棒改变凝固中金属初生晶粒的生长，获得球状或类球状的初生晶粒的半固态金属浆料。在搅拌过程中，通过控制搅拌室的温度来控制半固态金属的固相分数，通过改变叶片或搅拌棒的转速来控制剪切速率，并可以保证搅拌过程中的剪切速率不变。Flemings等用连续机械搅拌法成功制备了304及440C不锈钢、M2高速钢和4340低合金钢的半固态坯料。但从实验结果看，其生产效率不高，实验室制备钢铁半固态浆料的产量达到2400 g/min。

机械搅拌法设备简单、造价低、操作方便、剪切速率易于控制，非常适合实验室的研究工作。但是，该方法生产效率低、搅拌室和搅拌

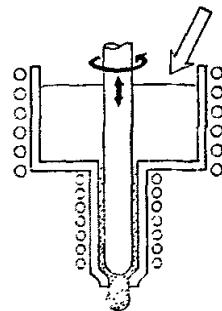


图 2-1 连续机械搅拌制备半固态浆料
Fig.2-1 Slurring by continuous mechanical stirring

棒的寿命短、搅拌棒和搅拌室易污染半固态金属浆料，无法制备高质量的半固态金属浆料或坯料，也无法满足工业生产的需要。

(2) 电磁搅拌法

电磁搅拌法是利用旋转电磁场在金属液中产生感应电流，金属液在洛伦兹力的作用下产生运动，从而达到对金属液搅拌的目的。电磁搅拌按磁场方向分为水平式与垂直式；按磁场发生方式又可分为交流法与旋转永磁体法。一般影响电磁搅拌效果的因素有搅拌功率、冷却速率、金属液温度、浇注速度等。

Blazek等人利用图2-2所示流变器对不锈钢(304、316、440C)、高速钢(M7、M4、M2)等进行了制备研究。毛卫民等也用电磁搅拌法成功制备了60Si2Mn、1Cr18Ni9Ti等高熔点钢铁材料半固态浆料。

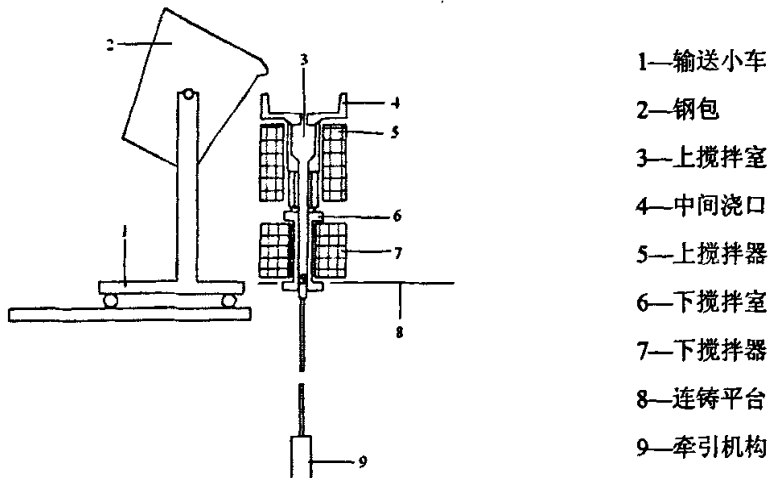


图 2-2 ISC 型流变器结构示意图

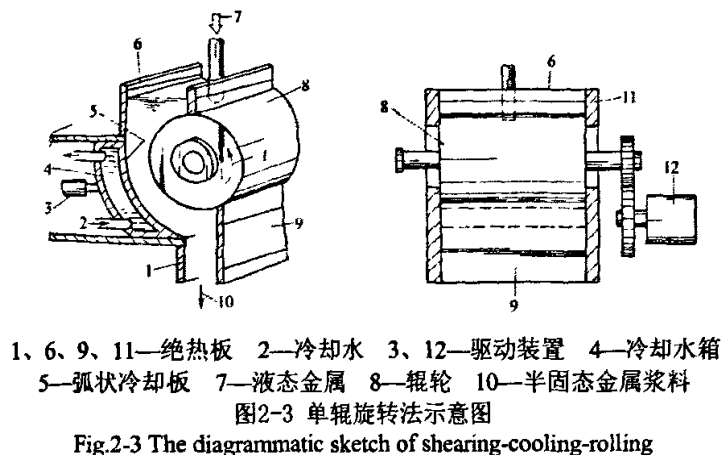
Fig.2-2 The diagrammatic sketch of apparatus for rheocasting

电磁搅拌的突出优点是不用搅拌器，不会污染金属浆料，也不会卷入气体。但设备投资大，工艺复杂，成本较高，由于“积肤”效应，该技术只运用于直径小于150 mm的锭坯。若用该方法制备浆料进行流变成型，则浆料的输送和浇注困难。

(3) 单辊旋转法

单辊旋转法是机械搅拌法的变种，其工艺原理是：利用一个机械旋转的辊轮把静止的弧状结晶壁上生长的初晶不断碾下、破碎，并与剩余的液体一起混合，形成流变金属浆料(见图2-3)。单辊旋转方法可以制备半固态金属浆料，也可以制备半固态金属薄带。日本学者利用单辊旋转法成功制备过FC20和FC30灰口铸铁及FCD40(日本牌号)球墨铸铁的半固态浆料。

该方法所用设备结构简单，设计、制造、运转及操作比较容易。但制备钢的半固态浆料困难较大，主要是因为钢的制浆温度很高，容易和辊轮、冷却板等粘连、粘焊，浆料也不容易从结晶壁和轧辊间隙中顺利流出。



2.1.2 控制凝固法

(1) 近液相线法

近液相线法是将合金熔体在液相线温度附近保温一定时间后,进行浇铸,获得适合半固态成型的金属浆料。液相线铸造合金熔体温度低,温度场均匀,在浇铸过程中大量晶核在熔体中均匀产生,获得组织细小、均匀、等轴的半固态浆料。

该方法简单可行,成本低廉,但其浆料质量受保温时间影响较大,制浆过程需要很长的保温时间才可获得理想的半固态浆料,故其突出缺点就是生产率低。如能缩短制浆时的保温时间,则该方法的工业应用潜力巨大。

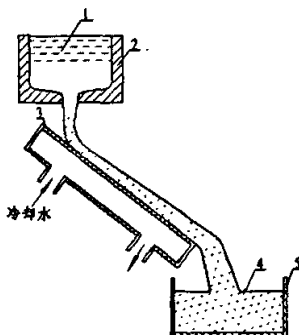
(2) 斜坡法

斜坡法^[44,45]是近期从日本兴起的一种新型制浆工艺,该法是使合金熔体在流经一个冷却斜坡时由于冷却斜坡的冷却作用而增加晶核的数目和晶体的游离,

从而达到细化晶粒,获得理想的微观组织的目的。图2-4为斜坡控冷示意图。斜坡具有强烈搅拌作用,熔体经过斜坡产生局部降温,强烈滚动和翻转,经过斜坡的熔体注入中间包时,又产生强烈的搅拌,即撞击、翻转以及滚动等,促进了晶体游离和形貌演变。所以,斜坡法有流程短、工序少和低成本的优势。

与斜坡法类似的斜管法是南昌大学半固态成型技术研究室于2002年在斜坡法的基础上改进的流变制备半固态合金熔体工艺^[46],与斜坡法的区别主要在于采用的是封闭的斜管,这样可以用于极易氧化的镁合金的生产,可以扩大应用范围;另外可以实现变静态斜管为转动管,对合金液凝固初期实施搅动,从而获得更多的游离晶粒。斜管法流变制浆设备主要由熔炼炉、保温炉、保温坩埚、斜管、结晶炉、结晶器和温度控制系统等构成。与斜坡法工艺流程相类似,合金熔体流经冷却斜管时,由于冷却斜坡的冷却作用而增加晶核的数目,从而携带大量的晶核流

入结晶器，通过控制结晶器温度，缓慢冷却，从而获得均匀、细小、非枝晶的触变组织，达到成型温度时，再用于流变成型。



1-金属液；2-熔炼坩埚；3-倾斜冷却板；4-半固态浆料；5-中间包

图 2-4 斜坡控冷过程示意图

Fig.2-4 The diagrammatic sketch of cooling slope

2.1.3 其他方法

(1) 应变激活法

应变激活法就是预先连铸晶粒细小的金属锭，再将其热挤压达到一定变形，在组织中储存部分变形能量，最后按需要将变形后的金属锭分切成一定大小，加热到半固态温度。在加热过程中，首先发生再结晶，然后部分熔化，使固相晶粒分散在液相基体中，得到半固态坯料。该法制备的金属坯料纯净，生产效率较高，对制备较高熔点的非枝晶组织合金具有其独特的优越性。但这种方法需要很大的挤压变形量，因此只能制备小直径的金属半固态坯料，成本高，且不适用于流变成型。

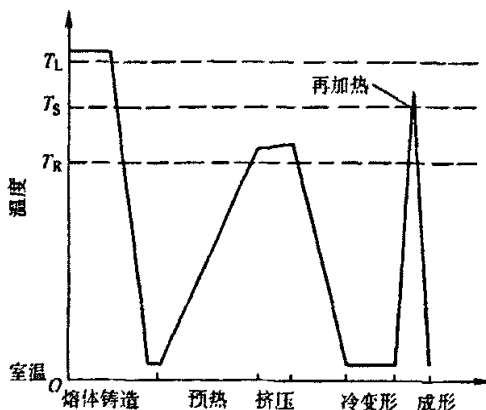


图 2-5 应变激活法工艺原理示意图

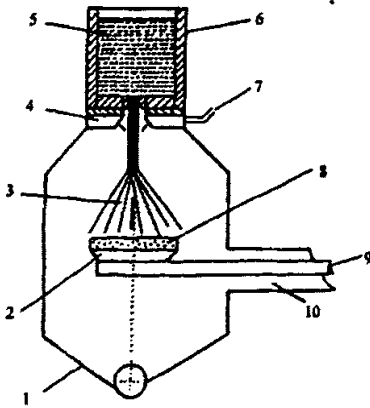
Fig.2-5 The diagrammatic sketch of SIMA

(2) 粉末冶金法

粉末冶金法制备半固态金属坯料的工艺路线是：首先制备金属粉末，然后进行不同种类金属粉末的混合，再进行粉末预成型，并将预成型坯料重新加热到半固态区，进行适当保温，即可获得半固态金属坯料。该工艺制备半固态金属坯料的晶粒非常小，尺寸稳定性高，但成本昂贵，很难得到大规模的实际应用。另外，该方法不适用于流变成型。

(3) 喷射沉积法

喷射沉积法是金属熔化成液态金属后，雾化为熔滴颗粒，在喷射气体作用下部分凝固的微滴直接沉积在收集基板上，快速凝固成一定几何形状的坯料，将这种坯料加热到局部熔化时，可得到具有球形颗粒固相的半固态金属浆料（图2-6）。Kapranos等曾用该方法制备过M2高速钢、Stellite高温合金的半固态坯料，两种合金的晶粒尺寸分别为19~36.1 μm、40.8 μm。该方法制备的半固态坯料质量很好，也便于半固态重熔加热和触变成型，但坯料制备价格比较昂贵，只适合制备高级或难熔合金坯料和成型高级零件毛坯，不能大规模应用。另外，该方法只适用于触变成型。



- 1-沉积室
- 2-基板;
- 3-喷射粒子流;
- 4-气体雾化器;
- 5-合金液;
- 6-坩埚;
- 7-雾化气体;
- 8-沉积体;
- 9-运动机构;
- 10-排气及取料室

图 2-6 喷射沉积原理示意图

Fig.2-6 The diagrammatic sketch of spray

目前，电磁搅拌法制浆仍在实际半固态金属成型应用中占据主导地位。综合以上半固态浆料的制备方法，有的无法制备出高质量的半固态浆料，有的不适用于流变成型，只有电磁搅拌不会污染金属浆料，也不会卷入气体，结合实验室条件，所以本实验选择电磁搅拌法制浆。

2.2 电磁搅拌下半固态 C 级钢组织的演变机理

C 级钢在电磁搅拌条件下所获得的半固态球状组织与传统条件下所获得的枝晶组织有着显著的区别，实际上半固态非枝晶组织的形成是一个涉及热量、质量

和动量传输,以及界面和界面张力效应的混合作用过程的自由边界的复杂问题。液态金属是由许许多多短程有序、处于瞬息变化的类晶体结构原子集团所组成。这些原子集团在激烈的原子热运动和能量起伏作用下,时而消失,时而产生,时而长大,时而减小。在过冷金属液体中一些较大的原子集团达到临界尺寸,成为晶核并开始稳定生长。电磁搅拌的强烈对流作用加速了金属液体过热和凝固过程中结晶潜热的导出,改变了金属液体中的温度场,使之趋于平缓直至达到零温度梯度,这种条件有利于等轴晶的形成并有可能使坩埚表面形成的细小枝晶脱落,但只是增加了形核核心,并没有改变形核的基本过程,却有可能使形核的过冷度增大,促进整个断面的形核,最终获得均匀细小的等轴晶组织。从半固态组织观察结果,分析认为在电磁搅拌条件下 C 级钢半固态组织中花瓣状、近球状或球状的奥氏体的形成与两方面的因素有关,一方面电磁搅拌作用使熔体中获得均匀的温度场和溶质场,熔体在几乎同时被冷却到相同或很相近的温度下形核生长,均匀的温度场和溶质场抑制了枝晶的形成与生长,枝晶的一次臂和二次臂的生长速度相近,为球状晶的获得奠定了基础;另一方面,熔体在电磁搅拌作用下,整个断面上获得均匀的温度场,连续冷却条件下熔体同时被冷却至形核温度以下并开始形核,整个断面的熔体获得相同的形核率,并在后续的冷却过程中不断生长,研究认为当晶核超过其临界尺寸时,奥氏体晶核在后续长大过程中,有相当一段时间是以树枝晶的方式长大的,因为晶核的体积很小,形核后相当一段时间内熔体中的固相率很低,晶核或其后续生长的微小的晶体是随着熔体运动的,各个微小晶体之间或微小晶体与附近的熔体之间不存在相对运动或相对运动速度很小,在固相率很低的半固态浆料液淬试样中能可发现固相颗粒为枝晶的形貌,当这种小枝晶生长到一定尺寸,固相颗粒的尺寸增加,固相率提高,颗粒与熔体或固相之间存在速度差,颗粒将受到剪切应力作用发生滚动、旋转或固相颗粒之间的碰撞,这种剪切应力作用在枝晶臂上,某些尺寸较大的枝晶臂将发生弯曲现象,特别是一次枝晶臂,这些固相颗粒与周围熔体做相反方向的相对运动,由于在悬臂梁作用下枝晶臂根部受到的应力最大,这可能给临近的枝晶臂的熔断脱落创造条件。在后续的电磁搅拌作用下,这种枝晶臂经过弯曲,熔断,合并长大的固相,在不断地旋转、滚动、相互之间的碰撞与摩擦,发生熟化,而渐渐地演变为球状晶或近球状晶^[47]。

2.3 浆料组织特征

在流变成型过程中,半固态浆料制备是个十分关键阶段。如果半固态浆料中非枝晶固相的形态、尺寸和分布达不到要求,就会出现充型不完整、液相偏析、

裂纹、缩松等缺陷。参考关于触变成型的有关研究成果^[48,49]，半固态流变成型要求半固态浆料应当满足如下要求：

(1) 固相为非枝晶粒状晶，其形貌以短条状或椭球状为主。若定义形状系数为

$$SF = \frac{p^2}{4\pi A} \quad \dots (2-1)$$

式中 p 是颗粒周长， A 是颗粒面积。则流变成型要求形状系数小于 2，平均尺寸小于 100 μm 。

(2) 固相分数在 0.2-0.5 之间。固相分数超过 0.5 时，难以在重力作用下直接浇注。固相分数低于 0.2 时，所得产品性能不够理想。

(3) 没有卷气和夹杂。一旦出现卷气和夹杂，很难排除，严重影响产品质量。

2.4 实验

2.4.1 实验材料

实验材料为 C 级钢，是目前机车车辆用低合金铸钢的主型钢种。其化学成分见表 2-1。由差热分析(DTA)确定该材料的液相线为 1510 $^{\circ}\text{C}$ 。

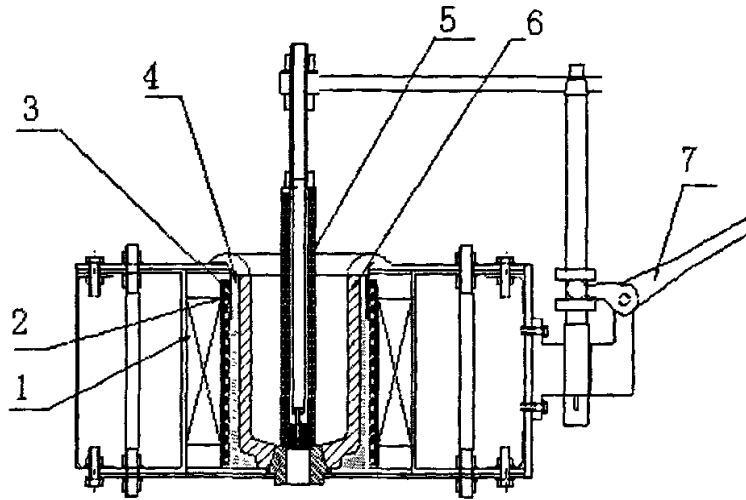
表 2-1 C 级钢化学成分

Table 2-1 The chemical composition of C grade steel

成份	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mo	Ni	Fe
质量分	0.22~	0.20	1.20	≤	≤	≤	0.40	0.2	0.35	
数/%	0.28	~	~	0.04	0.04	0.30	~	~	~	余量
		0.40	1.50				0.60	0.3	0.55	

2.4.2 实验设备

半固态成型实验室根据工业化生产的需要自行研制成功了一种电磁搅拌浆料制备机，总体结构如图 2-7 所示。



1—搅拌线圈 2—绝缘层 3—中频感应加热线圈 4—隔热层
5—塞棒 6—坩埚 7—起塞杆

图 2-7 半固态浆料制备机结构原理示意图

Fig.2-7 The schematic diagram of machine for semi-solid slurry

该半固态浆料制备机主要由搅拌线圈、中频感应加热线圈、塞棒、坩埚和起塞杆组成。中频感应加热线圈对浆料制备机进行预热，采用双铂铑热电偶测温，预热的同时，线圈中通冷却水进行冷却，保护线圈。搅拌线圈采用标准电机 Y225M-2 的定子缠绕法进行缠绕，搅拌金属液时，合金熔体相当于电机的转子，两者产生的电磁力驱动金属液搅动，搅拌参数通过变频器进行设定，来改变合金熔体的搅拌强度和搅拌速度。塞棒头是用刚玉制成；坩埚则是用镁砂与水玻璃混合后，在木模中打成。两者都是直接与高温熔体接触，因此制作材料必须是耐高温的。

其工作原理如下：首先用塞棒堵住塞口砖，启动中频感应加热系统将制浆室预热，加热频率 1000-2500Hz，功率约 30-50 kw。到一定温度并保持一定时间；然后将熔炼合格的金属液体注入制浆室，同时启动电磁搅拌系统，利用交流电磁感应力使金属浆料产生剧烈的流动，使金属凝固析出的枝晶充分破碎并球化。电磁搅拌器采用 2 极交流线圈，配变频器，实现水平旋转搅拌。搅拌频率可以在 10-50Hz 之间连续设定与调节。在连续冷却的过程中得到满足要求的半固态熔体。

2.4.3 试验技术参数

(1) 采用中频感应加热，频率 1000-2500Hz，功率约 30-50kw。

(2) 电磁搅拌器采用 2 极交流线圈，配变频器，实现水平旋转搅拌。搅拌频率可以在 10-50Hz 之间连续设定与调节。但本设备经调试最大搅拌频率不超过 30Hz，否则设备就不会正常工作。

(3) 输送机上配有热电偶能即时显示浆料温度，并能实现自动控温功能。

2.4.4 试验设计

应用“正交设计”法，优化半固态浆料制备工艺参数，以选择满足使用性能的最佳工艺参数组合。凭借已往经验和大量试验确定起主要作用的工艺“因素”是电源频率、电压和搅拌时间以及相对应的水平，如表 2-2 因素-水平表。取值范围覆盖生产条件下可能的最大波动范围。

表 2-2 因素-水平表
Table 2-2 List of factors-levels

因素 水平	A 电源频率/ Hz	B 电压/ V	C 搅拌时间/ min
1	20	150	2
2	30	200	3

表 2-3 C级钢半固态制浆正交试验表
Table 2-3 The orthogonal test of slurring for C grade steel

因素 试验号	A 电源频率/ Hz	B 电压/ V	C 搅拌时间/ min
a1	1(20)	1(150)	1(2)
a2	1	1	2(3)
b1	2(30)	1	1
b2	2	1	2
c1	1	2(200)	1
c2	1	2	2
d1	2	2	1
d2	2	2	2

2.4.5 试验过程

本实验用碱性中频感应炉不氧化法熔炼炉料。在进行 C 级钢半固态搅拌之前，首先将搅拌坩埚预热至 1200-1300℃，采用热电偶分别测量搅拌室底部和顶部的预热温度，为了减少试验消耗，浇铸和搅拌过程中将热电偶取出，用两根 0.08mm 单

铂铑快速热电偶测量钢液温度，搅拌一段时间，半固态浆料达到预定温度时提升塞杆，C级钢半固态浆料直接淬入底部的水池中。

所有试样经粗磨、精磨、抛光后，用2%硝酸酒精溶液浸蚀，在XJX-III型光学显微镜上观察，并拍摄金相照片。

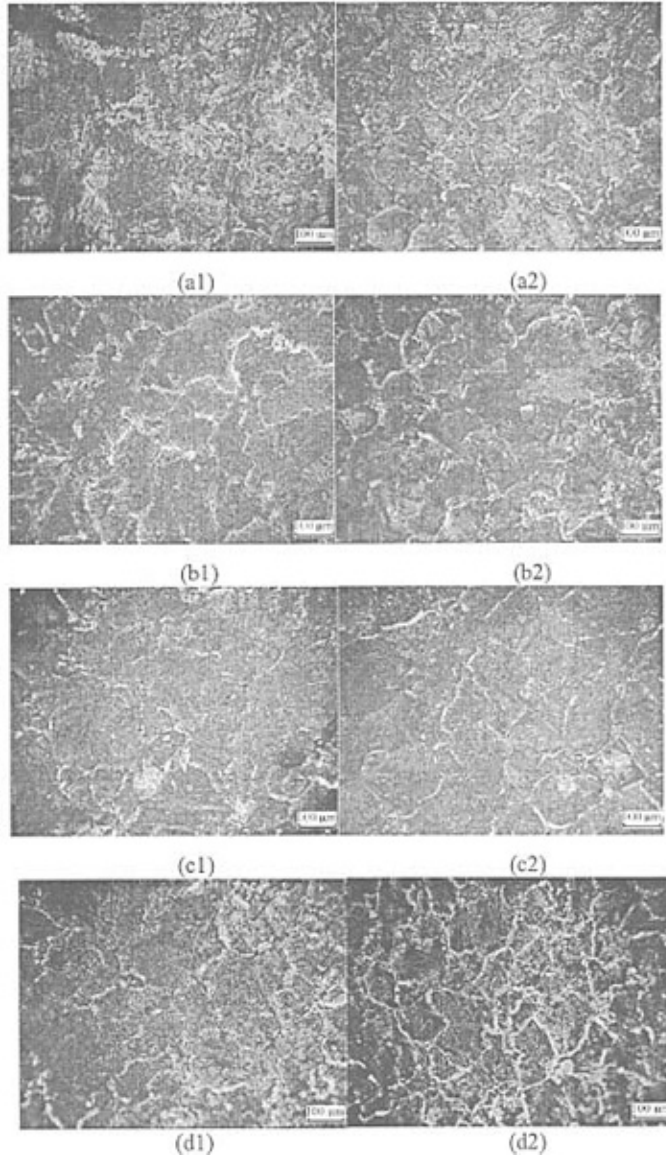


图 2-8 C 级钢的半固态组织
Fig.2-8 The microstructure of C grade steel

2.5 实验结果及分析

由图 C 级钢半固态制浆试验水淬组织看出，搅拌时间为 2 分时，浆料组织颗粒粗大，枝晶状，如试验号 a1、b1、c1 和 d1。因此应用本制浆机，在搅拌频率 20Hz 与 30Hz 和 150V 与 200V 电压下搅拌 2 分制出的浆料并非是完全的半固态组织。因此，排除 2 分情况，在正交分析中只考虑 3 分的情况。试验结果与计算分析，如表 2-4。

表 2-4 试验结果与计算分析
Table 2-4 The result of experiment and analytical calculations

因素 试验号		A	B	实验指标
		电源频率 (Hz)	电压 (V)	当量直径 (um)
a2		1 (20)	1 (150)	105
b2		2 (30)	1	95
c2		1	2 (200)	80
d2		2	2	50
当 量 直 径	$\overline{K_{1j}}$	92.5	100	
	$\overline{K_{2j}}$	72.5	65	
	$\overline{R_j}$	20	35	

由实验结果和极差分析表 2-4，得出除了搅拌时间对浆料组织颗粒大小影响最重要以外，其次对浆料组织影响较重要的因素是搅拌电压，最后为电源频率。所确定的最优方案是 A₂B₂C₂，如图 a2、b2、c2，晶粒较小，且均匀。下面从理论上分析电磁搅拌工艺参数对半固态浆料质量的影响。

(1) 电源频率的影响

普遍认为^[50,51]，搅拌速度对一次相树枝状晶的破碎有直接的影响。在电磁搅拌过程中，交流电源的频率决定着所产生的旋转磁场的转速，且二者存在如下关系：

$$n = \frac{60f}{p} \quad \dots (2-2)$$

其中，n 为旋转磁场的转速，f 为电源频率，P 为极对数。也就是说，电源频率越高，所获得的旋转磁场的转速越高。如图 2-9，对比 20Hz 与 30Hz 的半固态组织图可以得出：搅拌速度小时，一次相树枝状晶所受剪切力小，破碎强度也小，

获得的一次相晶粒较大，形状也不规则；搅拌速度大时，一次相晶粒变得细小，形状近似球状。但是搅拌速度太高，会导致固—液混合物飞溅和严重氧化，故需要在真空或氮气的保护气氛中搅拌。选择合适的搅拌速度，能使固-液金属浆料流动性好，一次相均匀细小且呈球状。

(2) 搅拌功率的影响

这里搅拌功率由调节电压控制。可通过电压与最大电流的乘积得到。如图 2-9，比较 150V 与 200V 半固态组织可以得出：在相同的频率下，通过调整输入电压，可以在流变器内获得不同的交变磁场强度，从而使金属液获得不同的搅拌功率。由于搅拌器内实际获得的搅拌功率很难测得，因此此处以单相名义功率即电源单相输出电压与输出电流的乘积作为实验中的功率参数。从图 2-8 中可以看出，搅拌功率对 C 级钢半固态初生固相的形态有着显著的影响。对比 a2 与 c2、b2 与 d2 可以看出，单相名义功率越大，初生固相的颗粒越细小，形态越趋于圆整。这是因为随输出电压的增大，电磁搅拌器内的磁场强度随之增大，金属浆料受到的切向洛伦兹力增大，结果使得流体获得更高的旋转速度^[43]。而且，在电磁搅拌条件下，金属熔体在径向上存在着明显的角速度梯度，这是金属熔体能够获得真正的搅拌

2.6 制浆小结

(1) 对浆料组织颗粒大小影响重要的因素按主次为搅拌时间，搅拌功率（或者说电压），最后为电源频率。

(2) 要获得颗粒细小、圆整、均匀的组织，搅拌时间为 3min 时比较合适；电源频率在 20~30Hz 内，浆料组织随着电源频率的升高，会变的更均匀细小；电压在 100~200V 内，浆料组织随着电压的升高，也会变的更均匀细小。

(3) 利用正交实验确定一组最优的制浆工艺参数方案 $A_2B_2C_2$ ，即电源频率 30Hz，电压 200V，搅拌时间 3min。

3 半固态浆料充型能力的研究

合金熔体的充型能力对于排出其中的气体、杂质和补缩、防裂,获得优质铸件有显著影响。因而它也一直一直是材料成型领域关注的基本问题。合金熔体的充型能力(mold-filling ability)在国标 GB/5611—85 中定义为:考虑铸型及工艺因素影响的熔体流动性,即熔体充满铸型型腔,获得形状完整,轮廓清晰的铸件的能力。

从充型能力的定义可以看出,合金熔体的充型能力的研究不仅仅是熔体自身的流动性,也涉及到铸型及浇注条件等外部因素的影响作用。影响合金熔体充型能力的内在因素是合金熔体本身的物理特性,即化学成分和凝固特性,也可以用合金熔体的粘度来表征,粘度越大,充型能力越差。而影响合金熔体充型能力的外界因素有浇注条件、铸型填充条件、铸件结构及铸造工艺等。

半固态 C 级钢的流变挤压成型能否获得具有一定复杂程度的优质零件,取决于该熔体在挤压铸造工艺下的充型能力。浇注温度即半固态浆料温度 1508 ℃。决定半固态熔体充型能力的外界因素主要是挤压铸造工艺中的充型压力、充型速度、模具预热温度、涂料等。本文主要研究这些外界因素对充型能力的影响规律。

3.1 实验

3.1.1 实验设备

实验材料为 ZG25MnCrNiMo,其化学成分见表 2-1,由差热分析(DTA)确定该材料的液相线为 1510 ℃。

实验设备如下:

①熔炼 碱性中频感应炉。为了保证坩埚内的熔体在保温阶段散热少,坩埚内温度均匀,在坩埚上端口加盖耐火砖隔热盖。

②测温 B 型裸头铂铑 30—铂铑 6 热电偶直接连续测温。

③控温 自行研制的控温柜显示温度,并控制加热与保温,控温精度 ± 1 ℃。

④浇注 浆料输送机,浆料输送机上的浇注包也是感应炉,可以在输送机感应炉中准备 C 级钢浆料,并用输送机浇注,如图 3-1 所示。

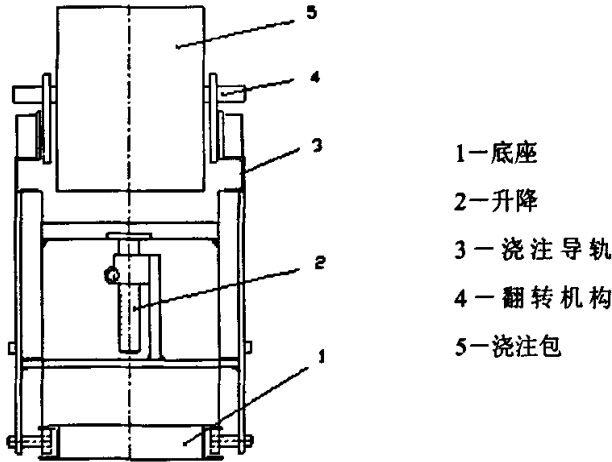


图 3-1 浆料输送机原理示意图

Fig.3-1 The diagrammatic sketch of machine for conveying slurry

⑤模具 挤压铸造用螺旋样模具，如图 3-2 所示。为了便于测量充填长度，在螺旋线外延方向上每隔 30°的下模的相对位置打上标记点，总共 42 个点，1260°，螺旋线总长度 1350 mm。实验所得到的螺旋试样的螺旋线部分背面会显示这种标记点，查看标记点，即可知道充填的角度。螺旋线的长度可依据下面的式 (3-1) 进行计算：

$$L = \int_0^t \sqrt{[r'(t)]^2 + [\theta'(t)]^2} d_t = \int_0^t \sqrt{(35\pi)^2 + 1260^2} d_t, \quad \dots (3-1)$$

式中， L 为螺旋线的充填长度； t 为自变量， t 的取值等于螺旋线充填的角度与 1260° 的比值，如整个充填了 1260°，则 $t=1$ ； r 和 θ 由式(3-2)定义。

$$r = \frac{8 + 5\pi \times 1260t}{180} \quad t \in (0,1) \quad \dots (3-2)$$

$$\theta = 1260t$$

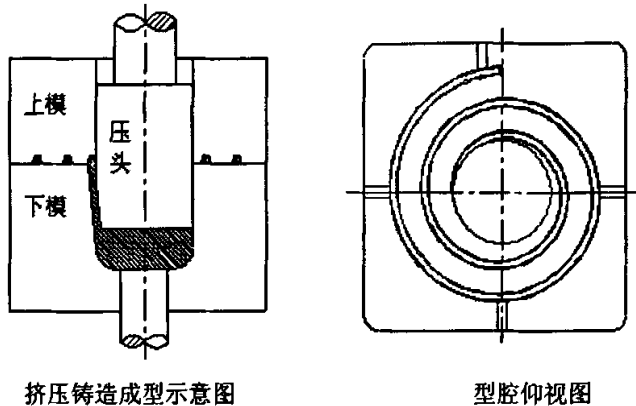


图 3-2 螺旋样模具示意图

Fig.3-2 The diagrammatic sketch of spiral sample mold

⑥模具预热 燃气烤模机, 主要由仿形喷头、燃气输送管及储气罐、压缩空气管和气体限量阀组成。通过红外线测温仪测量温度并控制气量, 可将预热温度控制在 $250\sim 500^{\circ}\text{C}$ 。

⑦成型 HTP16-200A 型多动液压机, 该设备可以按设定参数, 自动依次完成合模、充型、保压、卸压、开模、顶出等工序。合模力上限 2000 kN , 充型力与顶出力上限 630 kN , 在不超过上限范围内可按需要设定。充型速度可在 $10\sim 40\text{ mm/s}$ 设定, 保压和顶出时间按需要设定。

3.1.2 实验方法

(1) 实验方案

为对比液态 C 级钢熔体与半固态 C 级钢浆料的充型能力, 采用两种成型方法, 一种为液态成型, 一种为半固态浆料成型。

液态成型时, 除充型压力、充型速度、模具预热温度外, 留模时间(又称加压前停留时间)也是其工艺参数。浇注温度较高时, 模具预热温度的影响较弱。所以液态成型实验采用三因素两水平正交实验(见表 3-1), 研究充型压力 p 、充型速度 v 和留模时间 t 对液态 C 级钢充型能力的影响规律。采用两个压力值 $65\text{ MPa}(327\text{ kN})$ 和 $120\text{ MPa}(605\text{ kN})$, 两个充型速度 15 mm/s 和 40 mm/s , 两个留模时间 0 s 和 5 s , 而模具预热温度为定值 400°C 。

半固态浆料成型时, 浇注温度较低, 不应有留模时间, 而模具预热温度的影响增强。故实验通过改变充型压力 p 、充型速度 v 和模具预热温度 T , 分析充型压力、充型速度和模具预热温度三个工艺参数对 C 级钢半固态浆料流变充型能力的影响。采用三个比压值 $80\text{ MPa}(403\text{ kN})$ 、 $100\text{ MPa}(504\text{ kN})$ 、 $120\text{ MPa}(605\text{ kN})$, 两个模具预热温度 400°C 和 500°C 和两个充型速度 15 mm/s 和 40 mm/s (见表 3-2), 而留模时间为 0 s 。

(2) 实验步骤

①熔炼 本实验用碱性中频感应炉不氧化法熔炼炉料, 炉料熔清后, 适时适量向熔体中加入锰铁、硅铁等铁合金进行预脱氧并补充熔炼过程中合金元素的烧损。将熔体加热至 1600°C 后加铝片终脱氧。

②模具预热 浇注前模具要经烤模机预热, 通过测温和控制气量, 将预热温度控制在预定温度范围内。

③浇注 液态成型时, 在 1580°C 下浇注, 而半固态浆料成型温度控制在 1508°C 。

④成型 浇注后, 由 HTP16-200A 型多动液压机按预设参数进行挤压铸造。

3.2 结果与分析

3.2.1 液态 C 级钢充型能力及其影响因素

液态 C 级钢充型能力实验结果如表 3-1 所示。图 3-3 为螺旋线试样的实物照片。

表 3-1 液态 C 级钢充型能力实验结果和分析
Table 3-1 The result and analysis of C grade steel filling capability

序号	p (MPa)	v (mm/s)	t (s)	L (mm)
1	65	15	0	395
2	65	15	5	463
3	65	40	0	222
4	65	40	5	270
5	120	15	0	583
6	120	15	5	519
7	120	40	0	457
8	120	40	5	350
$\overline{K_{1j}}$	477.3	490	414.3	$\overline{L}=407.4$
$\overline{K_{2j}}$	337.5	324.8	400.5	
$\overline{R_j}$	139.8	165.2	14.3	



图 3-3 螺旋线试样照片
Fig.3-3 Photograph of helix sample

从表 3-1 中的 $\overline{R_j}$ 数据可以看出，充型压力 p 和充型速度 v 对充型能力的影响显著，而留模时间 t 对充型能力 L 的影响不显著。实验结果所体现的规律是： p 越

大, v 越小, 液态 C 级钢熔体的充型能力越好。减小 t 在一定程度上可以提高充型能力。图 3-4 和 3-5 是由表 3-1 的 8 组实验结果绘制的折线图, 从图中能直观地看出充型压力、充型速度的影响规律。

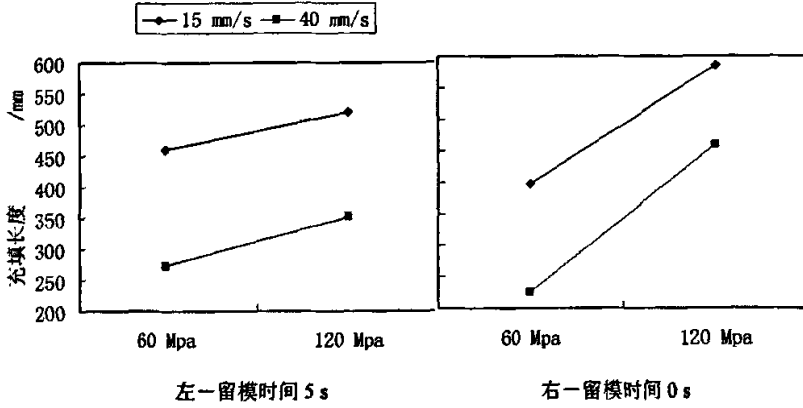


图 3-4 充型压力对充型能力的影响

Fig.3-4 Effect of filling pressure on filling capability

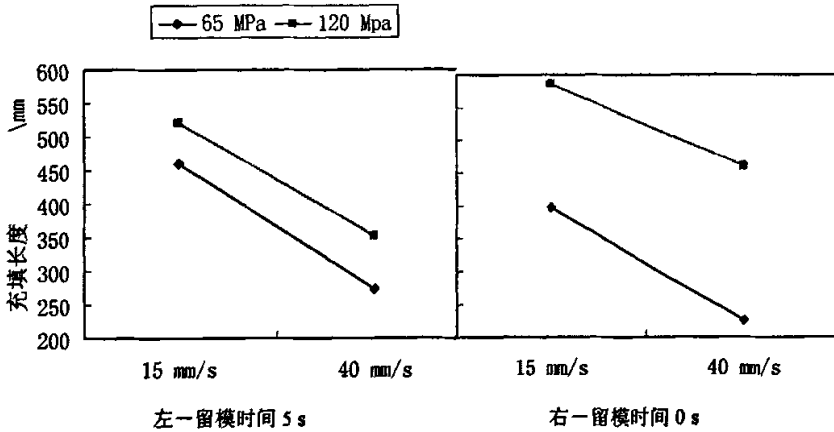


图 3-5 充型速度对充型能力的影响

Fig.3-5 Effect of filling velocity on filling capability

提高 p 有利于充型能力的提高, 这是因为 p 是合金熔体克服充型阻力充填模具型腔的动力, p 越大, 充填的动力越大, 充型能力就越好。在充填过程中, 合金熔体不断凝固, 其黏度越来越大, 充型阻力就越来越大, 当充型阻力大于 p 时, 熔体的充填速度减慢, 直至停止流动。 p 的增加使达到充型阻力大于 p 的时间延长, 即充填时间延长, 最终使得充填试样的长度 L 增加, 即液态 C 级钢的充型能力增加。

一般情况下, v 越大, 合金熔体的充型动能越大, 充型能力提高。另一方面, 较大的 v 减少了熔体在模具中单位长度上散去的热量, 即, 熔体充填到同一长度时, 快速充型的熔体的温度高于慢速充型的熔体。由于充型阻力随熔体温度的降低而增大, 所以快速充型时充型阻力沿程增加的速率减小, 有利于充填长度的增

加。但在本实条件下,浇注温度较高,充型速度的变化对充型阻力沿程增加速率的影响不显著。充型速度的影响还应考虑合金熔体的流变特性。从实验结果看,降低充型速度有利于充型能力的提高,由此,可以推测 C 级钢熔体在充型速度 15~40 mm/s 的范围内表现出胀流体的特性,即随剪切速率的增大,其黏度增大。充型速度较快时,熔体受到的剪切速率大,使其黏度增大,充型阻力增大。而充型速度的提高在较高浇注温度下未能显著降低充型阻力沿程的增加速率,充型阻力总体上呈增大趋势。故在低充型速度下液态 C 级钢熔体有较好的充型能力。

t 的不同在本质上就是加压时熔体的温度不同, t 越小,散热少,熔体的温度相对就越高;而 t 越大,散热多,熔体的温度相对就越低,所以 t 对 C 级钢熔体流变充型能力的影响规律与熔体的温度对充型能力的影响规律一致。 t 越小,即熔体温度越高,液态 C 级钢的充型能力越好。由于 0 s 和 5 s 相差不大,浇注温度高,模具型腔表面又有热障涂层的隔热作用,所以留模时间的影响不显著。

在本实验条件范围内,充型压力越大、充型速度越小,留模时间越短,液态 C 级钢熔体的充型能力越好。在充型压力 120 MPa,充型速度 15 mm/s 时,留模时间 0 s 时,获得最大充填长度 583 mm。

3.2.2 半固态浆料的充型能力及其影响因素

C 级钢半固态浆料充型能力实验结果如表 3-2 所示。

表 3-2 C 级钢半固态浆料流变充型能力实验结果
Table 3-2 The result of C grade steel filling capability experiment

序号	T (°C)	p (MPa)	v (mm/s)	L (mm)
1	500(470)	120	40	393
2	500(640)	100	40	796
3	500(455)	80	40	308
4	400(408)	120	40	323
5	400(390)	100	40	283
6	400(415)	80	40	236
7	500(510)	120	15	262
8	400(380)	120	15	241

注: () 外为预定值, () 内为实际值。

由表 3-2 的数据可提取 1、3、4、6 四组实验结果分析模具预热温度和充型压力对充型能力的影响(见图 3-6),也可提取 1、4、7、8 四组实验结果分析充型速度对充型能力的影响(见图 3-7)。分析计算结果如表 3-3 所示。

表 3-3 实验结果分析
Table 3-3 The analysis of experiment result

实验序号	1、3、4、6		1、4、7、8
因素	T	p	v
$\overline{K_{1j}}$	350.5	358	358
$\overline{K_{2j}}$	279.5	272	251.5
$\overline{R_j}$	71	86	106.5

由表 3-3 可知模具预热温度 T 、充型压力 p 、充型速度 v 对充型能力均有显著影响。在该表实验条件下 v 的影响最为显著， p 次之， T 再次。

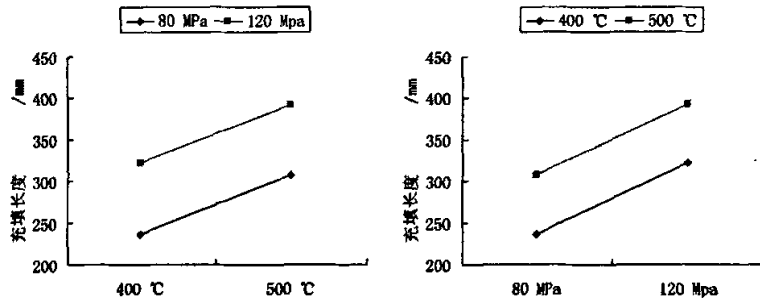


图 3-6 模具预热温度、充型压力对充型能力的影响
Fig.3-6 Effect of filling pressure and mold preheat temperature on filling capability

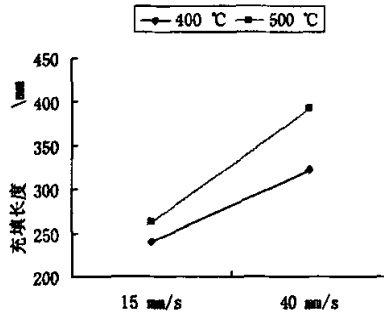


图 3-7 充型速度对充型能力的影响
Fig.3-7 Effect of filling velocity on filling capability

增大 p 有利于提高液态 C 级钢熔体的充型能力，同样也有利于提高 C 级钢半固态浆料的充型能力，其原因同前节分析。由于浇注温度很低，熔体的黏度很高，充型阻力很大，在同样工艺条件下，C 级钢浆料的充型能力不如液态，在正常工艺下最长的也只有 393 mm。

与液态 C 级钢熔体不同，充型速度 v 对 C 级钢半固态浆料的充型能力的影响趋势是 v 越大，充型能力越好。 v 越大，浆料的充型动能越大，充型能力提高。应该注意的是，浆料的黏度和温度不是呈线性关系，温度越低，黏度变化得越快。由于浇注温度低，温度的降低对浆料黏度的影响非常显著，而浆料胀流体特性的

影响相比之下不显著。较大的 v 减少了浆料在模具中单位长度上散去的热量，即，浆料充填到同一长度时，快速充型的浆料的温度高于慢速充型的浆料。这样，快速充型浆料的黏度小，其充型阻力小，在低温时，这种机制更为明显。对 C 级钢浆料而言，快速充型时充型阻力沿程增加的速率将显著减小，有利于充填长度的增加，提高浆料的充型能力。

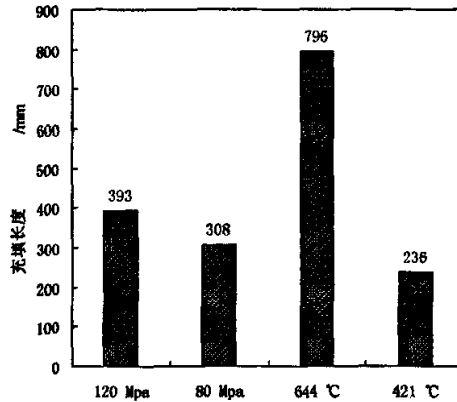


图 3-8 模具预热温度和充型压力对充型能力的影响对比

Fig.3-8 The comparison of effect of filling pressure and mold preheat temperature on filling capability

当 T 异常高时， T 将成为影响充型能力的最显著因素。由 1、2、3、5 四组数据可绘制图 3-8，形象地说明了 T 比 p 的影响显著。 T 增加，模具对浆料的激冷作用减弱，浆料的冷却速率变小。黏度随温度降低而增大的趋势减弱，充型阻力变小，凝固的时间延长，所以，充填长度增加。

本实验条件下，充型压力越大，充型速度越快，模具预热温度越高，C 级钢半固态浆料的充型能力越大。在充型压力 100 Mpa，充型速度 40 mm/s，模具预热温度为 644 °C 时，获得最大充填长度 796 mm。

3.3 本章小结

(1) 充型压力越大，充型速度越大，模具预热温度越高，C 级钢半固态浆料的充型能力越好。

(2) 在本实验的正常挤压铸造工艺条件下，液态 C 级钢熔体的在螺旋线模具中的最大充填长度为 583 mm，平均充填长度为 407.4 mm；而 C 级钢半固态浆料的最大充填长度仅为 393 mm，平均充填长度为 292.3 mm。因此 C 级钢半固态浆料的充型能力不如液态熔体。

(3) 在适当工艺下，C 级钢半固态浆料能在螺旋线模具中充填 300 mm 以上，

高于砂型铸造的 200 mm。C 级钢半固态流变挤压铸造适用于那些结构上符合挤压铸造工艺，形状复杂程度大于或等于砂型铸造铸钢件。

4 C级钢半固态成型工艺研究

4.1 半固态加工基本工艺

传统上人们将半固态加工的工艺路线分为两条：一条是将半固态浆料冷却凝固成坯料后，根据产品尺寸下料，再重新加热到半固态温度进行加工，称为触变成型(Thixoforming) [28,52-56]。另一条是将搅拌获得的半固态浆料直接进行加工，称为流变成型(Rheoforming) [2,57-59]。

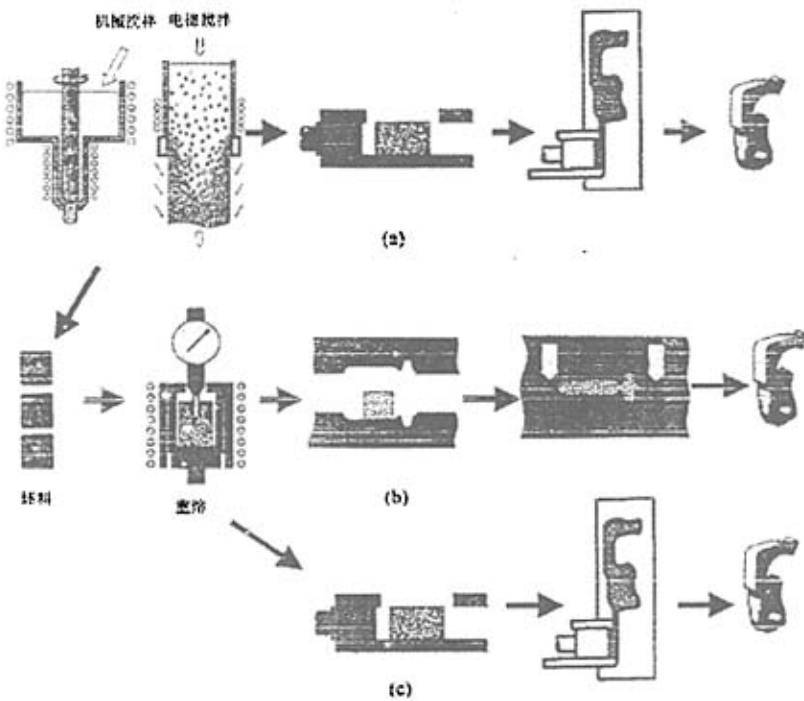


图 4-1 半固态浆料成型与坯料成型
Fig.4-1 Rheological forming and thixological forming

4.2 半固态挤压铸造工艺的特点及适用范围

半固态挤压工艺是半固态加工和液态模锻技术相结合的一个产物，它继承和发展了液态模锻工艺的许多特点，例如：

- (1) 在成型过程中，尚未凝固的金属液自始至终经受等静压，并在压力作用下发生结晶凝固；
- (2) 在成型的全过程中，已凝固的金属在压力下产生塑性变形，使毛坯外侧

紧贴模膛壁，金属液获得并保持等静压；

(3) 由于凝固层产生塑性变形，要消耗一部分能量，因此金属液经受的等静压值不是定值，而是随着凝固层的增厚而下降；

(4) 固—液区在压力作用下，发生强制性的补缩^[2]。

同时，半固态挤压较液态模锻工艺也有着明显的优势，例如，成型温度低，大大降低了模具的热冲击强度，模具受热条件的改善不仅是由于降低了几十度浇注温度，而且还由于半固态金属在其搅拌时已有大约 50% 的结晶潜热散失掉了，可缩短凝固时间，使坯料与模具接触的时间更短，从而有利于提高模具寿命^[2]。越来越多的有识之士逐渐认识到，发展半固态成型技术是钢质液态模锻发展的新出路。

半固态挤压工艺是用半固态浆料制备机制备浆料，然后将浆料转移到具有略高预热温度的模具型腔内加压成型，获得所需的接近成品尺寸的零件。其工艺路线如图 4-2 所示。

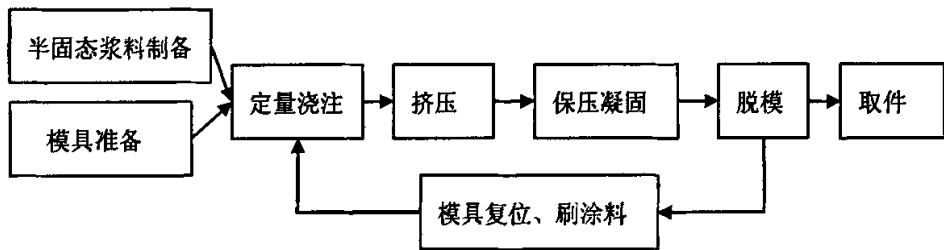


图 4-2 钢铁材料半固态流变挤压工艺路线

Fig.4-2 The processing route of semi-solid steel squeeze casting

进行半固态挤压工艺的开发，需要对工件的选择、合金材料的种类以及使用要求等因素综合考虑并进行广泛实践。理论上半固态流变挤压工艺的适用范围应该和液态模锻基本相同。对于一些用铸造工艺加工，工件性能不能满足要求，改用锻造工艺加工又难以成型或成本太高，采用半固态流变挤压工艺或许是最好的方法之一。

4.3 试验

4.3.1 零件的选定

进行半固态流变挤压工艺的开发，需要对工件的选择、合金材料的种类以及使用要求等因素综合考虑并进行广泛实践。根据半固态挤压的工艺特点选择了两

个有代表性的零件轴箱体（回转体）、钩舌（形状较复杂），其中轴箱体、钩舌（C级钢）是轨道客车转向架、刹车系统上的重要零件，轴箱体三维图如图 4-3 所示，以前采用的是砂型铸造，工艺出品率低，铸造缺陷较多。尤其是随着铁路客车的不断提速，问题显得越发突出。

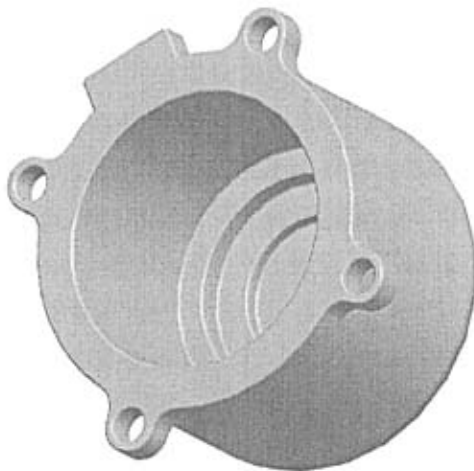


图 4-3 轴箱体缩小样
Fig.4-3 Reduced sample of axle box body

4.3.2 试验方法

(1) 试验设备

半固态流变挤压铸造成型设备的优劣直接影响到流变挤压生产的效率与制件的质量。在半固态流变挤压充型过程中，半固态浆料包含一定数量的非枝晶初生固相，它是一种两相流体，其表观粘度比同种液态金属的粘度约高 3 个数量级。因此，在挤压充型时的流动状态与纯液态金属的流动状态有明显的差异。半固态浆料这种独特的充型特点，对成型设备的充型速度、充型压力等参数提出了严格的要求。而目前国内用于半固态挤压成型的设备多是通用的或稍加改进的液压机，工艺参数不能满足要求。因此，为充分发挥半固态流变挤压成型技术的优势，挤压成型设备应具备以下功能：

(1) 半固态流变挤压铸造不仅要求半固态浆料在压力下充型，而且要实现压力下结晶。因此，要求成型设备提供能足够大的压力，且可进行保压至铸件完全凝固。这个特点决定了半固态流变挤压成型设备属于液压机类型，而不是曲柄压力机、螺旋压力机、摩擦压力机等类型。

(2) 半固态流变挤压铸造要求尽量缩短半固态浆料注入模具后的开始加压时间。因此，要求成型设备有足够的空程速度和一定的加压速度。

(3) 成型设备除了具有合模、顶出等功能外,还应设有充型机构即充型缸,以满足间接式半固态流变挤压成型的需要。

(4) 为提高生产效率,成型设备应具有一定的自动化程度,除了能进行手动操纵外,还应有半自动操纵能力。

半固态合金成型是介于传统铸造和模锻之间的一种工艺过程,适用于很多常规的成型方法。通常都根据采用的成型设备对其命名^[22],这些设备包括:压铸设备、挤压铸造设备、模锻设备、注射成型设备和连续铸造设备等^[60-63]。于是,半固态合金成型工艺主要有半固态锻造、半固态挤压、半固态轧制和半固态压铸等。半固态成型工艺既可采用专用设备,也可以将传统成型设备进行相应改造,进行半固态成型的生产。美国 Dow chemical 公司于 1988 年开发出称为“Thixomoldingmachine”的射压成型设备,此种装置将压铸和注射工艺合二为一。镁合金、铝合金、锌合金以及其复合材料均可采用此种成型工艺,且这种工艺生产的零件除具备半固态成型的一般特点(如零件内部疏松少,凝固收缩小)外,还有操作安全、效率高、切屑或碎片经碾研后回收率近 100%等特点^[62,64]。另外,瑞士 uhle:公司推出了实时控制的半固态触变压铸设备^[65,66],日本 UBE 公司也推出了垂直式半固态流变压铸设备^[61]。在国内,北京交通大学半固态成型研究中心邢书明将半固态流变充型与挤压铸造技术结合起来,提出了半固态挤压铸造新工艺,研制了半固态挤压铸造机^[67]。

图 4-4 是北京交通大学半固态成型实验室根据半固态挤压铸造工艺和天津锻压机床厂合作研制成功的 HTP16-200A 非标半固态模锻机。它能按程序自动完成合模、充型、保压、充型缸回程、锁模缸回程和顶出缸顶出工件等一系列动作。该设备区别于普通油压机的两个特点是:①可进行充型速度的快慢速转换;②通过计算机控制系统对充型比压、冲头挤压速度(充型速度)等工艺参数进行设置和实验数据自动记录。



图 4-4 HTP16-200A 非标半固态模锻机

Fig.4-4 HTP16-200A nonstandard machine for semi-solid squeeze casting

主要技术参数如表 4-1:

表 4-1: HTP16-200A 非标半固态模锻机主要技术参数
Table 4-1 The main technical parameters of HTP16-200A nonstandard machine for semi-solid squeeze casting

项目	基本参数值
主缸锁模力	2000KN
主缸回程力	300KN
辅注缸充型力	630KN
辅注缸回程力	300KN
顶出缸顶出力	630KN
主缸行程	1000mm
辅注缸行程	1000mm
顶出缸行程	300mm
主缸空程速度	400mm/s
主缸工作速度	10~50mm/s
主缸回程速度	100mm/s
辅注缸空程速度	400mm/s
辅注缸工作速度	10~40mm/s
辅注缸回程速度	80 mm/s
顶出缸顶出速度	40 mm/s
顶出缸回程速度	80 mm/s
工作液压力	25MPa
工作台尺寸	1200×1200 (mm)

(2) 成型工艺设计原则

半固态流变挤压铸造工艺设计除制浆工艺设计外,其成型工艺设计就包括分型面的选择、加工余量、型芯设计、挤压浇注系统、压室设计、涂料选择、拔模斜度设计、溢溜槽设置、气道设计、模具预热温度、浇注温度、模锻比压、模锻速度、保压时间等,本实验重点讨论浇注温度、模锻比压、模锻速度、保压时间、模具预热温度等工艺。

在半固态液态挤压成型生产过程中,常常会遇到这样的情况,一台正常的压铸机,合格的金属液,设计较合理的模具,三者结合到一起却压不出合格的铸件。这就涉及到液态积压成型工艺问题,所谓工艺,简单说就是通过操作者把合金、模具、机床三者有机结合起来生产合格压铸件的一种技术。在目前压铸机自动化程度不高的情况下,半固态液态挤压工艺尤其是挤压工艺参数的选择与调整对生

产是否正常起着关键性作用。

试验表明,在半固态流变挤压成型过程中,影响制件性能的工艺参数主要有浇注温度、模锻比压、模锻速度、保压时间、模具温度等。在对这些参数进行选用时,应遵循保证制件性能,延长模具寿命的原则。

(1) 浇注温度

液态挤压成型合金的浇注温度主要作用是防止浇不足,保证工件具有良好的表面质量。所以在保证工件成型及具有良好的表面质量的前提下,降低合金的浇注温度,可以减少型腔内金属的收缩量,减少工件厚壁处产生缩孔气孔的可能性。

在半固态流变挤压过程中,半固态浆料的浇注温度是一个关键的控制参数。它对浆料的充型、制件的性能具有极其重要的作用。根据半固态金属浆料的表观粘度 η_a 与浆料温度 T 的关系^[68]

$$\eta_a = A \exp \left[B \left(1 - \left(\frac{T_M - T_L}{T_M - T} \right)^{\frac{1}{1-k}} \right) \right] \quad \dots (4-1)$$

式中: T_M —溶剂金属的熔点; T_L —合金的液相线温度; k —溶质平衡分配比值; A, B —系数。可知,随着浇注温度的降低,半固态浆料的表观粘度急剧升高,充型时的阻力显著增大。所以,为了得到完整的制件和降低成型抗力,应使浆料的浇注温度控制的高一点。但另一方面,浇注温度的升高,会使半固态浆料的固相分数 f_s 降低,液相分数增加,加压充型时容易导致浆料产生喷溅、卷气现象。因此,浇注温度的选择应综合以上两方面来考虑。其原则是在保证半固态金属浆料充满型腔的前提下,尽量降低浇注温度。

(2) 模锻比压

模锻比压在工艺中是主要的参数之一,模锻比压以模锻压力和模锻比压两种形式来表示。模锻比压的单位是牛顿,其大小随压铸机的规格而不同。模锻比压是液体金属所受的压强。选取比压时应考虑如下因素:薄壁件、结构复杂件充型比压可选高一些;流动性好的合金以及当浇注温度较高时,可选用较低的模锻比压;厚壁件,结晶温度范围大,比重大,比强度大的合金,可选用较高的增压压力。

模锻比压 P_0 的主要作用是使半固态金属浆料具有一定的充型速度,保证浆料在压力下结晶凝固,补缩并产生少量塑性变形,使制件的密度增大,晶粒细化,性能提高。在实际合模充型过程中,注入到型腔内的半固态金属浆料由于受到激冷作用,在其外表面迅速形成一层细晶硬壳,将待凝固的半固态金属浆料包裹在里面,如图 4-5 所示。

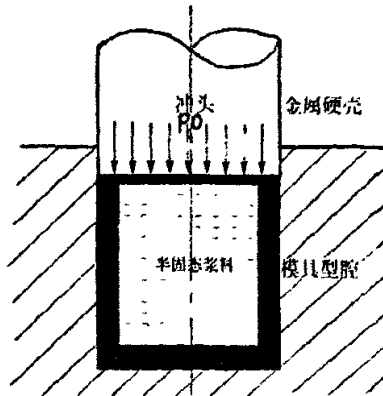


图 4-5 流变挤压下半固态浆料的结晶凝固示意图

Fig.4-5 The diagrammatic sketch of semi-solid slurry solidifying in the rheological squeeze casting processing

此时，尽管半固态金属浆料具有良好的流变性，但为了能够实现完整充型和有效补缩，模锻比压必须大于半固态浆料凝固硬壳的塑变抗力 σ 与半固态浆料流变临界切应力 τ_c 之和，即 $P_0 > \sigma + \tau_c$ ，否则半固态浆料无法流动^[69]。在模锻方式一定的情况下，半固态浆料的临界切应力 τ_c 与半固态浆料的组织特征有关，但到目前为止有关临界切应力 τ_c 的定量计算尚无精确的公式，只能根据试验来确定。当模锻比压 P_0 大于 $\sigma + \tau_c$ 以后，增大模锻比压对提高制件性能作用很大。试验表明^[70]，随着模锻比压的增大，制件的组织越致密，晶粒越细小，性能也越好。但模锻比压增大到一定值后，模锻比压对制件的性能提高基本无影响。

(3) 模锻速度

模锻速度通常是指冲头在充填时的速度，压射冲头的移动可分为四个阶段：慢速封口阶，压射冲头移动封闭浇料口；金属堆积阶段，使金属液堆积到内浇口前面；充填型腔阶段，按调定的快速移动，充填型腔；终压阶段，此阶段是冲头移动很小的持压阶段(增压阶段)。一般说来，对铸件充填和成型起主要作用的是填充型腔阶段的速度，即二级模锻速度(快压射速度)。

合理的模锻速度 v 与制件的大小、形状、壁厚、合金种类、浇注温度和模具温度等因素有关。在模锻过程中，由于半固态浆料含一定数量的球状初生固相，其表现粘度比同种液态金属的粘度高 3 个数量级，充型时阻力较大。因此，在半固态金属浆料充型过程中必须具有足够大的模锻速度 v ，才能保证浆料将模具型腔充满。另一方面，模锻速度过快也会带来一些不利影响。根据粘性流体流动状态的雷诺判据^[71]

$$Re = \frac{\bar{v}d\rho}{\eta_a} \quad \dots (4-2)$$

式中： Re 为雷诺数； \bar{v} 为浆料流动速度； d 为浇道直径； ρ 为浆料密度； η_a

为浆料粘度（当雷诺数 $Re > 2300$ 时，粘性流体以紊流状态流动；当 $Re \leq 2300$ 时，粘性流体以层流状态流动）。可知模锻速度 v 过快时，半固态浆料的流动速度 \bar{v} 很高，其雷诺数 Re 可能超过临界值（2300），浆料将以紊流状态充填模具型腔，从而造成严重裹气，进而降低制件性能。模锻速度降低，导致充型速度降低，但是在模锻速度降低到足以形成良好的充型、排气条件（整体前沿流动形态）以前，这种速度的降低对于工件的致密性是不利的，致使密度下降，铸件表面皮下气泡减少，但深层大气泡却增加。这说明模锻速度降低，破坏了压铸合金与气体的充分弥散混合，使得工件内部组织非均匀化。这一点是极不利的，因为体积较大的气孔容易集中在铸件的厚大部位，这一区域的工作性能大大下降会导致整个铸件的报废。当压射速度降低到使压铸金属以整体前沿形态充填型腔时，则可能获得基本无气孔，组织致密的压铸件。

（4）保压时间

保压时间是指半固态浆料充满型腔后压力达到规定的最大值开始到模锻设备撤销压力为止的时间段。这段时间的主要作用是使半固态浆料在压力作用下结晶凝固并补偿半固态浆料因凝固和温度变化所引起的体积收缩。

保压时间的长短，主要取决于制件断面的最大壁厚和制件的材质，同时也与制件的形状及浆料的浇注温度等因素有关。卸压时间过早，型腔内尚未凝固的浆料在继续凝固时发生的收缩将无法得到良好补偿，导致制件内部产生缩松、缩孔缺陷；卸压时间过迟，除了降低制件生产率外，还会增大制件产生裂纹的几率^[72]。因此，在保证半固态金属浆料完全凝固和成型致密的前提下，保压时间愈短愈好。

（5）模具温度

在半固态流变挤压过程中，模具温度应控制在合适的范围内。当模具温度过高时，可能带来以下问题：①模具表面硬度降低，增加模具磨损；②模具强度降低，在模锻压力作用下，模具容易发生塑性变形；③半固态浆料易于粘模，制件顶出时表面容易被拉伤；④半固态浆料的冷却速度降低，制件表面硬化层减薄，心部组织粗大，力学性能下降。当模具温度过低时，半固态浆料注入型腔后，便迅速凝固结壳，严重影响加压效果，使制件内部易出现缩松、缩孔缺陷，表面易出现冷隔纹裂，甚至开裂；此外，根据模具材料在工作循环中产生的热应力公式^[3]

$$\sigma = \frac{K\alpha E\Delta T}{1-\nu} \quad \dots (4-3)$$

式中， K 为常数， α 为模具材料的热膨胀系数， E 为模具材料的弹性模量， ΔT 为循环温度差， ν 为模具材料的泊松比。可知模具温度越低，与半固态浆料的温度差 ΔT 越大，在模具中产生的热应力越高，模具型腔表面越易形成热裂纹。因此，为了保证制件性能并使模具处于良好的工作状态，挤压前要对模具进行预热，连续

生产一段时间后，由于半固态浆料的加热作用，模具温度会升高，这时要对模具进行冷却，使模具温度保持在规定的范围内。

实验材料为 ZG25MnCrNiMo，其化学成分见表 2-1，由差热分析(DTA)确定该材料的液相线为 1510 ℃。轴箱体和钩舌的毛坯示意图见图 4-6。两零件结构不同，故采用不同的挤压方式，前者凸冲头直接反挤压成型，后者平冲头间接挤压成型，如图 4-7 所示。

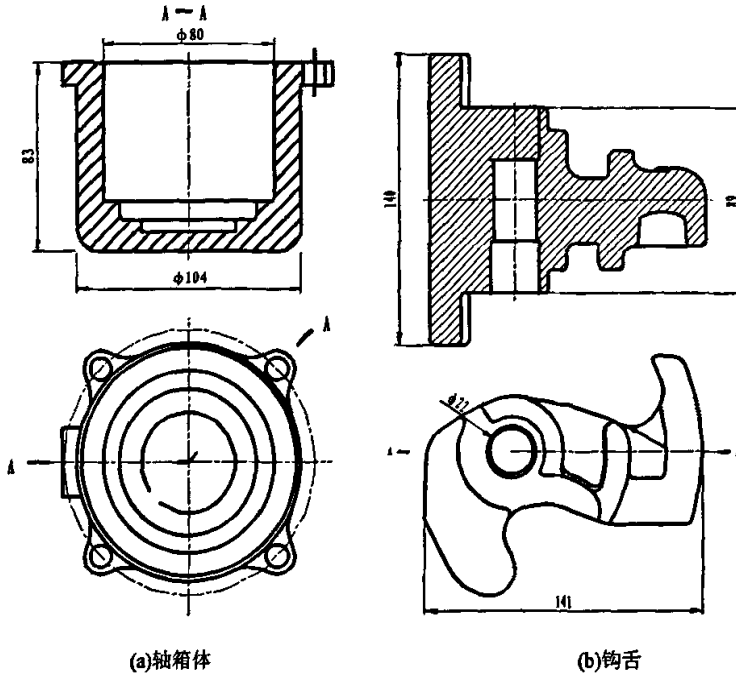


图 4-6 毛坯示意图
Fig.4-6 The diagrammatic sketch of blank

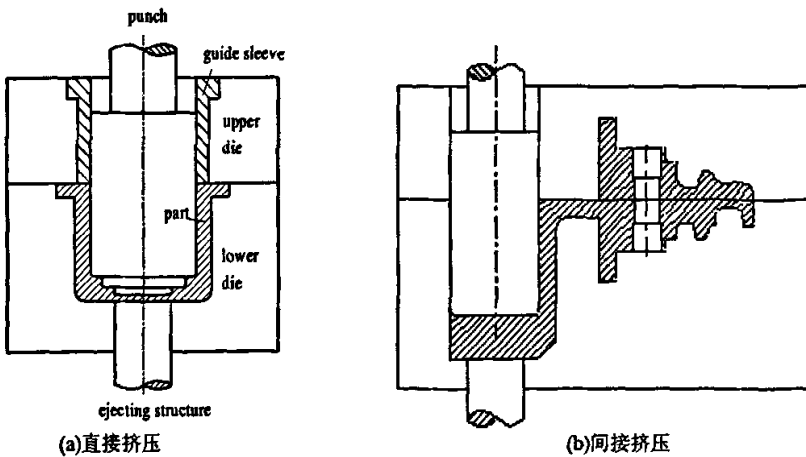


图 4-7 挤压方式示意图
Fig.4-7 The diagrammatic sketch of squeezing mode

本实验用碱性中频感应炉不氧化法熔炼炉料，用裸头铂铑 30—铂铑 6 热电偶直接连续测温，用自行研制控温柜显示和控制加热与保温，控温精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。炉料熔清后，适时适量向熔体中加入锰铁、硅铁等铁合金进行预脱氧并补充熔炼过程中合金元素的烧损。将熔体加热至 1600°C 后加纯铝片终脱氧。制浆后浇注在模具压室里。浇注前模具要经燃气预热。浇注后，由 HTP16-200A 型多动液压机完成挤压铸造成型。主要挤压铸造成型工艺参数为：压力 $80\sim 125\text{ MPa}$ ，充型速度 $20\sim 40\text{ mm/s}$ ，保压时间 $2\sim 20\text{ s}$ ，模具预热温度 $250\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，涂料为锆英粉+水玻璃。

4.4 实验结果

4.4.1 轴箱体

轴箱体零件在各成型参数下均能成型，其形状完整、轮廓清晰。但在压力较低、模具预热温度(简称模温)偏低的情况下会出现皱褶缺陷(图 4-8(a))，而且表面质量不均匀，浇注液面以下有皱褶，而浇注液面以上无皱褶。随压力增大和模温升高，皱褶缺陷逐渐减轻。当压力在 110 MPa 以上，模温在 450°C 左右时，皱褶缺陷完全消除(图 4-8(b))。另外，在用无脱模斜度的冲头成型轴箱体时，其内壁有周向分布的细小段状裂纹(图 4-8(a))，裂纹深度均小于 1.5 mm ，而改用脱模斜度为 1° 的冲头后，裂纹缺陷消除(图 4-4(b))。

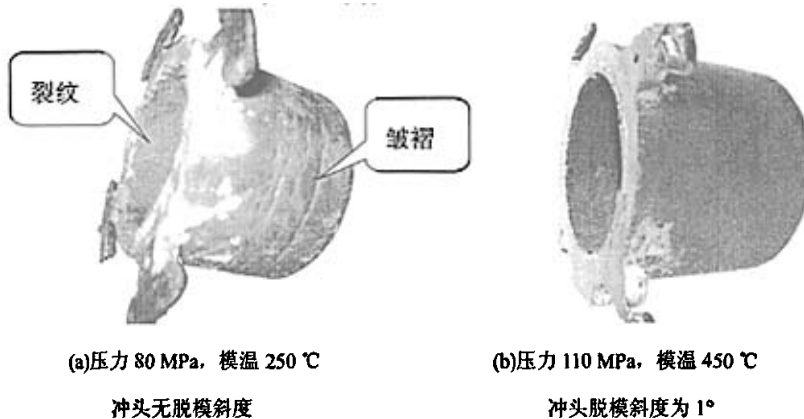
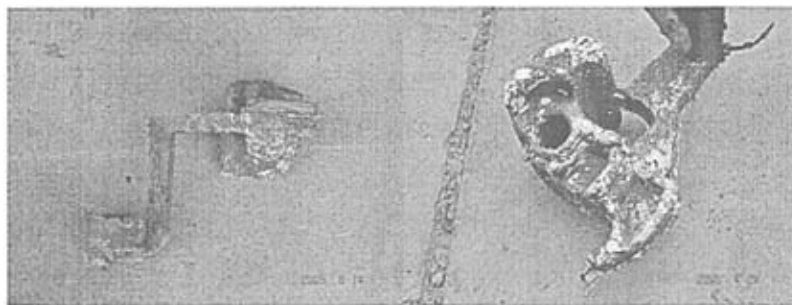


图 4-8 不同成型参数下的轴箱体
Fig.4-8 The axle box body cast squeezed at different processing parameters

4.4.2 钩舌

钩舌零件没有皱褶和裂纹缺陷，但成型困难，常充不满型腔(4-9(a))。充型速

度、压力、模温几乎都达到设备上限值时才能获得形状完整、轮廓清晰的毛坯(图 4-9(b))。



(a)未充型完整

(b)压力 125 MPa, 模温 500 °C,

充型速度 40 mm/s

图 4-9 不同成型参数下的钩舌

Fig.4-9 The coupler knuckle at different processing parameters

4.5 本章小结

- (1) 半固态挤压工艺可以获得形状完整、轮廓清晰、表面光洁的 C 级钢零件。
- (2) C 级钢半固态的成型性随着充型压力、充型速度、模具预热温度的提高而提高。
- (3) C 级钢半固态挤压铸造易产生表面皱褶缺陷, 该缺陷随充型压力、模具预热温度的提高逐渐减轻直至消失。C 级钢半固态挤压铸造所需压力较高(大于 100 MPa), 在较大压力损失情况下, 易产生浇不足缺陷, 通过提高充型压力和充型速度可消除该缺陷。
- (4) 挤压方式的选择及模具工艺设计应以流程短、压力损失小为原则, 以适应 C 级钢半固态充型能力差的属性。

5 半固态成型工艺对表面质量缺陷的影响

通过 C 级钢半固态挤压成型试验研究发现, 采用半固态流变挤压工艺加工出了形状完整、轮廓清晰的 C 级钢零件。但由于半固态浆料固有特性和工艺特点, 零件皱褶、气孔、裂纹等质量缺陷较为严重, 下面对半固态挤压成型实验中产生的缺陷进行讨论和分析, 可以为日后生产高性能的半固态挤压制件奠定基础。

5.1 皱褶缺陷

在用 C 级钢加工轴箱体的初级阶段, 皱褶缺陷时常出现, 不仅影响工件外观, 而且会严重影响工件的疲劳寿命, 使半固态成型的技术优势难以充分发挥。如图 5-1 是半固态模锻所得零件的照片(浅色为残余涂料层)。零件形状完整、轮廓清晰, 但表面质量不均匀。浇注液面以上的外表面较平整, 而浇注液面以下的外表面表面粗糙, 有明显的皱褶缺陷, 表面质量差。

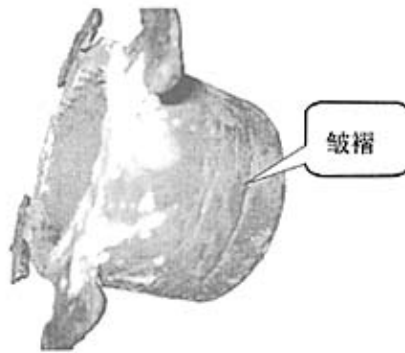


图 5-1 比压 80MPa, 模具预热温度 250℃时的零件

Fig.5-1 Photograph of part at 80MPa and 250℃

5.1.1 皱褶缺陷分析

图 5-2 为轴箱体零件成型过程示意图。当半固态浆料注入下模后, 在下模模壁四周和模底形成一个敞口的凝固层, 这时发生的液态收缩、凝固收缩所造成的体积收缩, 完全可以在半固态浆料的自重下, 利用其较好的流动性, 以减小液面高度来实现。而四周外壳侧壁的固态收缩, 使模膛侧壁与外壳壁之间形成了气隙。

在液态挤压时，模膛侧壁与外壳壁之间形成的气隙，在高度方向上通常可认为是等距气隙。但是，对于半固态挤压，由于半固态浆料中已经有一部分固相，浆料呈糊状，加之浇注过程中不连续性、不均匀性的影响，形成了在高度方向上距离不等的空隙，即表面形成皱褶。随后充型时，冲头端面与半固态浆料接触，迅速形成一硬薄层，这一硬薄层与侧壁形成的凝固层之间就形成了一个未凝固的环。冲头在下压的过程中，在压力 P_1 的作用下，根据阻力最小原理，半固态浆料从未凝固的环中被挤出充满型腔。在此过程中，冲头遇到的阻力主要是克服半固态浆料的粘性。因此，尽管压力 P_1 增加的速度很快，但是，压力的绝对值很小，即 P_1 远小于 P_2 (P_2 为预定压力，即充满型腔时的保压压力)。同时，模壁四周和底部形成的凝固层逐渐加厚，而此时模壁四周的激冷层所受的径向静压力很小，难以产生塑性变形，以消除硬层侧壁和模膛侧壁之间形成的气隙。当型腔充满后，虽然压力 P_1 增大到了预定压力，即 $P_1 = P_2$ ，但是，此时不仅凝固层的厚度增加，而且温度降低了许多，所施加的静压力已不足以使这样的凝固层产生所希望的塑性变形，气隙得不到消除，致使浇注液面以下粗糙，有明显的皱褶痕迹。

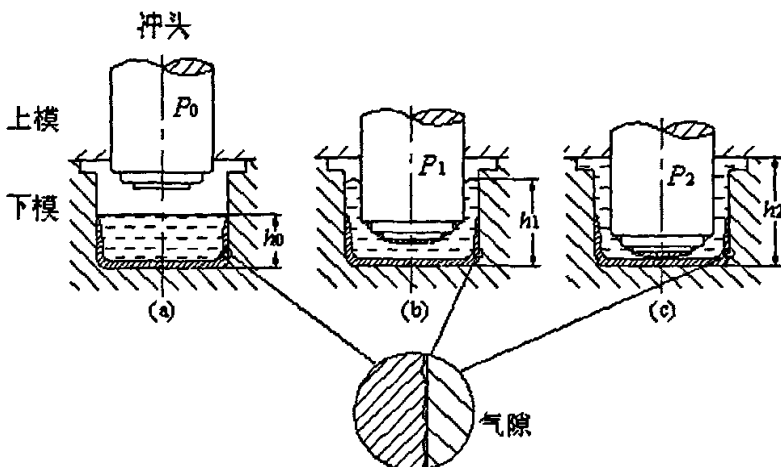


图 5-2 轴箱体零件成型过程示意图

Fig.5-2 The diagrammatic sketch of semi-solid rheological squeeze casting process

5.1.2 影响因素

(1) 模具预热温度对产生皱褶的影响

由上述分析可知，模具预热温度 T_m 对表面皱褶的产生有很大影响。 T_m 与浆料的热物理属性密切相关，不可过高或过低。 T_m 过高，使模具在高温条件下的强硬

性下降加剧,在较大比压下,其寿命显著降低。

半固态浆料浇入下模型腔后,瞬间浆料温度较高且与型腔内壁紧密接触, T_m 往往比浆料温度低很多(温差在 1000℃以上),虽有涂料的绝热作用,热量传递仍很快。型腔内壁处的浆料由于大量散热而失去过热度获得一定过冷度,很快形成凝固硬壳^[75]。凝固硬壳的厚度、强度及形貌对零件的表面质量影响很大。 T_m 过低,使下模型壁的激冷作用强,凝固硬壳在挤压充型前就有一定的厚度和强度。倘若凝固硬壳厚度和强度偏大,温度也偏低,在挤压过程中它就不易发生塑性变形也不易与熔融浆料熔合,从而将其重力成型的粗糙表面留在零件上,最终导致零件表面粗糙,即形成表面皱褶缺陷。

实验中,为保证模具的使用寿命,模具只预热到 250℃。皱褶缺陷可能是由于 T_m 偏低造成的。

(2) 比压 p 对皱褶的产生也有重要影响

p 定义为充型压力与承压面积之比,其大小对零件的物理力学性能、铸造缺陷、组织、偏析、熔点及相平衡等都有直接影响。在一定范围内,零件的强度随着 p 的增大而提高,这是由于半固态浆料在较高的压力下凝固,可以提高零件内部组织的致密性。提高 p 还可以提高浆料的充型能力,易获得轮廓清晰的零件。但 p 过高对提高零件性能不明显,而使模具承受较大载荷,降低模具寿命。 p 过小,零件的组织不够致密,内部可能会有缩松,外表面不够光洁甚至发生冷隔。

有学者提出过液态模锻的比压选用范围^[2]:密实比压为 60~100 MPa,高限比压为 100~150 MPa。此外,可以用经验公式估算比压:

$$p = K_1 K_2 \left[1 + 0.001 \left(\frac{H}{a} \right)^3 \right] \quad \dots(5-1)$$

式中, K_1 为合金种类系数, MPa; K_2 为液锻方式系数; H 为零件产生较大压力损失部分的高度, mm; a 为与 H 部分相对应的平均厚度, mm。

本实验所用材料为 C 级钢, K_1 为 100 MPa, K_2 为 1, H 为 60 mm, a 为 12 mm, 由式(5-1)算得的比压为 112.5 MPa。实验中的半固态流变模锻比压为 90 MPa, 在液态模锻的密实比压范围内, 但比式(5-1)的计算结果小。半固态挤压所需比压从理论上讲应大于液态模锻, 而实验中选定的比压偏小, 不足以消除皱褶缺陷。

5.1.3 实验验证

由本文 5.1.2 小节可知, 消除皱褶缺陷可以从提高模温 T_m 和增大比压 p 来着手。过高的 T_m 和过高的 p 对模具的使用寿命均有负面影响。为此, 逐步提高 T_m

和 p , 在 T_m 为 300~500 °C 和 p 为 95~125 MPa 的工艺参数范围内进行了一系列实验。

实验结果表明: 随着 T_m 的提高和 p 的增大, 零件表面质量逐步改善, 表面趋于光洁, 皱褶趋于消失。当 p 为 110~120 MPa, T_m 为 400~425 °C 时, 表面基本光洁, 几乎没有皱褶缺陷(见图 5-3); 当 p 在 120 MPa 以上, T_m 在 450 °C 以上时, 表面致密光洁, 没有皱褶缺陷(见图 5-4)。综合考虑零件质量和模具寿命, 合适的 p 为 110~120 MPa, 最佳的 T_m 为 400~425 °C。

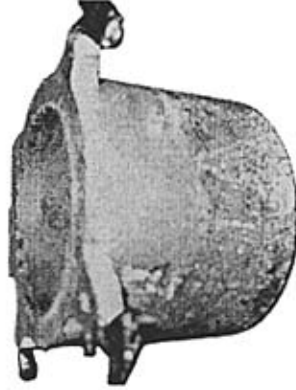


图 5-3 比压 100MPa, 模温 400°C 时的零件
Fig.5-3 Photograph of part at 100 MPa and 400 °C

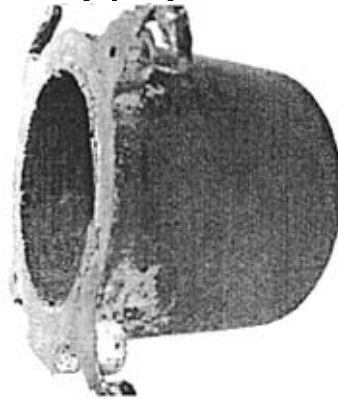


图 5-4 比压 120MPa, 模温 450°C 时的零件
Fig.5-4 Photograph of part at 120 MPa and 450 °C

5.2 气孔

5.2.1 半固态浆料的充型

半固态的多孔性主要与金属充填型腔的方式有关, 可借鉴压力铸造时液态金属充填型腔的状态, 如下种种观点。

弗洛梅尔(Frommer)于 1932 年提出喷射充填理论。如图 5-5

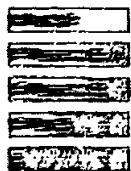


图 5-5 喷射充满
Fig.5-5 Spray filling

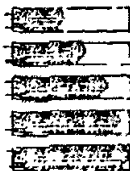


图 5-6 全壁厚充满
Fig.5-6 Full wall thickness filling

(1) 液态金属从内浇口进入型腔时, 液态流束不改变自己的截面积, 以内浇口形状射向远离内浇口的对面型壁。

(2) 撞击对面型壁后, 部分金属积聚形成涡流。

(3) 另一部分则向所有方向喷溅, 并沿型壁返回流动。

(4) 金属积聚所产生的反压力使喷溅金属紊乱地与后来的主流汇合, 并向内浇口方向流动。

(5) 在逐渐向内浇口流回的同时, 型腔的气体也是在内浇口附近最后排出。液态金属以这种形式充填压铸型腔时, 在产生的涡流中, 喷溅金属与后来金属汇合处便可能包裹气体, 这些气体最后滞留在铸件内形成气孔。

1937 年, 布兰特(Brandt)提出全壁厚充填理论。如图 5-6

(1) 熔融金属通过内浇口进入型腔时, 从内浇口处开始, 由后向前充满型腔厚度地流动。

(2) 流动时不产生涡流, 因而不会包裹气体。

(3) 型腔内的气体顺序地由内浇口起向前得到充分的排除。

(4) 这种流动保持到充填至最远端。在这种情况下, 液态金属不易包裹气体, 最后形成的压铸件内也不会存在卷入性气体。

巴顿 (Barton)于 1944 年提出三阶段充填理论。巴顿认为充填过程是个包含流体动力学、热力学以及流动因素的复合问题, 它大致可以分为三个阶段。

第一阶段: 合金液流按靠近内浇口的形状进入型腔, 首先撞击对面的型壁, 并在该处沿型壁向型腔四周扩展流向内浇口。在合金液流过的型壁上形成铸件的外壳(薄壳层)。

第二阶段: 随后进入的合金液沉积在薄壳层内的空间进行充填, 直至充满。

第三阶段: 在型腔完全充满的同时, 压力通过处于尚未凝固的中心部分作用在铸件上。

巴顿认为充填过程的三个阶段对铸件所起的作用是不同的。第一阶段是铸件的表面质量, 第二阶段是铸件的硬度, 第三阶段是铸件的强度。

半固态浆料的充型和液态金属相比, 温度偏低, 黏度较大, 倾向于全壁厚充填

理论, 不易包裹气体。

5.2.2 半固态液态挤压气体来源和气孔的形成

半固态液态挤压时气体的来源有三个方面。其一是压室和型腔中的气体;其二是由于涂料挥发而产生的;其三是金属液带进型腔的。

金属浆料在充填型腔时带入的气体和压室中的残留气体是气孔形成的主要原因。充填过程中, 当排气速度低于充填速度时, 型腔中的残留气体就会因为湍流而被卷入金属液中形成孔洞。这种孔洞的大小主要与增压压力大小有关。气体的位置不定, 可能在皮下, 也可能在表皮, 或者在金属深处, 分布可能集中也可能分散。

金属液中氢的存在是压铸件产生针孔的主要原因。尽管金属液在浇注前进行了净化处理, 但仍会有残留氢气随金属液进入压室, 由于氢气是溶解在金属中, 当金属液激冷迅速凝固时, 氢气便来不及排出而留在金属中形成针孔。针孔往往在皮下, 数量多且孔径小, 又因为压铸件是在高压下结晶凝固, 气孔也往往被压缩变得很小, 以至有时候难以分辨出是气孔还是针孔。

型腔中气体的存在会使型腔中的温度不致急剧下降。金属液流经充满气体的型腔时, 气孔成为金属液与型壁之间的隔热层, 有利于减缓金属液向型壁的热传导过程, 从而起到保温作用。

排气的概念并非指将气体彻底排除, 仅仅是指将气体排除到最小限度, 以降低压铸件缺陷, 最大限度地使金属材料机械性能充分利用。排气是个实践性很强的问题, 它本身产生于压铸件的生产实际, 也在长期的压铸生产中得到改善。

压室充满度对压铸件气孔影响较大, 压室充满度是指每次浇注金属液的总量占压室容积的百分数。压室充满度一般在 50%以上, 以 60%-70%为宜, 最低不得少于 40%。充满度越大, 压室中气体越少。当充满度小于 50%时, 则压室中的气体就多于型腔中以及浇道中的气体之和。无论大小挤压铸件, 在压室中的卷气现象都相同。

在挤压中, 机械卷入的气体是造成压铸件形成气孔缺陷的最主要原因。气体的卷入与金属液的充填速度有关。在慢速充填阶段, 充填速度过低或过高, 都会导致卷入气体形成气孔。在快速充型阶段, 金属液沿其充填路线的充填速度急剧下降是造成金属最终充填部位形成气孔、缩孔的主要原因。实验证明: 在内浇道附近金属液的充填速度为 14m/s, 而在最终充填部位为 2-3m/s; 同时型腔内的气体压力也从 0.01-0.02Mpa 沿充填路线上升, 在最终充填部位达到 0.1-0.2Mpa。降低最终充填部位的气体压力可提高该部位的充填速度, 从而达到消除气孔的目的。

5.2.3 半固态液态挤压气孔产生的原因

(1) 夹渣与皮下气孔

如果钢液质量不高,含渣过多,浇注前渣的清除又不彻底,那么在挤压中,渣有可能上浮至制件顶端,施压后就残留在制件表面内,形成表面夹渣;如果渣来不及上浮,就已经合模和施压,结果渣被包裹在制件内,形成内部夹渣。

皮下气孔也是在加工轴箱体过程中遇到的现象。如上图 5-7 轴箱体的底部,主要原因是涂料涂刷不当,厚薄不一,烘烤不干、不透。积聚涂料多的地方,涂料的载体靠模温来不及完全燃尽或挥发尽,一旦与浇注入模的钢液接触,便发生剧烈的氧化反应,这时如果施压操作已进行,氧化反应生成的气体来不及排出,就以气泡形式残留在表皮内,形成皮下气孔。解决办法是提高模具温度,以及严格按喷涂工艺进行喷涂,烘烤。喷涂涂料之前应仔细清理模具的工作表面,除去旧料、锈蚀及粘附的金属毛刺。

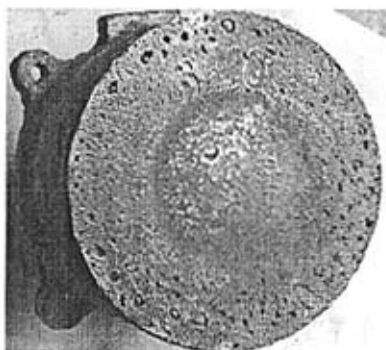


图 5-7 底部有气泡的轴箱体
Fig.5-7 The cast with gas cavity at bottom

夹渣的出现主要是由于半固态浆料制备时渣没有除净,充型时涂料剥落等所引起。其预防措施有:浆料制备时认真造渣、去渣,浇注前将浆料上部的浮渣彻底刮清;合理选用涂料,并注意涂料的喷涂工艺。皮下气孔的形成主要是由模具温度较低,涂料残留水分过多且喷涂不均匀所致。浆料注入型腔后,涂料中的残留水分在浆料高温作用下蒸发、分解而释放出气体,此时由于受到浆料凝固硬壳的阻碍,气体来不及排出,便以气孔的形式残留在表皮内^[54]。它可通过提高模具温度,减少涂料残留水分,均匀喷敷涂料、彻底烘烤等措施来预防。

(2) 工件内部气孔产生的原因

工件的气孔按存在形式的不同可分为:析出性气孔,反应性气孔和侵入性气孔。内部集中性气孔是溶解在浆料中的气体随着浆料温度的下降,溶解度降低而析出,因未能及时上浮至浆料顶面而被裹在浆料中所形成。侵入性气孔是在机械

压力作用下,无法排出的气体被压入制件内所形成。皮下针孔的形成见 5.2.3.1 的分析。

在半固态液态挤压时,型腔内的合金快速冷却(冷却速度 $100^{\circ}\text{C}/\text{s}$),因此铸件的凝固时间极短。其中保压时间大于液态成型时的凝固时间 8.03 s ,此凝固时间由式 5-2 计算:

$$t_n = \frac{1}{K^2} \left(\frac{V}{S} \right)^2 = \frac{M^2}{K^2} \quad [74] \quad \dots (5-2)$$

式中, t_n 为液态成型时的凝固时间, K 为凝固系数, $\text{cm} \cdot \text{min}^{1/2}$; V 为零件的体积, m^3 ; S 为零件的散热面积, m^2 ; M 为零件的折算厚度, cm 。

在如此短的时间内,溶解在金属中的气体根本来不及析出,所以工件内不可能产生析出性气孔。此外,由于工件的表层迅速凝固,工件内也难以形成反应性气孔。所以可以肯定工件内的气孔为卷入性气体所造成。

由于在本试验的压射速度条件下,合金的充型速度一般均大于 40m/s ,即使在半固态压铸时,压铸合金也完全可能形成弥散的充填型腔状态。在这种状态下,型腔内充型的压铸合金的前流不断冲击型壁,并弥散地与型腔内气体混合,然后贴附在型壁上凝固,形成压铸件的表面层,而后流入型腔的压铸合金一边充填已凝固的压铸件表面层内的空腔,一边沉积在已凝固的合金层 L 凝固。由于高速液流的强烈冲刷,此时凝固的金属层内不宜存在较大气泡,较大气泡容易存在于充型以后,压铸金属停流后尚处于未完全凝固的金属层内,即压铸件的厚壁中心。此外由于压铸件的表层是由与气体弥散混合的金属凝固而成,其中不可能存在大气孔,一般气孔的体积极小,肉眼难发现。所以压铸件的表面薄层内不会出现大气孔,而且即使在压铸件的表面薄层区的较深处的气孔,其中的气体含量也极少,故皮下气孔极浅、极小。

根据实际情况分析,这些气孔的形成与下列因素有密切关系:①模锻速度太高,导致浆料紊流充填,卷入气体;②半固态浆料制备时,除气不彻底;③模具温度过低、模锻比压过小,气体在浆料中的溶解因饱和而析出。④模具排气系统设置不合理,冲头加压时,型腔凹陷部位包裹的气体无法排出,当这些气体产生的压力 P 气达到浸入形成条件 $P_{\text{气}} > P_{\text{阻}} + P_{\text{静}} + P_{\text{表}}$ ($P_{\text{阻}}$ 为气体进入浆料的阻力, $P_{\text{静}}$ 为浆料的静压力, $P_{\text{表}}$ 为浆料表面张力) 时,便浸入浆料^[75]。⑤涂料用量太多且残留水分过多。因此,在实际操作中,可通过合理控制模锻速度;在浆料制备过程中安排除气工艺;适当增加模锻比压;在模具相应部位开设排气槽;涂料的烘干要彻底等措施来消除气孔缺陷的产生。

5.3 裂纹

裂纹是加工轴箱体过程中另一个突出的缺陷。如剖析下图所示处的裂纹形成过程,认为是由于开模后,拔出冲头时,冲头要克服轴箱体与冲头的热粘合,克服由于轴箱体加压时热收缩对冲头产生的包紧力,就会在表面产生较大的摩擦。因此,会产生很大拉应力,即增加热应力。起初是采取工艺措施的办法,如减小保压时间,从6s减到2s,发现裂纹稍微减轻一些,但还是不明显。于是,又采取更换冲头涂料的办法,将铅瑛粉与水和水玻璃配制的耐热涂料换成石墨和机油配制的润滑涂料,结果发现其大有改善,但还是没有完全消除。如图5-9(a)所示。最后,将焦点落在了冲头上,冲头没有拔模斜度是最大可能的原因。在随后将冲头增加了拔模斜度后,再加工轴箱体的制件图如下图5-9(b),裂纹已完全消失。

工件表面裂纹一般出现在壁厚突变部位或过渡圆角处,如图5-9(a)所示。其产生的原因有:①模具温度过低,附着在型腔内侧的半固态浆料迅速结壳,浆料冷却凝固时产生的收缩应力全部由金属壳来承担,当此收缩应力大于金属壳的极限强度后,金属壳便发生开裂;②保压时间过长,制件薄壁处的冷却收缩受到限制而被拉裂;③制件的过渡圆角较小,浆料凝固时在该处产生过大的应力集中。④冲头拔模斜度的大小,即脱模力。

根据以上分析,可采取以下预防措施:严格控制模具温度,合理选择保压时间,适当增大制件过渡圆角和冲头的拔模斜度等。

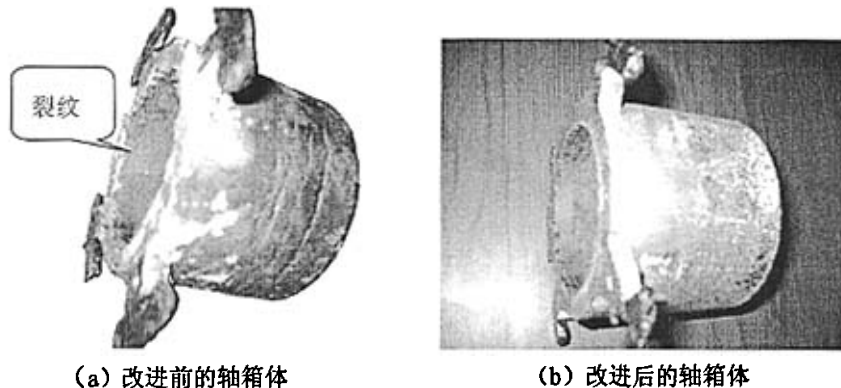


图 5-9 改进前后的轴箱体

Fig.5-9 The axle box body casts before and after process parameters are changed

5.4 本章小结

(1) 在半固态流变挤压过程种,影响工表面件质量的工艺参数主要有:浇注温度、模锻比压、模锻速度、模具温度、涂料、保压时间。

(2) 当半固态流变挤压工艺参数选用不合理时, 制件可能出现的缺陷有: 皱褶、型腔充填不满、裂纹、皮下针孔、气孔、缩孔、缩松、。

(3) 由于半固态浆料的特性, 在成型时易产生皱褶缺陷。半固态挤压工艺参数中的模具预热温度、比压是影响零件表面缺陷的关键因素。在模具温度偏低、比压不足等不合理工艺参数下, 零件会产生表面粗糙、皱褶等缺陷。

(4) 预防制件缺陷的主要措施有: 一是控制好半固态流变挤压工艺各参数; 二是模具成型工艺设计要合理。

6 结论

本文首先针对提高机车零件的性能和可靠性的需求，通过对车辆用 C 级钢半固态制浆研究，得出电磁搅拌法制备 C 级钢半固态浆料的最佳工艺参数。应用经过非标设计的双动专用液压机作为成型设备，研究了液态挤压铸造工艺下 C 级钢半固态的充型能力和成型性。通过半固态成型工艺研究，找出成型工艺对铸件表面质量的影响。试验表明半固态挤压成型工艺可以获得形状完整、轮廓清晰、表面光洁的 C 级钢零件，验证了半固态成型工艺的优越性，为半固态成型工艺在车辆用 C 级钢领域的应用奠定了一定基础。本文的一系列研究成果可总结如下：

1) 研究电磁搅拌法制备 C 级钢半固态浆料得出：

①影响浆料组织颗粒大小的重要因素按主次为搅拌时间，搅拌功率（或者说电压），最后为电源频率。

②要获得颗粒细小、圆整、均匀的组织，通过本试验确定了一组最优的半固态制浆工艺参数组合是电源频率 30Hz，电压 200V，搅拌时间 3min。

2) 在挤压铸造工艺下，充型压力越大，充型速度越大，模具预热温度越高，C 级钢半固态浆料的充型能力越好。在正常挤压铸造工艺条件下，半固态的最大充填长度为 393 mm，平均充填长度为 292.3 mm，高于砂型铸造的 200 mm，故半固态挤压铸造适用于那些结构上符合挤压铸造工艺，形状复杂程度大于或等于砂型铸造的铸钢件。

3) 在半固态流变挤压过程中，影响成型的工艺参数主要有：浇注温度、模锻比压、模锻速度、保压时间、模具温度。在模具预热温度 400~425℃，比压 110~120MPa，充型速度 40mm/s，保压时间 6s 时，可以获得形状完整、轮廓清晰、表面光洁的 C 级钢轴箱零件。

4) 当半固态流变挤压工艺参数选用不合理时，制件可能出现的缺陷有：皱褶、型腔充填不满、裂纹、皮下针孔、气孔。预防制件缺陷的主要措施有：一是控制好半固态流变挤压工艺各参数；二是模具成型工艺设计要合理。

5) 钢铁材料的半固态成型有其技术可行性和经济可行性，但仍有尚未克服的难点，如钢铁材料的流变浆料制备、流变充型能力及成型工艺等。

参考文献

- [1] Spener D B, Mehrabian R, Flemings M C. Rheological behaviour of Sn-15Pb in the crystallization range. *Metallurgical Transactions*, 1972, 3: 1925-1932
- [2] 罗守靖, 何绍元, 王尔德, 等. 钢质液态模锻. 哈尔滨工业出版社, 1990.
- [3] 罗守靖, 蒋鹏. 国外半固态加工的一些工业应用情况[A] 期刊 第一届半固态金属加工研讨会论文集[C]. 北京: 2000. 28-32
- [4] 岗野忍. 半凝固加工プロセス研究开发き终ろうて[J]. 铁钢界, 1994, 44 (12): 44-50
- [5] 市川洸. Present status of rheocast process [J]. 铁ケ钢, 1988, 74: 51-60
- [6] Molenaar J M M, Salemans F W H C, Katgerman L. Analysis of process limits for continuous thixotropic slurry casting[J]. *J Mater Sci*, 1985,20: 700-709
- [7] Clarser G L, Ravaioli A, Ciselli F. Advancing the frontier of aluminium technology: the multilink project[A]. The 4th Int Coat on Semi-solid Processing of Alloys and Composites[C]. England: 1996, 234-238
- [8] Sehini R. Mass production of fuel rails by pressure die casting in the semi-liquid state[A]. The 4th Int Coat on Semi-solid Processing of Alloys and Composites[C]. England: 1996, 248-250
- [9] Young K P. Recent advances in semi-solid metal (SSM) cast aluminium and magnesium components [A]. 4th Int Coat on Semi-solid Processing of Alloys and Composites[C]. England: 1996, 229-223
- [10] W Yunhua, G Zhiqiang, and Z Mingfang, et al. The effects of previous deformation and the isothermal temperature in semi-solid state on the thixotropic microstructure. In: Bhasin A K, Moore J J, Young K P, et al. Proc. 5th International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloy and Composites, USA, Colorado School of Mines, Golden, CO, 1998, 693-698
- [11] 朱鸣芳, 苏华钦. ZA12颗粒组织的形式及枝晶形态的演变. 东南大学学报. 1996, 26 (2): 1-6
- [12] 朱鸣芳, 苏华钦. 半固态等温处理制备粒状组织ZA12合金的研究. 铸造, 1996, (4): 1-5
- [13] 朱鸣芳, 王俊, 张敏等. Zn-20%Al合金的半固态压缩形变特性研究. 东南大学学报. 1993, 23 (5): 63-70
- [14] 朱鸣芳, 张力宁, 王仕勤等. 部分凝固和常规铸造Zn-20%Al合金的固态压缩形变特性的比较. 机械工程材料, 1993, 17(2): 32-35
- [15] Xia K, Tausing G. Liquidus casting of a wrought aluminum alloy 2618 for thixoforming. *Materials Science and Engineering*. 1998, A246: 1-10
- [16] Tausing, Xia K. Thixoforming of a liquidus cast aluminum alloy. Proc. 5th International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloy and Composites, USA, Colorado School of Mines, Golden, CO, 1998, 473-480
- [17] Flemings M C. Behavior of metal-alloys in the semisolid state. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22 (5): 957-981
- [18] 谢水生, 黄声宏. 半固态金属加工技术及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1999
- [19] Flemings M C, Riek R G, Young K P. Rheocasting. *Mater. Sci. Eng.*, 1976, 25: 103-117
- [20] 毛卫民. 半固态金属成型技术. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [21] 邢书明, 谭建波, 张励忠, 等. 半固态成型技术的概念体系和理论框架. 特种铸造及有色

- 合金前言技术论坛论文集, 2003
- [22] 邢书明, 无柱状晶连铸技术——半固态连铸[J], 特种铸造与有色合金, 2002, 增刊
- [23] 唐靖林, 曾大本. 半固态加工技术的发展和现状. 兵器材料科学与工程, 1998, 21(3): 56-58
- [24] Loue W R, Suery M, Querbes J L. Microstructure and rheology of partially remelted AlSi-alloys[J]. Proc 2 Int Conf Proc Semi Solid Alloys Compos, 1993. 266-275
- [25] Ghosh D, Fan R, VanSchilt C. Thixotropic Properties of Semi-solid Magnesium Alloys AZ91D and AM50 [J]. Recent Development in Light Metals. Toronto, Canada, 1994. 377-386
- [26] Chen Xiaoyang, Mao Weimin, Zhong Xueyou. Rheological properties of semisolid Al-Si alloy in solid-liquid zone[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 1997, 7(4): 30-33
- [27] Sannes S, Gjestland H, Arnberg L. Thixotropic Magnesium Alloys[J]. Proceedings of the 2nd International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites. Cambridge: MA, USA, 1993. 76-85
- [28] 张励忠, 何书华, 邢书明等. 钢铁材料半固态流变成型工艺参数设计. 特种铸造及有色合金, 2003 增刊: 291-293
- [29] Flemings M C, Young K P, Riek R G. Thixocasting of steel [A]. Proc of the 9th SDCE International Die casting Exposition & Congress [C]. Milwaukee, WI, USA: SDCE (Soc of Die Cast Eng), 1977. G-T77-092
- [30] Kapranos P, Kirkwood D H, Sellars C M. Semi-solid processing of tool steel [A]. Proceedings of the 3rd European Conference on Advanced Materials and Processes Part 2 (of 3) [C]. Paris: Editions de Physique, 1993. 835-840
- [31] Kapranos P, Kirkwood D H, Sellars C M. Semi-solid forging of high temperature alloys [A]. Proc 2nd Int Conf Proc Semi Solid Alloys Compos [C]. Cambridge, MA, USA: Minerals, Metals & Materials Soc (TMS), 1993. 119-129
- [32] Meuser H, Bleck W. Microstructural investigations in the semi-solid state of the steel X210CrW12 [J]. Steel Research, 2001, 72(7): 271-276
- [33] Bramann H, Fehlbier M, Sahm P R, et al. Casting of a cold work steel alloy in semi-solid state [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156(1-3): 1357-1364
- [34] Mao Wei-min, Zhao Ai-min, Yun Dong, et al. Slurry preparation and rolling of semi-solid 60Si2Mn spring steel [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2003, 19(11): 613-616
- [35] Mao Wei-min, Zhao Ai-min, Yun Dong, et al. Semi-solid slurry preparation and rolling of 1Cr18Ni9Ti stainless steel [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral Metallurgy Materials, 2003, 10(11): 35-39.
- [36] Fleming M C. Behavior of Alloy in the Semi-solid State [J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22A(5): 957-981
- [37] Young K P, Riek R G, Flemings M C. Structure and properties of thixocast steels. Metals Technology, 1979, 6(4): 130~137
- [38] Blazek K B, Kelly J E. The improvement of surface quality of continuous rheocast bars of steel and high melting point alloys. ISJJ International, 1997, 37(4): 365~374
- [39] Kapranos P, Kirkwood D H, Sellars C M. Thixoforming high melting point alloys into

- non-metallic dies. In: Kirdwood D H and Kapranos P. Proc. of the 4th Int. Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, University of Sheffield, England, June 19-21, 1996. UK: Department of Engineering Materials, University of Sheffield, 1996. 306-311
- [40] 潘险峰.铁基半固态合金的研究. 中国科学院博士学位论文, 2001. 6.
- [41] Kiuchi M, Sugiyama S. Characterization of semi-solid alloys made by SCR-process. In: Kirdwood D H and Kapranos P. Proc. of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, University of Sheffield. England. 1996.19-21. UK: Department of Engineering Materials, University of Sheffield, 1996. 197-201
- [42] Tsujikawa M, Tanaka K, Ushigome C, et al. Semi-solid alloy slurries with fine solid particles by powder compaction method. In: Kirdwood D H and Kapranos P. Proc. of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, University of Sheffield. England. 1996. 19-21. UK: Department of Engineering Materials, University of Sheffield, 1996. 165-168
- [43] Mohamed Ramadan, Hiroyuki Nomura, Mitsuharu Takita. Semi-solid processing of thin section gray cast iron in sand mold. Proc. of the 8th Int. Conf. on Semi-Solid Processing Conference of Alloys and Composites, University of Cyprus (Cyprus) and Worcester Polytechnic Institute (WPI) – USA, Paper18-1
- [44] Toshio Hags, Shinsuke Suzuki. Production of aluminum alloy ingots for Thixforming by the semi-solid casting using a cooling slope. In: Proc. 6th Inter. Conf. on semi-solid Processing of Alloys and Composites, Torino Italy, Sept. 2000: 735-740
- [45] Toshio Haga, Shinsuke Suzuki. Semi-solid strip casting of aluminum alloy using a melt Drag twin roll caster equipment with a cooling slope. In: Proc. 6th Inter. Conf. on semi-solid Processing of Alloys and Composites, Torino Italy, Sept. ,2000: 23-28
- [46] 蔡卫华, 杨湘杰, 郭洪民等.斜管法流变制浆设备工艺参数的研究南昌大学学报 (工科版), 2003, 25(3): 13-17
- [47] 焦殿辉.高碳工具钢半固态成型的研究. 北京科技大学硕士论文, 2004
- [48] 邢书明, 铝合金半固态连铸技术与理论研究, 清华大学博士后研究报告, 2001年6月
- [49] Liu Y. Q., Fan Z., Patel J., Thermodynamic approach to aluminum alloy design for semisolid metal processing, Proceedings of the 7th S2P, Sept. 23-29, 2002: 599,
- [50] 毛卫民.非枝晶 AlSiMg 合金半固态坯料组织形成规律及成型研究. 博士论文, 北京科技大学, 1999: 55
- [51] 邢书明.铝合金半固态连铸技术与理论. 博士后研究报告, 清华大学, 2001: 61-65
- [52] 谢水生, 潘洪平, 丁志勇. 半固态金属加工技术研究现状与应用. 塑性工程学报, 2002, 9(2): 1-11
- [53] 何书华, 张励忠等. 半固态流变成型模具失效与选材. 特种铸造及有色合金. 2004, 2: 33-35
- [54] 赵爱民, 毛卫民, 张乐平, 等. 1Cr18Ni9Ti 的流变浆料制备和直接轧制实验. 特种铸造及有色合金, 2001, (5): 3-6
- [55] Mao WM, Zhao AM, Yun D, et al. Slurry preparation and rolling of semi-solid 60Si2Mn spring steel. J Mater Sci & Technol, 2003, 19(6): 613-616
- [56] 杨卯生, 赵爱民, 毛卫民, 等. 60Si2Mn 钢半固态初生相形成与演化机制. 金属学报, 2002, 38(7): 689-693
- [57] Ghosh D, Fan R, VanSchilt C. Thixotropic Properties of Semi-solid Magnesium Alloys AZ91D

- and AM50 [J]. Recent Development in Light Metals. Toronto, Canada, 1994. 377-386
- [58] Chen xiaoyang, Mao weimin, Zhong xueyou. Rheological properties of semisolid Al-Si alloy in solid-liquid zone[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 1997, 7(4): 30-33
- [59] Sannes S, Gjestland H, Arnberg L. Thixotropic Magnesium Alloys[J]. Proceedings of the 2nd International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites. Cambridge: MA, USA, 1993. 76-85
- [60] Spitzer K H, Dubke M and Schwerdtfeger K. Rotational electromagnetic stirring in continuous casting of round strands. Metallurgical Transactions B, 1986, 17B (3): 119-131
- [61] Editor. Gearing up for GIFA. Diecasting World, 1999, (3): 9-13
- [62] Nussbaum AL. Semi-solid forming of aluminum and magnesium. Light Metal Age, 1996, (6): 6-22
- [63] Staf of Alumax Engineered Metal Process, Inc. Semi-solid forging at Alumax. Light Metal Age, 1994, (10): 32-34
- [64] Decker R. Semi-solid metalcasting gains acceptance, applications. Foundry Management & Technology, 1995(11): 23-26
- [65] Young K and Salzmann R. Buhler's US casting center on stream. Diecasting World, 1997(10): 116-118
- [66] Staf of Buhler Druckguss A G. Correction porosity using the diecasting machine Diecasting World, 1999(3): 26-29
- [67] 邢书明一种半固态挤压铸造机. 专利申请号: 992434661
- [68] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid State[J]. Metall. Trans, 1991 22B: 269-293
- [69] 邢书明, 马静, 陈维视. 挤压铸造的无缩松判据[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8 (1): 205-209
- [70] 田福祥, 王名涌. 模块挤压铸造新工艺[J]. 中国铸造装备与技术, 2004, 231 (3): 32-36
- [71] 安阁英主编. 铸件形成理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 17-18
- [72] 邢书明, 张励忠, 张国华. 白口铸铁磨球半固态挤压铸造工艺参数设计[J]. 铸造, 2002, 51 (7): 431-433
- [73] 黄险峰. 金属及合金挤压铸造的凝固特征[J]. 中国铸造装备与技术, 1997(4): 18-19
- [74] 陈玉喜, 侯英玮, 陈美玲. 材料成型原理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002
- [75] 叶四友, 周述积, 何汉军. 4Cr5MoSiV 钢挤压铸造模锻质量的研究[J]. 铸造设备研究, 2002, (2): 7-11

作者简历

刘金香，1990年7月毕业于河北工业大学铸造专业，2002.06-2004.08 北京交通大学全脱产进修研究生。1990年7月大学毕业后分配到中国南车集团石家庄车辆厂工作，主要从事铸铁、球墨铸铁、铸钢工艺设计工作，独立完成外委产品的开发，主持摇枕、侧架大部件的开发，2002年12月被评聘为高级工程师。现在中铁六局集团电务工程有限公司工作。

攻读硕士学位期间发表的论文：

- 1) 《大型厚壁球墨铸铁件的无冒口铸造》，《热加工工艺》，2004年5期；
- 2) 《半固态原料质量与产品性能的控制》，《铁道机车车辆》，2004年24卷3期；
- 3) 《电磁搅拌法制备钢铁材料半固态浆料的问题与对策》，《铸造》，2004年53卷8期；
- 4) 《半固态金属流变成形模具失效与选材》，《特种铸造及有色合金》，2004年2期。

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

学位论文作者签名：刘金香

导师签名：王

签字日期：2006年11月26日

签字日期：2006年11月26日

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：孙会莉 签字日期：2006 年 11 月 26 日