

大型钢铁件液态模锻技术研究与应用

邢书明¹, 吴征天^{1, 2}, 石洪伟³

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 北京汽车研究总院有限公司, 北京 101300;
3. 广州和德轻量化成型技术有限公司, 广东广州 511340)

摘要: 首先提出了大型钢铁件液态模锻的三个技术关键——定量浇注、模具选材及寿命和液态模锻装备, 给出了突破这三个技术关键的技术路径; 随后介绍了大型衬板、大型轮盘件及大型双金属复合钢铁件液态模锻的工艺要点、液锻机特点、关键工艺参数及其技术经济效果。结果表明, 称重式自动定量浇注机(车)是钢铁件液态模锻定量浇注的最优选择, 自动调节流量的冷却水控制系统和金属型铸钢涂料的使用可以有效调控模具温度, 移出工作台的立式多向液态模锻机是大型钢铁件液态模锻的最适宜机型。液态模锻大型钢铁件具有工艺出品率高、组织致密、综合性能优异的突出优势, 在耐磨零件、难锻造零件及双金属复合件方面应用前景广阔。

关键词: 钢铁零件; 液态模锻; 挤压铸造; 工艺装备; 应用

中图分类号: TG146.2; TG142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0252-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0035

Research and Application of Melted Metal Die Forging Technology for Large-Scale Steel and Iron Components

XING Shu-ming¹, WU Zheng-tian^{1, 2}, SHI Hong-wei³

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Automotive Technology Center, Beijing 101300, China; 3. Guangzhou Hede Light-Weight Forming Technologies Co., Ltd., Guangzhou 511340, Guangdong, China)

Abstract: First, three key technologies for melted metal die forging (MMDF) of large steel and iron components are proposed, including quantitative pouring, mold material selection and service life, and MMDF equipment, and technical approaches to break through these three key technologies are presented. Subsequently, the process essentials, characteristics of MMDF machines, key process parameters, and technical-economic effects of MMDF for large liners, large wheel discs, and large bimetallic composite steel and iron components are introduced. The results show that the weighing-type automatic quantitative pouring machine (cart) is the optimal choice for quantitative pouring in MMDF of steel components. The use of a cooling water control system with automatic flow regulation and metal mold cast steel coatings can effectively control the mold temperature. The vertical multi-directional MMDF machine with a removable worktable is the most suitable model for MMDF of large steel and iron components. MMDF of large steel and iron components exhibits prominent advantages such as high process yield, dense structure, and excellent comprehensive performance, and has broad application prospects in wear-resistant parts, difficult-to-forge parts, and bimetallic composite parts.

Key words: steel and iron parts; melted metal die forging; squeeze casting; process equipment; application

液态模锻, 也称挤压铸造, 是通过在熔融态的金属施加一定压力进行充型、补缩和压力结晶的一种金属零件成形技术。它比传统的压铸技术适用范围更宽, 不仅可以进行铝合金、镁合金、锌合金、铜合金等较低熔点有色合金件的精密成形, 也能实现钢铁零件的短流程高性能成形^[1-3]。但是, 因熔融态的钢铁材料温度高达上千摄氏度, 钢铁材料的液态模锻在定量

浇注、加压补缩、模具以及加压设备等方面都有其独特的要求, 现有的液态模锻模具和装备都难以满足要求, 其试验研究和应用开发难度大、风险高。目前, 试验研究主要集中在哈尔滨工业大学、北京交通大学、湖北汽车工业学院等院校^[4-6], 生产应用则主要是替代传统砂型铸造生产耐磨材料零件、汽车零件、不锈钢阀门等。为了促进液态模锻技术在钢铁零件高性

基金项目: 广州增城区创新领军团队计划项目(202202001)。

收稿日期: 2025-12-01 收到初稿, 2026-01-04 收到修订稿。

作者简介: 邢书明(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为金属材料先进成形技术与装备。电话: 13641156691, E-mail: smxing@bjtu.edu.cn

引用格式: 邢书明, 吴征天, 石洪伟. 大型钢铁件液态模锻技术研究与应用[J]. 铸造, 2026, 75(3): 252-257.

XING Shuming, WU Zhengtian, SHI Hongwei. Research and application of melted metal die forging technology for large-scale steel and iron components [J]. Foundry, 2026, 75(3): 252-257.

能成形制造中的应用,本文首先介绍了大型钢铁零件液态模锻中的关键技术和可行的解决方案,并以大型衬板、轮盘件和双金属复合件三大类典型零件为例,介绍了大型钢铁工件液态模锻的工艺特点、技术经济效果及应用前景。

1 大型钢铁件液态模锻的三个技术关键

所谓“大型钢铁件”是相对于早期液态模锻件而言的,单重50 kg以上或轮廓尺寸大于300 mm的钢铁件,其液态模锻成形难度就很大了。限制大型钢铁件液态模锻技术应用的三个技术关键:一是定量浇注,即如何将熔融态的钢铁材料准确定量,并顺利浇入到模具的设定位置;二是模具寿命,即如何确保模具在承受高达上千度的高温和近千个大气压的高压条件下不损坏且寿命长,进而降低模具费在单件产品成本中的占比;三是液锻设备,现有的商业化液态模锻机组只适用于有色金属,如何设计与获得适用于钢铁件液态模锻的装备是钢铁零件液态模锻的又一个卡脖子问题。

1.1 大型钢铁件液态模锻的定量浇注

液态模锻与传统铸造和锻造技术相比的主要优势之一就是工艺出品率高。重力铸造钢件的工艺出品率一般只有40%~60%,而液态模锻钢件的工艺出品率可达90%~95%。要真正发挥出这一优势,首先要求定量浇注,即根据工艺要求将设定重量的熔融态钢料浇入型腔或料筒中。由于钢液温度高,在钢包内降温快,为了确保能顺利浇注,一般要求出钢温度高于其液相线温度80~100℃,即出钢温度1 650~1 700℃。因此,钢铁零件液态模锻生产线配置的熔炼设备通常都是中频感应电炉^[2-3],其定量浇注的过程包括定量出钢、保温转移和定量浇注三个环节。

定量出钢:熔炼合格的钢液从中频感应电炉转入模具的过程不能像有色金属那样采用具有定量功能的给料机和料勺舀取,而是要首先通过中频炉倾转、定量倒入采用耐火材料制成的浇包内,这个过程称为定量出钢。定量的方法主要有浇包称重法和炉内称重法两种。炉内称重法是在感应炉的支撑座下方安装称重传感器,采用减重法定量反转出钢,也可以采用倾转角控制出钢量^[7]。这种定量方法需要配合炉体翻转机构的精确控制,定量误差可以控制在5%~10%以内;浇包称重法则是通过带有弹簧秤的吊具称重定量,或者使用在浇包底部安装称重传感器的浇注车进行定量承接

钢液。浇包称重法的定量精度会受出钢液流的冲击作用影响,但精度比炉体倾转定量准确,一般定量误差可以控制在3%~5%以内。目前,大量使用的就是浇包称重的定量出钢方法。

保温转移:盛有定量钢液的浇包需要快速转移到液锻机旁才能浇注。转移的方法与定量出钢相对应,有浇注小车和天车吊运两种。浇注小车转移是刚性支撑运动,在开始和停止环节的加速度较大,容易因钢液的大幅度晃动,造成浇包挂钢,增大定量浇注的误差;天车吊运属于柔性自平衡运动,运动比较平稳,钢液晃动小,但定位困难,导致转运时间延长,降温较大,通常需要辅助人工定位。无论哪种转移方法,都要求钢液包具有良好的保温性能,减小转移过程的温降。钢液在浇包内的降温与钢液量、钢包的烘烤温度及表面覆盖物有关,1 650℃钢液在1 t钢包内的降温速度约为4~6℃/min,而在500 kg的钢液包内的降温速度则可达10~30℃/min。所以,液态模锻钢件用的钢液包包壁和包底都采用铝镁刚玉砖,并在钢液表面加覆盖剂,可以使降温速度比用镁碳砖降低50%^[8]。

定量浇注:盛有定量钢液的浇包到达浇注位后,应尽快浇入压室或储料桶内。这里的定量实际上是采用减重法定量。即根据浇注剩余钢液的量来定量,这种定量的准确性受浇包翻转或塞杆启闭动作的灵敏度影响。比较有效的方法是在定量出钢定量比较准确的前提下,进行无剩钢的完全浇注来实现定量浇注。这就要求钢液转移过程不能有钢液的损耗或粘包。因此,钢铁件液态模锻用的浇包必须具有良好的保温性能,确保转移和浇注过程不粘包。

1.2 模具选材与寿命

模具是液态模锻必不可少的工装,在钢铁件液态模锻中,模具材料、模具寿命以及模具费用在成本中的摊销是其推广应用三个最为关心的问题。

液态模锻是一个高温高压的材料成形过程,无论哪种材料液态模锻,对模具都有三个基本的要求:

- (1) 具有高的红硬性或高温稳定性,即高温条件下依然具有高的硬度、强度,而保持其形状和尺寸不发生变化,这是保证模具能正常工作的前提;
- (2) 具有良好的抗热疲劳破坏能力,即在反复的冷热循环条件下不发生开裂和剥落的能力,这是模具长寿命的前提;
- (3) 具有良好的性价比,即模具寿命期内单件产品成本中模具费用的摊销要低,这是液锻件是否有市场竞争力的重要方面。

目前还没有同时满足这三个基本要求、适用于钢铁件液态模锻的模具材料。钢铁件液态模锻的模具必

须配合耐高温的涂料方能正常工作^[9], 否则, 即使是最优质 (当然也最为昂贵) 的高温合金同样寿命很低。这里的耐高温涂料就是各种金属型铸钢件的涂料, 如宝钢钢锭模涂料BJ-1和BJ-2, PBT-1 型钢锭模涂料、巴德士集团钢模块水漆、北京交大的钢质液态模锻专用涂料^[10]。配合这些涂料的情况下, 常用的H13钢制造的模具就可以用来进行钢铁件的液态模锻, 使用寿命可达3 000~5 000模次。

必须说明的是, 因模套、模脚一类的结构件和连接件不与钢液接触, 其使用寿命很长。因此, 模具费用的摊销不是整套模具的费用摊销, 而只是模具消耗件 (如压头、压室、顶杆、模芯等) 与钢液接触的零件费用的摊销。一般来说, 根据型腔的复杂程度不同, 这些零件的费用占模具总费用的20%~50%。采用3D打印高温合金制造上述模具消耗件是提高模具寿命、降低模具费摊销的有效途径^[11]。

1.3 液锻装备

用于铝合金、镁合金和锌合金等较低熔点有色金属的液态模锻装备已经有比较完善的规格系列, 但這些设备的取料给料装置与中频感应电炉难以适配, 料筒倾出、压射系统以及电气液压元器件的热防护等都不能满足钢铁件液态模锻的需要, 所以大型钢铁件液态模锻的装备需要非标订制。

用于钢铁件液态模锻的装备主要包括浇注设备、液锻机、喷涂设备及取件装置。其中喷涂设备和取件设备可以选用铝合金液态模锻的标准设备, 只要增加必要的元器件热防护措施即可; 但浇注设备和液态模锻机需要根据液锻工艺、浇注量和工件结构特性进行非标订购。大型钢铁件液锻机优选移动工作台、明浇明压的立式液锻机, 如图1所示, 将下模 (定模) 移出液锻机后进行定量浇注, 浇注完毕迅速移入机内进行合模液锻^[12]。

浇注设备通常使用定量浇注机和耐火材料打结的钢液浇注包进行定量浇注, 采用称重式定量, 可以满足要求。但是, 浇包要求具有良好的保温性能, 防止降温过大而粘包。受操作空间的限制, 难以采用柱塞式浇包。

2 大型耐磨钢件的液态模锻案例

2.1 大型衬板液态模锻

大型衬板是各种大型磨床必需的抗磨备件, 其形状简单, 但尺寸和单重大, 锻造所需设备投资巨大, 几乎无法锻造; 普通砂型铸造缺陷难以避免, 加之铸

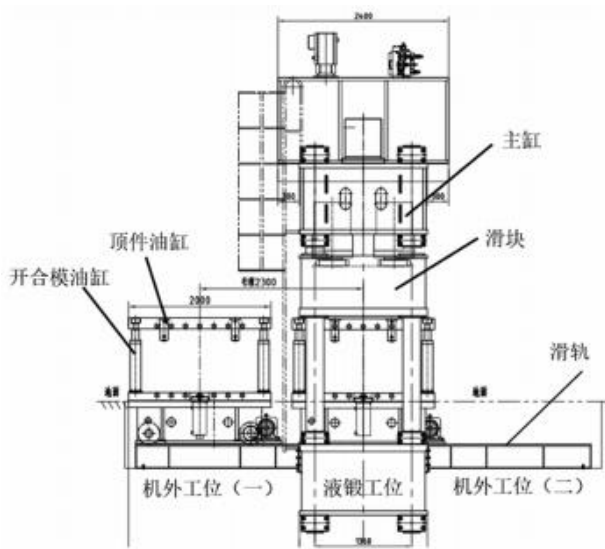


图1 大型钢件用立式液态模锻机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vertical MMDF machine for large steel components

造的“尺寸效应”和偏析现象, 其组织性能的一致性较差, 使用中断裂风险较高。液态模锻的高压凝固, 通过细化组织和提高致密度, 可使成形件综合力学性能和耐磨性显著高于砂型铸造件, 因此, 液态模锻是大型衬板成形制造最有效的替代技术。

早在2018年, 邢书明教授就指导研究生尚群超进行了液态模锻大型衬板的应用研究^[13]和试生产, 证明了其技术可行性。该件单重120 kg, 最大长度约800 mm, 最大厚度120 mm, 如图2所示。其量产条件下的工艺要点如下:

(a) 成形位置: 水平成形, 上下垂直分模;

(b) 浇注方式: 采用移动工作台或保温流槽, 进行机外浇注、机内加压液锻;

(c) 模具: 采用45钢模架、H13钢模芯, 配置模温机+水冷机, 进行模具预热、水冷、点冷和急冷镶块的模温调控;

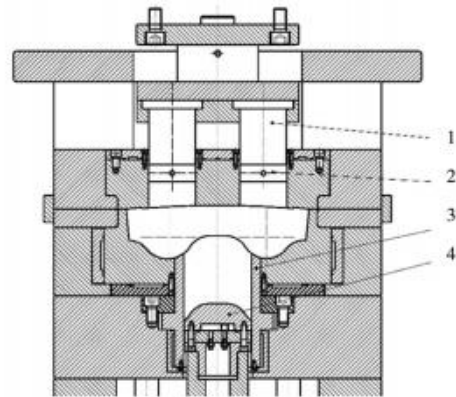
(d) 液锻机选型: 非标订制合肥海德数控液压机床有限公司生产的立式多功能液锻机。该机具有多向、多级、多点的加压功能, 可以实现主缸锁模、上下双向挤压和左右水平挤压补缩。

(e) 主要工艺参数: 液锻比压根据衬板厚度在50~120 MPa选取, 模温220~260 °C, 浇注温度1 600~1 650 °C, 保压时间根据衬板壁厚在3.5~5 min范围内选取。

采用液态模锻生产的衬板同样需要合理的热处理。采用锻后调质处理, 使用淬火液淬火, 调质后硬度控制在HRC41~43, 本体取样无缺口冲击韧度大于80 J/cm²。装机使用无开裂和破碎现象, 使用寿命比



(a) 衬板三维图



1. 压头连接杆 2. 补压压头 3. 压室 4. 充型压头

(b) 液锻模

图2 大型衬板液锻模具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the MMDF die for large liners

同材质砂型铸造衬板提高15%~20%，成本降低10%左右。综合技术经济效果满意。

2.2 大型轮盘液态模锻

轮盘件是一大类耐磨件，如轨道交通的制动盘、工程机械的四轮、重型车辆和特种车辆的轮毂、圆锥破碎机的扎破壁等，这些零件形状简单，但壁厚大，有很多减重孔、加强筋和吊装结构，锻造所需设备投资巨大，且加工费用高；这些零件目前主要是砂型铸造和低压铸造成形，但铸造缺陷难以避免，组织性能的一致性较差，服役过程异常破坏风险较高。大型轮盘类抗磨件和安全结构件是液态模锻的一个重要应用方向^[4]。如图3所示的大型球墨铸铁轮盘件，单重90 kg，直径500 mm。该件液态模锻的技术特点如下：

(1) 成形位置：一般均为水平成形，上下分模，盘面在下。因工件大，一般均为单腔、无冒口直接液锻，工艺出品率高达100%。

(2) 浇注方式：采用保温流槽进行机外浇注、机

内加压，若液锻机具有移动工作台功能，则可以将下模移出，在机外浇注后，移入机内，合模挤压成形。

(3) 模具：模架采用45钢，与钢液接触的零件采用H13钢，配置模温机+水冷机，进行模具预热、水冷、点冷和急冷镶块的模温调控。涂料为锆英粉铸钢涂料，厚度0.15~0.25 mm。对于上下轮缘阻碍脱模时，可以采用侧滑块或花瓣状凹模^[5]。

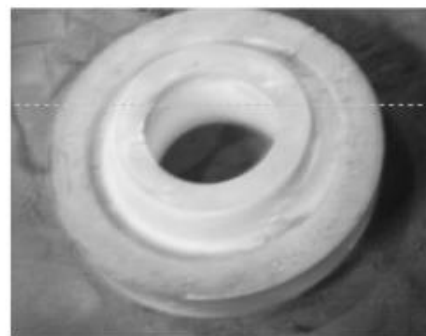
(4) 液锻机选型：非标订制立式框架型多功能液锻机。该机具有多向多级和上下对挤加压功能，并预留4~6路备用油路实现局部挤压或抽芯，主缸空载运动速度大于800 mm/s。

(5) 主要工艺参数：轮盘件的液锻比压较低，取30~80 MPa即可，模温220~260 ℃，浇注温度1 600~1 650 ℃，开始加压时间控制在5~8 s，保压时间根据壁厚大小取3~5 min。

采用液态模锻生产的大型链轮、齿轮以及轮盘，可以根据使用要求进行正火、退火、淬火和调质等各种热处理调节性能，代替锻件，综合技术经济效果



(a) 组合件



(b) 液态模锻出模的毛坯(红热状态)

图3 液态模锻大型轮盘件

Fig. 3 MMDF of large-sized disc components

很好。

2.3 大型双金属复合件液态模锻

双金属复合或梯度材料是复合材料制备与成形一体化的一个重要方向，特别是大型双金属复合件的制备，在矿山抗磨、电力、交通和化工等众多领域具有旺盛的需求。目前，这些零件的成形制备方法主要有固-固焊接复合、固-液铸造复合以及双液复合铸造三大类。其中，固-固焊接复合要求材料焊接性能较好，应用有限。固-液铸造复合则通常是塑性较好的金属为固态，另一种功能性金属材料为液态，通过恰当的浇注工艺，实现两者的牢固结合。常规重力铸造的双金属复合界面常因界面夹杂、气孔等缺陷，导致结合不良，使用中有早期脱落的风险。双液复合则是两种金属均为液态，通过一个隔流板进行同时浇注或者不用隔流板进行两种金属液的时差浇注，显然这种“时差”控制的工艺窗口很窄，推广应用的稳定性还有待提高。

液态模锻技术的推广应用为这类双金属复合件的生产提供了新途径。利用液态模锻既可以实现固-液复合，也可以实现双液复合。液态模锻的高压作用，可以使复合界面结合更加牢固、生产效率更高。这类零件液态模锻的技术特点如下：

(1) 复合和成形位置：一般选择固态金属在下或在外围，液态金属在上或在内，水平成形，上下分模。因工件大，一般均为单腔、无冒口凹凸模直接液锻或浇口、冒口和压室为一体的局部直接加压液锻。

(2) 浇注方式：采用保温流槽或给料机机内加压，也可以是将上下模闭合后移出，在机外浇注，然后移入机内，从浇口（即冒口、压室）挤压成形和补缩。

(3) 模具：这种复合件的模芯比较复杂，因预制固态件需要预热，其几何尺寸与模具的匹配是一个新的关键问题，需要恰当地考虑模具和预制件两种金属热胀特性的差异来设计间隙。

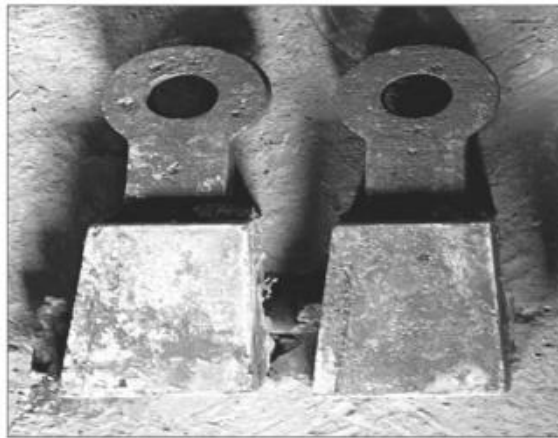
(4) 液锻机选型：非标订制立式框架型多功能液锻机更适合这种双金属复合件的液态模锻。预制件的预热和安放需要配置专门的设备。

(5) 工艺参数根据双金属的热物理参数及其凝固特性来确定。

采用液态模锻技术制备的钢/铝、钛/铝、铝/铜、钢/高铬铸铁等双金属复合件，如图4所示，可以通过热处理调节其性能，使其具有优异的结构-功能一体化性能特征，具有优异的耐磨性、抗腐蚀性能或传导性能。



(a) 液锻复合钢/铝复合轮盘，65 kg



(b) 液锻复合35钢/高铬铸铁锤头，20 kg

图4 液态模锻双金属复合件

Fig. 4 Bimetallic composite components with MMDF process

3 总结与展望

(1) 大型钢铁件液态模锻的技术关键已经突破，采用称重式自动定量浇注机（车），配合自动调节流量的冷却水控制系统和金属型铸钢涂料的使用，非标订制立式多向液态模锻机，可以实现大型钢铁件液态模锻的量产。液态模锻大型钢铁件具有工艺出品率

高、组织致密、综合性能优异的突出优势，在耐磨零件、难锻造零件及功能-结构一体的双金属复合件方面应用前景广阔。

(2) 大型钢铁零件液态模锻的成功经验可以方便地移植到大型铝合金件、铜合金件及有色金属双金属复合件的高性能成形中。

参考文献:

- [1] 罗守靖, 齐丕骧, 陈炳光. 液态模锻与挤压铸造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 邢书明, 鲍培玮. 金属液态模锻 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [3] 邢书明, 鲍培玮. 高效绿色铸锻技术——液态模锻及其应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015.
- [4] 霍文灿, 何绍元, 罗守靖. 钢质液态模锻 [J]. 锻压技术, 1982, 7 (1): 13-17.
- [5] 周恬武, 周述积. 液态模锻技术的研究和应用现状 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 1998 (2): 21-26.
- [6] 史今. 高铬铸铁的液态模锻工艺及热处理性能研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2025 (6): 102-108.
- [7] 吴洪涛. 基于角度编码器的中频感应炉留钢量精准控制方法及系统与流程: CN 113621754 A [P]. 2021-11-09.
- [8] 隋臣, 薛忠光, 袁树林, 等. 钢水温度对摇枕和侧架质量的影响及控制钢水降温速度的方法 [J]. 中国铸造装备与技术, 2018, 53 (2): 75-78.
- [9] 邢书明, 张密兰, 邢文斌. 挤压铸造液压阀体 [J]. 铸造, 2008, 57 (2): 137-139.
- [10] 姚淑卿. 钢铁材料挤压铸造专用涂料研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [11] 王长春, 杨国新, 史继之, 等. 3D打印技术在链轮壳体铸件研发中的应用 [J]. 铸造, 2025, 74 (11): 1524-1529.
- [12] 王卓群. 玻璃制品成形用铸铁模具液态模锻技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
- [13] 尚群超. 大型耐磨板型件液态模锻及其组织性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [14] LI Yuanyuan, ZHANG Weiwen, ZHAO Haidong, et al. Research progress on squeeze casting in China [J]. China Foundry, 2014 (4): 239-246.
- [15] 代颖辉. 挤压铸造A356铝合金重载车轮的模具设计 [J]. 铸造, 2016, 65 (2): 155-157.