

# 申报论文

## (高级)

题目：铸铁铸造工艺设计实例兼论铸铁工艺设计原则

单    位：中国铸造协会

姓    名：曹林锋

申报专业：机械加工

**2019 年 5 月 28 日**

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1. 铸铁的收缩特点及其影响.....    | 3  |
| 2. 顺序凝固原则与均衡凝固原则.....  | 3  |
| 2.1 顺序凝固原则 .....       | 4  |
| 2.2 同时凝固原则 .....       | 4  |
| 2.3 均衡凝固原则 .....       | 4  |
| 2.4 关于均衡凝固原则的商榷 .....  | 5  |
| 3 铸造工艺设计的必要性.....      | 8  |
| 4 蜂窝板铸件的工艺设计.....      | 9  |
| 4.1 蜂窝板铸件概述 .....      | 9  |
| 4.2 蜂窝板铸造工艺的变化过程 ..... | 10 |
| 5 结论及建议.....           | 12 |

# 摘 要

工艺守则和铸造工艺设计是保证铸件质量的两项重要的技术管理措施。对于铸造过程中各个主要工序：如配砂、熔炼、造型和造芯、合箱、浇注、清砂精整等，都要订出工艺守则，同时根据铸件的结构、技术要求等不同条件，编制各自的铸造工艺。

传统的铸造工艺设计一般遵循顺序凝固原则或同时凝固原则，自从均衡凝固原则提出以来，针对其应用范围、可操作性、均衡点的出现、科学性引发了诸多的争议，本文根据铸造生产中的铸造工艺设计实践，提出作者关于这些争议的思考，供铸造从业者思考和探讨，这些回答正确与否，也有待更多的铸造从业者验证。

在铸造工艺的设计实践中，工艺的适用宽泛性显得尤为重要，尤其是在生产管理不严格的中小铸造企业中，这也是铸造工艺设计需要考虑的一个问题。本文以作者曾经设计过的一个铸件——蜂窝板为例，介绍了其工艺设计过程中的变化过程以及关于失败的工艺设计的总结。通过对一些使用均衡凝固原则改进铸造工艺文献的探讨以及蜂窝板的铸造工艺取得稳定生产的基础上，认为顺序凝固更适合指导铸铁铸造工艺的设计，均衡凝固原则在指导工艺设计上缺乏可操作性。

**关键词：**铸铁 顺序凝固 均衡凝固 工艺设计实例

# 绪 论

结晶与凝固是铸件形成过程的核心，它决定着铸件的组织 and 缺陷的形成，因而也决定了铸件的性能和质量。在实际生产中，工艺守则和铸造工艺设计是保证铸件质量的两项重要的技术管理措施。

为了保证铸件质量，对于铸造过程中各个主要工序：如配砂、熔炼、造型和造芯、合箱、浇注、清砂精整等，都要订出工艺守则，它规定了各个工序中共同遵守和执行的一般的工艺操作方法。但是由于铸件的结构、技术要求等各不相同，铸造工艺必须根据铸件的具体要求来编制各自的铸造工艺。

传统的铸造工艺设计一般遵循顺序凝固原则或同时凝固原则，自从均衡凝固原则提出以来，引发了铸造从业者的一系列争议，也引起了很多从业者的思考，从而利用均衡凝固原则改进铸铁件或其他合金的铸造工艺设计。在铸造工艺设计的实践中，本文作者也曾经使用这种原则设计工艺并获得一部分经验，这些经验和传统设计原则碰撞促使我进一步弄清楚其中的缘由。

在查阅多部文献的基础上，本文借由提出一些争议来探讨均衡凝固原则的贡献与缺失，并通过一个铸造工艺设计的变化过程实例，对争议中看法的提出加以佐证。关于这些争议，作者曾经和诸多从业者有过探讨，其中的一些看法也借鉴了他们的看法进行修正，本文希望以此为契机，引起从业者的重视与思考，希望对铸造工艺的设计有一定的作用。

## 1. 铸铁的收缩特点及其影响

液体金属的结构，晶核的形成与长大，晶粒的大小、方向和形态等与铸件的凝固组织密切相关，它们对铸件的物理性能和力学性能有着重大的影响，控制铸件的凝固组织的目的是为了获得所希望的组织。

铸铁和任何铸造合金一样，其收缩过程也分为三个互相联系的阶段，即液态收缩、凝固收缩和固态收缩，但是铸铁凝固过程中有石墨的析出而使铸铁的收缩情况比较复杂，铸铁中石墨的析出使铸铁具有缩前膨胀的特性，缩前膨胀不仅影响固态线收缩率的大小，并且对于铸铁缩孔、缩松的形成也有着重要影响。

当铸铁的膨胀受到外界阻碍，不能自由膨胀时，就产生与外界阻力相平衡的膨胀力。增大铸铁的膨胀力，对正处于共晶转变阶段的铸铁而言，意味着共晶团之间的共晶成分的液相受到更大的挤压而使这种液相提高了流动能力，也就提高了铸铁凝固时期的自补缩能力。

## 2. 顺序凝固原则与均衡凝固原则

防止铸件中产生缩孔和缩松的基本方法是针对合金的凝固特点制订合理的铸造工艺，使铸件在凝固过程中建立良好的补缩条件，尽可能使缩松转化为缩孔，并使缩孔出现在铸件最后凝固的部位，在最后凝固部位设置补缩冒口，使缩孔移入冒口内或者将内浇口开设在铸件最后凝固的部位直接进行补缩就可以获得健全的铸件。要使铸件在凝固收缩过程中建立良好的补缩条件，主要通过控制整个

铸件的凝固原则来实现。

## 2.1 顺序凝固原则

铸件的顺序凝固，就是采用各种工艺措施，保证铸件各部分能按照远离冒口部分先凝固，然后是靠近冒口部分，最后是冒口本身凝固的顺序进行，顺序凝固能保证缩孔集中在冒口中，使铸件内部致密<sup>[1]</sup>。

## 2.2 同时凝固原则

同时凝固原是采取工艺措施，尽量减少铸件各部分之间的温差，使铸件各个部分同时凝固，按这种凝固原则凝固，铸件不易产生热裂，凝固后应力、变形也小，而且节省金属，简化工艺和减少工时，但是在铸件中心区域往往有缩松，铸件不够致密<sup>[1]</sup>。

## 2.3 均衡凝固原则

铸铁铁液冷却时要产生体积收缩，凝固时析出石墨要产生体积膨胀，均衡凝固就是利用膨胀和收缩动态叠加的自补缩和浇冒口系统的外部补缩，采取工艺措施，使单位时间的收缩与膨胀、收缩与补缩按比例进行的一种凝固工艺原则<sup>[2]</sup>。

在提出“均衡凝固”技术的参考文献<sup>[2]</sup>中，提出了一些实现均衡凝固的工艺原则，比如越是薄小的件越是要强调补缩；铸铁件的冒口不应该也不能放在铸件的热节上，冒口要靠近热节，以利于补缩；冒口又要离开热节，以减少冒口对铸件的热干扰；优先采用顶注工艺，使先浇入的铁液尽快静止下来，提前石墨化膨胀，以提高自补缩的利用程度等。通过多年的工作实践，我认为均衡凝固原则是对顺序凝固原则和同时凝固原则的一个补充，不能将均衡凝固原

则与顺序凝固原则、同时凝固原则对立或并列起来。

## 2.4 关于均衡凝固原则的商榷

均衡凝固原则把铸铁凝固收缩的一些现象，用胀、缩叠加原理给予解释，是理论系统化，是一个定性的理论。但是自从均衡凝固技术出现以来，就引起了很多争论<sup>[3-6]</sup>，且其中一些基本问题尚未得到明确地证实，下面就结合本文作者在工作过程一些实际问题加以讨论。

### (1) 问题 1: 铸铁件的冒口不应该也不能放在铸件的热节上？

在实际的生产过程中，铸铁件放在热节上的成功工艺案例比比皆是，所以这样的说法显然是有问题的。以《球墨铸铁件（GB1348-2009）》规定的 Y 型单铸试块为例，如果将单铸试块的取样部分视为一个铸件，那么其上面的部分就可视为一个明冒口，试样部分可认为是一个长方形的热节，而冒口就放在了热节上，显然这样的单铸试块一般情况下是极少有缺陷的，可见冒口放在铸铁件的热节上是可以成功的，只不过考虑到经济性的问题，铸件的出品率略低。

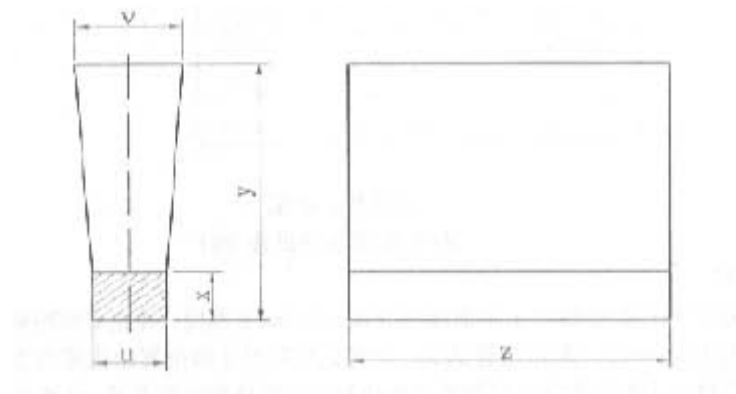


图 1 球墨铸铁件（GB1348-2009）中规定的 Y 型单铸试块

### (2) 铸铁件的凝固过程的体积变化是收缩还是膨胀？

铸铁件在冷却、凝固过程中，既有液态收缩、凝固收缩，又有石墨析出产生的膨胀，宏观上，铸件成形过程中所表现出来的体积

变化，是膨胀与收缩相抵的净结果。需要明确地一点是，防止缩孔所需的铁水补给量取决于铁水的液态收缩、石墨结晶析出而导致膨胀、凝固收缩、铸型的强度等四个因素<sup>[7]</sup>。球墨铸铁的体收缩和线收缩，不但和铸铁本身的参数有关，而且和铸型的因素有着密切的关系，由于铸型因素的改变，可直接影响到球墨铸铁的体收缩值和线收缩值，而且影响很大。因此，严格地说，这两个参数是随着铸型条件而改变的，简单地认为铸铁的体收缩值和铸钢不一样的观点是不全面的。球墨铸铁收缩值的大小，在金属本身的条件决定之后，主要决定于铸型因素。在实际情况下，石墨化膨胀是扩大缩孔与缩松还是使其缩小，视铸型性质而定，使用刚性差的铸型，导致缩孔、缩松体积的增加；使用刚性良好的铸型则可以使缩孔、缩松体积减少。

关于铸铁件的凝固过程中的体积变化在关于铸铁件的文献中也有论述<sup>[7-9]</sup>，铸铁在凝固过程中的体积变化不是一成不变的。实际的铸件在铸型中收缩时受到一些限制收缩的阻力，这些阻力有：铸件与铸型表面间的摩擦阻力；铸件不同部位冷速不同导致各部分收缩程度不一、彼此制约而产生的热阻力；由于结构上的原因，铸件收缩时受到型腔、泥芯、砂箱的阻碍而出现的机械阻力，这些阻力将限制铸件充分收缩，因此铸件的实际固态收缩量小于自由收缩量，而且同一铸件上各个方向的固态收缩量也不尽相同。

### （3）均衡凝固的“均衡点”存在吗？

如果恰当的调整铸铁化学成分（特别是碳含量和碳当量），可以实现凝固收缩为零<sup>[9]</sup>。根据参考文献[2]中的定义，均衡凝固要求做到“采取工艺措施，使单位时间的收缩与膨胀，收缩与补缩按比例进行”，作者认为在实际的铸造工艺设计中，由于大多数的铸件



形状非常复杂，即使是一种形状简单的铸件，也做不到按比例调控收缩与膨胀、收缩与补缩；即使是同一铸件的同一工艺，其工艺参数的变化也有一定的范围，其体积变化模式也会因工艺因素的波动而受到影响，按比例调控也就没有依据，以“均衡点”作为铸造工艺的指导性原则缺乏可操作性。

（4）关于使用均衡凝固设计原则的工艺真的是“均衡凝固”吗？

近几年很多文章作者都利用均衡凝固原则对改进成功的铸造工艺进行了分析，但是作者认为文章的分析基本上都可以用顺序凝固的理论加以解释。

在此举两个例子，文献[10]中利用均衡凝固原则重新设计了球墨铸铁飞轮的飞轮，实现了无冒口铸造，认为根据均衡凝固原则，对厚大断面球墨铸铁件只要合理的利用外冷铁就完全可以实现无冒口铸造。但是我觉得此工艺改进成功的首要原因是使用了大量的冷铁，冷铁使液态收缩提早和加快，提早产生体积空缺，能及时地利用有限的液态补缩时间多进入铁液弥补温度降低和表面结壳的体积收缩，也就是充分利用了浇注系统补缩，和均衡凝固关系不大。

文献[11]利用均衡凝固原则改进了方滑枕铸件的铸造工艺，认为均衡凝固原则在铣镗床方滑枕铸件中得到了正确的应用，缩孔、缩松、气孔等缺陷消失，综合性能良好。此铸件工艺改进主要是“浇注系统在原来的底注基础上，分箱面再增加一层内浇道，数量与下面一致，但截面积要稍大于下层内浇道”，本文作者认为这个分层浇注工艺首先充分利用了下层浇口进铁水比较平稳的特点，保证了铸件重要工作面的质量，其次上层浇口形成了自上而下的温度场，利于补缩，正是说明了顺序凝固的重要性。

### （5）均衡凝固可以用于非铸铁合金吗？

虽然均衡凝固原则在提出之始是利用铸铁的石墨化膨胀作为定义的，但是今年了出现在其他合金上的利用案例<sup>[12-13]</sup>，但是我认这些案例或多或少都只是利用了均衡凝固原则的概念，比如文献[13]有这样的描述，“采用顶注式雨淋浇口，增强了铸件的自补缩能力……自上而下进行补缩，保证了铸件质量”，这正是利用顺序凝固而取得了成功，均衡凝固原则用于其他合金的案例十分勉强。

## 3 铸造工艺设计的必要性

为了保证铸件质量，对于铸造过程中各个主要工序：如配砂、熔炼、造型和造芯、合箱、浇注、清砂精整等，都要订出工艺守则，它规定了各个工序中共同遵守和执行的一般的工艺操作方法。但是仅仅有了工艺守则还不够，由于铸件的结构、技术要求等各不相同，它们的铸造工艺还有其本身的特殊要求，所以必须根据铸件的具体要求来编制各自的铸造工艺。

工艺守则和铸造工艺设计是保证铸件质量的两项重要的技术管理措施。铸造工艺设计的意义在于：

- （1）有利于采用先进的工艺获得高质量、低成本的铸件；
- （2）根据工艺进行工序检查，产生铸造缺陷时便于寻找原因，采取纠正措施；
- （3）根据工艺设计进行技术准备，如准备砂箱、芯骨、必要的工艺装备和工具，有利于保证正常的生产秩序，方便生产计划调度；
- （4）可以不断的积累和总结经验，提高铸造生产技术水平。

有一点本文作者觉得很可惜，在作者的阅读范围内，尽管国内

有诸多的铸造工艺的著作，鲜有针对铸造工艺的编制提出一些基本原则，在文献[14]中提出了铸造工艺补缩的七个原则，其中第一条工艺原则竟然是“不补缩（Do not feed (unless absolutely necessary)）”，其原因有两个：一是经济性，使用了冒口必然降低了铸件的出品率，同时铸造工艺的目的并非是为了生产“完美”的铸件，而是为了生产合格的铸件，所以如果可以不使用冒口则不使用冒口；二是错误的冒口设计也会带来其他的问题，比如在文献[15]提到的冒口尺寸的错误设计反而带来的铸造工艺的失败，这样的例子也非常多。关于文中其他的设计原则，在此不再赘述。

## 4 蜂窝板铸件的工艺设计

### 4.1 蜂窝板铸件概述

铸件的生产不仅需要采用合理的、先进的铸造工艺和设备，而且还要求铸件的结构尽可能适合铸造生产的要求。这种对于铸造生产而言的铸件结构的合理性叫铸件的铸造工艺性。在铸造工作有句俗语叫做“车工怕车杆儿，铸工怕铸板儿”，可见铸造板型的铸件在铸造中是一个难题，在我的工作过程中，曾生产过如图 2 的蜂窝板铸件，这种铸件是一个系列，有不同的尺寸，应用于不同机型的印刷机上，生产工艺也经过了多种实验，最终取得了成功，很有代表性。

蜂窝板的基本形状就是一个厚度为  $1220\text{mm} \times 84\text{mm} \times 17\text{mm}$  的长方体铸件，材质为 QT500-7，在虚线范围内布满了  $\Phi 6\text{mm}$  的透孔，孔径之间间隔距离  $9\text{mm}$ ，所以铸件要求不能有任何缺陷。

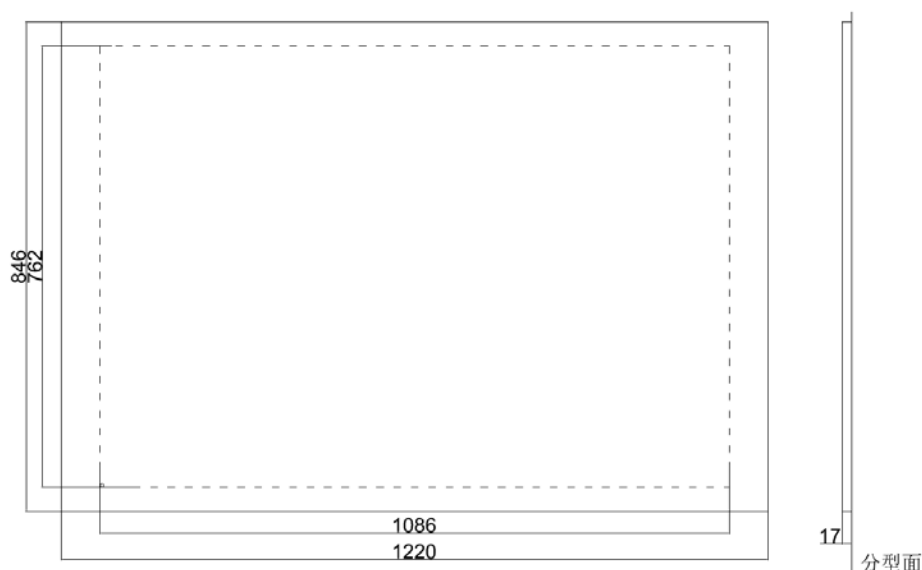


图 2 蜂窝板铸件

## 4.2 蜂窝板铸造工艺的变化过程

在蜂窝板的生产试制过程中，我们曾尝试了许多种工艺，最终取得了成功，下面进行简单的叙述。

工艺 1：在下平面铺满了冷铁，冷铁之间间隔 30mm，尽量多进入铁水，不使用冒口。这种工艺在放置冷铁的部位虽然没有缺陷，但是冷铁之间无论怎么调整间隔都不能将缺陷消除，分析原因一是铸件壁厚较薄，补缩通道小；二是一个部位的膨胀必然先抵消本部位的收缩<sup>[3]</sup>，先凝固的部位形成体积空缺，而补缩通道的不通畅致使冷铁之间无法得到有效的铁液补充，从而缺陷（主要是缩松）出现在冷铁之间的位置。

工艺 2：使用冷铁将铸件分为若干个小的区域，每个小的区域使用发热冒口补缩。这种工艺的设计想法是减少冒口的补缩距离，每个区域独立进行补缩。我们使用这种工艺进行过多次试制，也有成功的案例，但是在发热冒口下放时常出现缩孔，分析认为虽然将区域缩小到一定程度后，发热冒口可以起到补缩的作用，但是由于

放置发热冒口所形成的接触热节很难消除，调整发热冒口的规格也许可以取得成功，但是必须定制，这无疑大大增加了铸件的成本，所以也放弃了这种工艺。

工艺 3：工艺 3 也是我们可以稳定生产合格铸件的工艺，考虑到铸件厚度太薄，补缩通道非常有限，而在铸件凝固过程中建立良好的补缩条件，尽可能使缩松转化为缩孔，并使缩孔出现在铸件最后凝固的地方<sup>[6]</sup>是防止铸件产生缩孔和缩松的基本原则。这种工艺示意图如图 3 所示，在板型铸件上人为增加具有斜度工艺补贴，未使用冷铁，在工艺补贴的顶部使用一个小发热冒口。这种工艺一方面增加了铸件的补缩通道，使铸件得到有效的液体补充；另一方面因为厚度的梯度增加使铸件更容易形成顺序凝固的温度场，从而建立良好的补缩条件，将缺陷转移到最后凝固的位置，即工艺补贴或冒口中。这种工艺的使用范围非常宽泛，即使化学成分或者浇注温度产生较大的偏差，也可以生产出合格的铸件，在实际生产过程中，基本没有出现过因缩松而不合格的铸件。

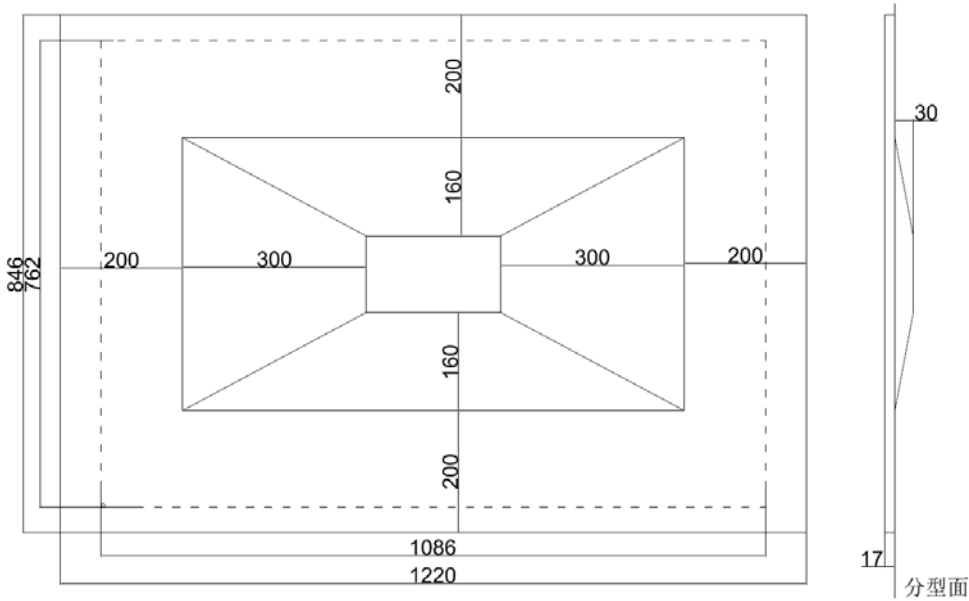


图 3 蜂窝板的稳定生产工艺

## 5 结论及建议

(1) 均衡凝固原则把铸铁凝固收缩的一些现象, 用胀、缩叠加原理给予解释, 是理论系统化, 是一个定性的理论, 用均衡凝固原则指导铸造工艺设计缺乏可操作性。

(2) 现存的使用均衡凝固原则的文献基本都可以用顺序凝固理论来解释, 均衡凝固原则是对顺序凝固原则和同时凝固原则的一个补充, 不能将均衡凝固原则与顺序凝固原则、同时凝固原则对立或并列起来。

(3) 虽然现有的铸造工艺设计著作很多, 但是我国尚缺少铸造工艺的原则性指导书籍, 这有待于铸造者的努力;

(4) 蜂窝板的铸造工艺实践说明, 顺序凝固原则具有更宽泛的使用范围, 更具有指导生产的可操作性, 在铸件工艺的指定过程中, 保持有效的补缩通道显得尤为重要。

## 参考文献

- [1] 董选普,李继强. 铸造工艺学[M], 北京: 化学工业出版社, 2009
- [2] 魏兵,袁森,张卫华. 铸件均衡凝固技术及其应用[M], 北京:机械工业出版社, 1998
- [3] 周亘. 球铁件应当如何补缩[J]. 现代铸铁, 2005(3):9-15
- [4] 周亘. 球墨铸铁件无冒口铸造可行性论证与实践. 现代铸铁, 2004(3):1-7
- [5] 周亘. 球墨铸铁件冒口补缩失败原因分析. 现代铸铁, 2004(4):7-14
- [6] 周亘. 对“均衡凝固技术”基本问题的探讨. 现代铸铁, 2004(5):4-11

- [7] 李荣德,于海朋,丁晖. 铸铁质量及其控制技术[M], 北京:机械工业出版社, 1998
- [8] 郝石坚. 现代球墨铸铁[M], 北京: 煤炭工业出版社, 1989
- [9] 郝石坚. 现代铸铁学[M], 北京: 冶金工业出版社, 2004
- [10] 杨恒远, 毕海香, 刘继波等. 厚大断面球墨铸铁飞轮无冒口铸造. 铸造设备与工艺, 2015(2): 24-28
- [11] 常喜彦, 苗秋军. 均衡凝固原则在铣镗床方滑枕中的应用. 机械工人, 2004 (10) : 60-61
- [12] 许利民. 均衡凝固理论在中碳低合金钢耐磨衬板上的应用. 铸造技术, 2017,38(11): 2757-2759
- [13] 杨宗才. 应用均衡凝固理论铸造摩托车铝缸头. 铸造, 1998(9):38-39
- [14] John Campbell. Castings[M]. Burlington: Butterworth-Heinemann, 1991
- [15] 刘金城. 运用均衡凝固理论解决英国铸件的缩孔问题. 铸造技术, 2004,25(2): 85-88
- [16] 穆光华, 赵忠兴. 球墨铸铁件无冒口铸造[M]. 北京:兵器工业出版社, 1994