

铸造炉料配比软件系统的开发与应用

周建新, 栾添舒, 冯春亮, 葛红州, 刘瑞祥, 陈立亮, 廖敦明

(华中科技大学材料学院凝固模拟研究室, 湖北武汉 430074)

摘要: 炉料配比是铸件生产中的一个重要工序, 随着计算机软硬件条件的改善, 利用计算机技术来进行炉料配比, 显示出越来越大的优势。介绍了计算机铸造炉料配比软件系统开发的基本思路和原理, 并介绍了华铸炉料配比系统——华铸FCS的基本功能及应用实例。应用表明, 华铸FCS能够实现自动炉料配比, 手动炉料配比, 炉前炉料配比, 在配比过程考虑到了元素的烧损, 并且能够实现最小成本配比, 这样一方面实现了准确的炉料配比, 另一方面实现了成本的最低化, 对实际铸件生产有一定指导作用。

关键词: 铸造炉料配比; 华铸FCS; 最小成本配比

中图分类号: TG243; TP311.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2007) 04-0384-04

Development and Application of Foundry Charging Mixing Software

ZHOU Jian-xin, LUAN Tian-shu, FENG Chun-liang, GE Hong-zhou, LIU Rui-xiang,
CHEN Li-liang, LIAO Dun-ming

(Lab of Solidification Simulation, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Foundry charging mixing process is an important step of casting production. With the development of computer hardware and software, it has a lot of advantages to calculate the foundry charging mixing by foundry charging mixing software. It is introduced that both the basic principles of the development of foundry charging mixing software in this paper, and also HZFCFS, a software package for the calculation of the foundry charging mixing. The applications show that the software can aid technologists to get the minimum cost mixing schedule for the foundry charging mixing.

Key words: oundry charging mixing; HZFCFS; charging mixing with minimum cost

随着计算机软硬件条件的改善, 利用计算机技术来进行炉料配比显示出越来越大的优势, 一方面可以更加方便、准确地给出满足要求的配比方案, 另一方面利用计算机配料可以较容易地实现最小成本炉料配比, 从而有效地降低生产成本。在这一领域, 不少科技工作人员做了工作, 如采用求解线性方程组、群蚁算法等方法设计开发了计算机炉料配比程序, 实现了计算机炉料配比^[1-5]。华中科技大学华铸软件中心从2004年着手开发铸造炉料配比软件, 所开发的华铸FCS铸造炉料配比软件已经在近20家单位获得了应用, 本文中, 介绍了华铸FCS软件的数学模型、基本功能以及应用情况^[6-9]。

1 数学模型

华铸FCS铸造炉料配比软件采用了求解线性方程组方法与基于穷举法的最小成本配比法。

1.1 求解线性方程组

以钢铁为例, A 、 B 、 C ...表示待加入炉料的百分

比。 $C_{\text{铸件}}$ 、 $Si_{\text{铸件}}$ 、 $Mn_{\text{铸件}}$ 、 $P_{\text{铸件}}$ 、 $S_{\text{铸件}}$ 是铁合金铸件要求的元素质量百分数。 C_A 、 Si_A 、 Mn_A 、 P_A 、 S_A 表示A炉料中元素C、Si、Mn、P、S的质量百分比, η_C 、 η_{Si} 、 η_{Mn} 、 η_P 、 η_S 为元素熔炼过程中的增减率百分比(元素增加时为正数, 元素减少时为负数), 通过求解式(1)~式(6)方程组即可求出待加入炉料百分比。

$$A \times C_A + B \times C_B + C \times C_C + \dots = \frac{C_{\text{铸件}}}{1 + \eta_C} \quad (1)$$

$$A \times Si_A + B \times Si_B + C \times Si_C + \dots = \frac{Si_{\text{铸件}}}{1 + \eta_{Si}} \quad (2)$$

$$A \times Mn_A + B \times Mn_B + C \times Mn_C + \dots = \frac{Mn_{\text{铸件}}}{1 + \eta_{Mn}} \quad (3)$$

$$A \times P_A + B \times P_B + C \times P_C + \dots = \frac{P_{\text{铸件}}}{1 + \eta_P} \quad (4)$$

$$A \times S_A + B \times S_B + C \times S_C + \dots = \frac{S_{\text{铸件}}}{1 + \eta_S} \quad (5)$$

$$A + B + C + \dots = 100\% \quad (6)$$

上述方程组可以推广到 m 种炉料 n 个合金元素, X_i 为第 i 种炉料在所配料中的质量分数, 第 i 种炉料含有第 j 种元素的质量分数为 C_{ji} , 在熔炼过程中第 j 种元素的熔

炼过程中的增减率百分比(元素增加时为正数,元素减少时为负数)为 η_j ,第 j 种元素的目标成分为 D_j ,求解方程式(7)、式(8)即可求出 m 种待加入炉料的百分比。华铸FCS软件可以求解最多28种炉料满足28个合金元素要求,求解线性方程组方法具有速度快的优点,但是不一定每种情况都找到符合要求的解。

$$\sum_{i=1}^m X_i \times C_{ji} = \frac{D_j}{1+\eta_j} \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m X_i = 100\% \quad (8)$$

1.2 基于穷举法的最小成本法

求解线性方程组的目标成分是名义值,实际上一般目标成分是一个允许范围,所以从理论上讲炉料配比应该是求解不等式组。

对于 m 种炉料 n 个合金元素,假设 X_i 为第 i 种炉料在所配料中的质量分数, P_i 是该炉料的价格(元/吨),第 i 种炉料含有第 j 种元素的质量分数范围为 C_{MINji} , C_{MAXji} (其中 C_{MINji} 为最小质量分数, C_{MAXji} 为最大的质量分数),在熔炼过程中第 j 种元素的增减率百分比(元素增加时为正数,元素减少时为负数)为 η_j ,第 j 种元素的目标成分为 $[D_{MINj}, D_{MAXj}]$,各炉料配比 X_i 需要满足式(9)~式(12),本次配料的价格 P_{Alloy} (元/吨)可以由式(13)计算出来。

$$\frac{D_{MINj}}{1+\eta_j} \leq \sum_{i=1}^m X_i \times C_{MINji} \leq \frac{D_{MAXj}}{1+\eta_j} \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

$$\frac{D_{MINj}}{1+\eta_j} \leq \sum_{i=1}^m X_i \times C_{MAXji} \leq \frac{D_{MAXj}}{1+\eta_j} \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m X_i = 100\% \quad (11)$$

$$X_i \geq 0 \quad (12)$$

$$P_{Alloy} = \sum_{i=1}^m X_i \times P_i \quad (13)$$

式(9)、式(10)是成分约束条件,在本模型中允许炉料成分可以在一定范围内波动,允许设定最小值 C_{MINji} 与最大值 C_{MAXji} ,这样就使得该数学模型与实际更加贴近,从而使计算的结果更能指导实际生产。华铸FCS软件采用了穷举法来求解这个新的数学模型的离散解,在此基础上求出这些离散解中成本最低的解,这就是基于穷举法的最小成本法。穷举法的基本思路是每种炉料设定一个最小加入量与最大加入量,从最小加入量开始以某一个增加量来逐步增加,验算每种可能的配比是否满足式(9)~式(12),若满足,则是有效解,是满足要求的配料方案,并计算本配料方案的成本,穷举法可以找出很多满足要求的配料方案,而最小成本法就是找到这些方案中成本最低的一种。当然,一般的铸件配料数学模型中会提到某一种炉料的最大加入量的问题,在本数学模型中最大加入量要

满足式(14)。其实只要满足式(9)~式(12)就肯定满足式(14),所以认为铸件配料的数学模型可以不包含式(14)。从华铸FCS软件计算速度与结果表明采用基于穷举法最小成本法可以满足实际的工程需要,因为采用这种方法只要增加量设置合适,基本上可以找到满足成分要求的配料方案,实际计算表明,计算1000万种左右配料方案一般用时不到1min,这已经很好地满足了工程的实时需要。

$$X_i \leq \text{Min} \left(\frac{D_{MAX1}}{C_{MAX1i}(1+\eta_1)}, \frac{D_{MAX2}}{C_{MAX2i}(1+\eta_2)}, \dots, \frac{D_{MAXn}}{C_{MAXni}(1+\eta_n)} \right) \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (14)$$

2 华铸FCS软件的基本功能与使用步骤

华铸FCS软件开发的目的是实现快速计算配料方案、实现配料方案成本最低、以及有效地管理历史配料方案。图1为华铸FCS的主要的系统界面,图2是采用该软件所做的一个配料方案,该软件主要有自动炉料配比、手动炉料配比、炉前炉料配比三个主要功能,以下分别介绍说明。

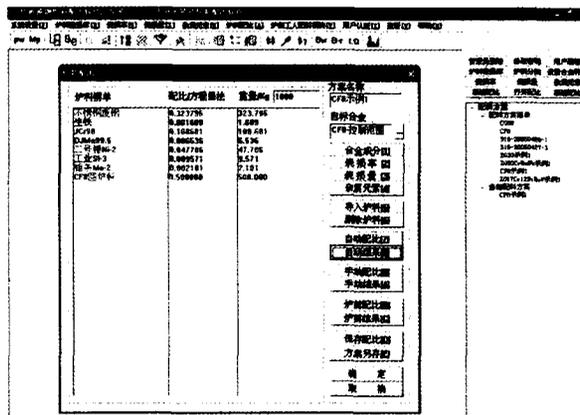


图1 华铸FCS软件界面

Fig. 1 Interface of HZFCs

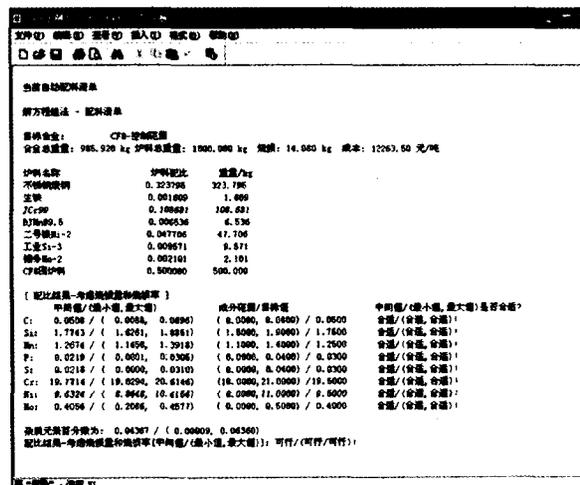


图2 采用华铸FCS的配料结果

Fig. 2 Charging mixing result by the HZFCs

2.1 自动炉料配比 (简称自动配比)

华铸FCS的自动配比功能包含了求解线性方程组与基于穷举法的最小成本法配比, 由于该方法只需要用户设置好目标成分范围与名义值、各种炉料的成分范围、各炉料的价格、以及各种元素的烧损率, 设好这些参数后, 软件会自动计算出自动配料比例, 包含求解线性方程组的配料比例、基于穷举法的最大成本配比与最小成本配比。

2.2 手动炉料配比 (简称手动配比)

华铸FCS的手动配比功能基本思路是用户根据自己经验来设定各炉料的重量 (比例), 软件实时计算出用户设定的配料方案的配比结果并提示是否满足目标成分的要求。该功能充分利用了工艺人员自己的经验以及计算机的快速计算功能, 该功能的原理与平常工艺人员对设定的一个配料方比例来手工验算是否满足成分要求完全一样, 所以称之为手动配比。该方法首先也需要用户设置好目标成分范围与名义值、各种炉料的成分范围、各炉料的价格、以及各种元素的烧损率等。

2.3 炉前炉料配比 (简称炉前配比)

华铸FCS的炉前配比功能主要满足炉前成分的调整, 实现的具体思路为, 若炉前光谱分析出的成分没有满足目标成分, 软件将根据炉前成分、炉前金属液体的重量等自动计算待加炉料的重量。该方法快速准确, 另外该功能采用手动与自动相结合的方法, 也就是说用户可以根据自己经验来加入某种炉料来调整, 该功能也就具有手动配比的优点。

2.4 其他功能与特点

除了上述功能与特点外, 该软件还具有以下特点。
①适合所有合金类型铸件的炉料配比, 如铸钢件、球铁件、灰铁件、铝合金铸件、镁合金铸件、锌合金铸件、铜合金铸件等的炉料配比。
②如前面数学模型中提到, 不仅考虑炉料各成分的名义值, 而且考虑到了各成分的最小值、最大值, 实现了区间配料, 允许炉料各成分在一定范围内波动而找到合适的配比。
③解方程组法实现了快速自动炉料配比, 对于某种炉料也可以预先设定加入量。
④可以方便地设定各种元素的烧损率, 也可以事先设定烧损率方案, 方便操作。
⑤开放的炉料数据库系统, 用户可以根据自己需要, 建立自己常用的数据库, 系统也自带了各种合金的数据库。
⑥可以对炉料分类, 如回炉料、废钢等可以分别建立自己类别的数据库。
⑦可以根据实际情况选用配比炉料种类的多少, 软件同时可以实现最多28种炉料的炉料配比, 基本上可以满足所有实际铸件的炉料配比。
⑧配比结果直观、明了, 可以方便地查看各种炉料的比例、炉料重量、总重量、烧损重量、炉料成本以及烧损前后的成分情况。
⑨配料方案管理清楚了, 可以方便查看历史配料方案, 软件容易掌握, 操作起

来也简便。

2.5 华铸FCS软件使用的基本步骤

华铸FCS铸造炉料配比系统的基本思路是先将各种炉料建立数据库, 随后建立一个配比方案进行配比, 具体步骤如下述。
①在进行某个牌号炉料配比的时候, 首先要新建一个空的炉料配比方案。
②打开新建的配比。
③利用相关功能导入某牌号的合金成分。
④设定合金各种成分的烧损率。
⑤设定合金各种成分的增加量。
⑥定义杂质元素。
⑦逐个导入本次配比的炉料。
⑧可选择采用自动配比、手动配比、炉前配比来进行炉料配比。
⑨可利用写字板查看本次炉料配比的结果。

3 应用实例

上文提到华铸FCS适合所有合金类型铸件的炉料配比, 即可按合金种类进行模块划分, 如铸钢模块、铸铁模块、铝合金模块、镁合金模块、锌合金模块、铜合金模块、钛合金模块等。下面给出2个实例, 一个是华铸FCS在生产铸钢件炉料配比上的应用, 另一个是在生产铸铁件炉料配比上的应用。

3.1 在铸钢件炉料配比上的应用

某厂生产的不锈钢铸件要求成分及使用的炉料成分见表1。计算时考虑的烧损情况如下: C_{烧损}6%、Si_{烧损}8%、Mn_{烧损}25%、Cr_{烧损}5%、Mo_{烧损}2%。华铸FCS计算出来的配料单见表2, 从计算结果看, 如果采用最小成本配比, 每吨钢液成本可以节约人民币500多元。

表1 某不锈钢铸件化学成分及所用的炉料成分

元素	成分范围	charging used					W _B (%)	
		回炉料	废钢	锰铁	硅铁	钼铁	铬铁	
C	<0.08	<0.08	0.04	-	-	-	-	
Si	1.0~1.3	1.0~1.3	0.2	<1.0	74~80	-	-	
Mn	1.2~1.5	1.2~1.5	0.5	60~67	<0.4	-	-	
S	<0.04	<0.04	0.02	<0.03	<0.02	<1.0	<0.04	
P	<0.04	<0.04	0.02	<0.5	<0.035	<0.04	<0.03	
Cr	18.5~19.5	18.5~19.5	-	-	<0.3	-	65~69	
Ni	11.5~12.5	11.5~12.5	-	-	-	-	-	
Mo	3~3.3	3~3.3	-	-	-	-	57~63	

注: 镍条含Ni99%~100%

表2 某不锈钢铸件的2个配料方案

	casting						W _B (%)
	镍条	铬铁	钼铁	硅铁	锰铁	废钢	
解方程组法	5.982	14.842	2.669	0.745	1.170	24.592	50
最小成本法	5.473	14.366	2.533	0.593	1.035	26.000	50

3.2 在铸铁件炉料配比上的应用

表3是某厂生产的某铸铁件要求的成分范围及使用的炉料成分情况。计算时应当考虑的烧损情况如下。C_{增加}35%、Si_{烧损}15%、Mn_{烧损}20%、S_{增加}100%、P不变。表4是华铸FCS计算出来的配料单, 从计算结果看, 如

果采用最小成本配比, 每吨铁液成本可以节约人民币40多元。

表3 某铸铁件化学成分及所用的炉料成分

Table 3 Compositions of a cast iron casting and its charging

	used				w_B (%)
	C	Si	Mn	P	S
控制范围	3.1~3.4	1.3~1.6	0.9~1.2	<0.1	<0.12
生铁	4.5	0.68	0.2	0.04	0.02
回炉料	3.2	1.5	0.9	0.06	0.12
废钢	0.2	0.3	0.5	0.02	0.02
硅铁	-	75	-	-	-
钼铁	-	-	65	-	-

表4 某铸铁件的2个配料方案

Table 4 Two charging mixing schedules of a cast iron casting

	w_B (%)				
	生铁	回炉料	废钢	锰铁	硅铁
手工配比结果	32.5	30	35.0	1.52	1.48
最小成本结果	28.7	30	39.3	0.96	1.04

4 结束语

实际应用表明, 华铸FCS能够实现自动炉料配比、手动炉料配比、炉前配比。在配比过程考虑到了元素

的烧损、炉料的成分波动等, 并且实现了最小成本配比, 这既实现了快速准确地炉料配比, 又实现了成本的最低化, 对铸件生产有明显的现实意义。

参考文献:

- [1] 陈琦, 彭兆弟. 铸件配料手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 赵兆祉, 张润岭, 李宏. 冲天炉微机优化配料系统的开发及应用 [J]. 铸造设备研究, 1996 (1): 16-20.
- [3] 张云新, 许宁, 舒涛, 等. 冲天炉熔炼的计算机配料计算 [J]. 现代铸铁, 2003 (3): 29-30.
- [4] 王超, 沈卫东, 单恩长. 使用计算机计算炉料配比 [J]. 铸造技术, 2004 (3): 168-169, 176.
- [5] 李智, 李伟. 蚁群算法在铸造生产配料优化中的应用 [J]. 铸造, 2004 (11): 913-916.
- [6] 冯春亮. 铸造炉料配比软件系统的开发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [7] 惠订. 铸铁件炉料配比中元素烧损问题的研究 [D]. 华中科技大学, 2005.
- [8] 陈邦乾. 铸钢件炉料配比中元素烧损问题的研究 [D]. 华中科技大学, 2005.
- [9] 葛红洲. 铸件炉料配比系统关键算法的研究 [D]. 华中科技大学, 2005.

(编辑: 田世江, tsj@foundryworld.com)

(上接第 383 页)

- [6] 宋延沛, 等. 滑动速度对WCp/Fe-C功能梯度复合材料磨损性能的影响 [J]. 功能材料, 2006, 37: 660-663.
- [7] 邵荷生, 等. 摩擦与磨损 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992 (9): 120-122.
- [8] 李忠民, 姜丽燕. 铸铁中的化学成分对热导率的影响 [J]. 山东机

械, 2002 (2): 14-16.

- [9] 曹洪吉, 宋延沛, 等. 摩擦速度对颗粒增强铁基复合材料摩擦性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2005 (11): 15-16, 25.

(编辑: 田世江, tsj@foundryworld.com)

消失模铸造设备及工艺技术

我部铸造专用于消失模铸造的设备并指导生产, 培训技术骨干。

服务项目

1. 为你制作最基本的设备, 价格合适。先简单投产后再逐步完善, 投资风险小。
2. 多工位、全自动的生产线, 电脑编程控制, 屏幕显示生产全过程。环保型生产。
3. 发泡模型简易制作技术转让; 不用加工型腔, 铸造厂自己即可制作。表面精度达Ra1.6, 成本只有传统制模工艺的1/3, 制造周期7~10天/套。极好地解决了消失模发泡模型成本高的问题。

玉林市哥锐铸造技术服务部

地址: 广西玉林市排洪管理站内天桥机电有限公司 联系人: 黎永远
手机: 13877528584 传真: 0775-3889201

4. 铁屑熔化炉, 是本服务部最新试验成功的熔化炉。按炉型每小时300~1000kg, 该炉有以下特点:

- ◆ 不用加料平台, 铁屑不用压块可以直接散料装炉。连上料工作两人即可开炉。
- ◆ 可使用碎碳、低热值碳甚至白煤。碳铁比最低1:4, 铁液温度可达1450℃。可用于消失模铸件的浇注。
- ◆ 白口铁熔炼后变为灰口铁, 灰口铁熔炼后仍为灰口铁。