

文章编号:1000-582X(2004)09-0017-05

铝合金铸件渗漏的预测及防治*

权燕燕,彭晓东,刘相果

(重庆大学机械学院,重庆400030)

摘要:在简述了铝合金铸件产生渗漏机理的基础上,介绍了当前铝合金铸件渗漏研究的主要进展。一是对判据函数模型、连续性方程-达西定律的模型等预测铝合金铸件中产生渗漏的数学模型的研究,其次是在实际生产中通过对铝合金熔体进行处理或采用新的工艺等措施来预防铝合金铸件的渗漏。各种预测渗漏的模型虽都具有一定的适用性,但同时也有自身的局限性,都不能精确的预测缩松的产生。研究人员针对各自领域中的具体条件确定的很多有效的防治渗漏的方法对生产应用中预测铸件缩孔缩松的产生具有一定的指导意义,然而这种方法需要耗费大量的时间、人力及物力。因此为了更精确的预测铸件中缩孔和缩松的产生部位及形状尺寸,应该将计算机模拟同实际生产结合起来,根据各领域的特定条件灵活的、发展的运用这些模型和方法,从而达到消除或减少铸件渗漏的目的。

关键词:铝合金;渗漏;缩孔;缩松

中图分类号:TG 245;TG 292

文献标识码:A

压力容器铸件,常常因渗漏而产生无法弥补的损失,对生产和经济造成严重的影响。例如发动机的缸体、缸盖、壳体、阀门和泵体等有气密性要求的铸件,在加工完成后要进行耐压试验,一旦渗漏即告报废,造成巨大的浪费。因此,研究铸件的渗漏机理,阐明铸件渗漏的原因,寻找解决渗漏的办法,提高铸件的出品率,降低生产成本,减少资源和能源的消耗,是十分重要的。

近年来,随着铝合金部分代替黑色金属生产发动机缸体、缸盖和泵体等有气密性要求的铸件,研究铝合金铸件的渗漏及其防治成为当前亟待解决的问题。大多数铝合金具有较宽的结晶温度范围,在凝固过程中晶体以枝晶状生长,熔体可以在枝晶间流动,当分枝较多的树枝晶互相搭接形成骨架以后,枝晶间的剩余熔体逐渐被分割和封闭起来。最后当枝晶间的剩余熔体凝固收缩时,由于得不到熔体补充,便会在最后凝固的地方形成缩孔、缩松。同时,熔体凝固时析出的气体(主要是氢气)也会进入枝晶间而影响熔体的补充形成气缩孔。这些由于凝固收缩和气体析出而形成的缩

孔和缩松一旦形成连贯的通道,就会造成铸件渗漏^[1]。因而,对铝合金铸件渗漏的研究,就是研究铸件缩孔、缩松的形成及其存在形式。目前,对铝铸件渗漏的研究主要集中于以下方面:

1)利用数学的方法分析缩松、缩孔形成的热力学和动力学因素,建立数学模型,使用计算机模拟铸件的凝固过程,确定铸件中缩孔缩松形成的部位,然后进行分析并改变模型中的工艺参数以达到消除或减轻缩松的目的,最终用于指导铝合金铸件的生产。

2)研究人员依据凝固过程的特性,在生产实践中通过反复试验,探索缩孔、缩松形成的原因和机理,针对成因改进工艺消除或减轻缩松、缩孔,以达到防治渗漏的目的。

1 渗漏预测模型及其应用

铝合金铸件渗漏主要是由缩孔和缩松引起的,因此研究预测渗漏模型就是研究预测缩孔和缩松的模型,目前,预测铸件中产生缩孔缩松的模型主要有以下几类。

* 收稿日期:2004-05-20

作者简介:权燕燕(1981-),女,甘肃省庆阳县人,重庆大学硕士研究生,主要从事轻合金加工技术的研究开发。

1.1 缩孔、缩松的判据函数预测模型

早在20世纪50年代, Pellini^[2]就提出了为防止铸件中缩孔、缩松的产生, 冒口大小和充填距离之间关系的判据公式。经过半个多世纪的广泛研究, 科学家又先后提出用等温曲线法、温度梯度法、流导法、固相率梯度法和压力梯度法等^[3]来预测缩孔、缩松的产生, 并在实际应用中取得了良好的效果。其中, 最著名的判据公式要属 Niyama 于1982年提出的 $G/\sqrt{R} > K$ 法^[4] (G —温度梯度; R —凝固速度; K 为常数), 即新山判据。该判据认为在忽略了气体扩散析出对缩孔、缩松的影响情况下, G/\sqrt{R} 存在一个临界值 K ; 当 $G/\sqrt{R} < K$ 时, 该区域就会产生缩松。由于该判据不但具有一定的准确性, 而且计算比较简单, 很快人们在铸钢件凝固过程数值模拟中普遍采用此判据来预测缩松的产生。随后, Laurent V 等^[5]将此判据用于预测铝合金凝固时产生的缩松, 亦取得了良好的效果, 其 $K = 0.85$ 。国内陈昌明等^[6]通过新山判据来模拟和判断铝合金铸件中缩孔、缩松形成的倾向, 得到的结果是 G/\sqrt{R} 越小, 缩松形成趋势越大, 并通过分析后发现, 在一定程度上控制金属型壁厚, 可以有效的控制铸件的凝固过程, 达到消除缩松或减轻缩松程度的目的。

目前, 很多铸件缩孔、缩松预测的商业化软件都采用该判据, 如清华大学开发的 FT-Star 软件^[7]。但该判据很大程度上受到铸件的合金成分, 形状复杂度, 铸造工艺, 外界条件等因素的限制, 因此在实际应用中, 要根据具体情况对该判据进行适当的改进。例如, 田学雷等^[8]研究了压力对缩松预测的影响, 将金属液静压力 P_0 引入到缩松的判据中, 得到新的缩松判据为 $P_0 G/R$, 并将此判据应用于铝硅合金汽车轮毂低压铸造的缩松预测。通过计算机模拟所得到的缩松分布形状和位置与实际铸件中缩松的分布基本一致, 并且比原判据更加准确。贾宝仟等^[9]则考虑了成分偏析造成缩松预测偏差的问题, 从枝晶形成条件入手, 重新推导了该判据式, 得到如下判据式:

$$G/R < B \cdot \Delta T/D_L \quad (1)$$

其中: ΔT ——溶质浓度为 C_0 的合金液相线与固相线温度差, D_L ——液体中溶质的扩散系数, B ——与枝晶形态相关的修正系数。

1.2 缩松的连续性方程—达西定律预测模型

一般的缩松预测只是基于凝固的热状况, 得出凝固时间、温度梯度、冷却速度等热参数来获得预测判

据, 如 G/\sqrt{R} 法。然而对于铝合金等具有宽结晶温度范围的合金来讲, 还应综合考虑铸型内热状况、枝晶间流动状况、金属液中过饱和气体的析出和金属静压力等的影响^[10]。随着模拟技术的不断发展, 出现了一种新的模型, 该模型的基本思想是将枝晶间的补缩流动视为多孔介质中的流动, 通过联立连续性方程和达西定律来求解补缩过程中的补缩压力降, 并结合缩孔、缩松缺陷的形成机理来模拟其形成过程。

徐宏等^[11]运用这种模型对铝合金铸件进行了缩松的预测。他们首先假设: 1) 枝晶骨架不流动; 2) 缩松形成起源于一次枝晶的根部; 3) 达西定律描述的是枝晶域内液体流动的阻力。在此基础上综合质量守恒方程、动量方程和氢含量守恒方程, 建立了数学模型对铝合金铸件进行缩松的预测。该模型考虑了铸件形状、合金液枝晶间流动和含气量的影响, 从而提高了缩松预测的精度。该模型所用到的公式^[12]如下:

$$\bar{v} = -\frac{K}{\mu}(\nabla P - \rho g) \quad (2)$$

$$\left(\frac{\rho_s}{\rho_l} - 1\right)\frac{\partial f_1}{\partial t} - \frac{\partial f_1 v_i}{\partial x_i} + \frac{\partial f_P}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$P_g = P_m + \frac{2\gamma_{sl}}{r} \quad (4)$$

$$C_H^0 = (1 - f_1)C_s + f_1 C_l + \alpha \frac{P_g C_V}{T} \quad (5)$$

Kubo 等^[13]也在此方面做了相关研究, 他们假设孔洞产生在枝晶的固液界面上, 而且孔洞直径等于二次枝晶臂的间距; 随后利用达西定律和质量守恒方程求得局部金属液压力, 并运用缩松中气体压力方程确定熔体内气体压力, 然后根据已知的气体压力通过气体含量守恒方程确定是否有气孔生成。

通过联立连续性方程和达西定律对缩松进行预测的模型将新山判据中没有考虑的氢的影响考虑进来, 提高了预测的精度。然而该方法存在如下缺点: 不能预测孔洞的形状尺寸; 计算量相对较大。

1.3 氢气扩散受阻引起微孔形成的模型

前面所提到的2种模型都是在假设缩松的形成主要是由凝固过程中体积收缩引起的基础上建立起来的, 虽然第二种模型中也考虑了气体析出对缩松产生的影响, 但它不是主要因素。对于铝合金铸件, 由于其在凝固过程中会析出大量的气体, 因此研究气体析出对缩松、缩孔的产生所带来的影响尤为重要。最近几年, Lee 等^[14-16]科学家利用X射线温度梯度仪对 Al-

Cu 合金试样中微小孔洞形核和长大进行了动力学研究,通过比较气体析出和凝固收缩这两个导致铸件产生缩松的驱动力, Lee 发现, 在一些小的糊状区, 缩松的产生主要是由于气体扩散受阻引起的^[14], 由此推导出氢气扩散受阻引起微孔形成的模型。这个模型假设铸件中所有微孔同时形核, 并且微孔在铸件中规则排列。他认为在整个凝固过程中, 随着温度的降低, $[H]$ 在母液中经扩散、形核、长大而形成微小的气泡, 一旦气泡与合金液中固态粒子发生碰撞, 就被固态粒子包围, 形成紧密的球状结构^[15,17], 导致氢气扩散受到阻碍, 形成微孔。根据这些假设, 在形成的微孔的球状区域内氢气的扩散满足球坐标中改良的非克第二定律, 并得到如下公式:

$$\frac{\partial C_H}{\partial t} = D_H \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_H}{\partial r} \right) + S_t \quad (6)$$

其中: C_H ——氢气的浓度, D_H ——扩散系数, r ——微孔的球半径, S_t ——由凝固速度所决定的氢气受阻随时间变化的系数。

此模型在预测 Al - Si 合金铸件中缩松的平均尺寸大小及其生长过程方面较其它模型有很大的优越性。然而, 该模型存在以下局限: 无法运用到合金液发生流动时的问题; 不能解决由于体积收缩引起的缩松问题。

随着计算机技术的飞速发展, 计算机模拟已成为预测铸件中产生缩松和渗漏的有效手段。针对实际的某一类铸件, 采用合适的判据函数建立数学模型, 然后使用差分法或有限元法对铸件的凝固过程进行计算机模拟, 确定铸件凝固之后的缩松趋势和位置, 并通过反复模拟或分析来确定有效的避免缩孔、缩松的工艺和方法。利用这种方法可节约大量的时间和反复试验的费用, 生产成本大大减低, 尤其是在研发新产品或重量特别大的新铸件的过程中, 可以节约大量的人力、物力和试验经费, 并且抢得了时间, 增强了新产品的竞争力。

2 生产实践中预防和消除渗漏的措施

通过计算机模拟铸件的凝固过程来预测缩孔、缩松的形成只是近几十年来随着计算机行业的兴起才逐渐发展起来的, 长期以来, 在实际生产中对铝合金铸件中缩孔、缩松缺陷的预防和消除主要还是依据凝固过程的特点, 通过大量的试验来实现的, 这种方法在目前

仍然被广泛的采用, 主要有以下几个方面。

2.1 通过铝合金熔体的处理

铝合金液中存在超标的气体、夹杂时, 将在铸件中生成气孔、缩孔等缺陷, 从而造成铸件渗漏等问题。因此要获得良好的铝合金铸件必须先获得洁净的铝合金液。精炼是净化铝合金液的一种最常用的方法, 主要包括除气和除渣两个方面。除气(主要是除氢)是铝合金净化的一个重要途径, 在各种除气方法中, 旋转喷吹除气^[18]是目前公认的最有效的方法。20 世纪 80 年代末, 英国 FOSECO 公司推出了旋转喷吹 N_2 (Ar) 的精炼工艺。在此基础上, Hepworth 公司又推出了 N_2 (Ar) 喷吹熔剂精炼工艺。这两种方法均可达到很好的除气效果。

和旋转喷吹气相比, 熔剂精炼具有成本低, 设备和操作简单等特点。倪红军^[19]等自行研制了用于熔体净化的熔剂, 在净化时仅仅只需将该熔剂覆盖于熔体表面, 通过发生一系列的物理化学反应, 使铝液在 700 °C 时的含氢气量从 0.18 mL/100gAl 下降到 0.08mL/100gAl, 除气效果非常显著。

此外, 由于生产中的铝液中往往含有 Al_2O_3 等夹杂物, 在凝固过程中, Al_2O_3 会作为氢气泡的形核基底, 有利于氢气泡的形成, 因此必须消除 Al_2O_3 夹杂。黄良余^[20]等采用泡沫陶瓷过滤工艺对铝液进行除渣, 清除了 Al_2O_3 夹杂, 有效控制了氢气泡的形成, 解决了由此造成的铸件渗漏的问题。

2.2 通过工艺的改进

通过对渗漏机理的研究发现, 为防止缩孔和缩松的产生, 在凝固过程中应尽量采用顺序凝固方式以对铸件进行补缩, 并避免枝晶相互搭接形成骨架, 同时在较快的冷却速度下凝固来避免凝固过程中气体的析出。在实际生产中, 根据具体的铸件合理的选择浇铸方式、科学的设计冒口和模具, 并在适当的部位采用加冷铁, 铁芯, 溢流冒口等工艺措施, 可以控制其缩松缩孔的产生。李小俊等^[21]对生产铝合金帽子铸件的砂型铸造工艺进行了改进, 降低了缩孔、缩松的产生, 帽子铸件是高压开关中的关键铸件, 对力学性能和气密性要求很高。由于缩孔缩松等铸造缺陷引起的渗漏使废品率很高, 通过对帽子铸件结构及原砂型铸造工艺所致缺陷的种类和分布规律的综合分析, 改进了原工艺的浇注系统, 在铸件热节处设置了冷铁并在冒口根部设置了冒口颈, 造成了由热节向顶冒口顺序凝固的局部条件, 降低了缩松。新工艺使废品率由原来的 20 % 降

低到1%左右,大大提高了经济效益。然而这种方法遇到的最常见两个问题是:1)许多铸件结构复杂,难以采用冷铁激冷;2)冒口的大小、位置难以精确确定,并且在很多情况下会造成局部区域达不到设计强度。在此情况下,在铝合金铸件的生产中也常采用激冷涂料和激冷砂^[22]。

此外,改变成形过程中的某些工艺参数,也能在一定程度上减小缩孔和缩松形成的可能性。如在进行铝合金液态压铸时,从卫群等^[23]通过对快压射速度、增压建压时间、压射力和慢压射行程的正交试验后发现:先等速慢压射较长距离,然后高速大力压射,缩短增压建压时间,加大浇口厚度,使铝液填充平稳,减少卷气并补充铸件厚部铝液,这样就能极大地减少压铸件的缩孔缩松。

2.3 运用新工艺

除了传统预防缩孔缩松的方法外,近几年又发展了一些新工艺,亦可消除或减少缩孔缩松等铸造缺陷。例如在传统的铝合金液态压铸过程中,由于熔体卷入大量的气体,导致压铸件产生严重的缩孔和缩松,降低了铸件的综合机械性能,左宏志等^[24]采用半固态工艺^[25]对传统的液态压铸进行了改良,成功的压铸出的半固态摩托车零件,较液态压铸有更高的致密度,大大降低了缩孔和缩松的产生,使产品既具有接近锻件的优良机械性能,又有精密铸造一次精密成形的高效率、高精度,有广阔的应用前景。

单晶连铸技术^[26]也是一项新型技术,它将先进的定向凝固技术和高效的连续铸造技术相结合,可以连续铸造无限长的单晶金属型材。由于产品显微组织中无晶界,所以消除了铸件在凝固收缩过程中产生缩孔和缩松的可能。范新会等^[27]利用该技术原理,自制了实验用水平单晶连铸设备,并以工业纯铝为原料进行试验研究,得到无缩孔、缩松的铝铸件。

3 结 论

对于所介绍的目前比较流行的3种预测缩孔缩松产生的模型来说,虽然都具有一定的适用性,但都有自身的局限性,都不能精确的预测缩松的产生,这是由于缩孔缩松是由凝固收缩和气体析出共同作用产生的。除了要考虑和凝固收缩相关的热参数(温度梯度、冷却速度、凝固时间等)外,对于具有宽结晶温度范围和熔体中含气量很大的铝合金来说,还应综合考虑枝晶

间的微观流动以及氢气析出对铸件产生渗漏的影响。研究人员一直在试图探索一种理想的模型来克服这些局限,但由于需要更多的材质属性和边界条件而导致结构复杂,很难应用于实际生产。然而随着计算机处理数据的能力不断提高,使复杂模型的精确计算成为可能,因此,对铸件预测渗漏模型的研究和模拟预测方法的软件开发,仍将是今后研究的热点之一。

研究人员针对各自领域中的具体条件确定了很多有效的防治渗漏的方法,对在生产应用中预测铸件缩松、缩孔的产生具有一定的指导意义。然而,这些方法往往需要通过反复试验研究,要耗费大量的时间和人力、物力。因此,为了更精确的预测铸件中缩孔和缩松的发生部位及形状尺寸,应该将计算机模拟同实际生产结合起来,根据各领域的特定条件灵活的、发展的运用这些模型和方法,从而达到消除或减少铸件渗漏的目的,这对提高企业的效益,增强产品的国际竞争力具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 田荣璋,王祝堂. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南大学出版社,2000.
- [2] PELLINI W S. Factors which determine riser adequacy and feeding range[J]. AFS Trans, 1953, 61 (67):61-80.
- [3] 陈海青,李华基,曹阳. 铸件凝固过程数值模拟[M]. 重庆:重庆大学出版社,1991.
- [4] NIYAMA E, UCHIDA T, MORIKAWA M, et al. A method of shrinkage prediction and its application to steel casting practice[J]. AFS Int. Cast Metal, 1982, 9:52-63.
- [5] LAURENT V, RIGAUT C. Experimental and Numerical Study of Criteria Functions for Predicting) Microporosity in Cast Aluminum Alloys [J]. AFS Transaction, 1992, 100: 647-655.
- [6] 陈昌明,徐介文,方立高. 用凝固模拟方法预测铝合金铸件缩松的形成[J]. 南昌航空工业学院学报, 1994, 9(1): 85-90.
- [7] 崔吉顺,李文珍. 铸件缩孔缩松多种预测判据的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(8):5-8.
- [8] 田学雷,刘志勇. 金属液压力对缩松预测的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2001, 4:9-11.
- [9] 贾宝仟,柳百成. 铸件缩松缩孔判据 G/T1/2 的理论基础及应用[J]. 铸造, 1996, 4:13-15.
- [10] CHIOU I J, TSAI H L. Modeling of porosity formation in castings[J]. AFS Transactions, 1990, 98:823-830.
- [11] 徐宏,程军,钟雪友. 铝合金铸件缩孔缩松预测新技术[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5):34-38.

- [12] LEE P D, CHIRAZI A, SEE D. Modeling microporosity in aluminum - silicon alloys: a review[J]. *Journal of Light Metals*, 2001, 1:15 - 30.
- [13] KUBO K, PELKE R D. Mathematical modeling of porosity formation in solidification[J]. *Metall. Trans.*, 1985, 16B: 359 - 366.
- [14] LEE P D, HUNT J D. Hydrogen porosity in directional solidified aluminium - copper alloys: in situ observation[J]. *Acta Mater*, 1997, 45 (10): 4 155 - 4 169.
- [15] ATWOOD R C, SRIDHAR S, ZHANG W, et al. Diffusion - controlled growth of hydrogen pores in aluminium - silicon castings: in situ observation and modeling[J]. *Acta Mater*, 2000, 48 (2): 405 - 417.
- [16] WILT P M. Nucleation rates and bubble stability in water - carbondioxide solutions[J]. *Colloid Interface Sci.* 1986, 112(2): 530 - 538.
- [17] FREDRIKSSON H, SVENSSON I. On the mechanism of pore formation in metals[J]. *Metall. Trans.* 1976, 7B: 599 - 606.
- [18] 董孟环. 铝合金旋转喷吹工艺的水模拟研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2002, 7(4): 114 - 116.
- [19] 倪红军, 孙宝德, 蒋海燕. JDN - I 熔剂对铝熔体除氢净化效果的研究[J]. *轻合金加工技术*, 2001, 29(9): 13 - 15.
- [20] 黄良余, 张少宗. 铝合金熔体处理及炉料处理的若干问题——铝合金熔体处理部分[J]. *特种铸造及有色合金*, 2001, 4: 36 - 38.
- [21] 李小俊. 铝合金帽子砂型铸造工艺的改进[J]. *铸造*, 1997, 10: 27 - 29.
- [22] 谭锁奎. 激冷砂在铝合金铸造中的应用与发展[J]. *热加工工艺*, 1998, 1: 5 - 7.
- [23] 丛卫群. 控制某些压铸工艺参数以减少铸件气(缩)孔[J]. *特种铸造及有色合金*, 1994, 1: 39 - 40.
- [24] 左宏志, 刘昌明, 邹茂华, 等. ZL112Y 压铸铝合金摩托车零件的半固态高压铸造成形[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(4): 949 - 955.
- [25] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semi - solid state[J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 1991, 22A: 957 - 981.
- [26] MOTOYASU G, KANEKO M, SODA H, et al. Continuously cast Cu - Al - Ni shape memory wires with a unidirectional morphology[J]. *Metall. Mat. Trans. A Phys Metall. Mat Sci*, 2001, 32(3): 585 - 593.
- [27] 范新会, 魏朋义, 李建国, 等. 铝单晶线材连续铸造工艺及其性能[J]. *材料工程*, 1997, 9: 38 - 40.

Prediction of the Leakage of Aluminium Alloy Casting and Its Prevention

QUAN Yan-yan , PENG Xiao-dong , LIU Xiang-guo

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Two aspects of the study on the leakage of aluminium are introduced after the leakage mechanism of aluminium alloy casting is described. Three mathematical models, criteria function models, continuing equations - Darcy's law models, hydrogen diffusion - controlled pore growth models, are studied. Some measures of predicting leakage of casting in practice are summarized, such as the treatment of aluminium liquid and the adoption of new technics, Many different models of pore formation and growth have been proposed, however, each of these models has limitation and is not precision enough. Measures in practice have certain significance to the study of predicting leakage of casting, however, to obtain these measures cost a lot of time, manpower and material resource. In order to predict pore formation and growth of aluminium casting more precision, these mathematical models and practical measures should be integrated felicitously in different condition.

Key words: aluminium alloys; leakage; shrinkage cavity; porosity

(编辑 成孝义)