

电磁感应加热冒口对铝合金铸件补缩效果的研究

李 威, 关鲜洪, 孙治国, 张 伟, 向青春, 任英磊, 邱克强

(沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870)

摘要: 通过三组对照试验, 探究了有无感应加热冒口以及感应加热冒口有无加热套等情况下冒口对ZL101铝合金圆柱形铸件补缩效果的影响。试验研究结果表明: 感应加热冒口可改变冒口的温度场, 感应加热冒口对铸件的补缩效果明显优于无感应加热的冒口, 它使冒口内的金属液顺利地补缩铸件, 从而消除铸件内部的缩孔缩松缺陷。带有钢套的电磁感应加热冒口与无钢套的电磁感应加热冒口相比, 其补缩效果更好。本文还对感应加热冒口的补缩效果进行了模拟研究, 试验结果验证了模拟结果的准确性。

关键词: 感应加热; 冒口; 补缩效果; ZL101铸件; 缩孔缩松

铸件凝固过程中均产生体积收缩, 如果补缩不及时就会出现缩松缩孔缺陷, 大大降低铸件质量^[1]。如果冒口内的金属液先于铸件凝固, 导致冒口内残余金属液不能进入铸件内, 也会产生缩孔缩松缺陷^[2]。铸件冒口的设计是获得致密、合格铸件的重要工艺环节^[3]。企业普遍采用保温冒口^[4]和发热冒口^[5], 但由于二者都没有稳定热源, 无法长时间维持金属液稳定的热中心, 导致冒口补缩效果差^[6], 因此出现了电加热冒口。

电加热方式主要有电弧加热^[7]、电渣加热^[8]和电磁感应加热^[9-10]。不管是电渣加热还是电弧加热, 加热过程中都会污染金属液, 而且电弧加热由于使用石墨电极还会使金属液的含碳量增加, 所以本研究采用电磁感应加热的方式对冒口进行加热。变化的电流通过感应线圈就会产生交变磁场, 处在交变磁场中的导体会产生感应电流, 感应电流通过导体从而产生热效应^[11], 实现了电-磁-热三者之间的转换^[12]。感应加热冒口相比于普通冒口、保温冒口和发热冒口, 具有冒口尺寸小、加热效率高、不污染环境、设备操作简单方便、能耗低等优点^[13]。本文主要对ZL101铝合金圆柱形铸件的感应加热冒口进行对比工艺试验。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

图1为电磁感应加热冒口装置简图。在金属液浇注前, 先用感应线圈对钢套进行加热, 钢套将热量传递到冒口部位型腔内壁, 当金属液浇入冒口中时, 可以减缓冒口内壁对金属液的激冷, 同时, 感应线圈还可对刚浇入的金属液直接加热, 从而可有效延长冒口内金属液的冷却时间, 提高冒口的补缩效果。图2为感应加热冒口试验装置实物图。

1.2 试验方法

选择直径为90 mm, 高为100 mm的圆柱形铸件为试验和模拟研究对象, 根据铸造手册^[14]可知, 圆柱形铝合金铸件明顶冒口的计算公式为:

$$D_R = 1.2d_c \quad (1)$$

$$H_R = 1.2 \sim 1.8d_c \quad (2)$$

式中: D_R 为冒口根部直径; d_c 为铸件热节圆直径; H_R 为冒口高度。

作者简介:

李 威(1995-), 男, 硕士生, 主要研究方向为电磁感应加热冒口。电话: 13804029499, E-mail: 2233821434@qq.com

中图分类号: TG244+.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)04-0424-05

收稿日期:

2019-10-09 收到初稿,

2019-12-27 收到修订稿。

经过计算和多次数值模拟，最终选择冒口尺寸为 $\Phi 60$ mm，高140 mm来进行对比试验。表1所示为三组试验设计方案。

C组试验由于含有加热套的冒口在试验过程中需要预热，因此该冒口选择水玻璃砂造型，其余部分均采用树脂砂造型^[15]。加热套的内径为106 mm，外径为114 mm，壁厚为4 mm。所用中频感应加热电源设备的型号为DDZP-90型，额定功率为90 kW，电源频率为6 000~8 000 Hz。试验时，感应加热电源的功率为12.6 kW，感应加热时间为10 min左右。试验前通过感应加热先对加热套进行预热，通过加热套的传热使冒口部位的型腔温度升高到450℃左右，调节电源功率保温，然后进行浇注。当铸件上顶表面的温度下降到合金的固相线温度以下时，关闭感应加热电源，停止感应加热。

图3为试验装置中热电偶测温点的示意图。其中节点1、2、3测量冒口内不同高度位置的温度，节点4测量铸件中心偏上位置的温度，节点5测量加热套的温度。

试验过程中，通过观察温度记录仪的温度来调节电源功率，以保持加热冒口部位温度的恒定。金属液浇注结束后继续通电进行感应加热，保持冒口内金属液的温度在液相线以上，从而使铸件至冒口实现顺序凝固。

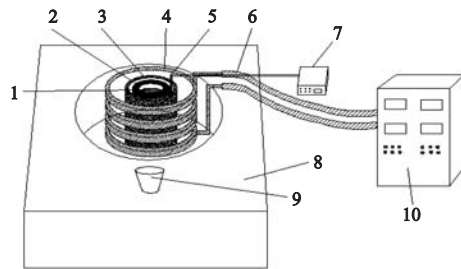
利用CAE软件对铸件的浇注和凝固过程进行模拟仿真，其模拟参数为：普通砂型重力铸造，铸件材质为ZL101，浇注温度为690℃，浇注时间为4.5 s，铸件与砂型的界面换热系数设为 $500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ，钢套与砂型的界面换热系数设为 $50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。先计算感应加热的加热效率，再将钢套作为一个内热源，计算出钢套的发热值，然后将其数值输入模拟软件中，从而实现感应加热冒口的凝固模拟。

2 结果与分析

2.1 模拟结果

图4为凝固时间1 000 s时，三组试验方案下铸件的温度场模拟结果。图5为三组试验方案下铸件最后凝固的缩孔缩松位置模拟结果图。图4a为带有常规冒口铸件的温度场模拟结果，从图中可以看出，在冒口根部与铸件顶部接触部位存在铸造热节，在金属液凝固过程中，该部位的温度较高为560~586℃，而冒口顶部与铸件底部的温度均较低，约为530℃左右，因此，金属液在凝固的过程中，冒口顶部以及铸件底部最先凝固，而铸件热节部位温度较高最后凝固，致使热节处部位形成孤立的液相区，冒口上方的金属液不能很好地补充热节处金属液的凝固收缩，从而导致在热节部位形成收缩孔洞，最终出现缩孔缩松缺陷，见图5a所示。从图4b中可以明显看出，有感应线圈装置进行感应加热的冒口，冒口中的金属液温度明显提高，其

温度为610~660℃，显著高于铸件温度（560℃左右），这样铸件至冒口自下而上形成了正的温度梯度，使铸件整体趋于顺序凝固，从而冒口内的金属液能较好地对铸件进行补缩，最终铸件内部没有明显缩松缩孔缺陷，见图5b所示。从图4c可以看出，在带有



1.金属液 2.铸型材料 3.钢套 4.感应线圈 5.热电偶
6.水冷电缆 7.温度记录仪 8.砂型 9.电源控制箱 10.浇口杯
图1 感应加热冒口装置图

Fig. 1 Schematic diagram of induction heating riser device

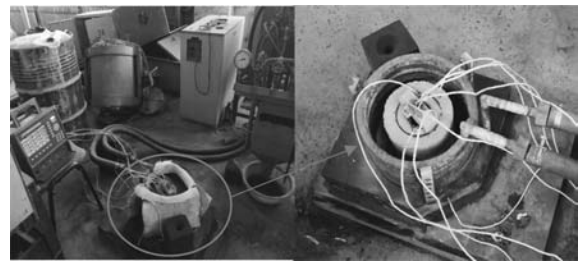


图2 感应加热冒口试验装置实物图

Fig. 2 Experimental device of induction heating riser

表1 冒口试验设计方案
Table 1 Scheme of riser experiments

组别	冒口尺寸/mm	加热套(钢质)	感应加热
A组	$\Phi 60 \times H140$	无	无
B组	$\Phi 60 \times H140$	无	直接加热
C组	$\Phi 60 \times H140$	有	直接加热和间接加热

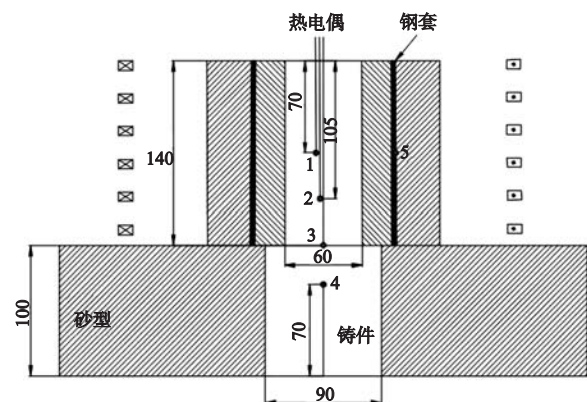


图3 热电偶测温点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of thermocouple temperature measurement points

钢质加热套的感应加热冒口内金属液的温度明显提高, 约为660~690℃。与前面两种冒口相比较, 该冒口中的金属液维持液体的时间更长, 补缩铸件收缩的效果更好, 而且铸件至冒口自下而上也形成正的温度梯度, 更有利于铸件实现顺序凝固, 最终铸件内

无缩松缩孔缺陷, 见图5c所示。

通过模拟结果对比可知, 感应加热冒口可使铸造过程中金属液最后凝固部位由铸件内部上移到冒口中, 而且, 带有加热套的感应加热冒口其补缩效果优于不带加热套的直接感应加热冒口。

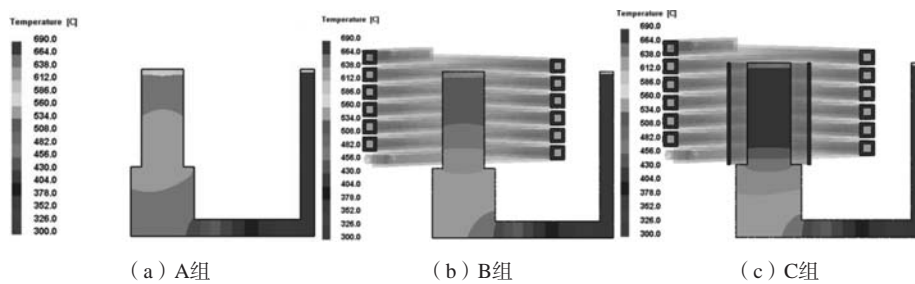


图4 凝固时间为1 000 s时三组试验的温度场分布模拟结果

Fig. 4 Temperature field distribution of three groups of casting at solidification time of 1 000 s

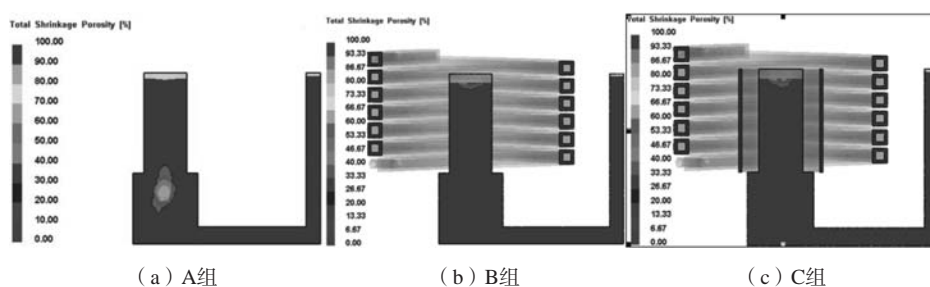
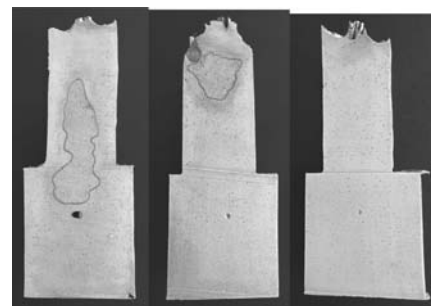


图5 三组试验的缩松缩孔缺陷模拟结果

Fig. 5 Simulations results of shrinkage porosity defects of three groups of casting

2.2 试验结果

图6为三组试验所得铸件及其冒口内的实际缩松缩孔形貌图。铸件及其冒口均从中间位置用线切割剖开, 然后经砂纸打磨抛光后所拍, 其中铸件内大的圆孔部位并不是缩孔, 而是节点4的热偶测温点位置。图6a是不带感应加热装置的传统冒口条件下所做的A组试验结果照片, 而且是根据铸造手册中数据明显缩小了的冒口条件下做出来的。根据传统冒口设计公式(1)和(2), 所需冒口的直径为108 mm, 所需冒口的高度为108~162 mm。从图6a中可以看出, 在铸件顶部和冒口中心部位均产生了明显缩松缩孔缺陷, 如图中划线区域所示。这是由于所用冒口模数比铸件的模数还小, 导致冒口中金属液并不能对铸件的凝固收缩进行补缩所产生的铸造缺陷。图6b是带有感应加热装置的冒口条件下所做的B组试验结果照片。在金属液浇注完毕后, 将感应加热电源开关打开, 对冒口中的金属液进行感应加热。从实际测温数据可知, 浇注完毕后200 s时, 感应线圈对冒口的加热效果并不明显, 此时冒口温度低于铸件金属液的温度(节点1-3的温度均比节点4的温度低), 这是因为一方面冒口的模数小, 刚浇进冒口内的金属液与冒口壁接触受到激冷, 冒口内金属液的温度下降比铸件金属液的温度下降要快; 另一方



(a) A组 (b) B组 (c) C组

图6 三组试验的实际铸件缺陷分布图

面, 感应加热需要一定时间才能使冒口内的金属液产生足够焦耳热。在浇注完毕后200~500 s内, 感应线圈加热冒口内金属液, 使冒口温度逐渐高于铸件, 此时节点1、2、3的温度均比节点4的温度高。直至铸件完全凝固完毕, 关闭感应线圈电源开关。在铸件的凝固收缩阶段, 由于冒口内的金属液在感应加热作用下, 其温度比铸件的温度要高, 因而能对铸件的凝固收缩起到较好的补缩作用, 从而使圆柱形铸件内部不再产生缩孔缩松缺陷。但此时在冒口顶部中心部位出现了缩孔缩松区域, 如图6b中划线区域所示。对比图6a、6b可知, 感应加热冒口可使原铸件中的缩孔缩松区域

上移至冒口内,从而避免铸件产生收缩缺陷,从而提高铸件质量。图6c是带有钢质加热套的感应加热冒口条件下所做的C组试验结果照片。由于在浇注前就打开了感应线圈电源开关,通过钢质加热套的感应加热对冒口进行了预热,所以金属液在浇注进入冒口中时,不会受到冒口的激冷作用而引起温度快速下降。此时,一方面,感应加热装置对冒口内的金属液直接产生感应加热作用;另一方面,感应加热装置还继续对钢质加热套产生感应加热作用,并将热量传输至冒口内的金属液而产生间接加热作用。从实际测温数据可知,节点1至节点4在整个铸造过程中基本上总是呈递减规律,从而使铸件至冒口完全实现顺序凝固,因而冒口对铸件起到了很好的补缩作用。从图6c中可以看出,铸件内部无任何缩孔缩松缺陷,甚至冒口内也不像图6b中那样存在明显缩孔缩松区域,只是在冒口的最顶部区域出现了明显的缩凹。对比图6b、6c可知,带加热套的感应加热冒口其补缩效果要更好一些。

2.3 模拟结果与试验结果的对比

三组试验节点4的温度场模拟结果与实测结果的对比如图7所示,可见模拟结果与实测结果的温度曲线总体上的走势相同。各点的温度相差不大,在误差允许的范围内。总体来看,模拟的温度场可以很好地反映出实际测量的温度场,因此可以利用CAE模拟软件对

实际铸件的温度场以及缩孔缩松缺陷位置进行预测,从而可以实现借助模拟手段减少试验次数和优化感应加热冒口铸造工艺参数的目的。

图8所示为三组试验缩孔缩松缺陷的模拟结果与实际试验结果对比。每组图中,左侧为模拟结果,右侧为试验结果。图8a-c的模拟图中,深色代表的是出现缩孔缩松缺陷的区域。由图8可见,三组试验缩孔缩松缺陷的模拟结果与实际试验结果大体上有一定的对应性,虽然它们之间仍有些差异,这主要是由于数值模拟时,将界面换热系数当做定值,而实际上其值是随着温度变化的,而且浇注温度会有波动,还有砂型的温度变化等多种物理因素的影响。

本试验研究表明,若按照传统的冒口设计方法,根据式(1)和式(2),则需采用直径108 mm、高160 mm的传统冒口,其冒口体积为 $1\ 465\text{ cm}^3$,此时铸件的工艺出品率为28.2%。若采用本试验设计的直径60 mm、高140 mm的电磁感应加热冒口,则冒口体积为 396 cm^3 ,此时铸件的工艺出品率为53.6%,相比于传统冒口,铸件的工艺出品率提高了25.4%。根据铸造手册^[14]查表可知,传统普通明冒口的补缩效率 $\eta=14\%$,保温冒口的补缩效率为25%。根据公式,计算出本研究C组试验的电磁感应加热冒口的补缩效率为32.5%,其中 V_R 是冒口的初始体积为 396 cm^3 , V_{RE} 是凝固结束后冒口的残余体积为 267 cm^3 。根据《铸造工艺及设计》^[16]

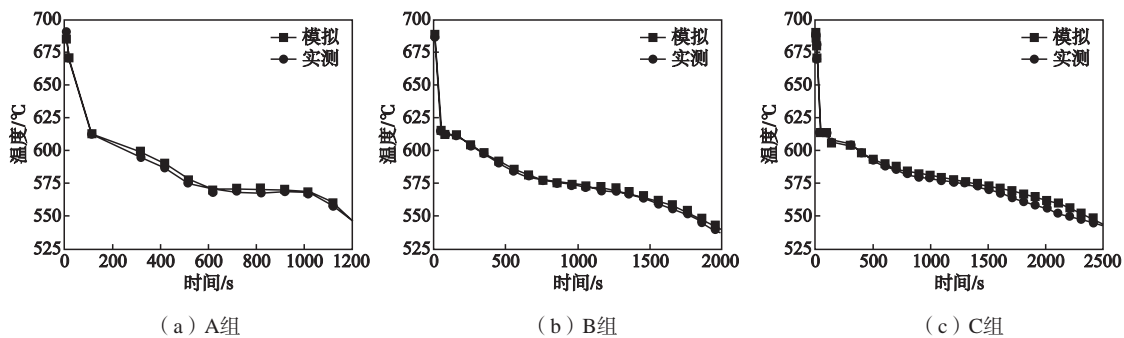


图7 三组试验节点4的温度场模拟结果与实测结果对比

Fig. 7 Comparison of simulation results and measured results of temperature field at point 4 in three groups of casting

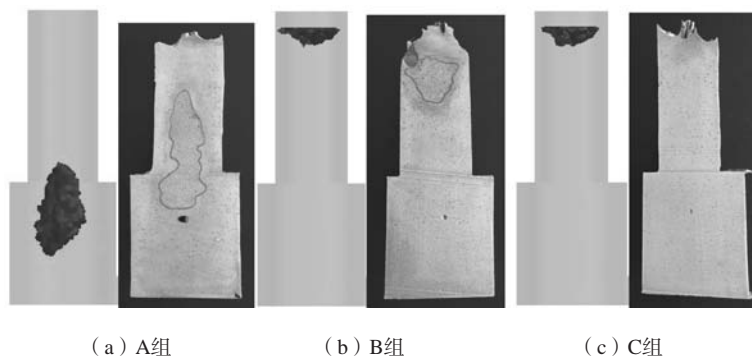


图8 三组试验缩孔缩松缺陷的模拟结果与实际试验结果的对比

Fig. 8 Comparison of simulation results and experimental results of shrinkage porosity defects in three groups of casting

可知,保温发热冒口的补缩效率约为30%。可见,本研究中电磁感应加热冒口的补缩效率和补缩效果比保温冒口和发热冒口均要好。

3 结论

(1) 电磁感应加热冒口的补缩效果明显优于相同尺寸的普通冒口、保温冒口和发热冒口。采用电磁感

应加热冒口,可以缩小冒口的体积,提高冒口的补缩效率和铸件的工艺出品率。电磁感应加热冒口装置还具有可以重复使用、不污染环境等特点。

(2) 带有加热套的电磁感应加热冒口其金属液凝固时间长于没有加热套的电磁感应加热冒口,它采用间接加热和直接加热相结合,从而更有利于冒口的补缩作用,避免铸件产生收缩缺陷。

参考文献:

- [1] 刘继常. 用激光加热冒口内金属提高补缩效率 [P]. 中国, CN200510031287.5. 2006-9-6.
- [2] FLINN R A. Fundamentals of metal casting [M]. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1963.
- [3] IMAFUKU I, CHIJIWA K. A mathematical model for shrinkage cavity prediction in steel castings [J]. AFS Transactions, 1983, 91: 527-540.
- [4] CORBETT C F. The use of insulating materials for feeder heads in steel castings [J]. The British Foundryman, 1974, 67 (4): 106-115.
- [5] RUDDLE R W. Riser aids in steel foundry practice [J]. AFS Transactions, 1975, 83: 577-584.
- [6] 徐自立. 发热冒口的应用 [J]. 汽轮机技术, 1978 (1): 27-31.
- [7] 向川, 黄智慧, 董华军, 等. 真空开关电弧对阳极加热作用的仿真研究 [J]. 高电压技术, 2017, 43 (12): 3929-3937.
- [8] 徐万里, 耿茂鹏, 赵准, 等. 金属表层电渣加热的试验模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (18): 58-60.
- [9] WU C Y, ZHOU Y M, JIN X L. Progress on research of induction heating in baosteel [J]. Baosteel Technical Research, 2016, 10 (1): 21-27.
- [10] COX M R, POOLE G M. Numerical simulation of electromagnetic and heat transfer phenomena in inductively heated risers [C]. CFD modeling and simulation in materials processing, 2018.
- [11] 孔雪. 感应加热冒口升温特性及在典型平板铸钢件上的应用 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- [12] 孙兴龙, 许长军, 胡小东, 等. 矩形电磁冒口内部磁场分布模拟研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (12): 1257-1260.
- [13] 向青春, 邱克强, 张伟, 等. 铸造冒口感应加热装置及铸造冒口感应加热方法 [P]. 中国, CN201510186969.7, 2017-7-21.
- [14] 李新亚. 铸造手册: 铸造工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [15] 邱克强, 尹衍良, 向青春, 等. 感应加热冒口对铸钢件补缩效果的影响 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (1): 102-105.
- [16] 陈百明. 铸造工艺及设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.

Feeding Effects of Electromagnetic Induction Heating Riser on Aluminum Alloy Casting

LI Wei, GUAN Xian-hong, SUN Zhi-guo, ZHANG Wei, XIANG Qing-chun, REN Ying-lei, QIU Ke-qiang

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

Abstract:

By designing three groups of comparison experiments, the feeding effects of risers on ZL101 aluminum alloy cylindrical castings with a common riser, with an electromagnetic induction heating riser, and with an electromagnetic induction heating riser containing a steel sleeve, were investigated, respectively. The experimental results show that the feeding effect of the electromagnetic induction heating riser on the cylindrical casting is much better than that of the conventional riser. It was found that the electromagnetic induction heating can change the temperature field distribution of the riser and facilitate the smooth filling of the molten metal in the riser into the casting, thus eliminating the shrinkage porosity defects of the casting. The research results also show that the feeding effect of the electromagnetic induction heating riser containing a steel sleeve is better than that riser containing no sleeve. In the paper, the feeding effects of the electromagnetic induction heating risers were simulated, and the simulation results were compared with the actual experimental results. It was found that the simulation and experimental results are basically in good agreement.

Key words:

induction heating; riser; feeding effect; ZL101 casting; shrinkage and porosity