

文章编号:1000-582X(2012)11-062-05

## 铸件/铸型热力耦合界面换热系数的稳态法测量

赵建华<sup>a,b</sup>, 宋刚<sup>a</sup>, 王亚军<sup>a</sup>, 曾礼<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

**摘要:**通过自行设计的实验装置研究了 A356/H13 钢在热力耦合下的界面换热系数随温度和接触载荷的变化规律。结果表明:采用由滑轮增力机构和液压增力机构组成的二级增力机构加载的稳态热流方法,可以对铸型/铸件热力耦合界面换热系数进行测量研究;双边加热实验比单边加热实验具有优越性;在所测量的温度和载荷范围内, A356/H13 钢界面换热系数随着温度和载荷的增加而呈增大趋势;温度较高时的 A356/H13 钢界面换热系数对温度的敏感性比温度较低时大; A356/H13 钢界面换热系数与界面载荷成近似线性关系。

**关键词:**换热系数;界面;耦合;铸件;稳态

**中图分类号:** TG21+4

**文献标志码:** A

### Experimental research for heat transfer coefficient of casting/mold interface with thermal-mechanical coupling effects using steady-state method

ZHAO Jianhua<sup>a,b</sup>, SONG Gang<sup>a</sup>, WANG Yajun<sup>a</sup>, ZENG Li<sup>a</sup>

(a. College of Materials Science and Engineering; b. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The variation tendency of interface heat transfer coefficient of A356/H13 steel with the thermal-mechanical coupling effects is investigated by using an experimental setup designed by the authors. The results show that, the steady-state heat flow method, which is realized by means of a multiple force amplifier consisting of a pulley force amplifier and a hydraulic force amplifier, can enable the study of the heat transfer coefficient of casting/mold interface with thermal-mechanical coupling effects; the bilateral heating experiments are superior to the unilateral ones; the increase of temperature or load causes the increase of interface heat transfer coefficient in the test range; moreover, the interface heat transfer coefficient at high temperature is more sensitive to temperature than at low temperature, the interface heat transfer coefficient of A356/H13 is nearly linear with the interface load.

**Key words:** heat transfer coefficients; interfaces; coupling; castings; steady-state

边界条件的设置对铸造过程计算机模拟结果的精确性影响很大<sup>[1-3]</sup>。对于存在型芯的铸件与铸型界面,分为铸件/铸型外型界面和铸件/铸型内芯界面。有研究者指出:铸件内界面与外界面换热特性

不同,对于内界面,间隙达到最大值后型芯发生膨胀,铸件发生收缩,致使界面间隙不断减小,与外界面变化规律相反<sup>[4-7]</sup>。外界面随着冷却时间的增加而换热系数减小;而内界面则随着冷却时间的增加,

**收稿日期:** 2012-06-15

**基金项目:** 国家科技攻关重大专项资助项目(G09003, 2-1); 重庆市科技攻关项目(CSTC2009AA3012-3)

**作者简介:** 赵建华(1962-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事铸造、轻合金材料、模具技术等方面研究;(E-mail) zjhzwz@yahoo.com.cn。

换热系数增大<sup>[8-10]</sup>。目前,国内外对铸件/铸型界面换热系数作了一定量的研究,主要集中在外界面,内界面换热研究很少<sup>[11-12]</sup>。为了更好地研究铸件/铸型内界面的换热系数,笔者设计了一套可测量较高温度下界面换热系数的装置来研究铸件收缩包紧力对铸件/铸型内芯界面换热系数的影响规律,重点研究了 A356/H13 钢在热力耦合下的界面换热系数。

## 1 实验原理与装置

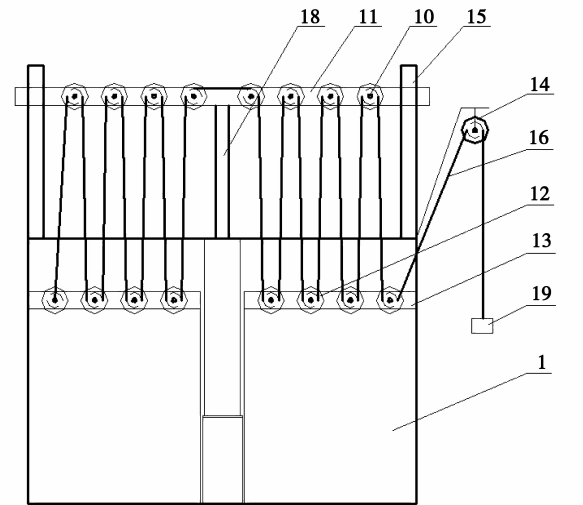
笔者采用由滑轮增力机构和液压增力机构组成二级增力机构加载的稳态热流法,对 A356/H13 钢在热力耦合下的换热系数进行测量研究,并从中找出界面换热系数与界面接触载荷、界面温度等因素的关系。本实验装置结构原理如图 1 所示,该装置主要由温度控制系统、加载装置、数据采集系统等组成。其中加载装置由滑轮增力机构和液压增力机构组成二级增力机构。砝码 19 的载荷通过滑轮增力机构增力后加在小缸径液压缸 7 的活塞杆 18 上,小缸径液压缸 7 液压力通过液压油管 9 传递给大缸径液压缸 8,大缸径液压缸 8 通过大活塞杆 17、加热夹头 I 将放大后的载荷加在试样上。滑轮增力机构增力倍数由动滑轮组上的钢绳段数  $n$  决定,液压增力机构增力倍数由大、小液压缸活塞面积之比  $m$  决定,则二级增力机构增压倍数为  $n \times m$  倍。实验时,将铸件(试样 1)和铸型试样(试样 2)分别放入加热夹头内。试样 1 和试样 2 的接触面直径为 40 mm,高均为 50 mm。所有接触面用 800# 水砂纸打磨处理,以得到平整的表面。图 2 所示为试样及热电偶的位置。热电偶孔距接触界面均为 1 mm,夹头及试样周围用隔热石棉包裹,只留铸型上表面散热,以保持单向散热条件。用便携式桌面温控单元控制铸件、铸型温度和实时显示测温点上热电偶的温度,用无纸记录仪对数据进行记录处理。

通过便携式温控单元分别设置铸件、铸型温度,温控单元自动调节热夹头内热源加热功率,经过一定时间后,加热功率等于散热功率,铸件、铸型中的温度场趋于稳态。根据牛顿冷却公式<sup>[13]</sup>可推导出计算铸件/铸型界面换热系数的公式:

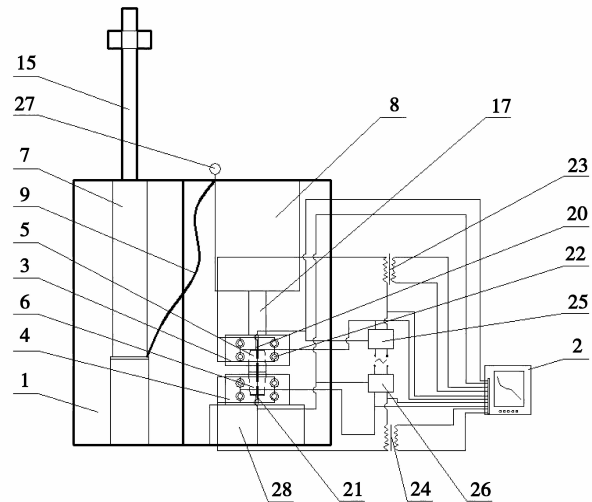
$$h = \frac{Q}{\Delta T A} = \frac{U_c I_c}{(T_1 - T_2) A}, \quad (1)$$

式中: $h$  为界面换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $Q$  为单位时间通过界面传递的热量,  $W$ ;  $\Delta T$  为界面的温度差(即铸件与铸型的温度差),  $^\circ C$ ;  $A$  为换热界面的面积,  $m^2$ 。  $U_c$  为铸件加热器两端的电压,  $V$ ;  $I_c$  为流过铸件加热器的总电流,  $A$ ;  $T_1$ 、 $T_2$  为界面处铸件与铸型

温度,  $^\circ C$ 。



(a)主视图



(b)左视图

图 1 实验装置示意图

1—机架; 2—记录分析仪器; 3—加热夹头 I; 4—加热夹头 II; 5—待测试样 I; 6—待测试样 II; 7—小缸径液压缸; 8—大缸径液压缸; 9—液压油管; 10—动滑轮组; 11—动滑轮组安装板; 12—定滑轮组; 13—定滑轮组安装板; 14—第一定滑轮; 15—导向柱; 16—钢丝绳; 17—大活塞杆; 18—小活塞杆; 19—砝码; 20—试样 I 测温探头; 21—试样 II 测温探头; 22—加热棒; 23—互感器 I; 24—互感器 II; 25—温控单元 I; 26—温控单元 II; 27—压力表; 28—垫块

通过添加砝码从小到大改变铸件/铸型界面接触载荷,设定铸件、铸型温度,温控单元则自动调节加热功率,可以得到在不同界面接触载荷下的稳态,只要测出稳态下铸件加热夹头加热器两端的电压、电流及界面面积就可以得到铸件/铸型界面在不同稳态下的换热系数。

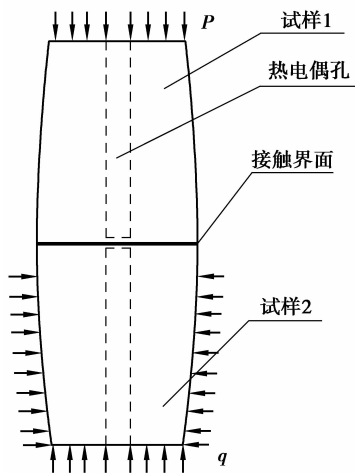


图 2 试样及热电偶安装位置

## 2 实验结果与分析

利用上面的实验装置和实验原理,分别采用单边加热和双边加热,对 A356/H13 钢在不同界面温度和载荷下的界面换热系数进行测量,以探索温度和载荷对界面换热系数的影响规律。

### 2.1 单边加热条件下温度及载荷对界面换热系数的影响

单边加热是在实验中只对 A356(铸件)加热, H13 钢(铸型)不加热;周围用隔热石棉包裹,仅留上表面散热,以实现一维传热;铸件在设定的温度和载荷下达到稳态,计算出此时的换热系数。实验时铸件温度分别设置为 400、450、480、510、540 °C,每个温度下分别测定在 1.68、4.48、7.28、12.88 MPa 下稳态时的换热系数。实验结果如图 3 所示。

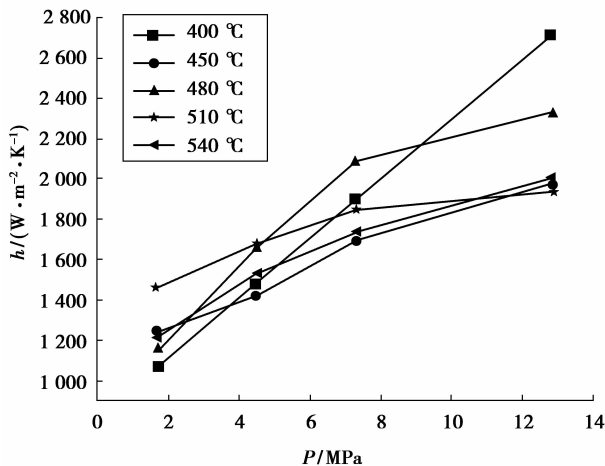


图 3 单边加热的不同铸件温度下, A356/H13 钢界面换热系数随载荷的变化

单边加热时在一定的温度下随着接触面压强的增加, A356/H13 钢界面接触越来越紧密,界面热阻减小,界面换热系数增大。从图中看不出铸件温度对换热系数影响的明显规律,其原因主要是铸型/铸件热力耦合界面换热受接触面压强、铸件温度、铸型温度(或界面温差)影响,在单边加热条件下只能控制界面中铸件侧的温度,而铸型侧的温度不能控制,界面温差不为恒定,带来单边加热条件下温度对换热系数的影响关系比较复杂。

### 2.2 双边加热条件下温度及载荷对界面换热系数的影响

双边加热是对 A356 和 H13 钢都进行加热,可以按实验要求控制铸件及铸型两侧的温度,消除了单边加热界面温差无法控制的弊端。笔者为考察接触面压强、铸件温度对界面换热系数的影响,保持界面温差恒定,取界面温差为 40 °C 进行双边加热实验。

图 4 为不同界面接触载荷时, A356/H13 钢界面换热系数随铸件界面温度变化曲线。从图 4 可以看出,在测定的温度范围内,换热系数随铸件界面温度变化的趋势是铸件界面温度越高,换热系数越大。A356/H13 钢界面换热系数在 450~480 °C 时随温度变化的斜率比 510~540 °C 时小。因此可以得出铸件界面温度较高时的 A356/H13 钢界面换热系数对温度的敏感性比铸件界面温度较低时大。

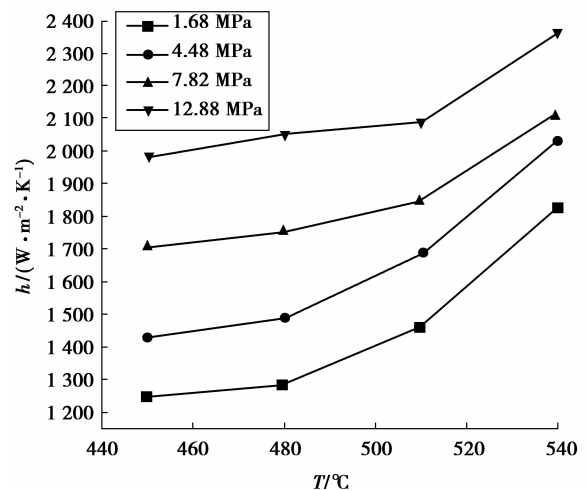


图 4 双边加热的不同载荷下, A356/H13 钢界面换热系数随温度的变化

图 5 为不同接触载荷且界面温差均为 40 °C 时, A356/H13 钢界面换热系数随铸件界面温度的变化曲线。从图中可以看出随着界面接触载荷和铸件界

面温度的提高, A356/H13 钢界面换热系数都呈增大趋势。且在测定的载荷范围内铸件/铸型界面换热系数与界面载荷成近似线性关系。

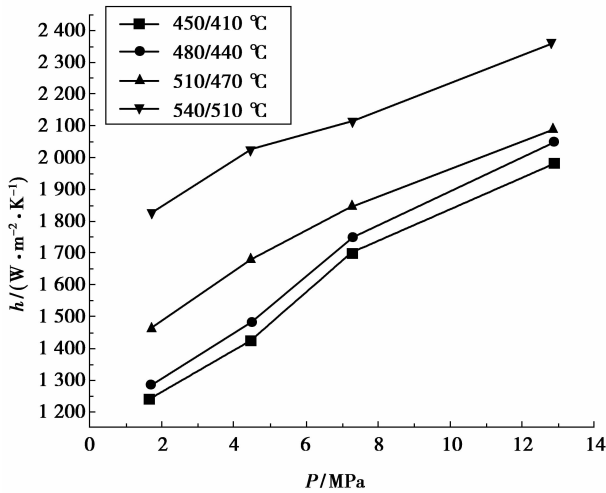


图 5 双边加热的不同铸件界面温度下, A356/H13 钢界面换热系数随载荷的变化

### 2.3 铸件/铸型热力耦合界面的传热过程分析

从微观角度看, 铸件及铸型表面不是理想的平面, 在其表面有很多微小突起。在热力耦合条件下, 铸件/铸型界面微凸体产生微观弹性、塑性变形以及蠕变, 实际的接触仅发生在一些离散点或微小面积上, 如图 6 所示。微接触点之间的热传导, 一般起主要换热作用, 换热系数的大小受实际有效接触面积大小影响。

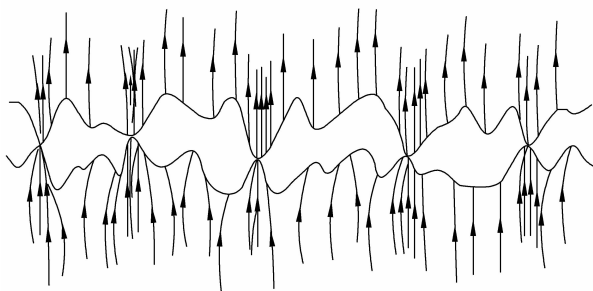


图 6 接触界面微观及热流变化图

当温度一定时, 材料的单位面积的变形抗力一定。对界面外加一个载荷  $P$  时, 接触的微凸起产生变形, 最后总变形抗力与外加的载荷相等时达到平衡。设材料单位面积的变形抗力为  $\sigma$ , 界面总面积为  $A$ , 受力平衡时的单位有效接触面积为  $S$ , 则有

$$\sigma SA = P, \quad (1)$$

或  $\sigma A = P/S$ 。 (2)

实验中,  $S$  为定值。温度一定时,  $\sigma$  为常数。由式(2)可以看出, 载荷  $P$  增大时单位有效接触面积  $S$  增大。而其他因素一定时, 单位有效接触面积(即有效传热面积)与换热系数成正比。因此, 载荷与换热系数成正比。图 5 的结果可以用温度一定、载荷增加时界面有效接触面积增加来解释。

当载荷一定时, 随着温度的升高, 材料单位面积的变形抗力  $\sigma$  降低, 根据式(1), 单位有效接触面积  $S$  增大才能达到新的力学平衡, 而单位有效接触面积  $S$  增大的结果带来界面换热系数的增大, 这种解释与图 4 的结果是一致的。至于为什么铸件界面温度较高时的 A356/H13 钢界面换热系数对温度的敏感性比温度较低时大, 笔者分析可能与温度升高时材料力学特性的变化、界面材料的扩散以及界面材料氧化层的变化有关。从低温到高温, 材料的力学状态将从硬化态、到半硬化态、再到软化态的变化。在笔者研究的温度范围内, H13 处于半硬化态, 而 A356 处于半硬化态及软化态。在温度升高到约 500 °C 时, A356 进入软化态, 其单位面积的变形抗力  $\sigma$  降低速度增大, 根据式(1)力学平衡时单位有效接触面积  $S$  增大的程度增加。同时, 在热力耦合条件下随着温度的升高以及时间的增加, A356/H13 钢接触界面直接将产生相互扩散, 随着扩散的进行, A356/H13 界面接触紧密程度越来越高, 对换热有较好的促进作用。随着界面温度的升高还会产生氧化层, 氧化层较硬且导热率比母体金属小得多, 因此将阻碍界面的换热。随着温度升高, 材料单位面积的变形抗力  $\sigma$  降低, 材料的变形程度增加, 界面氧化层必定会发生不同程度的破裂, 因此改变了实际接触状态, 引起接触换热系数的增加。这些因素将导致耦合界面的接触状态变得复杂, 影响了实际的界面接触面积, 从而改变了接触条件、影响耦合界面换热系数。

## 3 结 论

1) 采用由滑轮增力机构和液压增力机构组成的二级增力机构加载的稳态热流法, 可以对铸型/铸件热力耦合界面换热系数进行测量研究。且双边加热实验比单边加热实验具有优越性。

2) 双边加热实验中, 当界面温差一定(40 °C)时, A356/H13 钢界面换热系数随着铸件界面温度和载荷的增大而增大; 在所测定的温度和载荷范围内, 铸件界面温度较高时的 A356/H13 钢界面换

热系数对温度的敏感性比温度较低时大, A356/H13 钢界面换热系数与界面载荷成近似线性关系。

#### 参考文献:

- [1] Rafique M M A, Iqbal J. Modeling and simulation of heat transfer phenomena during investment casting[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(7/8): 2132-2139.
- [2] Kumar G, Hegde S, Prabhu K N. Heat transfer and solidification behaviour of modified A357 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1/2/3): 152-156.
- [3] Lau F, Lee W B, Xiong S M, et al. A study of the interfacial heat transfer between an iron casting and a metallic mould[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 79(1/2/3): 25-29.
- [4] Rajan T P D, Prabhu K N, Pillai R M, et al. Solidification and casting/mould interfacial heat transfer characteristics of aluminum matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(1): 70-78.
- [5] Aweda J O, Adeyemi M B. Experimental determination of heat transfer coefficients during squeeze casting of aluminium [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1477-1483.
- [6] Mehmet S H, Kadir K, Ramazan, K, et al. Determination of unidirectional heat transfer coefficient during unsteady-state solidification at metal casting-chill interface [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(1): 19-34.
- [7] Zhang L Q, Li L X, Ju H, et al. Inverse identification of interfacial heat transfer coefficient between the casting and metal mold using neural network [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(10): 1898-1904.
- [8] Amin M R, Mahajan A. Modeling of turbulent heat transfer during the solidification process of continuous castings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1/2/3): 155-166.
- [9] Guo Z P, Xiong S M, Liu B C, et al. Determination of the heat transfer coefficient at metal-die interface of high pressure die casting process of AM50 alloy[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25/26): 6032-6038.
- [10] Zhao J H, Tian J, Qian H C. Interfacial heat-transfer between A356-aluminium alloy and metal mould[J]. China Foundry, 2009, 6(4): 109-111.
- [11] Zhang W H, Xie G N, Zhang D. Application of an optimization method and experiment in inverse determination of interfacial heat transfer coefficients in the blade casting process [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1068-1076.
- [12] Xiao B W, Wang Q G, Jadhav P, et al. An experimental study of heat transfer in aluminum castings during water quenching [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(14): 2023-2028.
- [13] 朱光俊. 传输原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

(编辑 王维朗)