

钪和锆对低压铸造铝硅合金气缸盖二次枝晶间距的影响

毛郭灵, 周海涛, 胡定云, 何晓东, 王 岩, 江 超

(中国北方发动机研究所(天津) 车用动力系统全国重点实验室, 天津 300400)

摘要: 利用仿真的方法开展研究, 首先对仿真结果进行了标定, 铝硅合金气缸盖二次枝晶的仿真结果与试验结果能一一对应, 然后研究了钪(Sc)和锆(Zr)对低压铸造铝硅合金气缸盖二次枝晶的影响。结果表明: 添加Sc后, 低压铸造铝硅合金气缸盖的二次枝晶间距微量增加; 添加Zr后, 低压铸造铝硅合金气缸盖的二次枝晶间距微量减小; 联合添加Sc和Zr后, 低压铸造铝硅合金气缸盖的二次枝晶间距微量增加, 即Sc和Zr在材料级上对二次枝晶的积极作用没有完全体现在零件级铝硅合金气缸盖上。添加Sc和Zr后, 铝硅合金的导热率和固相分数等性质改变, 气缸盖相同位置的凝固时间不同。之后需要优化气缸盖的结构和工艺, 以充分发挥Sc和Zr的积极作用。

关键词: 钪(Sc); 锆(Zr); 低压铸造; 铝硅合金气缸盖; 二次枝晶

随着汽车工业的发展, 柴油机的工作环境更加恶劣, 如更大的机械载荷和更高的温度载荷等, 这就要求柴油机具有更高的性能^[1-3]。气缸盖是柴油机非常关键的零件之一, 其组织与性能决定着柴油机能够服役的工况及寿命^[4-5]。改善气缸盖的组织并提高其性能具有重要意义, 添加微量元素是一种常用且有效的改善组织提高性能的方法^[6-7]。但气缸盖结构复杂、壁厚不均, 包含气道、润滑油道、冷却水道和螺栓孔等, 制造时造型复杂, 工序时间较长, 需要很多人力物力, 若利用试验一一确定微量元素的种类、含量和工艺等, 则会消耗大量的人力物力, 因此需借助仿真模拟手段提高效率。

为了满足轻量化需求, 大部分气缸盖的材料都是铝硅合金^[1-3], 而二次枝晶是决定铝硅合金力学性能最关键的组织^[4-7], 因此本文以铝硅合金气缸盖的二次枝晶为研究对象。对于铝硅合金材料, 添加Sc(钪)和Zr(锆)后, 铝硅合金的二次枝晶间距减小, 力学性能提高。中北大学的姚衡研究了Sc对铝硅合金组织与性能的作用, 结果表明, Sc能细化二次枝晶, 当Sc含量为0.2%时, 二次枝晶间距最小, 力学性能最高^[8]。何兵等人的研究表明添加Sc后, A356合金(铝硅合金)的二次枝晶间距减小, 力学性能提高^[9]。黄佩武等人的研究表明Zr能使铝硅合金的枝晶细化, 力学性能提高^[10]。与零件相比, 材料级结构和工艺简单, Sc和Zr在材料级上对二次枝晶的积极作用能否体现在零件上, 以及添加Sc和Zr后零件的结构和工艺如何改变, 都需要进行大量的基础数据积累。针对零件级铝硅合金气缸盖, 贾正峰等人研究了二次枝晶间距与气缸盖裂纹的关系以及二次枝晶间距仿真的实现方式^[15]。陈晓斌等人利用仿真研究了气缸盖的凝固过程^[16]。迄今为止, 并没有添加Sc和Zr后气缸盖二次枝晶的相关研究。因此, 本文拟利用仿真的方法研究Sc和Zr对气缸盖二次枝晶的影响, 为Sc和Zr在铝硅合金气缸盖上的工业化应用提供基础数据, 为添加Sc和Zr后改变气缸盖的结构和工艺指明方向。

作者简介:

毛郭灵(1994-), 男, 副研究员, 主要从事铝硅合金工艺、性能研究及其工业化应用。电话: 15574887645, E-mail: maoguoling@163.com

中图分类号: TG249.2;

TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

05-0649-07

收稿日期:

2024-09-12 收到初稿,

2024-11-12 收到修订稿。

1 仿真结果标定

利用ProCAST软件进行仿真计算,选择仿真网格的类型为四面体网格。图1所示为气缸盖网格模型,红色箭头标识的是气缸盖,其他的部分为冷铁、冒口和浇道等铸造辅助系统,共3 599 218个网格。依据气缸盖生产实际设置边界条件,浇注方式为低压浇注,浇注压力如图2(a)所示;合金与冷铁的换热系数如图2(b)所示,合金与铸型的换热系数如图2(c)所示,冷铁与铸型的换热系数为 $700 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;浇注温度为 695°C 。

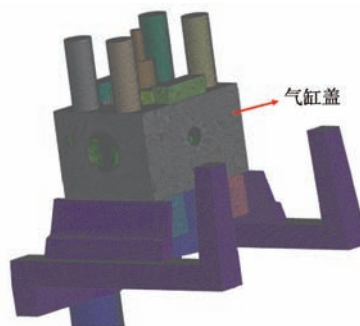
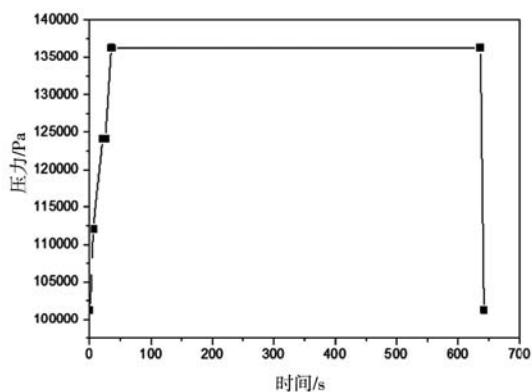
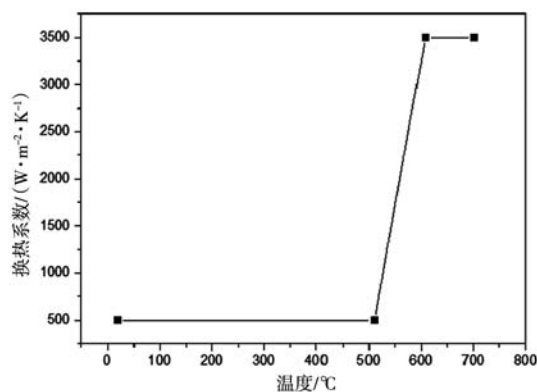


图1 气缸盖网格模型

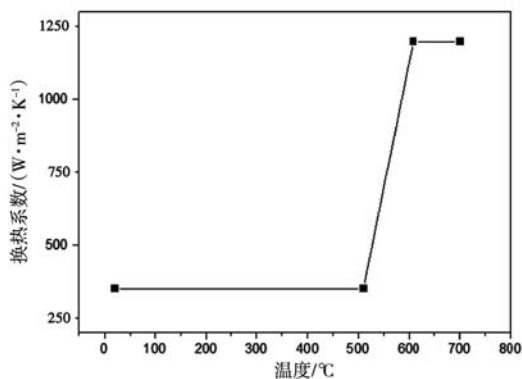
Fig. 1 Cylinder head mesh model



(a) 浇注压力曲线



(b) 合金与冷铁的换热系数



(c) 合金与铸型的换热系数

图2 仿真计算边界条件

Fig. 2 Boundary conditions for simulation calculation

图3所示为仿真计算得到的气缸盖不同视角的二次枝晶臂间距,底板二次枝晶间距为 $14.4\sim 28.8 \mu\text{m}$,顶板二次枝晶间距为 $28.8\sim 43.2 \mu\text{m}$,气道壁二次枝晶间距为 $72.0\sim 86.4 \mu\text{m}$ 。浇注气缸盖样品,在底板、顶板和气道壁三个位置切取金相试样,统计其二次枝晶臂间距。图4所示为取样位置,图4(a)至(c)中黄色虚线矩形框标识的是底板、顶板和气道壁的切取部位,红色圆圈标识的是金相试样切取部位。图4(d)至(f)中红色颜料标识的是所观察的金相试样面。分别在底板、顶板和气道壁取样3个,按照QJ 3290-2007标准,利用金相显微镜对二次枝晶进行观察,结果如图5所示,求

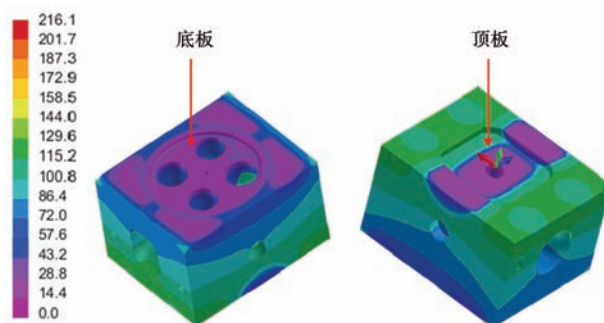


图3 仿真计算得到的气缸盖不同视角的二次枝晶臂间距

Fig. 3 Secondary dendrite arm spacing from different perspectives of cylinder head obtained through simulation calculation

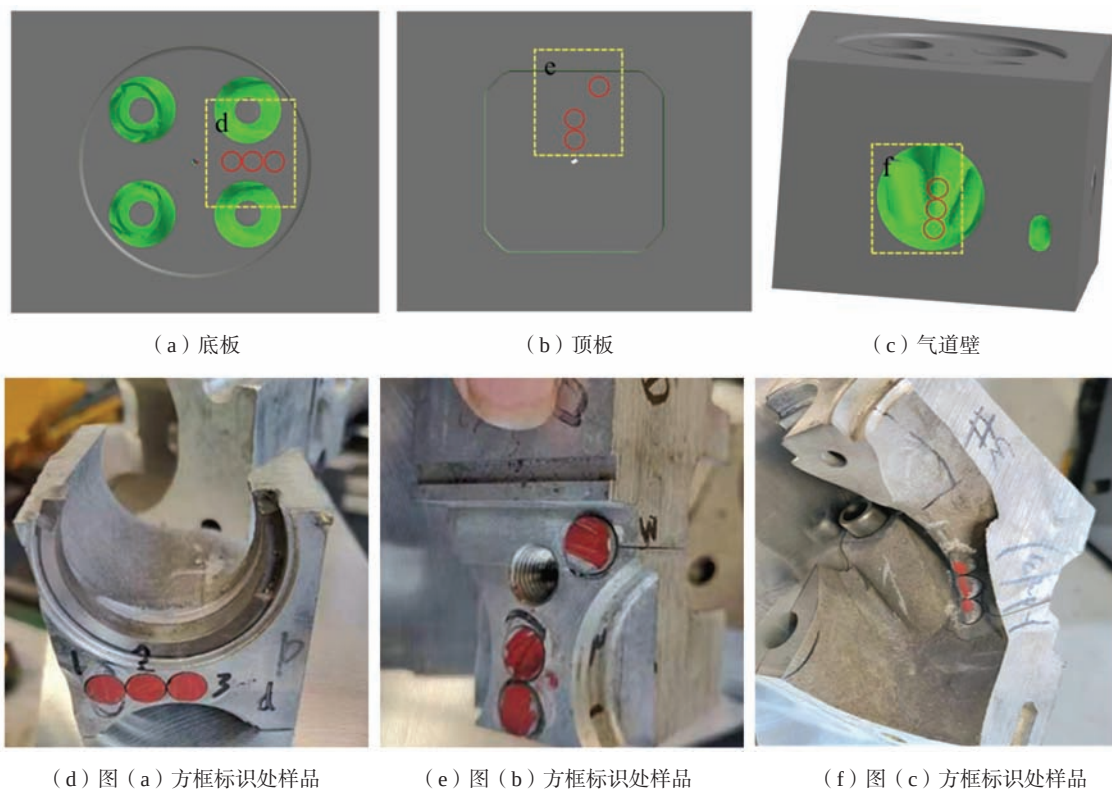


图4 取样位置

Fig. 4 Sampling location

取平均值得到每个位置的二次枝晶间距，二次枝晶间距的测量与统计方法详见参考文献[17-18]。底板的二次枝晶间距为20 μm ，顶板的二次枝晶间距为30 μm ，

气道壁的二次枝晶间距为80 μm 。由图3和图5可知，仿真结果和试验结果能一一对应。

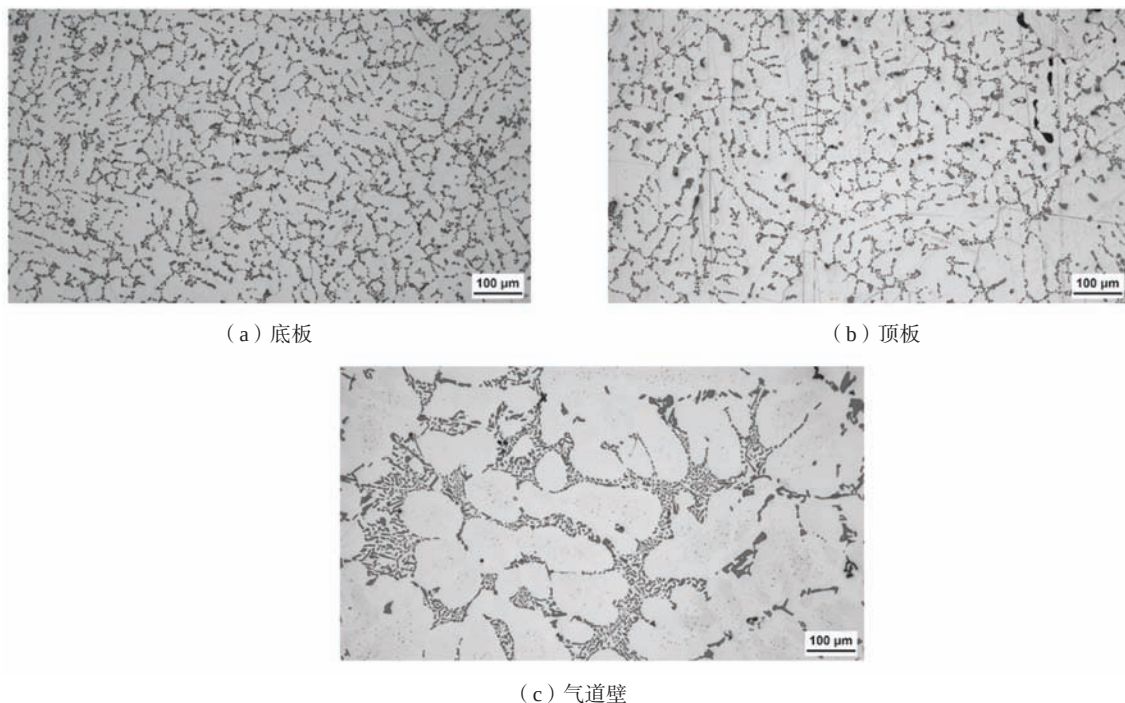


图5 试验得到的气缸盖不同位置的金相照片

Fig. 5 Metallographic photos of cylinder head at different positions obtained from the experiment

2 Sc和Zr对气缸盖二次枝晶的影响

为研究Sc和Zr对低压铸造铝硅合金气缸盖二次枝晶的影响,设计四种方案,分别为不添加Sc和Zr, Sc含量0.2%, Zr含量0.2%, Sc和Zr联合添加且含量都为0.1%。仿真计算时,浇注压力如图2(a)所示,换热系数如图2(b)和图2(c)所示,浇注温度为695℃。利用相图计算获得添加Sc、Zr后铝硅合金的性质。如图6所示,在合金凝固过程中,添加Sc、Zr后,导热率、密度、焓变和固相分数曲线并没有完全重合;添加Sc、Zr后,合金性质改变,将这些合金性质分别应用于对应的方案中,由于合金性质改变,势必会导致气缸盖二次枝晶变化。

图7所示为四种方案铝硅合金气缸盖二次枝晶的

仿真结果,表1统计的是这些方案气缸盖底板、顶板和气道壁位置的二次枝晶间距。由图7和表1可知,原铝硅合金气缸盖底板二次枝晶间距为14.4~28.8 μm,顶板二次枝晶间距为28.8~43.2 μm,气道壁二次枝晶间距为72.0~86.4 μm; Sc含量为0.2%的气缸盖底板二次枝晶间距为14.6~29.2 μm,顶板二次枝晶间距为29.2~43.7 μm,气道壁二次枝晶间距为72.9~87.5 μm; Zr含量为0.2%的气缸盖底板二次枝晶间距为14.3~28.6 μm,顶板二次枝晶间距为28.6~43.0 μm,气道壁二次枝晶间距为71.6~85.9 μm; Sc和Zr含量都为0.1%的气缸盖底板二次枝晶间距为14.5~29.0 μm,顶板二次枝晶间距为29.0~43.5 μm,气道壁二次枝晶间距为72.6~87.1 μm。添加Sc后,气缸盖的二次枝晶间距微量增加,添加Zr

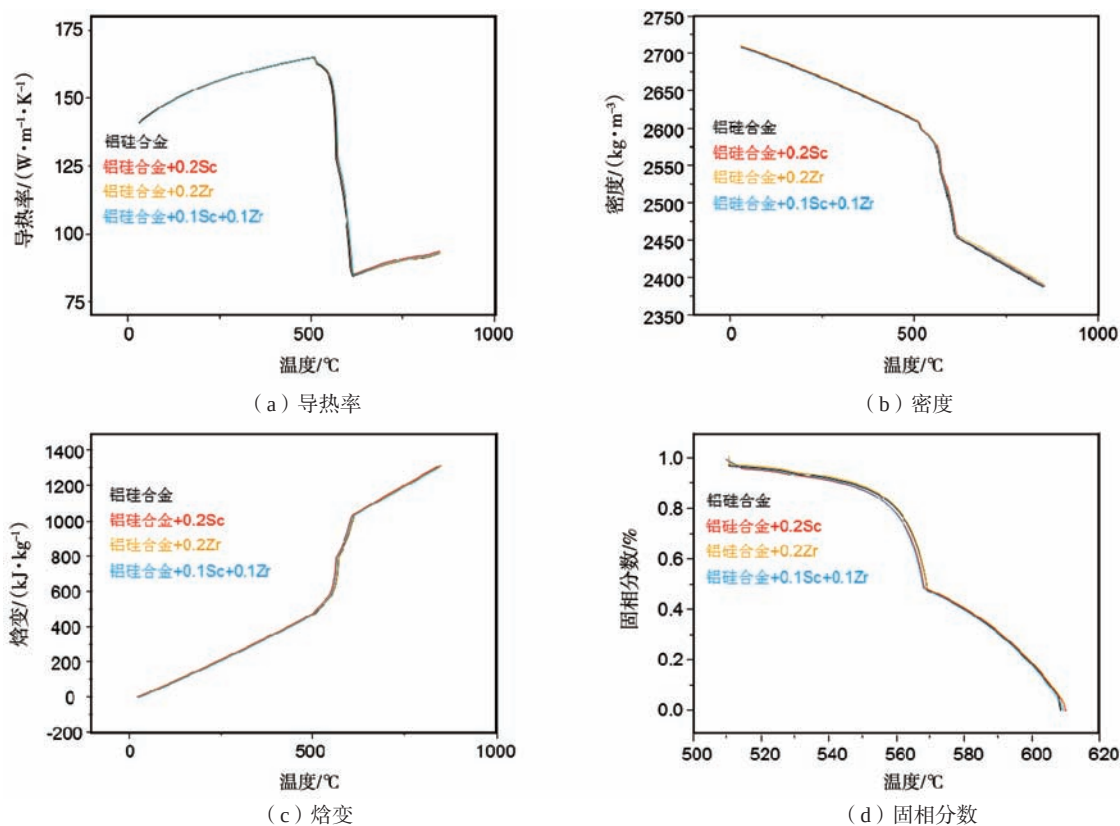


图6 四种方案的合金性质

Fig. 6 Alloy properties of four schemes

表1 四种方案气缸盖不同位置的二次枝晶间距
Tab. 1 Secondary dendrite spacing at different positions of cylinder heads in four schemes

合金类别	底板/μm	顶板/μm	气道壁/μm
原铝硅合金	14.4~28.8	28.8~43.2	72.0~86.4
Sc的含量为0.2%	14.6~29.2	29.2~43.7	72.9~87.5
Zr的含量为0.2%	14.3~28.6	28.6~43.0	71.6~85.9
Sc和Zr的含量都为0.1%	14.5~29.0	29.0~43.5	72.6~87.1

后,气缸盖的二次枝晶间距微量减小,联合添加Sc和Zr后,气缸盖的二次枝晶间距微量增加,但增量比单独添加Sc方案的小。由材料级相关研究可知,添加Sc、Zr后,铝硅合金的二次枝晶间距减小、力学性能提高^[12-14]。由本研究的零件级研究可知,添加Sc、Zr后,铝硅合金气缸盖的二次枝晶间距微量变化,Sc和Zr在材料级上对铝硅合金二次枝晶的积极作用没有完全体现在零件级铝硅合金气缸盖上。

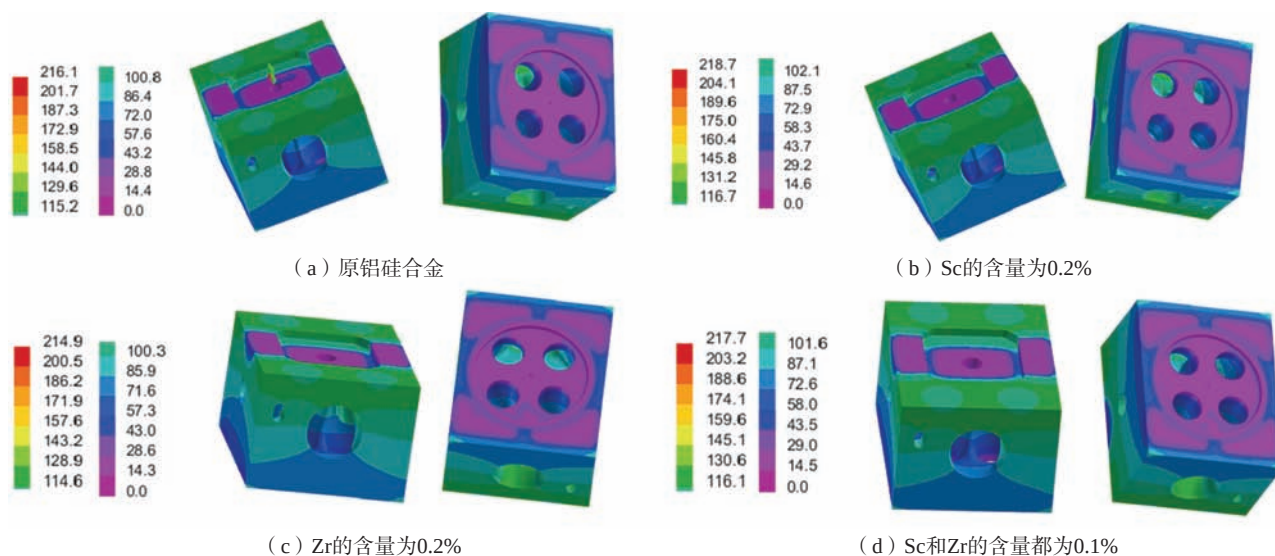


图7 仿真计算得到的四种方案气缸盖不同视角的二次枝晶臂间距

Fig. 7 Secondary dendrite arm spacing from different perspectives of cylinder heads in four schemes obtained through simulation calculation

由图6可知,添加Sc、Zr后,铝硅合金的性质改变,由图6(d)可知,原铝硅合金的固相线温度为510℃、液相线温度为608℃;添加Sc的铝硅合金的固相线温度为510℃、液相线温度为610℃;添加Zr的铝硅合金的固相线温度为510℃、液相线温度为609℃;添加Sc和Zr的铝硅合金的固相线温度为510℃、液相线温度为610℃。本文在进行仿真研究时,所使用的模型、工艺、边界条件等完全相同,唯一的变量是合金性质,没有依据添加Sc、Zr后铝硅合金性质的变化对模型和工艺进行调整,如浇注温度、浇注时间和气缸盖结构等。这可能是Sc和Zr在材料级上对二次枝晶

的积极作用没有完全体现在零件级铝硅合金气缸盖上的一大原因。除此之外,H. Mao等人研究了不同冷速下Sc在铝硅合金中的作用,结果表明Sc在铝硅合金中发挥积极作用时与冷速有关^[19]。本文在进行仿真研究时,添加Sc前后,所使用的模型、工艺和边界条件等完全相同,未按照Sc元素发挥积极作用的特点,利用气缸盖结构、冷铁和工艺等进行冷速调节,这可能是Sc对二次枝晶的积极作用未发挥的原因。

如图8所示为四种方案铝硅合金气缸盖凝固时间仿真结果,表2统计的是这些方案气缸盖底板、顶板和气道壁位置的凝固时间。由图8和表2可知,原铝硅合金

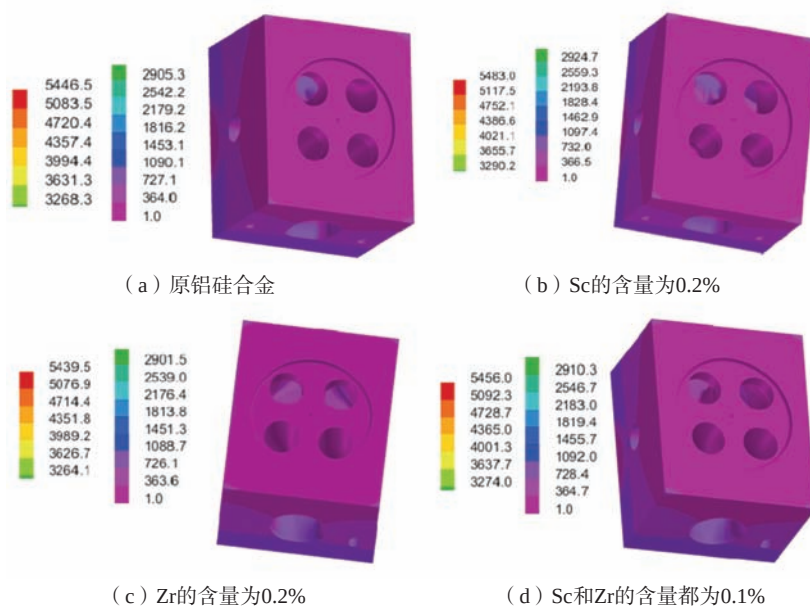


图8 仿真计算得到的四种方案气缸盖的凝固时间

Fig. 8 Solidification time of cylinder heads in four schemes obtained through simulation calculation

表2 四种方案气缸盖不同位置的凝固时间
Tab. 2 Solidification time at different positions of cylinder heads in four schemes

合金类别	底板/ μm	顶板/ μm	气道壁/ μm
原铝硅合金	364.0~727.1	727.1~1 090.1	727.1~1 090.1
Sc的含量为0.2%	366.5~732.0	732.0~1 097.4	732.0~1 097.4
Zr的含量为0.2%	363.6~726.1	726.1~1 088.7	726.1~1 088.7
Sc和Zr的含量都为0.1%	364.7~728.4	728.4~1 092.0	728.4~1 092.0

气缸盖底板凝固时间为364.0~727.1 s, 顶板凝固时间为727.1~1 090.1 s, 气道壁凝固时间为727.1~1 090.1 s; Sc含量0.2%的气缸盖底板凝固时间为366.5~732.0 s, 顶板凝固时间为732.0~1 097.4 s, 气道壁凝固时间为732.0~1 097.4 s; Zr含量0.2%的气缸盖底板凝固时间为363.6~726.1 s, 顶板凝固时间为726.1~1 088.7 s, 气道壁凝固时间为726.1~1 088.7 s; Sc和Zr含量均为0.1%的气缸盖底板凝固时间为364.7~728.4 s, 顶板凝固时间为728.4~1 092.0 s, 气道壁凝固时间为728.4~1 092.0 s。凝固时间越短, 表明凝固速率越快, 二次枝晶间距越小, 对比图7、表1和图8、表2, 添加Sc和Zr后, 凝固时间越短的位置, 二次枝晶间距也越小, 即图7、表1二次枝晶间距的仿真结果与图8和表2凝固时间的仿真结果变化趋势一致。对比添加Sc和Zr后气缸盖的相同位置, 添加Sc和Zr后, 气缸盖相同位置的凝固时间不

同, 这是因为添加Sc和Zr后, 合金的导热率和固相分数等性质改变(图6)。

综上所述, 下一步, 要在铝硅合金气缸盖零件级上充分发挥Sc和Zr在铝硅合金材料级的积极作用, 需要依据合金性质变化的特点(如导热率等)以及合金元素发挥积极作用的条件(如冷速等), 改善气缸盖的结构、工艺等。

3 结论

本文利用仿真的方法研究了钪和锆对低压铸造铝硅合金气缸盖二次枝晶的影响, 结论如下。

(1) 铝硅合金气缸盖底板、顶板和气道壁二次枝晶的仿真结果与试验结果一一对应, 仿真结果的偏差较小。

(2) 添加Sc后, 气缸盖的二次枝晶间距微量增加; 添加Zr后, 气缸盖的二次枝晶间距微量减小; 联合添加Sc和Zr后, 气缸盖的二次枝晶间距微量增加, Sc和Zr在材料级上对二次枝晶的积极作用没有完全体现在零件级铝硅合金气缸盖上。

(3) 添加Sc、Zr后, 铝硅合金的导热率和固相分数等性质改变, 气缸盖相同位置的凝固时间不同。之后需要依据合金性质变化的特点(如导热率等)以及合金元素发挥积极作用的条件(如冷速等), 改善气缸盖的结构、工艺等。

参考文献:

- [1] REN Peirong, SONG Wei, GU Zhong, et al. High-cycle fatigue failure analysis of cast Al-Si alloy engine cylinder head [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 105546.
- [2] LI Yuan, LIU Jinxiang, ZHANG Qiang, et al. Casting defects and microstructure distribution characteristics of aluminum alloy cylinder head with complex structure [J]. Materials Today Communications, 2021, 27: 102416.
- [3] LI Yuan, LIU Jinxiang, GU Zhong, et al. Analysis of a diesel engine cylinder head failure caused by casting porosity defects [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 105498.
- [4] 李鹏, 周海涛, 王根全, 等. 气缸盖疲劳开裂载荷机理分析与研究 [J]. 车用发动机, 2021 (6): 37-42.
- [5] 赵承章, 黄渭清, 左正兴, 等. 铸造铝硅合金缸盖拉伸性能分析及威布尔建模 [J]. 内燃机学报, 2022, 40 (5): 463-470.
- [6] MAO G, TONG G, GAO W, et al. The poisoning effect of Sc or Zr in grain refinement of Al-Si-Mg alloy with Al-Ti-B [J]. Materials Letters, 2021, 302: 130428.
- [7] MAO G, YAN H, ZHU C, et al. The varied mechanisms of yttrium (Y) modifying a hypoeutectic Al-Si alloy under conditions of different cooling rates [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 806: 909-916.
- [8] 沈月, 何国球, 田丹丹, 等. 二次枝晶臂间距对A319铝合金拉伸及疲劳性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2014, 28 (8): 587-593.
- [9] ZOU Yongzhi, XU Zhengbing, ZENG Jianmin. Effects of secondary dendrite arm spacing on microporosity of A357 Alloy [J]. Advanced Materials Research, 2010, 97-101: 781-784.
- [10] SASCHA Gerbe, ULRICH Krupp. Influence of secondary dendrite arm spacing (SDAS) on the fatigue properties of different conventional automotive aluminum cast alloys [J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2019, 48: 105-115.
- [11] I. NARASIMHA MURTHY, J. BABU RAO. Evaluation of the microstructure, secondary dendrite arm spacing, and mechanical properties of Al-Si alloy castings made in sand and Fe-Cr slag molds [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2017, 24 (7): 784-793.
- [12] 姚衡. 含钪高强韧铝硅合金组织与性能研究 [D]. 广州: 中北大学, 2012.

- [13] 何兵, 覃铭, 梁柳青, 等. Sc含量对Al-Si铸造合金组织与力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (10): 2360–2364.
- [14] 黄佩武, 张新明, 李慧中, 等. 微量的Zr和Y在Al-Si合金中的合金化作用 [J]. 湖南有色金属, 2006, 22 (5): 38–41.
- [15] 贾正峰, 曾庆强, 刘斌, 等. 缸盖裂纹及二次枝晶间距的仿真技术 [J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33 (12): 1111–1114.
- [16] 陈晓斌, 谈毅, 杨安, 等. 铝合金缸盖低压铸造模具设计及凝固质量优化 [J]. 铸造, 2024, 73 (8): 1144–1150.
- [17] 钟文惠, 丁鹏飞, 谢维, 等. 型壳温度对DZ22B合金叶片枝晶组织的影响 [J]. 铸造, 2024, 73 (4): 489–497.
- [18] 叶珍, 朱大智, 张少文. 铝合金车轮内轮缘伸长率性能研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (6): 647–651.
- [19] MAO H, LIAN P, WEI Q, et al. Effect of scandium on grain refinement mechanism and mechanism and mechanical properties of Al-7Si-0.6Mg alloy at different cooling rates [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 4784–4796.

Influence of Sc and Zr on the Secondary Dendrite Arm Spacing of Low-Pressure Cast Aluminum Silicon Alloy Cylinder Heads

MAO Guo-ling, ZHOU Hai-tao, HU Ding-yun, HE Xiao-dong, WANG Yan, JIANG Chao
(China North Engine Research Institute (Tianjin) National Key Laboratory of Vehicle Power System, Tianjin 300400, China)

Abstract:

This paper used simulation methods to conduct research. Firstly, the simulation results were calibrated, and the simulation results of the secondary dendrites in the aluminum silicon alloy cylinder head corresponded one-to-one with the experimental results. Then the influence of scandium and zirconium on the secondary dendrite arm spacing of low-pressure cast aluminum silicon alloy cylinder heads was studied. The results showed that after adding Sc, there was a slight increase in the secondary dendrite arm spacing of the low-pressure cast aluminum silicon alloy cylinder head. After adding Zr, there was a slight decrease in the secondary dendrite arm spacing of the low-pressure cast aluminum silicon alloy cylinder head. After adding Sc and Zr together, there was a slight increase in the secondary dendrite arm spacing of the low-pressure cast aluminum silicon alloy cylinder head. The positive effects of Sc and Zr on secondary dendrites at the material level had not been fully reflected in the part level aluminum silicon alloy cylinder head. After adding Sc/Zr, the thermal conductivity, solid fraction and other properties of aluminum silicon alloy change, and the solidification time at the same position of the cylinder head was different. Then it was necessary to optimize the structure and process of the cylinder head to fully leverage the positive effects of Sc and Zr.

Key words:

scandium; zirconium; low-pressure cast; aluminum silicon alloy cylinder head; the secondary dendrite