

不同铸造工艺及含氢量对 Al-Si 合金活塞喉口重熔的影响

洪晓露 徐 英 朱鸿磊 张 将 彭银江 刘永强 陈大辉 侯林冲
(中国兵器科学研究院宁波分院)

摘 要 对比 Al-Si 合金活塞不同铸造工艺及不同本体含氢量条件下,高能电子束重熔技术对活塞喉口显微组织和性能的影响。结果表明,在相同重熔工艺条件下,重力铸造试样的熔深大于挤压铸造的,重熔区的硬度也较挤压铸造的低;当挤压铸造试样中每 100 g 铝氢含量高于 0.25 mL 或重力铸造试样氢含量高于 0.15 mL 时,重熔区边界易出现微观孔洞。在相同铸造工艺条件下,氢含量高的比氢含量低的容易出现微观孔洞,在相同氢含量下重力铸造比挤压铸造容易出现微观孔洞。

关键词 铸造工艺;氢含量;活塞喉口;重熔

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Different Casting Process and Hydrogen Content on Remelting
Strengthening of Al-Si Piston Throat

Hong Xiaolu, Xu Ying, Zhu Honglei, Zhang Jiang, Peng Yinjiang, Liu Yongqiang,
Chen Dahui, Hou Linchong
(Ningbo Branch of China Ordnance Academy)

Abstract: The effects of high energy electron beam remelting on the microstructure and properties of piston throat were compared under different casting processes and hydrogen content. The results show that under the same process parameters of high energy electron beam remelting, the penetration of gravity casting piston sample is greater than that of squeeze casting piston sample, and the hardness of remelting zone is lower than that of squeeze casting piston. When the hydrogen content is higher than 0.25 mL/100 g for squeeze casting samples, or the hydrogen content is higher than 0.15 mL/100 g for gravity casting samples, so there is a high probability of micro holes in the boundary of remelting zone. Under the same casting conditions, the high hydrogen content is easier to cause micro holes than the low hydrogen content, and under the same hydrogen content, the micro holes in gravity casting piston are more likely to appear than that of squeeze casting piston during remelting.

Key Words: Casting Process, Hydrogen Content, Piston Throat, Remelting

活塞是发动机部件中工作环境最恶劣、结构最复杂的运动部件之一。随着现代发动机高功率、轻量化发展,活塞所承受的机械压力和热负荷也越来越大,其失效形式也日益增多,燃烧室喉口开裂便是其中之一^[1]。在高载荷及持续交变热负荷作用下,活塞顶部温度可达 350~400 ℃。燃烧室喉口被视为热传导的狭路,局部温度超过 420 ℃,此时已达到材料保持高温强度的极限温度。同时,受到热机械疲劳和作用在活塞销方向上的高周疲劳影响,由燃烧压力引起的热应力会导致塑性变形及喉口出现裂纹,从而严重影响活塞的可靠性和使用寿命^[2,3]。因此,活塞顶材料及其表面组织必须首

先满足温度达 350 ℃时的高强度、热机械疲劳的高稳定性要求,同时要具有较高质量的表面层金相组织。传统的活塞材料设计优化及工艺优化已满足不了恶劣工况的要求,目前活塞喉口局部强化主要有陶瓷纤维铝基复合材料增强技术^[4]、高能束表面重熔强化等。陶瓷纤维铝基复合材料增强技术成本较高,而高能束表面重熔强化成本较低、操作简单,并可大大提高活塞表面的性能^[5]。高能束表面重熔强化是利用高能量密度电子束流、脉冲激光束流、等离子束流等,使活塞顶燃烧室边缘表面快速熔化,然后通过基体自身导热,以极高的冷却速

收稿日期:2021-03-23;修改稿收到日期:2021-04-07
基金项目:进口替代专项资助项目(TDZX-17-027-2)
第一作者简介:洪晓露,女,1988 年出生,助理研究员,浙江宁波(315103),E-mail:hxl614517@163.com
引用格式:洪晓露,徐英,朱鸿磊,等.不同铸造工艺及含氢量对 Al-Si 合金活塞喉口重熔的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 167-1 169.
HONG X L, XU Y, ZHU H L, et al. Effects of different casting process and hydrogen content on remelting strengthening of Al-Si piston throat[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 167-1 169.

度从液相凝固,改变基体合金表面的显微组织和相结构。美国辉门公司采用 DuraBowl 工艺在活塞燃烧室边缘进行了高能氩弧表面重熔强化处理,可使金相组织显著细化,并延长发动机活塞寿命 3~4 倍^[6,7]。德国 KS 公司开发了激光重熔处理技术,试验表明,其喉口重熔后的活塞热机械疲劳强度较未使用重熔的活塞提高了 200%^[8]。国内有研究者也对活塞喉口表面重熔强化处理技术进行了深入研究,分析了活塞材料在强化后的金相组织和性能^[9~11]。

采用高能电子束焊接技术,对活塞喉口进行表面重熔强化。对比 Al-Si 合金活塞不同铸造工艺及不同本体氢含量条件下,高能束重熔技术对其显微组织和性能的影响,为高强化重熔活塞的设计优化提供参考。

1 试验准备

采用不同铸造工艺制备了不同含氢量的 Al-Si12Cu3Ni2Mg 合金活塞试样,具体方案见表 1。1、2 号活塞为挤压铸造,3 号活塞为重力铸造,3 件活塞的氢含量为 0.15~0.25 mL/100 g Al。

表 1 不同铸造工艺的活塞试样

Tab.1 Piston samples with different casting processes		
序号	铸造工艺	100 g 铝中氢含量/mL
1	挤压铸造	0.25
2	挤压铸造	0.15
3	重力铸造	0.15

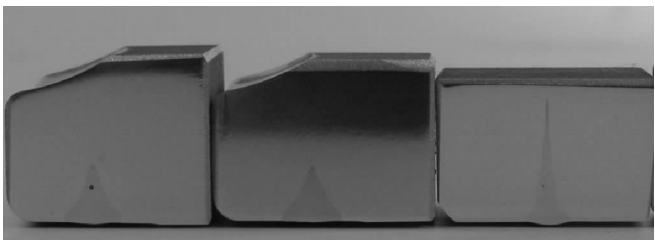
采用高能电子束焊接工艺,对活塞喉口进行表面重熔强化,试验工艺参数:设备加速电压为 60 kV,焊接电流为 30 mA,焊接速度为 500 mm/min,聚焦电流为 2.85 A。

重熔后,将活塞喉口重熔层截面按照国标制成金相试样。用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀后,在 ZEISS Imager A2m 金相显微镜下进行显微组织观察分析。用 MH-50D 显微维氏硬度计测试重熔区的显微硬度,载荷为 200 N,加载时间为 15 s。

2 试验结果与讨论

2.1 宏观形貌

重熔后的试样截面宏观形貌见图 1。可以看出,不同铸造工艺的重熔试样在相同的重熔焊接工艺参数下,出现了不同的熔深。挤压铸造活塞试样(1 号和 2 号)的熔深较浅,而重力铸造活塞试样(3 号)的熔深较深。由于挤压铸造是在压力下凝固结晶,组织致密度要高于重力铸造。在相同工艺参数下,产生的焊接能量基本相同,组织致密度高的熔深较浅,组织致密度低的熔深较深。



(a) 1 号 (b) 2 号 (c) 3 号

图 1 不同试样重熔后截面的宏观形貌

Fig.1 Macromorphology of different samples after remelting

同时,1 号试样重熔区存在宏观孔洞缺陷。H 元素在液态与固态铝合金中的溶解度相差很大,见图 2。在熔点以下时,H 在 100 g 铝溶解度约为 0.036 mL,在固液转变过程中温度不变,铝合金从固态转变为液态,H 的溶解度达到 0.69 mL,提高了近 19 倍。重熔过程中,铝合金先由固态变为液态,吸收了周围所有可能存在的 H 原子。在快速凝固后,即由液态转变为固态,大量 H 原子析出并团聚形成气孔。可见,H 含量越高,越容易出现孔洞缺陷^[12,13]。

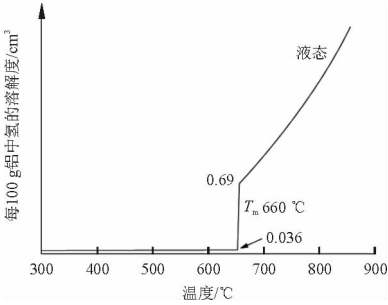


图 2 H 在铝合金中的溶解度随温度的变化曲线^[14]

Fig.2 Temperature dependence of solubility of H in aluminum alloy

2.2 微观组织

Al-Si 合金活塞经高能电子束重熔后获得的组织包括重熔区和基体。基体中含有块状初生 Si 组织。重熔后组织与基体组织相比, α 固溶体、共晶 Si 和初生 Si 明显细化。共晶 Si 呈短条状或小块状,初生 Si 呈细小块状。重熔区与基体之间存在热影响区,形成冶金结合层。

图 3 为不同试样的重熔区与活塞合金基体结合部位的组织。可以看出,不同状态下获得的重熔区,均与活塞合金本体结合紧密,不存在微观裂纹。但是,1 号试样重熔边界部位出现了微观孔洞,直径约为 40 μm ;3 号试样重熔边界部位也出现了微观孔洞,最大直径约为 100 μm ;而 2 号试样重熔边界则完好无孔洞。

在重熔过程中,高能电子束使得基体表层快速熔化,液态合金填充了已有的气孔及间隙,使得整个重熔区更为致密。同时,重熔过程存在极高的冷却速度(其

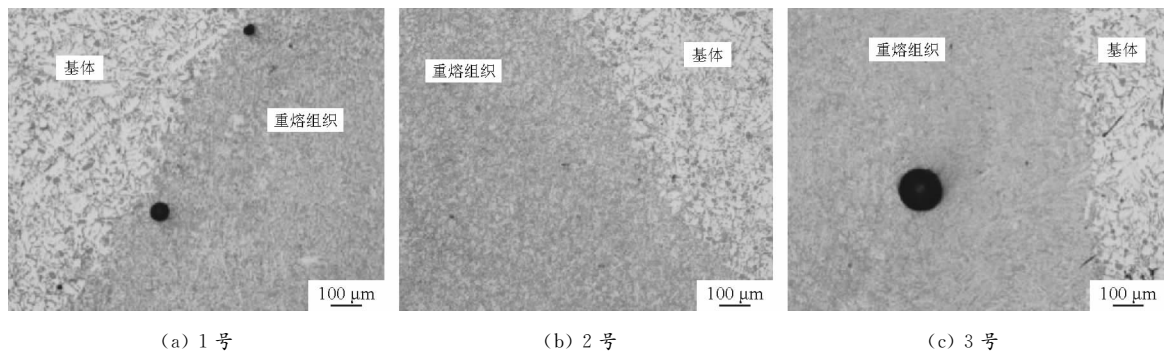


图3 不同试样重熔区与基体结合部位的组织(100×)

Fig.3 Microstructure of the interface between remelting zone and matrix

冷却速度可达 10^{10} °C/s, 比传统铸造方法的冷却速度 $10^6 \sim 10^7$ °C/s 高几个数量级), 提高了形核率, 产生大量晶核, 从而有效抑制了晶粒长大, 使得重熔区内部组织细化, 获得了高致密的重熔区组织。组织越细小, 细晶强化效果越强, 可有效改善材料的疲劳强度及使用寿命^[10,15]。

2.3 显微硬度

对不同试样的重熔区采用 MH-50D 显微维氏硬度试验系统进行硬度测试, 结果见图 4。重熔过程的快速熔化凝固使得材料内部产生大量晶格畸变, 增加了变形抗力, 可以看出, 重熔后其重熔区的硬度均较基体有较大提升。但由于重力铸造活塞的组织致密度较挤压铸造的低, 因此, 其重熔区硬度也比挤压铸造硬度略低^[16]。

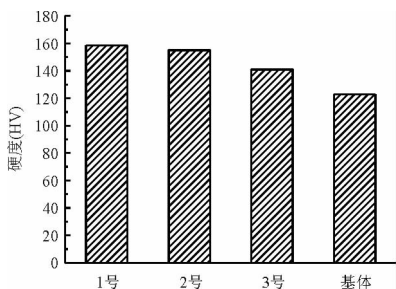


图4 不同试样重熔区及基体的硬度

Fig.4 Hardness of remelting zone in different samples

3 结 论

(1) 在相同高能电子束重熔工艺参数条件下, 重力铸造 Al-Si 合金活塞试样的熔深大于挤压铸造活塞试样的熔深, 重熔区的硬度也较挤压铸造活塞重熔区的硬度低。

(2) 当每 100 g 铝氢含量高于 0.25 mL 时, 挤压铸造试样重熔区边界易出现微观孔洞缺陷; 当氢含量高于 0.15 mL/100 g Al 时, 重力铸造试样重熔区边界易出现微观孔洞缺陷。

(3) Al-Si 合金活塞重熔区出现微观孔洞与铸造工

艺及氢含量的大小存在一定的关系。在相同铸造工艺条件下氢含量高的比氢含量低的更容易出现微观孔洞, 在相同氢含量条件下重力铸造活塞比挤压铸造活塞在重熔时更容易出现微观孔洞。

参 考 文 献

- [1] 王亮, 吴国栋, 赵文斌, 等. 高强度柴油机活塞销孔型线设计及实验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2018, 35(1): 40-43.
- [2] 高尉尉, 熊培友, 王溪, 等. 活塞燃烧室喉口疲劳开裂的原因分析与改进[J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36(1): 68-72.
- [3] 许春光, 王国莹, 梁惠杰, 等. 高强度柴油机铝合金活塞承载特性研究[J]. 车用发动机, 2020, 4(2): 35-41.
- [4] 徐涛, 徐云庆, 赵旭东, 等. 陶瓷纤维铝基复合材料在铝合金活塞燃烧室喉口的应用[J]. 内燃机与配件, 2016(2): 1-4.
- [5] 樊晓光, 赵俊平, 吴永强, 等. 高负荷柴油发动机铝合金活塞局部强化[J]. 金属加工, 2013(5): 49-50.
- [6] CHENC L, THOMSON R C. The combined use of EBSD and EDX analyses for the identification of complex intermetallic phases in multicomponent Al-Si piston alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 490: 293-300.
- [7] 高波, 郝仪, 王震, 等. 过共晶铝硅 Al-17.5Si 强流脉冲电子束表面改性[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(9): 115-118.
- [8] 刘涛. 高强度柴油机喉口重熔活塞设计与试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [9] 杨忠, 郭永春, 夏峰, 等. 激光重熔处理对活塞铝合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(8): 49-55.
- [10] 温志高, 郑飞, 彭明诚, 等. 基于 TIG 重熔的铸造铝合金活塞喉口强化[J]. 南阳师范学院学报, 2018, 17(4): 30-32.
- [11] 黄中伟, 黄学平, 张威, 等. 柴油机活塞燃烧室喉口重熔技术开发[A]. 2014 年 APC 联合学术年会[C]. 浙江临海, 2014.
- [12] 张东萍, 徐淑红, 王晓峰, 等. 氢对铝及铝合金生产的影响[J]. 电子制作, 2012(12): 205-208.
- [13] 王慧萍, 赵磊, 周标, 等. 反重力铸造条件下氢含量和冷却速度对铝合金铸件中孔洞的影响[J]. 铸造, 2009, 58(3): 205-209.
- [14] 李谢华. 氢与夹杂对铝合金的组织与性能的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [15] 黄奇文. ZL108 铝合金活塞燃烧室喉口等离子束表面重熔强化处理[A]. 第十三届全国铸造年会[C]. 苏州: 2015.
- [16] 叶锦华. 含氢量对铝合金致密性检测的影响[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.

(编辑: 张正贺)