

应用惰性气体保护技术提高活塞铸件成品率

崔岁绵¹, 刘永军², 李 强¹, 杨 进¹

(1. 马勒发动机零部件(营口)有限公司, 辽宁营口 115001; 2. 马勒发动机零部件(南京)有限公司, 江苏南京 210032)

摘要: 随着对活塞轻量化要求的提高, 活塞结构中面窗壁厚、燃烧室厚度也越来越薄。在活塞铸造过程中, 合流线、冷隔等铸造缺陷问题也变得尤为突出。为解决该问题, 利用铸件充型过程惰性气体保护技术, 有效地提高了铝合金液的充型能力, 从而解决了现有缺陷问题, 降低了铸造废品率。批量生产中, 铸造废品率从最高的4.70%下降到0.18%。

关键词: 活塞铸造; 惰性气体; 氧化夹杂; 冷隔

活塞一般作为汽油发动机的核心部件, 其工作强度大, 工艺设计难度高, 尤其在铸造过程容易产生缩孔、缩松、氧化夹杂、气孔、冷隔等铸造缺陷^[1-2]。这些缺陷一方面会导致产品的废品率较高, 增加生产成本, 另一方面, 如果缺陷没有被及时发现, 可能会导致发动机在使用过程中产生不可逆的损坏。所以改善现有铸造技术, 从而降低废品率, 改善活塞品质变得尤为重要^[3]。

活塞材质必须具有热膨胀系数小、密度低、良好的热传导性, 并具有较高的耐磨性、耐腐蚀性、尺寸稳定性及抗疲劳性^[4-5]。大众、通用、宝马等汽油机活塞应用最广的铸造材质为AlSi12Cu4Ni2Mg铝合金。该材质在300~400℃具有更高的热疲劳性能, 可以减少裙部开裂的产生和销孔的变形, 进一步提高了体积稳定性和抗磨损性能。

本文针对活塞轻量化生产中存在的合流线、冷隔等铸造缺陷问题, 利用铸件充型过程惰性气体保护技术, 不仅提高了铝合金液的流动速度, 也增强了铝合金液的充型能力, 避免了冷隔、合流线的产生, 降低了活塞的铸造废品率, 也降低了浇注温度, 达到了节能环保的目的。

1 活塞铸造缺陷分析

随着对发动机性能要求越来越高, 活塞性能要求也随之提高, 特别是燃烧室位置的材料性能要求愈加严格, 内部一些小的氧化物可能会对发动机寿命产生不利的影响^[6]。

活塞普遍采用金属型重力铸造下抽芯方式生产, 在浇注过程中, 铝液从浇口杯流入, 依次经由直浇道、横浇道、内浇道进入型腔, 铝与空气中的氧气发生化学反应生成三氧化二铝, 铝液表面会形成氧化膜, 生成的氧化物在铝液交汇处形成合流线^[7]。合流线是表面形成的液体流动方向的痕迹, 没有凹坑所以不视为铸造缺陷。随着活塞轻量化发展, 高功率、大负荷的要求, 活塞顶部厚度设计越来越薄, 且大多是铸造燃烧室顶面, 有些产品会因内腔合流线造成顶部开裂, 导致发动机损坏, 从而产生极大的安全隐患。

如图1所示, 图1a是合流线实物照片, 该图片显示, 椭圆圈标记部分为充型过程中产生的合流线; 图1b是内腔彩色探伤照片, 图中显示铸件内腔中间部分有线状铸造缺陷; 图1c是按图1b线状铸造缺陷位置剖切做的放大100倍的金相图, 通过观察可以看出氧化物的最大深度达600 μm; 图1d是夹渣缺陷图, 显示铝液在充型过程中, 两侧氧化膜在即将交汇时, 在中芯顶部形成合流线。

作者简介:

崔岁绵(1964-), 男, 工程师, 工学学士, 主要研究方向为活塞铸造技术。E-mail: 1254168788@qq.com

中图分类号: TG245

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)08-0991-06

收稿日期:

2020-12-07 收到初稿,
2021-01-30 收到修订稿。

活塞的轻量化,要求活塞结构复杂、重量轻、壁厚薄^[8]。但在铸造过程中,产生的冷隔缺陷会显著增加活塞铸造废品率。冷隔产生的主要原因是由于金属液充型后,在金属液的交接处融合不好,从而在铸件中产生穿透的或不穿透的缝隙。如图2所示是一种新型轻量化设计产品的结构图,其具有壁厚比一般设计更薄的优点,最薄处仅为2.7 mm,但是在铸造生产过程中因冷隔缺陷产生的铸造废品率高达3%~5%,严重影响生产成本和经济效益。

图3a中圈出的是发生在活塞顶部的冷隔缺陷,图3b中圈出的是发生在面窗薄壁处的冷隔缺陷。

对于毛坯壁厚 ≥ 3.5 mm正常产品而言,浇注温度一般控制在 $(760 \pm 10)^\circ\text{C}$,其冷隔废品率很低。对于壁厚 < 3.5 mm的薄壁活塞而言,必须提高浇注温度到 $(780 \pm 10)^\circ\text{C}$,提高铝液的充型能力,但是依然存在冷隔废品率较高的问题。

现有活塞铸造技术的不足,导致了合流线以及冷隔缺陷问题的产生,这些问题产生的主要原因是充型过程中铝液与氧气发生氧化反应生成氧化物。由于本身杂质和氧化物的存在会增加铝液的粘度,降低了充型能力,尤其在浇注温度较低的情况下^[9]。亟需采用新的铸造技术来改善铝液的流动能力,从根本上解决该问题。

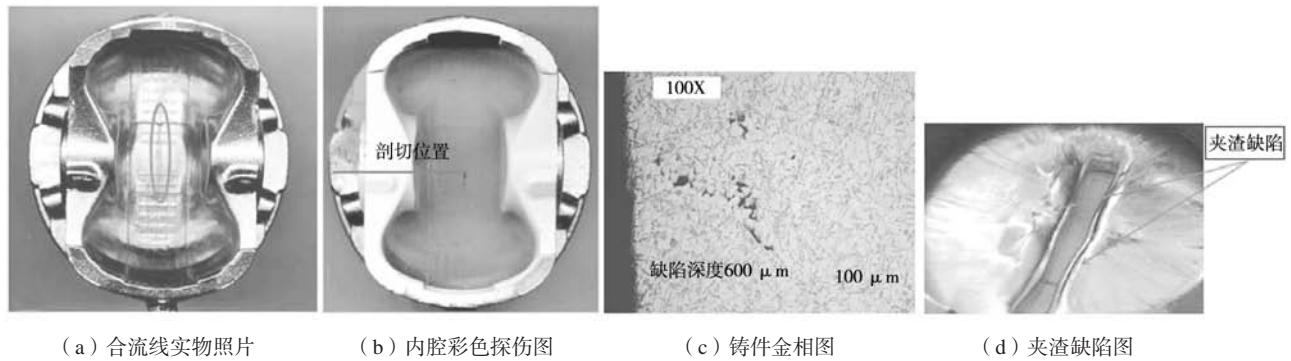


图1 毛坯样件缺陷检测图

Fig. 1 Defects inspection results of piston casting

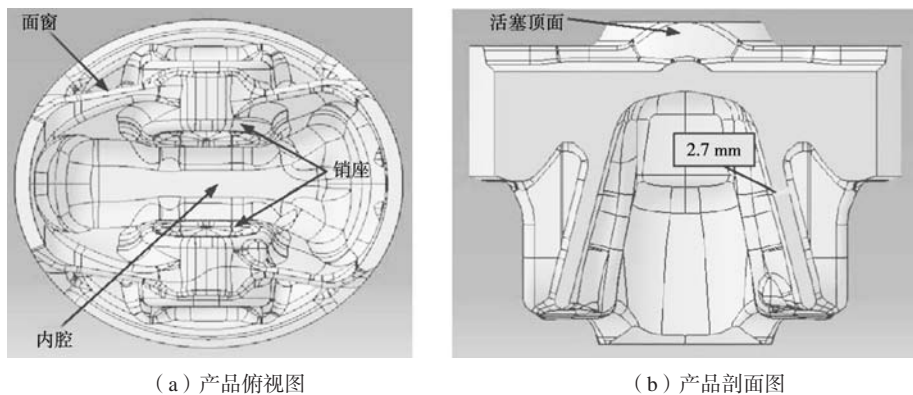
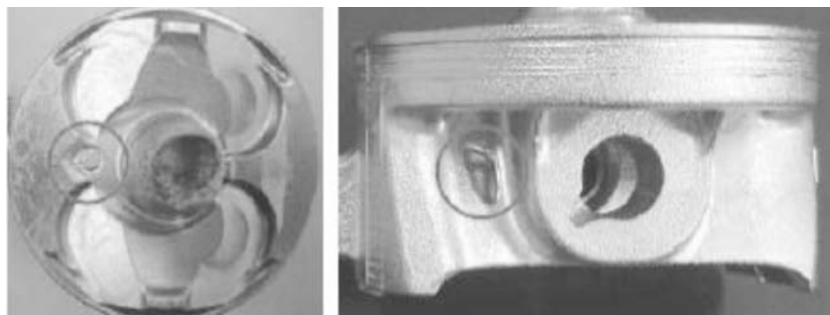


图2 一种新型轻量化设计产品的结构图

Fig. 2 A new-type lightweight piston design drawing



(a) 铸件顶部缺陷图

(b) 铸件面窗缺陷图

图3 铸件冷隔缺陷实物图

Fig. 3 Cold shut defects in piston casting

2 惰性气体在金属型重力铸造中的应用

2.1 惰性气体的特点及应用

在工业加工中，惰性气体因其化学性质不活泼，最常用于保护气，防止高温下金属与空气发生氧化反应。在活塞铸造之前，需要在型腔内充满保护气防止金属氧化，常常利用氮气作为保护气。对于活塞铸造材料而言，包括铝、镁等金属材料，氮气在高温下与铝、镁等金属会发生化学反应，如氮化铝、氮化镁影响产品性能。所以对于活塞铸造而言，采用惰性气体中的氩气是一个更佳的选择。

氩气具有以下优点：密度 1.78 kg/m^3 ，比空气重，因而能沉在型腔内，形成良好的保护氛围；流动性较好，便于充满型腔和排出；来源广泛，价格低。

2.2 氩气在金属型重力铸造中的应用

氩气在金属型重力铸造中的应用主要用于充型之前，作为保护气充满型腔，保证充型过程铝液不被氧化，从而提高铝液在整个铸造过程中的流动性。

在铸造加工之前，需要对整体氩气装置进行安装设计。首先需要在模具上设计氩气充气口，通过气路系统与液氩连接。整个氩气管道系统由流量控制器控制充气流量，由电磁阀控制管路的开闭，整个控制与铸造设备的控制融为一体，当模具合型结束，PLC给出信号开始充氩气，计时器开始工作。当开始浇注铝液时停止，保证铝液充型前型腔充满氩气。

如图4所示氩气经管路接入，经压力开关（压力 $0.4 \sim 0.8 \text{ MPa}$ ）到换向阀，经减压阀调整压力至 $0.2 \sim 0.4 \text{ MPa}$ ，再经4个换向阀（2个控制外模、2个控制顶模），通过流量调整阀调整氩气流量，氩气流量控制在 $10 \sim 40 \text{ L/min}$ ，电子流量计显示氩气流量数值，再通过浇注机氩气管路接入一模两腔模具，其中外模前后4个管路，顶模2个管路。

外模合模后，顶模下降开始通氩气，外模、顶模同时通入氩气，氩气开始流动，当浇包经过光栅时，氩气停止流动同时排气开始，延时 $0 \sim 5 \text{ s}$ 后打开电磁阀，浇注过程中，自动排除型腔内的氩气。

氩气充填过程中，必须保证外模、顶模同时充填。图6展示了两种不同情况，其中图6a是顶模单独采用惰性气体保护技术，图6b是外模、顶模同时采用保护技术。

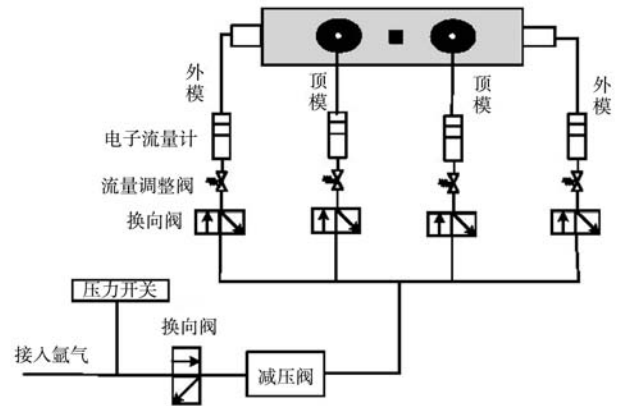
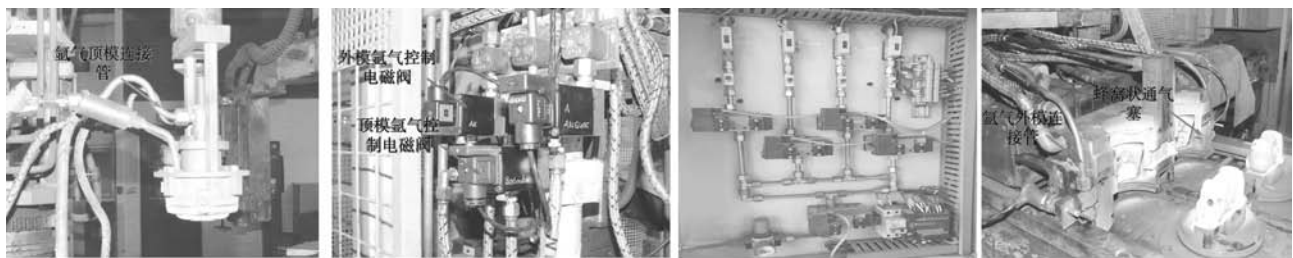


图4 氩气控制系统简图

Fig. 4 Schematic diagram of argon control system



(a) 顶模氩气连接管路

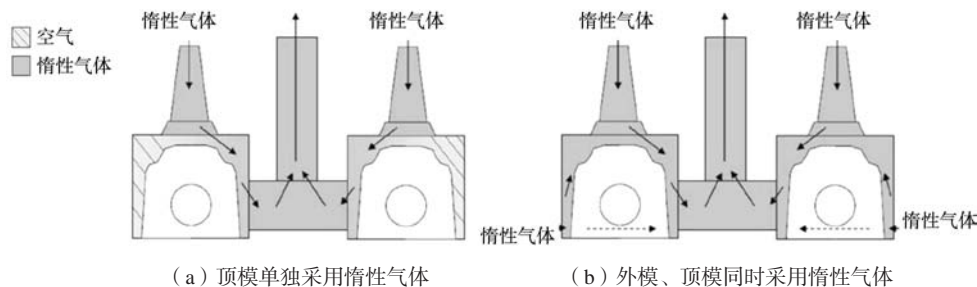
(b) 控制电磁阀

(c) 电器控制图

(d) 外模氩气连接管路

图5 管路连接图

Fig. 5 Piping connection diagram



(a) 顶模单独采用惰性气体

(b) 外模、顶模同时采用惰性气体

图6 两种状况示意图

Fig. 6 Schematic diagram of two different conditions

惰性气体保护技术。在实际操作中,如果采用图6a的形式,会因外模通气口堵塞,造成型腔内惰性气体不能完全充填的现象。

3 试验结果

3.1 合流线消失

对图7所示的毛坯进行测试,并与图1进行对比,其中图7a是应用惰性气体保护技术之后的铸件,因型腔内有惰性气体保护,铝液充型时没有被氧化,无氧化膜形成,毛坯内腔显示合流线消失,图7b是对内腔的彩色探伤检测,图中未发现有铸造缺陷。图7c是图7b剖切位置的放大100倍的金相图,未发现有铸造缺陷。

3.2 冷隔废品率降低

选取了7种不同型号铸件进行测试,以型号为78L77A1的活塞铸件为例,其面窗壁厚为3.0 mm,燃烧室顶部厚度为4.5 mm。未采用惰性气体保护之前,毛坯面窗、燃烧室顶部易产生冷隔缺陷,其冷隔废品率达3.8%。采用惰性气体保护之后,因避免铝液氧化,未形成氧化膜,提高了铝液的流动性,铸造面窗、燃烧室顶部冷隔缺陷基本消失,现在废品率已降至0.2%以下。

如表1所示,7种不同壁厚从2.7 mm到3.4 mm的毛坯,未通入氩气时,毛坯冷隔废品率较高,统计发现壁厚越薄废品率越高;在使用通入氩气的新工艺后,冷隔废品率大幅度降低,由最高的4.7%下降到0.18%,平均废品率也由3.8%下降到0.13%,大大降低了铸造废品率。

3.3 风险分析

采用新的惰性气体保护充型技术之后,显著减少了铝合金液的氧化,提高了铝合金液的流动性和充型能力,但也会出现以下几个问题。

(1) 烫伤风险。在铸造过程中,当惰性气体流动

时,模具可能会将熔液“喷涌”出浇口,有烫伤人的风险,所以要求在铸造开始前停止惰性气体充入。

(2) 废品的风险。当惰性气体过早停止或填充过低的流量时,型腔中的氧气浓度会增加,出现废品的机率随之增加。惰性气体充气时间短时,型腔中的氧气浓度会增加,出现废品的机率也随之增加。充气时间最少为3 s,并且稳定运行。在浇注开始前0~1 s,惰性气体充型必须停止。

(3) 使用惰性气体保护充型技术,容易产生“黑斑”缺陷。采用惰性气体会产生黑斑缺陷,黑斑主要影响因素是浇注温度,浇注温度越高,黑斑缺陷废品越高,浇注温度过低,又影响铝液的流动性和充型能力,所以需在保证铝合金液的流动性和充型能力前提下,尽量降低浇注温度,避免“黑斑”缺陷的产生。

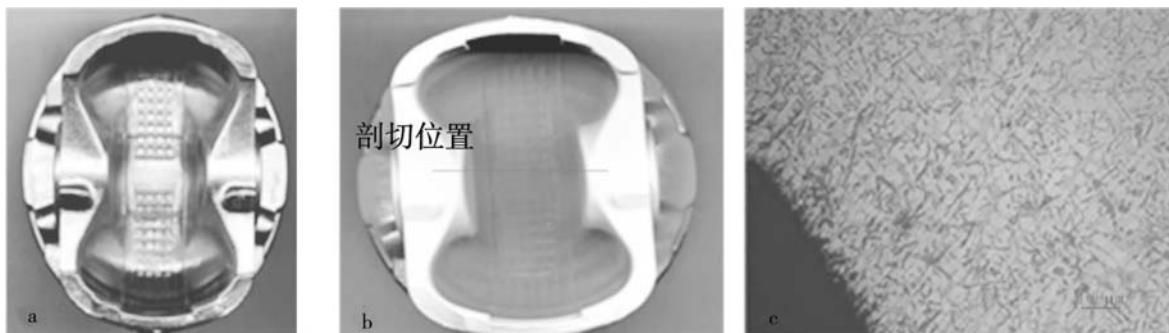
图9是黑斑处经能量色谱X射线光谱仪分析含C、O、Na、Mg、Al、Si、S、Ca元素,说明黑斑中含有氧化物。

(4) 降低浇注温度,也会降低磷、钒在铝液中的溶解度。磷是铝硅过共晶合金的变质剂,Al+P=AIP,AIP与初晶Si晶格形状相同(均为金刚石型六方晶

表1 7种不同壁厚毛坯应用惰性气体保护技术冷隔废品率对照表

Table 1 Scrap rate of seven kinds of different wall thickness castings before and after inert gas protection

毛坯型号	壁厚/mm	冷隔废品率/%	
		未采用惰性气体保护技术	采用惰性气体保护技术
74L68+1A1	2.7	4.70	0.18
76L148A1	2.9	4.30	0.22
78L77A1	3.0	3.85	0.11
85L136+1A2	3.1	3.50	0.12
87L91A1	3.2	3.10	0.15
83L170+1A3	3.4	2.80	0.08
82L251A1	3.4	2.84	0.07
平均		3.80	0.13



(a) 铸件

(b) 内腔彩色探伤图

(c) 铸件金相图(100X)

图7 应用惰性气体保护技术后毛坯铸件缺陷检测图

Fig. 7 Defects inspection results of piston casting after using inert gas protection

格)，且晶格常数、最小原子间距也非常接近，其熔点又在1 000 ℃以上。因此，AlP在初晶硅形核过程中成为非均质形核的核心，从而细化初晶硅，提高了材料的力学性能。如图10、图11和表2两组不同的化学成分的试验数据显示，随着温度的变化，其含量也在变化，铝液温度低于730 ℃时，P含量会急剧下降。

金属钒密度为6.11 g/cm³，熔点1 910 ℃，沸点3 407 ℃。钒在铝硅合金中形成VA1₃难熔化合物，在铸造过程中起细化晶粒作用，从而提高材料的力学性能。如图10、图11所示，两组不同的化学成分的试验数据显示，随着温度的变化，其含量也在变化，铝液温度下降至730 ℃，因其密度较大（高于铝液2.4 g/cm³）会沉淀析出，含量会明显下降。一般情况下，铝液温度应控制在（740 ± 10）℃。

(5) 损伤模具。未使用惰性气体保护技术时，铝液与接触的氧气生成氧化铝是铝液与模具涂层之间的保护膜，降低了涂层损伤速度，模具重新喷涂涂层后，可以防止腐蚀模具。

使用惰性气体保护技术时，因型腔内充填惰性气体，铝液与空气不接触，铝液会与模具涂层中的氧化物完全接触。铝液在高温下从模具涂层中夺取氧，致使模具涂层变得不稳定，模具涂层保护缺失导致模具

表2 合金熔体的化学成分
Table 2 Chemical composition of alloy melt w_B/%

项目	Si	Cu	Mg	Ni	Zr	Ti	V	Fe	Al
铝液1	12.5	4.2	0.95	2.40	0.18	0.09	0.08	0.35	余量
铝液2	12.2	4.1	0.7	2.38	0.15	0.12	0.09	0.31	余量

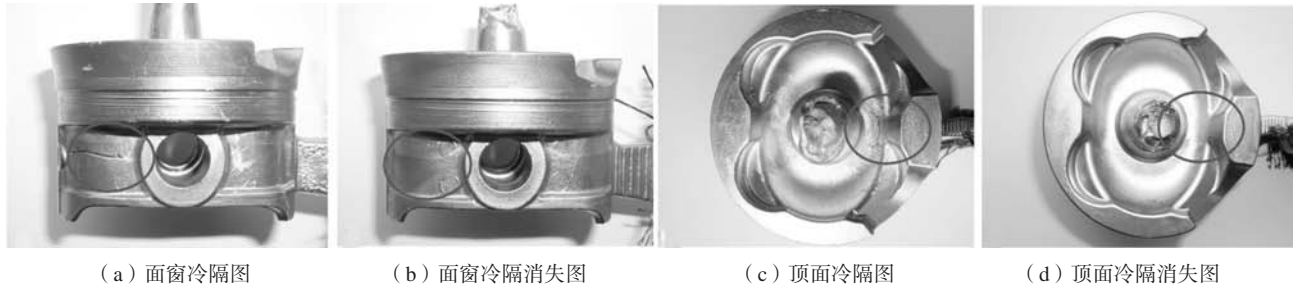
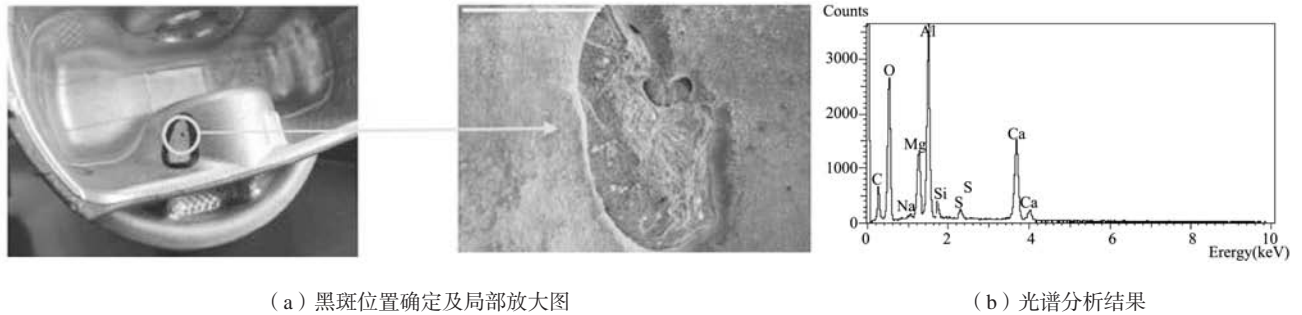


图8 应用惰性气体保护技术前后冷隔对比图

Fig. 8 Comparison of cold shut defects before and after application of inert gas protection technology



(a) 黑斑位置确定及局部放大图

(b) 光谱分析结果

图9 黑斑位置及元素分析图

Fig. 9 Position and element analysis of black speckle

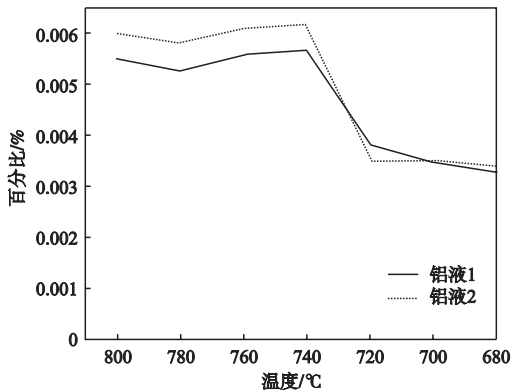


图10 磷的溶解度

Fig. 10 Solubility of phosphorus

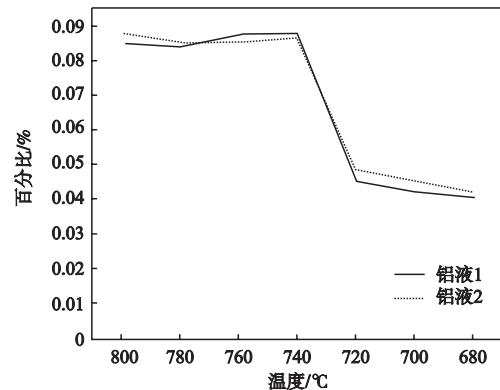


图11 钒的溶解度

Fig. 11 Solubility of vanadium

表面在很少的周期内出现腐蚀缺陷，即使重新喷涂涂层后，模具已经腐蚀，不可逆转，会出现如图12所示的模具腐蚀情况。

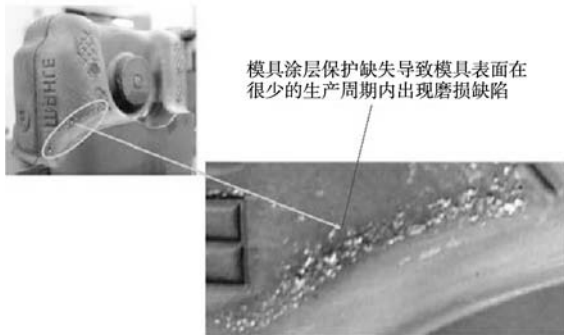


图12 模具腐蚀状态图
Fig. 12 Corroded mould

4 结论

(1) 在金属型腔内形成惰性气体保护氛围，可大大减少铝液表面氧化，提高合金的流动性和充型能力，降低了浇注温度。因降低了温度梯度，也就减少了凝固时间，缩短了生产节拍，降低了能源损失，提高了生产效率。

(2) 采用轻量化产品结构设计时，特别是壁厚小于3.5 mm时，利用铸件充型过程惰性气体保护技术，可避免合流线和冷隔缺陷的产生，从而保证冷隔铸造废品率控制在0.2%以下。

(3) 采用铸件充型过程惰性气体保护技术，虽然能显著降低废品率，但该工艺对模具损伤较大，下一步将试验铬镍铝合金组成的永久模具涂料，改善模具腐蚀倾向，提高模具使用寿命。

参考文献:

- [1] 苏志国. 活塞铸造缺陷与控制 [J]. 内燃机与配件, 2013 (12): 20-22.
- [2] 张屹林, 俎训龙, 高学瑞, 等. 轿车铝活塞铸造缺陷分析及改进 [J]. 金属加工: 热加工, 2013 (23): 75-76.
- [3] 牟俊东, 邢小兵, 朱宝新. 大直径铝合金活塞的模具设计和铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2012 (7): 747-749.
- [4] 陈琪云. 铝合金活塞材料的研发与应用进展 [J]. 合肥学院学报 (自然科学版), 2012 (3): 46-49.
- [5] 金梅. 铝合金活塞材料的研发与应用进展 [J]. 中国材料科技与设备, 2012 (2): 1-3.
- [6] 邬智立. 发动机铝合金活塞铸件缺陷分析及铸造工艺改进 [J]. 铸造, 2018, 67 (1): 45-48.
- [7] 王浩, 张龙, 黄贞益. 汽车活塞浇注系统的改进及数值模拟 [J]. 铸造, 2019, 68 (1): 34-37.
- [8] 胡振, 乔信起, 王渠东, 等. 发动机活塞轻量化的研究进展 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2013, 42 (6): 76-81.
- [9] 周俊, 刘旦, 安现军. 铸造铝合金流动性影响因素研究 [J]. 科技经济导刊, 2020, 28 (10): 229-229.

Application of Inert Gas Protection Technology to Piston Casting for Improvement of Yield Rate

CUI Sui-mian¹, LIU Yong-jun², LI Qiang¹, YANG Jin¹

(1. MAHLE Engine Components (Yingkou) Co., Ltd., Yingkou 115001, Liaoning, China; 2. MAHLE Engine Components (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 210032, Jiangsu, China)

Abstract:

With the increasing need for lightweight piston, the wall thickness of window and combustion chamber are becoming thinner and thinner. In the process of piston casting, the casting defects such as confluence line and cold shut become particularly prominent. In order to eliminate these defects, inert gas protection technology was used, which improved effectively the filling ability of aluminum alloy melt, and the casting defects thereby were reduced. In the mass production, the casting scrap rate decreased from the highest 4.70% to 0.18%.

Key words:

piston casting; inert gas; oxide inclusions; cold shut