挤压态 7075 铝合金半固态加热过程中的组织演变

张靖宇　刘洪军
（兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室）

摘　要　研究了加热温度和保温时间对部分重熔再结晶方法（RAP）制备 7075 铝合金半固态坯料过程中的组织演变的影响。结果表明，通过在半固态温度区间加热可以将挤压态 7075 铝合金的纤维组织转变为半固态颗粒状晶粒组织。随着加热温度的提高和保温时间延长，挤压态组织逐渐消失，颗粒状晶粒经再结晶生长并合并长大；颗粒状晶粒的尺寸随加热温度和保温时间的增加而变大。在试验条件下，高温短时间加热比低温长时间下获得的半固态组织更加细小均匀。通过试验得出 RAP 法制备 7075 铝合金半固态坯料的优化工艺参数为 600 ℃下保温 5 min。

关键词　7075 铝合金；半固态；RAP 法；组织演变
中图分类号　TG441.8；TG146.21；TG249.2+6　　**文献标志码**　A　　DOI：10.15980/j.tzzz.2016.07.014

Semi-solid Microstructure Evolution of As-extruded 7075 Aluminum Alloy during Semi-solid Reheating Process

Zhang Jingyu，Liu Hongjun
（State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals，Lanzhou University of Technology）

Abstract：Semi-solid 7075 aluminum alloy billets were prepared by recrystallization and partial remelting (RAP) technology. The influences of heating temperature and holding time on microstructure evolution were investigated. The results show that the fibrous microstructure in as-extruded 7075 aluminum alloy is transformed into semi-solid granular ones after heating treatment. As increasing in the heating temperature and holding time，the as-extruded microstructure gradually disappears，and the granular grains are generated and grown through recrystallization process. The size of semi-solid granular microstructure is increased with the increase of heating temperature and holding time. Under the experimental conditions，the semi-solid microstructure heated at a higher temperature with short time is the more homogeneous than that of ones heated at a lower temperature with long time. Based on experimental analysis，the satisfied semi-solid 7075 aluminum alloy billets by RAP method can be fabricated with heating at 600 ℃ for 5 min.

Key Words：**7075 Aluminum Alloy，Semi-solid，Recrystallization and Partial Remelting Method（RAP），Structure Evolution**

再结晶重熔（Recrystallization and Partial Remelting，简称 RAP）法是一种高效率的金属半固态坯料制备方法[1]，适用于半固态触变成形[2]。其工艺路线为：首先铸造出具有细小枝晶组织的金属坯料；随后将该金属坯料进行大变形量的热塑性变形（再结晶温度以下），从而使铸态的树枝晶组织充分破碎；最后将冷变形后的金属坯料切成所需的尺寸，并将其迅速加热至半固态温度区间并保温一定时间，从而得到具有球状晶粒组织的半固态坯料[3]。很多企业在出厂前已进行过等温挤压处理，这种挤压态合金原料只需在合适温度下重熔加热即可获得用于触变成形的半固态坯料，因此具有工艺流程短、生产效率高的优点，有着很大的工业应用潜力。本课题探讨了直接采用商用挤压态 7075 铝合金棒材进行 RAP 法制备半固态坯料的工艺，主要研究了加热温度和保温时间对半固态组织演变的影响，并对不同制备条件下的组织均匀性进行了分析。

1　试验材料与方法

选用商用挤压态 7075 铝合金棒料，直径为 ϕ60 mm。图 1 为挤压态 7075 铝合金棒料的微观组织。

收稿日期：2016-01-22；修改稿收到日期：2016-03-01
基金项目：甘肃省自然科学基金资助项目（145RJZA082）
第一作者简介：张靖宇，男，1989 年出生，硕士研究生，兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室，兰州（730050），电话：18794216276，E-mail：550844452@qq.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在 RAP 法中，加热温度和保温时间是二次加热过程中非常重要的两个工艺参数，而加热温度对半固态坯料微观组织的影响起决定性作用[4,5]。本试验选取 570、580、590、600 ℃进行二次加热，考察不同加热温度下的组织变化。

从挤压态 7075 铝合金棒中沿挤压方向截取 ϕ15 mm×19 mm 的圆柱试样，置于 SX2-2.5-12 型箱式电阻炉中，采用 PID 设备控制二次加热温度，达到指定保温时间时，迅速取样水淬。试样经过打磨后，再手工抛光腐蚀，腐蚀剂用体积分数为 1% 的 HF＋2.5% 的 HNO_3＋1.5% 的 H_2O 溶液（科勒试剂），腐蚀时间为 40 s。在 4XC-PC 型金相显微镜下观察其微观组织。组织观察位置为试样横截面中心处，见图 2 中 a 处。为分析组织的均匀性，还在典型试验条件下进行了不同位置的组织比较（图 2 中 a～e 处）。

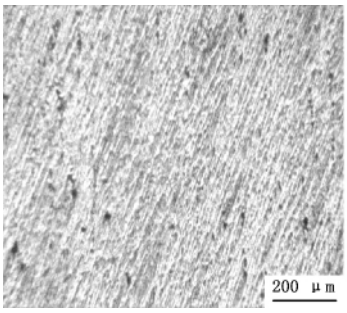


图 1　挤压态 7075 铝合金

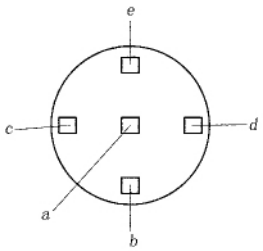
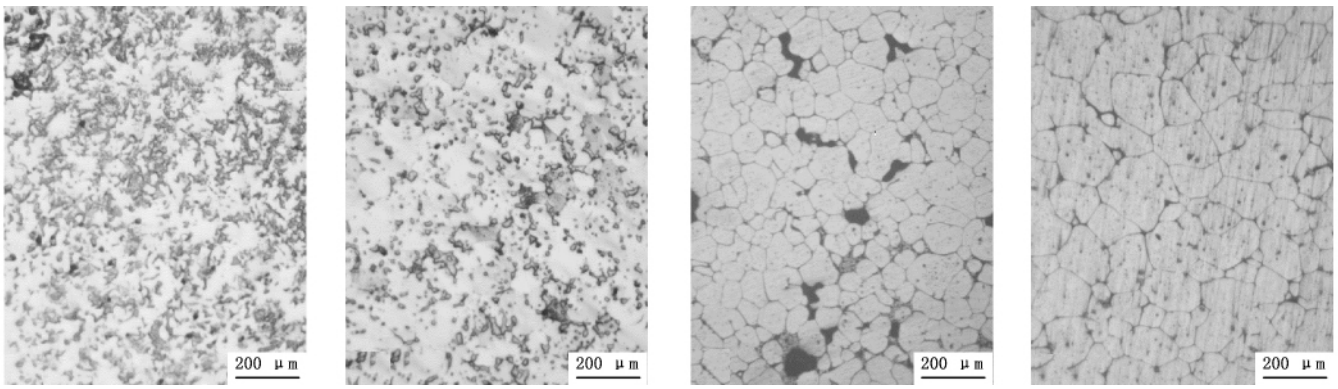


图 2　组织观察位置示意图

2　试验结果及讨论

2.1　加热温度对 7075 合金棒料组织的影响

图 3 为挤压态 7075 铝合金棒料在不同的加热温度下保温 10 min 的组织。可以看出，随着加热温度增加，合金逐渐由挤压态组织经再结晶转变为颗粒状半固态组织。加热温度为 570 ℃时，组织虽然发生再结晶，晶粒变大，但是晶粒轮廓非常粗糙（见图 3a）；加热温度提高到 580 ℃，再结晶的作用使得组织明显粗化，晶粒轮廓开始变得圆滑，挤压态组织的特征仍然很明显，这说明合金的再结晶不充分（见图 3b）；温度升高到 590 ℃时，挤压态组织消失，合金发生完全的再结晶，组织已经半固态化，晶粒几乎都为颗粒状，颗粒状晶粒间分布有少许液相，因此可以认为在 10 min 的加热时间下半固态化的温度是 590 ℃（见图 3c）；继续提高温度至 600 ℃，组织中半固态颗粒合并长大，组织中出现尺寸较大的晶粒，液相组织明显增多（见图 3d）。经计算，图 3c 和图 3d 中组织的平均晶粒尺寸分别为 38 μm 和 48 μm。因此，提高加热温度会导致半固态晶粒尺寸增大、液相率增加和固相晶粒的粘连合并现象，影响组织均匀性。



(a)570 ℃　(b)580 ℃　(c)590 ℃　(d)600 ℃

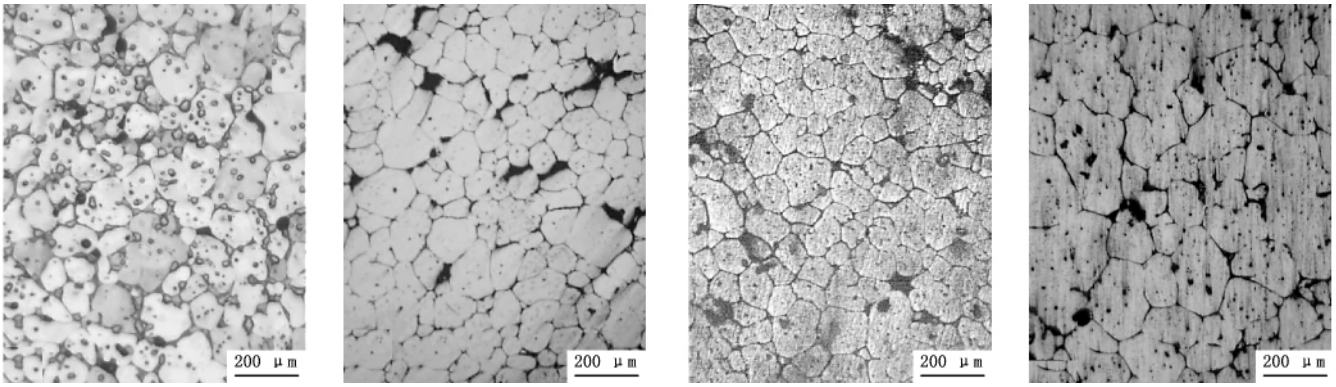
图 3　不同加热温度下保温 10 min 时的微观组织

2.2　保温时间对 7075 合金棒料组织的影响

根据分析可知，挤压态 7075 铝合金的组织半固态化温度为 590 和 600 ℃时，效果比较理想，因此选取 590 ℃和 600 ℃研究保温时间对组织演变的影响，见图 4 和图 5。从图 4a 中可以看出，保温时间为 5 min 时，大部分组织已经半固态化，但是由于重熔处理过程较短，组织还未完全再结晶，仍有部分挤压态组织，晶粒间液相很少；保温时间增加到 10 min 时，挤压态组织消失，组织已经完全半固态化，呈颗粒状晶粒及晶粒间少量液相，晶粒尺寸较均匀（见图 4b）；保温时间为 15 min 时，出现部分晶粒的熔合现象，组织中出现较大的晶粒，晶粒间和晶粒内部的液相增多（见图 4c）；保温时间为 20 min 时，颗粒状晶粒的尺寸明显增大，表明晶粒发生了长大和合并熔合，导致晶粒中出现了较多的液相组织（见图 4d）。

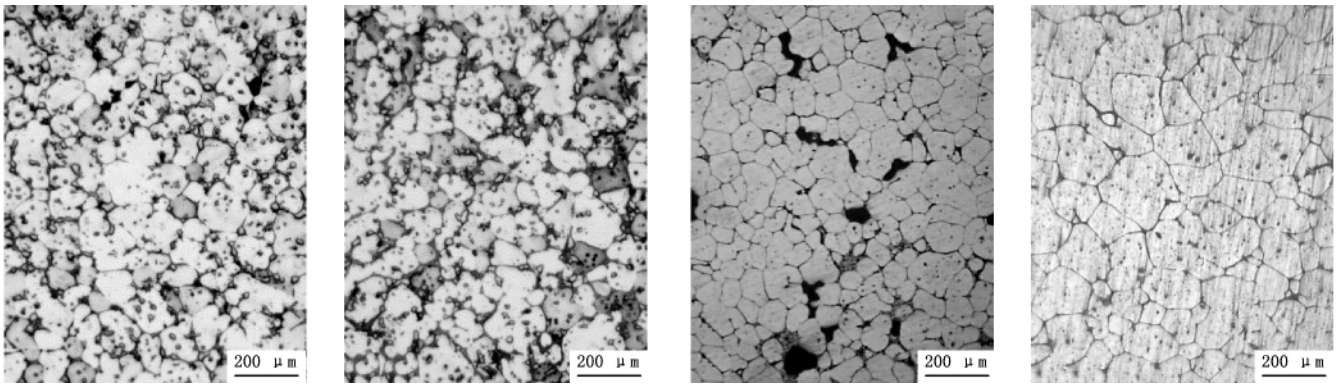
图 5 为加热温度为 600 ℃时，分别保温 1、3、5 和 10 min 时的微观组织。组织演变的趋势与加热温度为 590 ℃时类似，但是组织半固态化的时间大大缩短，保温 5 min 时就完成了挤压态到完全半固态化的转变，增加保温时间到 10 min 后，组织中晶粒尺寸明显增大且晶粒中液相增多。因此，挤压态组织需要一定的保温时间才能完全转变为半固态组织，而后随着加热时间的增加，颗粒状晶粒逐渐长大和合并熔合，晶粒尺寸和不均匀程度增加，保温时间的延长不利于获得均匀细小的半

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)5 min　(b)10 min　(c)15 min　(d)20 min

图 4　加热温度为 590 ℃时不同保温时间下微观组织



(a)1 min　(b)3 min　(c)5 min　(d)10 min

图 5　加热温度为 600 ℃时不同保温时间下的微观组织

固态组织。

图 6 为合金在 590 ℃和 600 ℃下保温不同时间的平均晶粒尺寸。可以看出，相同保温时间下，600 ℃比 590 ℃的晶粒尺寸要更大，而且随着保温时间的延长，600 ℃下保温时晶粒尺寸长大速度明显变快。随着保温时间的增加，晶粒尺寸都会有不同程度的增长。重熔加热过程中晶粒长大和球化的驱动力是系统界面自由能的降低，这是一个自发过程。长大过程首先是晶臂之间的合并，其次是晶粒之间的合并，这两种方式导致晶粒数量减少，而晶粒则长大和实现等轴化[6]；晶粒同时还发生 Ostwald 熟化。晶粒的半固态化与长大也需要一定的保温时间，而且较高的重熔温度会加速原子的扩散，从而加速这一过程[7~9]。

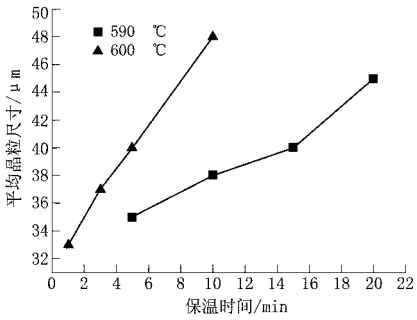


图 6　合金在 590 ℃和 600 ℃下保温不同时间的晶粒尺寸

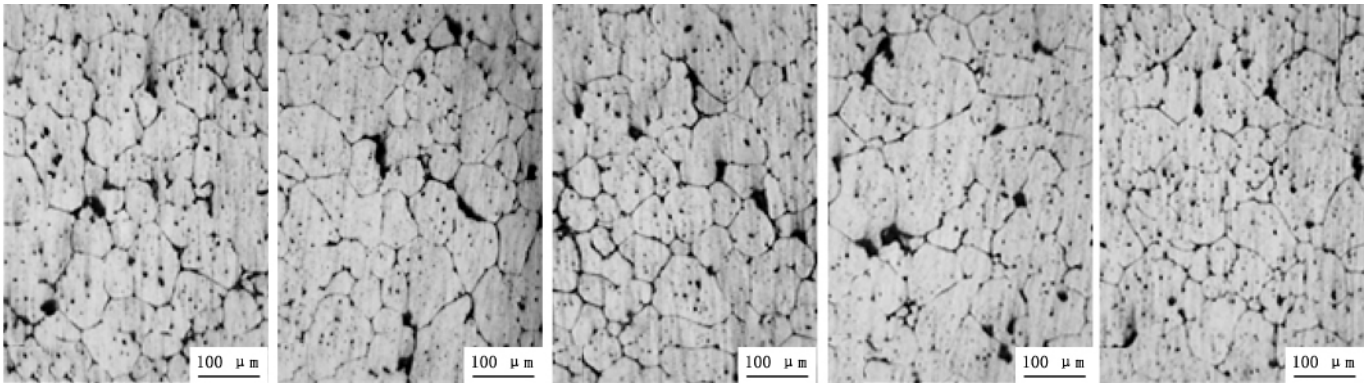
综上所述，挤压态 7075 铝合金通过 RAP 法获得较均匀细小半固态组织的优化工艺为：在 590 ℃下保温 10 min 或在 600 ℃下保温 5 min。

2.3　制备条件对半固态坯料组织均匀性的影响

图 7 和图 8 分别为挤压态 7075 铝合金在两种不同制备条件（590 ℃下保温 10 min 和 600 ℃下保温 5 min）下，不同位置取样的微观组织。由图 7 和图 8 可见，在两种不同的制备条件下，试样中心部分的组织都比较细小均匀，而边缘部分的组织都出现了较大的晶粒。由于试样的温度提高依赖于试样表面到内部的热传导，因此试样不同位置存在温度梯度，该温度梯度随加热时间的延长而减小。a 位置为中心位置，到达半固态化温度的所需时间稍长，且在加热时间较短时，温度也稍低于试样边缘。也就是说，a 位置的半固态加热温度和时间都略低于其他位置，因此其组织略为细小，组织中液相组织也较少，由于晶粒合并长大的时间较短，组织中晶粒粗大化的情况比其他位置少。其他 4 个位置虽然组织也略有差异，但是总体区别并不大，因此离表面的距离是影响组织均匀性的最主要因素。

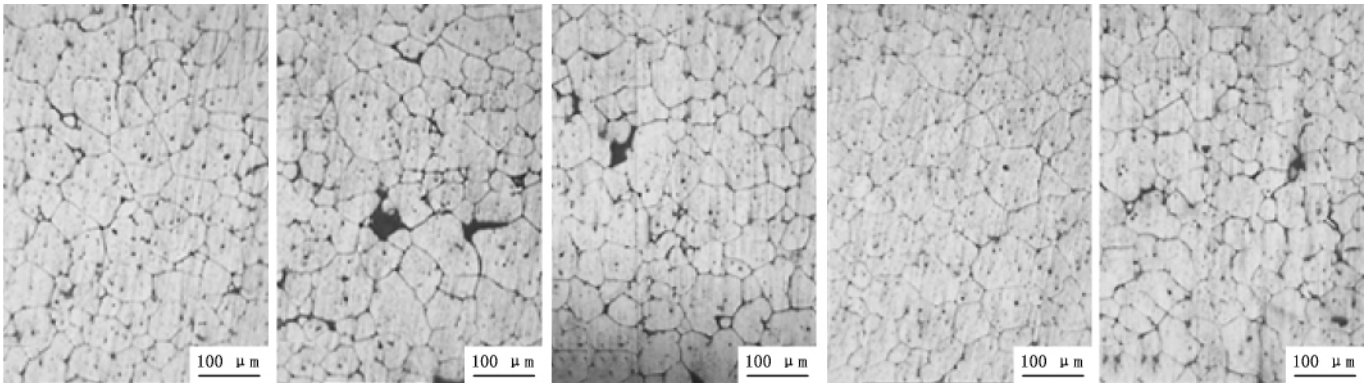
在 590 ℃下保温 10 min 和 600 ℃下保温 5 min 各部位的晶粒尺寸见图 9。从图 9 可知，600 ℃下保温 5 min 的组织比 590 ℃下保温 10 min 中的组织更加均匀细小。半固态的颗粒状晶粒是通过挤压态组织的再结晶形成的。组织中较大的晶粒一般都是再结晶后的晶粒经合并长大熔合而形成的，保温时间越长，尺寸较大

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



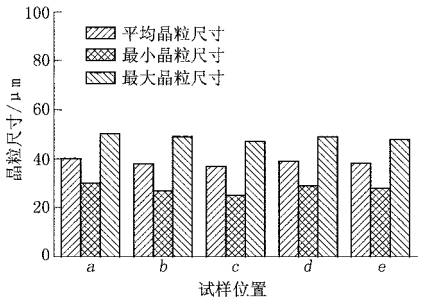
(a)位置 *a*　(b)位置 *b*　(c)位置 *c*　(d)位置 *d*　(e)位置 *e*

图 7　在 590 ℃下保温 10 min 时试样不同部位的组织

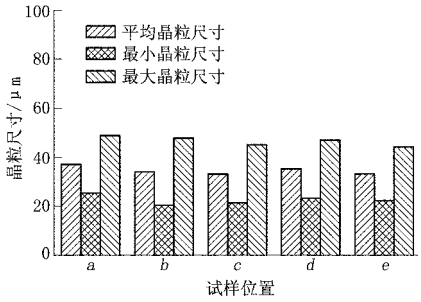


(a)位置 *a*　(b)位置 *b*　(c)位置 *c*　(d)位置 *d*　(e)位置 *e*

图 8　在 600 ℃下保温 5 min 时试样不同部位的组织



(a)590 ℃×10 min



(b)600 ℃×5 min

图 9　590 ℃×10 min 和 600 ℃×5 min 各部位的晶粒尺寸

晶粒的形成机会越大，晶粒尺寸的差异越大，也就是组织均匀性越差[10]。加热温度越高，组织完全再结晶的速度越快。由于较低的加热温度下，完全再结晶需要的时间长，已经再结晶的晶粒熔合长大的机会较大，因此组织均匀性略差。提高加热温度，半固态组织的形成时间缩短，组织均匀性得到改善，但是试样表面或者边角的熔化出现机率增加，试样容易变形，且表面氧化的程度增加。因此也不宜采用非常高的加热温度。

综上所述，在合理的加热温度下，高温短时间加热比低温长时间加热更容易获得组织均匀的半固态组织，因此在试验条件下，采用 600 ℃下保温 5 min 制备半固态坯料较好。

3　结　论

采用 RAP 工艺可以由商用挤压态铝合金型材经重熔加热而直接获得触变用半固态坯料。挤压态 7075 铝合金在加热过程中，随着半固态温度区间保温时间的延长，挤压态组织逐渐经再结晶转变为颗粒状半固态组织，且该过程随着加热温度的提高而加快。在 590 ℃下保温 10 min 和 600 ℃下保温 5 min 是合理的优化半固态工艺，就组织均匀性而言，采用 600 ℃下保温 5 min 制备半固态坯料更好。

参　考　文　献

[1]　袁森，夏明许，王武孝，等. 形变镁合金半固态加热过程中的再结晶及晶粒球状化[J]. 材料热处理学报，2004，25(3)：63-65.

[2]　KAPRANOS P，WARD P J，ATKINSON H V，et al. Near net shaping by semi-solid metal processing[J]. Materials & Design，2000，21(4)：387-394.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

LUBEWAX™ 500颗粒冲头润滑油试验问题及对策

杨 诚[1] 杨兴国[1] 冯江国[2]
(1.重庆大学汽车工程学院;2.中城建第三工程局集团有限责任公司)

摘 要 为改善环境和降低成本,将压铸冲头润滑油由液态G275更换为固态颗粒LUBEWAX™ 500。针对初评时出现频繁断料饼情况,通过分析对比两种冲头润滑油的润滑性能和冷却性能,结合生产现状和过往经验,采取点检模具、冲头和料筒冷却水保证其畅通、变更料筒式样等举措,解决了使用LUBEWAX™ 500颗粒冲头润滑油批量生产断料饼问题。

关键词 润滑油;LUBEWAX™ 500;冲头;料筒
中图分类号 TG249.2+5 **文献标志码** A DOI:10.15980/j.tzzz.2016.07.015

Testing Problems and Countermeasures of LUBEWAX™ 500 Particles Piston Lubricant

Yang Cheng[1], Yang Xingguo[1], Feng Jiangguo[2]
(1. College of Automotive Engineering, Chongqing University;
2. The Third Engineering Bureau of China City Construction Group Co., Ltd.)

Abstract: For the purpose of improving the environment and reducing costs, piston lubricant for die casting was replaced from liquid G275 to the solid LUBEWAX™ 500. However, there exists broken cake during the initial evaluation of the product. Through a comparative analysis of lubricity and cooling properties between the two piston lubricants, combining with production status and past experience, series of countermeasures, such as checking mold, piston and barrel's cooling water and ensuring smooth, as well as changing the barrel style, the problem of cake broken was solved. Finally, the LUBEWAX™ 500 particles piston lubricants was imported successfully.

Key Words: Lubricating Oil, LUBEWAX™ 500, Plunger, Barrel

目前,国内外普遍使用的压铸冲头润滑油有以矿物油为基础油含固体颗粒的冲头油、人工合成物润滑油、蜡质颗粒状润滑剂等3种[1]。长期以来,国内铝合金压铸企业多使用液态的人工合成物润滑油,分为含石墨和不含石墨两种。液态润滑油的供给装置简单、操作方便,尤其是含石墨的冲头润滑油不仅润滑效果好,而且能够延长冲头和料筒寿命等,受到众多企业的青睐。

但是,传统的液态冲头润滑油燃烧火焰大、烟雾浓等缺点,既容易引发火灾,又严重污染环境,铸件料饼油污重,因此,改变这一现状刻不容缓。LUBEWAX™ 500固体颗粒具有润滑效果好、燃烧烟雾小和用量少等优点。本课题以某企业试验LUBEWAX™ 500固体冲头润滑颗粒为例,探讨了使用这种固体颗粒的优点以及注意事项。

收稿日期:2016-01-18;修改稿收到日期:2016-03-07
第一作者简介:杨诚,男,1964年出生,副教授,重庆大学汽车工程学院,重庆(400030),电话:13618376136,E-mail:cdyccn@163.com
通信作者:杨兴国,男,1986年出生,硕士研究生,重庆大学汽车工程学院,重庆(400030),电话:18223592732,E-mail:20140713220@cqu.edu.cn

[3] KIRKWOOD D H, SELLARS C M, ELIAS-BOYED L G. Thixotropic materials: European Patent, 0305375 B1[P]. 1992, 10-28.
[4] 陈强. 合金加工流变学及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2012.
[5] 郑宏强,李元东,李明,等. 浇注温度对自孕育法制备半固态6061合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2015,35(1):339-343.
[6] 王顺成,李元元,陈维平,等. 半固态2024Al合金部分重熔新工艺与组织演变[J]. 稀有金属材料与工程,2009(S1):192-196.
[7] LIU C M, HE N J, LI J K. Structure evolution of AlSi6.5Cu2.8Mg alloy in semi-solid remelting processing[J]. Journal of Matrials Science, 2001, 36:4 949-4 953.
[8] JUNG H K, KANG C G. Repeating process of cast and wrought aluminum alloys for thixoforging and their globularization mechanism[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 104: 244-253.
[9] LUO S J, CHEN Q, ZHAO Z D. Effects of processing parameters on the microstructure of ECAE-formed AZ91D magnesium alloy in the semi-solid state[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 477:602-607.
[10] WU G H, ZHANG Y, LIU W C, et al. Microstructure evolution of semi-solid Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy during isothermal heat treatment[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013(1): 39-46.

(编辑:袁振国)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net