

如何实现“以铸代锻” ——新型高强铝合金挤压铸造量产实例

王攀¹, 湛弘义¹, 刘名¹, 徐义武^{2, 3}, 王建锋¹

(1. 通用汽车中国科学研究院, 上海 201206; 2. 通用汽车(中国)投资有限公司, 上海 201206;

3. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 概述了铝合金挤压铸造的优点, 以及实现“以铸代锻”需要重视的三个方面: 第一选择可热处理强化的高强铝合金; 第二必须同零部件设计工程师密切沟通, 不断优化铸件结构以利于挤压铸造工艺; 第三必须有严格的铸造工艺控制, 从不同方面减少挤压铸件的含气量。

关键词: 挤压铸造; 铝合金; A345; 铸件结构; 工艺控制

挤压铸造也被称为液态模锻, 是一种集铸造和锻造工艺特点于一体的特种铸造工艺。该工艺将一定量的金属液体直接浇入金属型内, 通过模具或冲头以一定的压力作用于液态或半固态的金属上, 使之充填、成形和结晶凝固, 金属在压力下结晶凝固并产生一定量的塑性变形, 从而成为获得优质铸件的一种金属成形方法^[1]。挤压铸造可分为两大类: 直接挤压铸造和间接挤压铸造。直接挤压工艺类似于金属模锻, 压力直接施加于液态或半固态金属的整个面上; 间接挤压工艺与高压压铸接近, 压力通过浇道间接地作用于液态或半固态金属上。目前市场上所使用的可以连续而且大批量生产的挤压铸造装备绝大部分都是属于间接挤压铸造, 以下文中挤压铸造所指的均是间接挤压铸造。挤压铸造主要有以下优点。

(1) 挤压铸造机的料筒一般是立式的, 金属液由下而上充填型腔, 充填速度较慢, 这样不但保证金属液在型腔内是层流流动充填, 不会卷入气体, 而且也有利于排除模具型腔内的空气, 因此挤压铸造铸件含气量很低, 可以进行热处理, 也可以进行焊接。

(2) 挤压铸造模具设计时必须采用大的内浇道, 并且金属液在很大的增压压力下凝固, 铸件补缩效果非常好, 铸件内部基本无缩孔、疏松等铸造缺陷, 从而提高了铸件力学性能。

(3) 由于铸件在充填和凝固的过程中, 金属液自始至终受到较大的高压压力作用, 所以铸件晶粒细小, 组织均匀, 同时压力使铸件外侧紧贴模具内壁, 铸件的尺寸精度高。

(4) 挤压铸造工艺, 相对于锻造来说, 更适宜于一些形状比较复杂、且性能要求比较高的产品。

(5) 由于挤压铸造零件可以进行热处理, 如果选用能进行热处理强化的合金, 就可以通过热处理来大幅提高铸件的力学性能, 达到接近或相当于模锻件的质量。

笔者近几年有幸参与我司的两个发动机安装支架的开发项目, 并取得了成功。这两个支架形状比较相近, 一个是左件, 另一个是右件。该支架原来设计是用铝合金模锻件(如图1)。在开发过程中, 项目组通过同一级供应商紧密合作, 不断地优化该产品的结构, 最终生产出适宜于挤压铸造的两个发动机支架(如图2, 仅列出右边支架)。通过对该项目的开发过程进行认真仔细的梳理, 认为该项目能取得成功主要得益于以下三个方面。

作者简介:

王攀(1975-), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向是轻合金铸造工艺。电话: 13918451468; E-mail: wang.pan@gm.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)02-0193-03

收稿日期:

2022-04-27 收到初稿,
2022-06-24 收到修订稿。

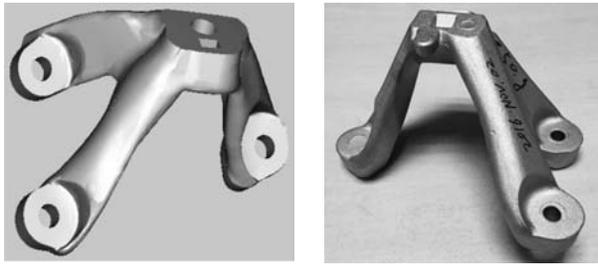


图1 原始零件图

图2 优化后的零件图

Fig. 1 Picture of the original part Fig. 2 Picture of the optimized part

1 选用高强度且能热处理强化的铝合金

在本项目中，该支架选用了本公司自主研发

专利高强度铸造铝合金。该合金在美国铝业协会（Aluminum Association，简称AA）注册的牌号为A345，化学成分与A356.2类似，适当地降低了硅元素的含量，有利于改善铸件的延展性且能够保证零件生产时液态铝合金的流动性。另外，该合金中还适当添加了一些有利于热处理强化的化学元素，这些元素中没有贵金属和稀土元素。因此，新合金的设计思路是在有效提高铸件强度的同时，实现汽车行业所需要的零件成本控制要求。A345合金的化学成分见表1，该合金力学性能见表2，适用于低压铸造、差压铸造或挤压铸造等厚壁件的铸造工艺，在T6热处理状态下，无论是屈服强度还是抗拉强度，远远超过传统的A356.2铝合金，接近变形铝合金6061的性能。

表1 A356.2和A345.1化学成分对比表

Table 1 Chemical compositions of the A356.2 and A345.1 aluminum alloys

 $w_B / \%$

牌号	状态	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Al
A356.2	铸锭	6.50~7.50	<0.12	<0.10	<0.05	0.30~0.45	-	<0.20	余量
A345.1	铸锭	4.00~6.50	<0.12	<0.20	<0.10	0.30~0.55	0.10~0.30	0.10~0.25	余量

注：杂质元素：单质<0.05%，总量<0.15%。

表2 A356、A345和6061在T6态的力学性能对比表

Table 2 Mechanical properties of the T6 tempered A356, A345 and AA6061 aluminum alloys

合金牌号/通用汽车标准	成形工艺	热处理	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
GMW5M-Al-C-P-Si7Mg-T6 (A356)	低压铸造	T6	180~210	230	7
A345	低压铸造	T6	270~290	320~350	6~9
	挤压铸造/差压铸造	T6	270~290	320~350	8~10
GMW15657M-Al-F-Mg1SiCu (AA6061)	锻造	T6	270	310	10

2 与零部件工程师密切沟通，优化铸件结构

本项目中，原始零件的结构厚薄不均，不适合挤压铸造。我司项目组成员与一级供应商的产品设计人员密切沟通，并通过使用铸造模拟软件，不断更改铸件结构，合理调整铸件不同部位的厚度，最终优化出一个适宜于挤压铸造工艺的零件^[2]。图3是一个增加铸件局部厚度的实例图，原来的零件设计预留的安装空间较大，从而造成在该部位的壁厚太薄（图3左边圆圈处），阻断了该铸件最长支腿的补缩通道，造成最长支腿内部缩孔严重。为了消除这个缩孔区域，特地在这个部位增加5 g左右质量的铝合金（图3右边圆圈处），形成凝固的补缩通道，最终消除了铸件的缩孔，得到一个组织致密的挤压铸造件。图4所示的就是典型的T6热处理后的挤压铸造A345铝合金的金相显微组织，由铝基体和共晶区组成，组织中仅有极少量的



图3 零件增大补缩通道的实例图

Fig. 3 Picture showing the location where the solidification path is enlarged
细小气孔存在。

3 严格的铸造工艺控制

严格的工艺控制是制造出一个完美挤压铸件必不可少的一个条件。首先，尽可能的提高铝合金液的洁净度，严格控制铝合金液的含气量，必须小于 $0.25 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ ，从源头上控制铸件的含气量。其次，

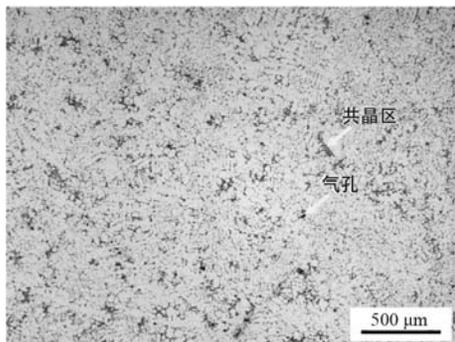


图4 T6处理后的挤压铸造A345铝合金的金相显微组织
Fig. 4 Typical optical microstructure of the T6 tempered A345 aluminum squeeze casting part

选用低发气量的料筒涂料、低发气量和隔热性能较好的模具涂料。第三，严格控制冲头的速度，对于平均壁厚在3~6 mm的铸件，在内浇道的充填速度必须低于0.7 m/s，避免铸件在充型时卷入模具型腔内气体。第四，定期清理模具，保证模具的排气槽畅通，防止铸件内卷气。

我司开发出的这两个发动机安装支架铸件，由于使用了新型高强铝合金A345，生产工艺由原来的锻造改为现在的挤压铸造，制造成本降低了约70%。铸件本体取样的屈服强度跟锻造铝合金基本一样（图5），同时也有足够的伸长率，最终量产铸造零件的质量跟原锻造设计的图纸质量一样，从而实现了“以铸代

锻”。目前这两个支架已经从2019年实现批量供货了，应用于第八代科尔维特（Corvette Zerv，2020年上市销售，见图6）轿跑车。该车采用的是6.2 L的中置发动机布置，全铝车身结构，零到百公里时速的加速时间仅需2.9 s。

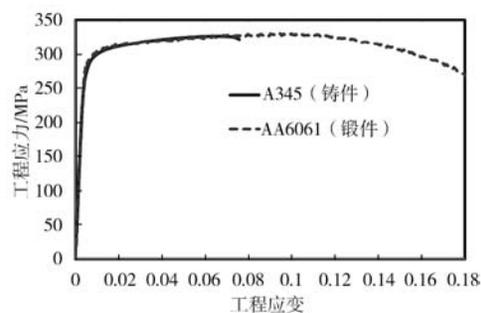


图5 A345挤压铸件和AA6061锻件拉伸性能比较
Fig. 5 A comparison of tensile properties between the A345 squeeze casting and the AA6061 forgings



图6 采用中置发动机布置的第八代科尔维特轿跑车
Fig. 6 Picture of the first mid-engine 8th generation Corvette speedster

参考文献:

- [1] 罗守靖, 陈炳光, 齐丕曩. 液态模锻与挤压铸造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 罗继相, 裴连进, 夏望红, 等. 挤压铸造技术的选择与应用实践 [C]//第十四届中国国际压铸会议/第5届有色金属及特种铸造技术国际研讨会, 2019.

How to Use Castings Replacing Forgings: an Example of Mass Production of Squeeze Casting for a Novel High Strength Aluminum Alloy

WANG Pan¹, ZHAN Hong-yi¹, LIU Ming¹, XU Yi-wu^{2,3}, WANG Jian-feng¹

(1. General Motors China Science La, Shanghai 201206, China; 2. General Motors (China) Investment Co., Ltd., Shanghai 201206, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, School of Materials Science and Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract:

The merits of squeeze casting are summarized in this paper, and three important factors must be emphasized if the engineers want to use casting parts replacing forging parts. First, the high strength heat treatable aluminum alloy must be selected; second, continuously communicating with the parts designer and optimizing the structure of the parts must be done to ensure the parts are suitable for the squeeze casting process; third, strict casting process must be followed to minimize the gas content of the squeeze casting parts.

Key words:

squeeze casting; aluminum alloy; A345; casting structure; process control