

# 活塞挤压铸造用高性能铝合金材料的制备研究

王乾廷<sup>1,2</sup>, 陈鼎宁<sup>1,2</sup>, 张丹<sup>3</sup>, 陈秀玉<sup>3</sup>, 范小萍<sup>3</sup>, 朱虎<sup>1</sup>

(1. 福建省新材料制备与成形技术重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118; 3. 福州钜全汽车配件有限公司, 福建 福州 350014)

**摘要:** 针对现有铝合金材料不能满足动力机械用的薄壁高强韧铝合金零件的要求,通过改进材料配方和制备方法,得到符合铝合金挤压铸造工艺要求的高强韧新材料。实验结果表明,利用该材料生产的铸件平均抗拉强度达到 300MPa,高温抗拉强度 268MPa,伸长率超过 1.73%,硬度超过 HB95,微观组织晶粒致密,基本无疏松缩孔等缺陷,达到了高性能要求。

**关键词:** 挤压铸造; 铝合金; 材料制备; 高性能

中图分类号: TG249.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)01-0063-03

## Research into the improvement and preparation of high performance aluminium alloy material used in the squeeze cast processing

Wang Qianting<sup>1,2</sup>, Chen Dingning<sup>1,2</sup>, Zhang Dan<sup>3</sup>, Chen Xiuyu<sup>3</sup>, Fan Xiaoping<sup>3</sup>, Zhu Hu<sup>1</sup>

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of New Materials Preparation and Forming Technology, Fuzhou 350118, China;

2. College of Material Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Fuzhou Jieh Chueng Automobile Fitting Co., Ltd., Fuzhou 350014, China)

**Abstract:** To improve aluminium alloy materials to satisfy the requirements of thin-walled high performance aluminium alloy parts for dynamic machinery, aluminium alloy materials formula and preparation methods were improved. High performance new aluminium alloy materials that can satisfy the requirements of aluminium squeeze cast processing were obtained. The average anti-tensile strength and the high temperature anti-tensile strength of the casting pieces manufactured with the new materials can reach 300MPa and 268 MPa respectively. The casting pieces have an elongation rate of 1.73% and a hardness of HB95, the crystalline structure of which is dense with no shrinkage or porosity, indicating that the new aluminium alloy can reach the requirements of high performance.

**Keywords:** squeeze casting; aluminium alloy; material preparation; high performance

在轻型动力机械领域,例如发电机、高压清洗机、扫雪机、割草机和草坪车等领域,随着技术发展,在对这些产品需求量不断增长的同时,又要求轻便、可靠性高、长寿命。体现在其活塞和连杆等关键部件上,则要求轻量化、高强韧等<sup>[1]</sup>。为了达到这个目标,挤压铸造是可行的成型工艺。由

于铝合金的挤压铸造过程影响因素很多,过程复杂,从合金成分的设计<sup>[2]</sup>、合金材料的熔炼<sup>[3]</sup>、合金液的浇注<sup>[4]</sup>、以及挤压铸造方案的选取<sup>[5]</sup>,挤压铸造模具的设计<sup>[6]</sup>,到熔炼设备、热处理设备的先进性以及热处理工艺是否合理都将影响到铝合金活塞产品的最终质量。

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: 福建省高校产学研合作科技重大项目(2013H6002,2012H6001);福州市科技计划项目(2013-G-87, 2012-G-129)

第一作者简介:王乾廷(1977-),男(汉),河南南阳人,教授,博士,研究方向为材料加工工程、先进制造技术等。

本文的基本思路是通过改进用于挤压铸造工艺的高性能铝合金材料的配方和制备方法,得到新铝合金材料,使之既符合高性能的要求,又具有良好的成型性能。

1 铝合金材料制备

本文以某一种新型铝合金活塞为研究对象,其轮廓示意图如图 1 所示。该产品具有如下特点:

1)在壁厚方面,最薄部位仅 3.5 mm,位于裙部;最厚处约 14 mm,即活塞销座部分。常见的轻型动力机械活塞最小壁厚一般不低于 5 mm,且壁厚差通常也超过 6 mm。此外还通过缸径减小等综合措施,使得总质量约 208 g,比同样缸径的重力铸造活塞减轻了 25%。

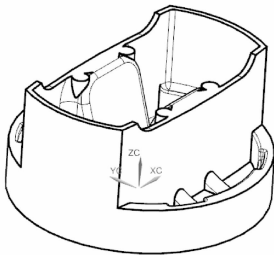


图 1 某规格用于便携式除草机的活塞  
Fig.1 A certain-sized piston used in portable grass-cutting machine

2)在力学性能方面,要求韧性好、耐冲击、耐磨损,外形美观,内在组织致密。经 T5 处理的抗拉强度高于 240 MPa,经 T6 处理的抗拉强度达到 300 MPa 以上,屈服强度达到 268 MPa 以上,伸长率大于 4.73%,最大初晶硅 40  $\mu\text{m}$ ,平均初晶硅

20 ~ 30  $\mu\text{m}$ ,体积稳定性小于 0.02%,砂孔径极少且不超过 0.5 mm,硬度不低于 90 HB。

在铝硅合金中调整 Cu、Mg、Mn、Ni 及其它合金元素的含量,不同程度地融入  $\alpha(\text{Al})$  固溶体中,使其结构复杂化,提高合金的强度,这些合金元素在合金中生成强化相,高温稳定相来提高合金的强度和高温性能。

1.1 试验目标

在常用压铸用的 ZL108 材料基础上,综合重力铸造和锻造使用的材质成分,对其中 Cu、Si、Mg 等元素进行优化对比试验,得出新材料配比,目标是能够利用 T5 热处理的铝材料,使之能够适合挤压铸造工艺又能达到高性能要求。对于改进后的材料,既要进行综合处理试验,还要对流动性能进行试验。

1.2 材料制备试验

步骤 1:在熔炼炉中按质量百分比加入铝锭,加热至 580 ~ 600  $^{\circ}\text{C}$ ,铝锭溶解,加入占铝锭质量 0.1% ~ 0.2% 的低温除渣剂,将铝液搅拌 40 ~ 60 次后除去表层杂质,再加入占铝锭质量 0.1% ~ 0.2% 的低温除渣剂,再次搅拌 40 ~ 60 次后除去铝液表层的浮渣。

步骤 2:将除渣后的铝液继续加热至 730 ~ 750  $^{\circ}\text{C}$ ,把铝合金中除 Al 外的 Si、Cu、Mg、Fe、Ni、Mn、Cr、Sn、Ti、Zn、Pb 等元素按表 1 所示的百分比,混合均匀后加入熔炼炉中,搅拌铝液 3 ~ 5 min。

步骤 3:将铝液继续加热至 720 ~ 740  $^{\circ}\text{C}$ ,加入占铝锭重要 0.2% ~ 0.3% 的复合变质剂进行细化变质处理。

表 1 铝合金的成分

Tab.1 Composition of aluminium alloy

成份	Si	Cu	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Sn	Ti	Zn	Pb	Al
质量分数/ %	13.5 ~ 14.5	3.5 ~ 4.5	0.05 ~ 0.25	0.4 ~ 1.05	1.5 ~ 2.25	0.1 ~ 0.35	0.01 ~ 0.15	0.01 ~ 0.1	$\leq 0.15$	$\leq 1$	$\leq 0.2$	其余

步骤 4:将细化变质处理后熔融的铝液送到保温炉内,在 720 ~ 740  $^{\circ}\text{C}$  下保温 50 ~ 70 min,再加入占铝锭质量 0.1% ~ 0.2% 的高温除渣剂进行除渣处理,然后进行除气精炼处理。

步骤 5:将初期精炼后的铝液静置 6 ~ 10 min,按要求加热保温至挤压铸造浇注所需的温度。

以上试验步骤,尤其是材料成分配比等关键步骤是经过多次反复改进和优化的结果,其过程不再详述。

2 试验结果分析

活塞按优化的工艺方案及模具结构试制,并

对其取样进行力学性能及显微组织分析, 分别对活塞销座、裙部及顶部取样进行分析。

2.1 活塞力学性能测试

活塞各部位力学性能测试结果如表 2 所示。从表中可以看出, 活塞销座裙部硬度高于活塞销座及活塞顶部, 这是由于活塞裙部薄壁部位在挤压铸造时, 冲头加速了裙部薄壁部位与模具之间的热传导, 晶粒得到了细化, 同时还产生了部分塑性组织, 在后边的金相试样观察中也得到证实。活塞的各项机械性能均能满足活塞技术要求。

表 2 活塞合金力学性能 (T5 热处理)  
Tab. 2 The mechanical property of piston aluminium alloy (with T5 heat-treatment)

部位	抗拉强度/MPa		伸长率/	布氏硬度/
	26℃	300℃	%	HB
活塞销座	320	219	1.93	95
裙部	335	228	2.12	98
活塞顶部	310	208	1.82	93

2.2 显微组织分析

试样采用 T5 热处理, 销座部分加工销孔, 外圆加工切槽后均未见宏观疏松缩孔缺陷。分别在活塞销座、裙部、顶部截取合适体积大小的试样, 试样在 XQ - 1 型金相试样镶样机上镶样, 在 YM - 2A 型金相试样预磨机上粗磨和精磨后, 然后在水磨砂纸上细磨, 最后在 PG - 2D 型金相试样抛光机上抛光, 抛光液采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉配比成一定比例。实验选用的 0.5% 的 HF 水溶液浸蚀剂, 腐蚀面由光亮变成灰暗色即可, 时间约为 5 s, 腐蚀完毕后对抛光面清洗和烘干, 制得合格的观察样品后 (如图 2), 利用 XJZ - 6A 型金相显微镜, J12 - 50 型显微镜电源, 对其显微组织在不同倍率下进行观察拍照, 如图 3 所示。图中 (a)、(b) 对应取样对应于图 2 中销座部位, 依次从低倍到高倍拍照。图 (c)、(d) 对应于裙部位置, 图 (e)、(f) 对应于活塞顶部位置。由金相图可见组织主要由黑色的共晶相 + 白色的 α - Al 组成, 3 部分均无粗大的块状初晶硅存。图中, 没有孔洞微缩孔的存在, 也没有大块状或集中分布的鱼骨状铁相夹杂物存在。由图 (c)、(d) 可见, 该处相对活塞销座及活塞顶, 晶粒更加细小。活塞裙部薄壁处没有粗大的块状粗晶 Si 析出, 组织细小, 这是由于薄壁部位相对于厚壁处冷却速度快, 且冲头在挤

压铸造过程中加速了薄壁部分与型腔的热传导。图 (e)、(f) 可见, 有初晶硅的存在, 但初晶硅的量很少, 且尺寸也很小。

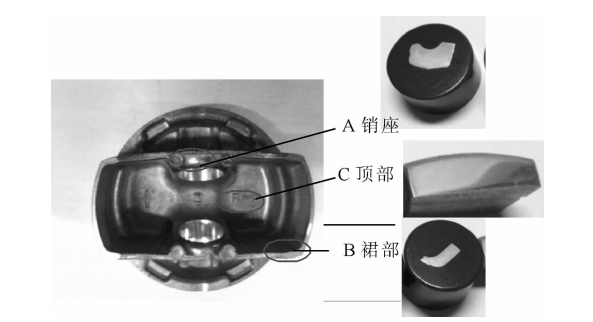


图 2 T5 处理后活塞试样取样  
Fig. 2 Sampling of piston aluminium alloy post T5 heat treatment

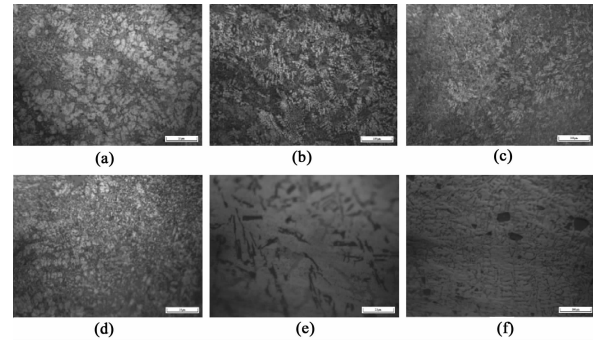


图 3 活塞不同位置的金相显微组织  
(a) 活塞销座低倍组织 (b) 活塞销座高倍组织 (c) 活塞裙部低倍组织 (d) 活塞裙部高倍组织 (e) 活塞顶部低倍组织 (f) 活塞顶部高倍组织

Fig. 3 Metallurgical structure of different parts of piston

3 结论

当前的 ZL108 铝合金材料由于其材料成分和制备方法的限制, 在高致密性和轻薄零件中很难达到要求。本文对于有害杂质元素夹杂和气体, 采用“防、排、溶”的原则, 即采用除渣剂、变质剂、除气精炼处理等方法来降低铁相及夹杂物的影响, 改进了材料的成型性能, 并通过挤压铸造工艺方法得到符合铝合金挤压铸造工艺要求的高强韧新材料。实验结果表明, 利用该材料生产的铸件平均抗拉强度、高温抗拉强度、伸长率、硬度等指标均高出 ZL108 材料, 实现了高性能要求。

(下转第 89 页)

参考文献：

[1] 钱炳,金中坤,方文辉. 模块化生产组织方式对模块供应商创新意愿的影响研究[J]. 科技管理研究,2014(8): 202 – 206.

[2] 余东华. 模块化企业价值网络:形成机制、竞争优势与治理结构[M]. 上海:上海人民出版社,2008.

[3] 芮明杰,张琰. 模块化组织理论研究综述[J]. 当代财经,2008(3):122 – 128.

[4] 陈杰,屠梅曾,孙大宇. 生态供应链下绿色采购的信号博弈[J]. 系统工程学报,2004,19(4):202 – 206.

[5] 陈杰,屠梅曾,赵旭. 生态供应链下环境型采购的博弈分析[J]. 系统工程理论方法应用,2004,13(6):268 – 271.

[6] 计国君,张茹秀. 基于演化博弈的生态供应链采购管理研究[J]. 生态经济,2010(1):26 – 29.

[8] 王辉,侯文华. 考虑企业间模块化程度影响的 ITO 固定报酬契约设计研究[J]. 物流技术,2010(10):85 – 92.

[7] Amrit T. Does technological modularity substitute for control? A study of alliance performance in software outsourcing strategic[J]. Management Journal,2008,29:769 – 780.

[9] Ron S,Joseph T. Modularity,flexibility,and knowledgement in product and organization design strategic[J]. Management Journal, 1996,17:63 – 76.

[10] Carliss Y B,Clark K B. Design roles: the power of modularity[M]. Boston:MIT Press,2000.

[11] 王亚娟,刘益模. 模块化程度、动态性边界与企业绩效[J]. 人文杂志,2010(4):68 – 73.

[12] Schilling M A. Toward a general modular systems theory and its implication to inter firm product modularity[J]. Academy of Management Review, 2000,25(2):312 – 334.

[13] Hoetker G,Swaminathan A,Mitchell W. Modularity and the impact of buyer-supplier relationships on the survival of suppliers [J]. Management Science, 2007,53(2): 171 – 191.

[14] 史学锋,徐国华. 一种多阶段供应商选择的混合整数规划模型[J]. 工业工程,2006,9(1):100 – 103.

[15] 梁建. 试论供应链环境下供应商管理中的转换成本[J]. 湖北经济学院学报:人文社会科学版,2007,4(12):48 – 49.

[16] Juliana H. Capturing the degree of modularity embedded in product architectures[J]. The Journal of Product Innovation Management,2006,23: 128 – 146.

[17] Christopher A V,Juliana H. Service architecture and modularity [J]. Decision Sciences,2009,40(3): 541 – 569.

(责任编辑：肖锡湘)

(上接第 65 页)

参考文献：

[1] Azhagan M T, Mohan B, Rajadurai A, et al. Influence of squeeze pressure on the mechanical properties of squeeze cast aluminium alloy AA6061[J]. Advanced Materials Research,2014,984:350 – 354.

[2] Ashiri R, Niroumand B, Karimzadeh F. Physical, mechanical and dry sliding wear properties of an Al – Si – Mg – Ni – Cu alloy under different processing conditions[J]. Journal of Alloys and Compounds,2014,582:213 – 222.

[3] 林玲,刘锦辉. 高硅铝合金活塞材料的研究[J]. 机械工程材料,1990(2):33 – 36.

[4] 杨通,张伟,陈保安,等. 高强韧铸造铝合金组织与性能研究[J]. 西安工业大学学报,2008,28(3):240 – 244.

[5] 林波,张卫文,程佩,等. 挤压铸造 Al – 5.0Cu – 0.6Mn – 0.5Fe 合金的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2013,23(5):1195 – 1201

[6] 罗守靖,陈炳光,齐丕骧. 液态模锻与挤压铸造技术[J]. 北京:化学工业出版社,2007.

(责任编辑：陈雯)