材料与成形性能

压力对Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V合金组织和力学性能的影响

孟凡生，张卫文，赵愈亮，张大童，杨超
（华南理工大学 机械与汽车工程学院，广州 510640）

摘要：目的 以Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V合金为研究对象，分析其在挤压压力为0，50，100 MPa时的合金组织及力学性能。**方法** 试验采用拉伸性能测试、宏观腐蚀、金相显微镜（OM）、扫描电镜（SEM）、能谱（EDS）等测试方法进行研究。**结果** 提高挤压压力能明显细化铸态合金的晶粒，提高合金的抗拉强度、屈服强度及伸长率；挤压压力为100 MPa时的合金相对于50 MPa时的合金，不论是晶粒细化程度还是力学性能提升效果均不明显；V在合金中的溶解度较低，在合金中积聚生成的微米级初生$Al_{10}V$在拉伸过程中部分发生断裂，对合金的力学性能不利。**结论** 当挤压力为50 MPa时，合金可获得较好的力学性能。

关键词： 聚醚醚酮；改性；成型加工；性能研究
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.01.009
中图分类号： TG113.25；TG113.1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2016)01-0050-04

Effect of Pressures on the Microstructures and Mechanical Properties of Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V Alloy

MENG Fan-sheng, *ZHANG Wei-wen*, *ZHAO Yu-liang*, *ZHANG Da-tong*, *YANG Chao*
(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

ABSTRACT: The microstructure and mechanical properties of Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V alloy which aimed at 0, 50, and 100 MPa were studied in this paper. Tensile test, macro corrosion, optical microscope (OM), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) were used. The results show that the increase of the squeeze pressure can obviously refine the grain size, improve the tensile strength, yield strength and elongation of the alloy, but the 100 MPa alloy is not significantly improved with the increase of the grain size and mechanical properties compared with 50 MPa alloy. The solubility of V in the alloy is low, and the formation of micron grade primary $Al_{10}V$ phase is accumulated in the alloy, which can be broken in the fracture process, which is not conducive to the improvement of the mechanical properties of the alloy. When the squeeze pressure was 50 MPa, the better mechanical properties of the alloy were obtained.

KEY WORDS: pressure; grain size; microstructure; property

铝铜合金具有强度高、耐热性能好、加工性能优良等特点，在现代工业中得到了广泛应用。挤压

收稿日期： 2015-11-15
基金项目： 国家自然科学基金(51374110)；广东省自然科学基金研究团队项目(2015A030312003)
作者简介： 孟凡生(1981—)，男，山东潍坊人，博士生，主要研究方向为铝合金铸造。
通讯作者： 张卫文(1969—)，男，长沙人，博士，教授，主要研究方向为铝铜合金近净成形工艺。

铸造制备的铝铜合金具有优良的性能[1-3],在合金中添加Zr,Sc,Ti,RE等微量元素能够显著改善合金的性能[4-6]。大量研究表明[7-8],在铝合金中添加微量的元素V,能够细化晶粒并改善合金的力学性能。李元元等人[9-10]研究表明,V在Al-5.0Cu铸造铝合金中主要存在于晶内细化晶粒,添加0.13%的V能明显降低合金的热裂倾向,使得合金的抗拉强度和伸长率明显提高;当含量增加为0.25%时,V偏聚于晶界,使得合金的热裂倾向效果减弱,合金的抗拉强度和伸长率下降。刘路等人[11]研究表明,2519铝合金中加入1%的V元素后,V,Al和Ti等元素形成难以固溶的粗大析出相,极易形成裂纹源,并且在晶粒中形成的纳米级析出相,降低了Cu在Al基体中的固溶量,减少了2519合金主要析出强化相θ'相(Al_2Cu)的析出,从而使得合金的力学性能下降。

目前对于V在挤压铸造铝合金中的研究文献相对较少,而具体针对Al-5.0Cu0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V挤压铸造铝合金的研究未曾见报道。文中通过对挤压压力对铸造Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V铸态合金的力学性能及微观组织进行研究,并对其作用机理进行解析,为开发新一代合金提供实验依据。

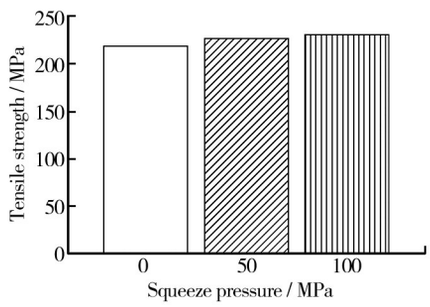
1 试验

合金熔炼在电阻炉的石墨坩埚中进行,每次熔炼10 kg。试验原材料为99.95%高纯铝,Al-50%Cu,Al-10%Mn,Al-5%V,Al-5%Ti-1%B,Al-10%RE中间合金。待纯铝熔化后依次加入Al-V,Al-Mn,Al-Cu,Al-Re,Al-Ti-B中间合金,合金熔化过程中采用钠盐覆盖,熔化完全后搅拌,并在730 ℃左右进行氮气精炼除气,合金的浇注温度约为730 ℃。在H13磨具中采用挤压铸造工艺进行浇注,模具预热温度为200 ℃,挤压力分别为0,50,100 MPa,获得的圆柱形铸件直径为80 mm,高度约为100 mm。光谱分析得到铸锭(Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V)的成分为质量分数:Cu 4.43%,Mn 0.41%,Ti 0.08%,RE 0.10%,V 0.21%,Al余量。在铸件中心约30 mm的圆周上,采用线切割截取直径约10 mm的圆棒,加工直径为5 mm,标距为25 mm的标准拉伸试样。拉伸试验在SANS CMT5105微机控制万能材料试验机上进行,拉伸速度为1 mm/min,每种拉伸试样至少测试3个样品。将铸件对开后获得宏观腐蚀样品,宏观腐蚀剂为HCl,HNO_3,HF,H_2O的混合溶液(体积分数分别为45%,15%,15%,25%)。试样抛光后采用0.5%体积分数的HF溶液作为腐蚀剂,在LEEICA/DMI 5000M电子金相显微镜上进行微观组织观察。断口组织在Quanta 2000扫描电子显微镜(SEM)上进行观察。

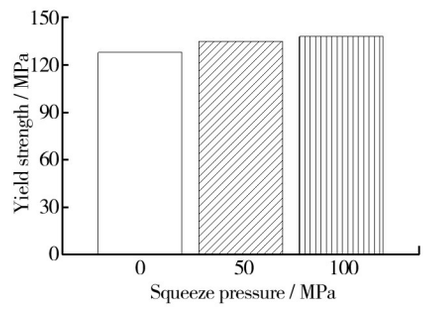
2 结果与分析

2.1 力学性能分析

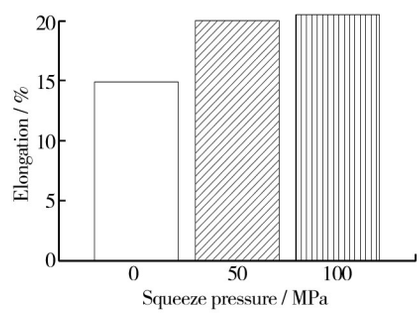
不同压力下铸态合金的力学性能如图1所示。随着压力的增加,合金的抗拉强度和屈服强度均呈现增加的趋势,尤以伸长率的增幅最为显著,但是100 MPa时的合金较50 MPa合金的增幅较小。具体为:压力由0增加到50 MPa时,合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别由219 MPa,128 MPa,14.9%增加到227 MPa,135 MPa,20%,增幅分别为3.7%,5.5%,



a 抗拉强度



b 屈服强度



c 伸长率

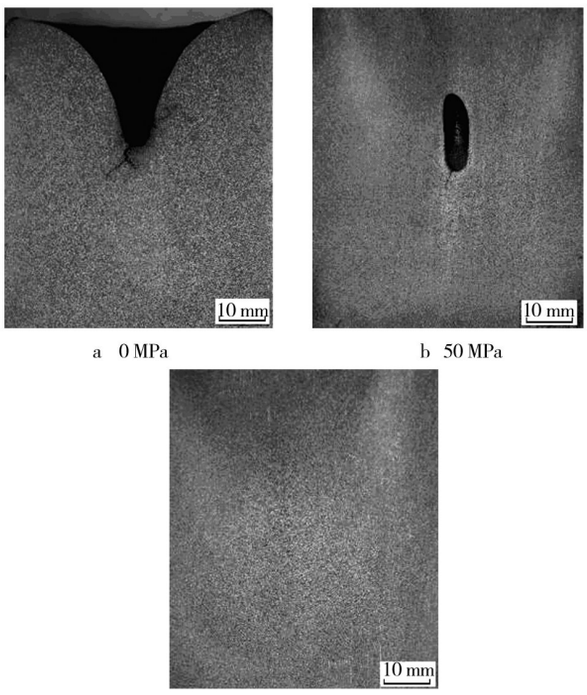
图1 不同压力下的铸态合金的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of as-cast alloys at different applied pressures

34.2%;压力由50 MPa增加到100 MPa时,合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别由227 MPa,135 MPa,20%增加到231 MPa,138 MPa,20.5%,增幅分别为1.8%,2.2%,2.5%

2.2 宏观组织分析

图2为不同压力下合金的宏观腐蚀形貌。可以看出,50 MPa,100 MPa合金的晶粒较0 MPa合金明显变得细小,100 MPa较50 MPa合金的细化效果并不明显,对距离铸锭表面10 mm的圆周处,测量不同压力下合金的平均晶粒大小,得到0,50,100 MPa压力下平均晶粒尺寸分别为108,65,55 μm。



a 0 MPa b 50 MPa

c 100 MPa

图2 合金不同压力下的宏观腐蚀形貌

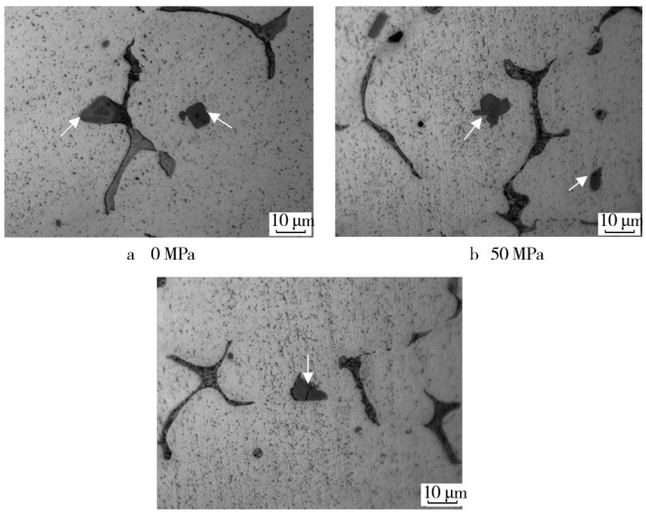
Fig.2 Macrostructures of ingots solidified at different applied pressures

2.3 微观组织分析

图3为不同压力下合金的金相组织形貌。由图3可以看出,不同压力下的合金主要是由θ(Al_2Cu)相和T($Al_{20}Cu_2Mn_3$)相组成。但是枝晶间均出现了不同程度的片状第二相,长度在8~15 μm之间,呈现锋利棱角,如图3中箭头所示。片状第二相的能谱如表1所示,结合相关文献[14]的原子比例,可以判定这种片状的结构为$Al_{10}V$相,其中溶解了部分的Ti,Cu,Ce原子。

2.4 断口分析

图4为不同压力下合金的断口横断面形貌。可以看出,基体中除出现不同程度的θ相与T相断裂外,0 MPa合金中的$Al_{10}V$相并没有出现断裂,而50和100



a 0 MPa b 50 MPa

c 100 MPa

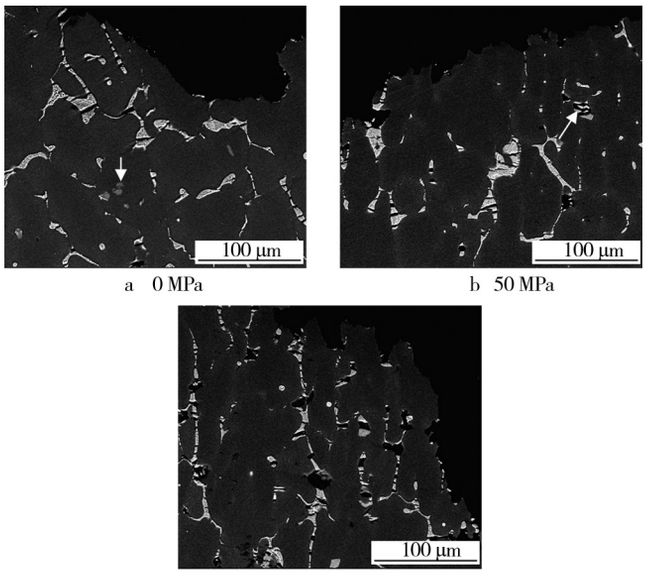
图3 为不同压力下合金的金相组织形貌

Fig.3 Microstructure morphology at different applied pressures

表1 不同压力下合金中第二相平均能谱(at,%)

Table 1 Average second phase energy spectrum analysis of alloys at different pressures (at,%)

Elements	0 MPa	50 MPa	100 MPa
Al	88.64	83.57	84.64
Ti	0.84	1.16	0.56
V	8.28	7.77	8.20
Cu	1.52	3.26	3.59
Ce	0.72	4.24	3.01



a 0 MPa b 50 MPa

c 100 MPa

图4 不同压力下合金纵向断口形貌

Fig.4 Profiles of alloys beneath the fracture surfaces at different pressures

MPa合金中的$Al_{10}V$相部分出现了断裂(箭头所示)。

2.5 讨论

在铸态Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V合金中,由于挤压铸造可使铸件在高压下凝固,消除了铸造过程中的缩孔、缩松等缺陷,获得的铸件组织致密,进而使得50,100 MPa合金的力学性能高于0 MPa合金,尤以伸长率的提升效果最为显著。100 MPa较50 Pa合金的力学性能提升不明显,原因在于50MPa合金中合金的铸造缺陷已经基本消除,继续提高压力对铸件的影响微小。50,100 MPa合金较0 MPa合金的晶粒明显细化,压力对铸态合金的晶粒细化作用能够提升合金的力学性能,可由霍尔-配奇关系式来表征屈服强度σ_s与晶粒直径d的关系[15]:

$$\sigma_s=\sigma_0+kd^{-0.5}$$

其中:σ_0为常数,反映晶内对变形的阻力;k为常数,表征晶界对强度的影响程度,与晶界结构有关。

V在合金中的溶解度较小,不同压力下的合金表面均会生成粗大的块状初生$Al_{10}V$相。原因在于试验过程中凝固的非平衡状态及V较强的偏析性能,使得少量的V即能大量偏析,在合金中以微米级的块状$Al_{10}V$相析出(如图3所示)。断裂过程中断口附近除θ相与T相断裂外,50,100 MPa合金中的大块初生$Al_{10}V$相出现了不同程度的断裂迹象,表明初生的微米级的$Al_{10}V$不利于合金力学性能的提升。

3 结论

1)铸态Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE-0.25V合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率随挤压压力的增加而升高,伸长率的提升最为明显。当0 MPa增加到50 MPa时,合金力学性能的增幅较大,但当挤压压力由50 MPa增加到100 MPa时,合金力学性能的增幅并不明显。

2)压力对铸态Al-5.0Cu-0.4Mn-0.1Ti-0.1RE合金具有明显晶粒细化效果,100 MPa较50 MPa的晶粒细化效果不明显。

3)V在合金中的溶解度较低,不同压力下均有初生的$Al_{10}V$相生成,50,100 MPa合金中$Al_{10}V$相的断裂使得合金的力学性能有所下降。

参考文献:

[1] 柏振海,赵楠,罗兵辉. 挤压铸造对Al-Cu合金性能的影响[J]. 轻合金加工技术,2002,30(5):17—18.
BAI Zhen-hai, ZHAO Nan, LUO Bing-hui. The Effects of Squeeze Casting on the Properties of Al-Cu Alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology,2002,30(5):17—18.

[2] 李彦霞,倪东惠,赵海东,等. 不同压力下挤压铸造铝铜合金的组织与性能[J]. 铸造,2005,54(8):764—766.
LI Yan-xia, NGAI Tung-wai, ZHAO Hai-dong, et al. Microstructure and Properties of Squeeze Cast Al-Cu Alloy with Different Applied Pressure[J]. Foundry, 2005, 54(8): 764—766.

[3] 张明,赵海东,张卫文,等. 间接挤压铸造Al-Cu-Mn支架的工艺及性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(3):16—21.
ZHANG Ming, ZHAO Hai-dong, ZHANG Wei-wen, et al. Processing and Properties of Al-Cu-Mn Supporting Frame by Indirect Squeeze Casting[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2007,35(3):16—21.

[4] MAHMUDI R, SEPEHRBAND P, GHASEMI H M. Improved Properties of A319 Aluminum Casting Alloy Modified with Zr [J]. Materials Letters,2006,60:2606—2610.

[5] YUAN Wu-hua, LIANG Zhen-yu. Effect of Zr Addition on Properties of Al-Mg-Si Aluminum Alloy Used for all Aluminum Alloy Conductor[J]. Materials and Design, 2011, 32:4195—4200.

[6] WANG Xu, CHEN Guo-qin, LI Bing, et al. Effects of Sc, Zr and Ti on the Microstructure and Properties of Al Alloys with High Mg Content[J]. RARE METALS, 2010,29:66—71.

[7] HAGHAYEGHI1 R, KAPRANOS P Comparison on Grain Refinement Efficiency of Peritectic and Eutectic Alloying Elements on Pure Aluminium[J]. Met Mater Int, 2014, 20(4):713—717.

[8] MENG Yi, CUI Jian-zhong, ZHAO Zhi-hao, et al. Effect of Vanadium on the Microstructures and Mechanical Properties of an Al-Mg-Si-Cu-Cr-Ti alloy of 6XXX Series[J]. Journal of Alloys and Compounds,2013,573:102—111.

[9] 李元元,郭国文,张卫文,等. 合金元素对Al-Cu合金热裂倾向的影响[J]. 中国有色金属学报,2011,11(5):791—795.
LI Yuan-yuan, GUO Guo-wen, ZHANG Wei-wen, et al. Effects of Alloying Elements on Hot Tearing Trends of Al-Cu Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2011,11(5):791—795.

[10] 李元元,郭国文,张卫文,等. Zr和V对铝铜合金力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2002(3):4—6.
LI Yuan-yuan, GUO Guo-wen, ZHANG Wei-wen, et al. Effects of Zr and V on Mechanical Properties of Al-Cu Alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys,2002(3):4—6.

[11] 刘路,陈江华,夏申琳,等. V元素对2519铝合金组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2014,5(4):78—83.

(下转第66页)

[4] DAVIS, JOSEPH R. Aluminum and Aluminum Alloys[M]. ASM International, 1993: 3—18.

[5] MA Yun-zhu, CAI Q S, LIU W S. Status of Near Net-Shape Technology of Powder Metallurgy[J]. Powder Metallurgy Industry, 2011.

[6] COMINOTTI R, GENTILI E. Near Net Shape Technology: An Innovative Opportunity for the Automotive Industry[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24(6): 722—727.

[7] 李平,陈丹囝. 铝合金车轮生产与性能[J]. 轻合金加工技术,2012,39(11):1—20.
LI Ping, CHENG Dan-jian. Production and Performance of Aluminum Alloy Wheal[J]. Light Alloy Processing Technology, 2012, 39(11): 1—20.

[8] PANDIT M. Integrated Extruder Plant Automation with Learning Control[J]. Key Engineering Materials, 2010, 424: 273—280.

[9] 白彦超,黄放. 基于DEFORM的某锻件数值模拟及毛坯优化[J]. 热加工工艺,2012,41(21):113—114.
BAI Yan-chao, HUANG Fang. Numerical Simulation and Blank Optimization of Forging Based on DEFORM[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(21): 113—114.

[10] 张博, 颜银标. 基于DEFORM-3D的铝合金支架挤压成形分析[J]. 热加工工艺, 2015,44(7):167—168.
ZHANG Bo, YAN Yin-biao. Analysis of Extrusion Forming of Aluminum Alloy Bracket Based on DEFORM-3D[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(7): 167—168.

[11] 李大乔. 7075铝合金瞄准镜座热塑性成形数值模拟及成形工艺研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.
LI Da-qiao. Numerical Simulation and The Forming Process Research for Thermoplastic Deformation of 7075 Aluminum Alloy Sight[D]. Naning: Nanjing University of Science and Technology, 2014.

[12] 胡建军. DEFORM-3D塑性成形CAE应用教程[M]. 北京:北京大学出版社,2011.
HU Jian-jun. Numerical Simulation and the Plastic Forming Application Tutorial by DEFORM-3D[M]. Beijing: Peking University Press, 2011.

[13] SATISHA G D, SINGHB N K, OHDARB R K. Pre-form Optimization of Pad Section of Front Axle Beam Using DEFORM [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 20(3): 102—106.

[14] 蒋晓英,马力,陈刚. 轴盖温挤压成形工艺及坯料结构优化数值模拟研究[J]. 热加工工艺,2012,41(5):87—88.
JIANG Xiao-ying, MA Li, CHEN Gang. Numerical Simulation on Optimized Warm Extrusion Process of Shaft Cover and Billet Structure[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(5): 87—88.

[15] OKAHARA H, OHARA M, TAKIGAWA Y, et al. Optimization of Die Material and Its Surface Coating for Press Forming Magnesium Alloy[J]. Materials Transactions, 2006, 47(4): 954.

(上接第53页)

LIU Lu, CHEN Jiang-hua, XIA Shen-lin, et al. Effect of Element V on Microstructure and Mechanical Properties of 2519 Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 5(4): 78—83.

[12] 刘友良. V含量对高铜Al-Cu合金组织和性能的影响[D]. 长沙:中南大学,2006.
LIU You-liang. Effect of V Content on the Microstructure and Properties of High Cu Al-Cu Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2006.

[13] DANIELE C, THOMAS H, MATTIA Me, et al. The Effect of Ni and V Trace Elements on the Mechanical Properties of A356 Aluminium Foundry Alloy in As-cast and T6 Heat Treated Conditions[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 610: 414—426.

[14] WANG Feng, LIU Zhi-lin, QIU Dong, et al. Revisiting the Role of Peritectics in Grain Refinement of Al Alloys[J]. Acta Materialia, 2013, 61: 360—370.

[15] 崔忠圻,谭耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
CUI Zhong-qi, TAN Yao-chun. Metal Science and Heat Treatment[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.