

热处理对挤压铸造 AlCu5Mn1Mg 铝合金飞轮壳 微观组织和力学性能的影响

孔令波¹, 姜巨福¹, 王 迎², 董 健¹, 张晓东¹, 崔竞波¹, 张金泽¹, 陈 岩¹

(1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150000;

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150000)

摘要: 作为汽车关键承载部件, 铝合金飞轮壳经热处理后, 其力学性能可得到有效提升。采用X射线荧光光谱仪(XRF)、金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、20 kN万能拉伸试验机、硬度计等对热处理前后的AlCu5Mn1Mg铝合金飞轮壳试验件的微观组织和力学性能变化规律进行了研究。结果表明, 原始铸件的晶粒细小, 组织致密, 主要由大量形貌为蔷薇状和等轴状的 α -Al晶粒和非平衡共晶相组成。当提高固溶温度后, 晶界处的第二相粒子逐步溶解到铝基体中, 但是过高的固溶温度导致晶粒发生粗化, 有晶粒合并的现象发生, 降低了材料的力学性能。随着固溶时间的延长, 晶界处的合金元素向晶粒内部扩散, 同时晶粒尺寸增大。在180 °C时效5 h后, 拉伸曲线存在Portevin-Le Chatelier (PLC) 效应。挤压铸造AlCu5Mn1Mg铝合金飞轮壳构件的最佳热处理工艺为: 固溶495 °C × 10 h, 时效140 °C × 5 h。

关键词: 挤压铸造; AlCu5Mn1Mg铝合金; 飞轮壳; 热处理; 微观结构; 力学性能; 固溶-时效处理

中图分类号: TG249.2; TG166.3; U463.334.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0497-09

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0067

The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of AlCu5Mn1Mg Aluminum Alloy Flywheel Housings Produced by Squeeze Casting

KONG Ling-bo¹, JIANG Ju-fu¹, WANG Ying², DONG Jian¹, ZHANG Xiao-dong¹,
CUI Jing-bo¹, ZHANG Jin-ze¹, CHEN Yan¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, Heilongjiang, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract: As a key load-bearing component of automobiles, the mechanical properties of the aluminum alloy flywheel housing can be effectively improved by heat treatment. An X-ray fluorescence spectrometer (XRF), an optical microscope (OM), a scanning electron microscope (SEM), a 20 kN universal tensile testing machine, and a hardness tester were used to investigate the changes of microstructure and mechanical properties of AlCu5Mn1Mg aluminum alloy flywheel housing before and after heat treatment. The results show that the as-cast sample has fine, dense grains, and is mainly composed of a large number of α -Al with rosette and equiaxed morphologies and non-equilibrium eutectic phases. With the increase of solution temperature, the second-phase particles at the grain boundaries are gradually dissolved into the aluminum matrix. However, an excessively high solution temperature leads to grain coarsening and grain coalescence, which reduces the mechanical properties of the material. With the extension of solution time, the alloying elements at the grain boundaries diffuse into the interior of grains and distribute uniformly, and the grain size increases simultaneously. The Portevin-Le Chatelier (PLC) effect is observed in the tensile curve after aging at 180 °C for 5 h. The optimal heat treatment process for the squeeze-cast AlCu5Mn1Mg aluminum alloy flywheel housing component is determined as follows: solution treatment at 495 °C for 10 h followed by aging treatment at 140 °C for 5 h.

Key words: squeeze casting; AlCu5Mn1Mg aluminum alloy; flywheel housing; heat treatment; microstructure; mechanical properties; solution-aging treatment

基金项目: 重点新材料研发及应用国家科技重大专项(2025ZD0619001); 国家自然科学基金项目(52375317、U2241232、U2341253)。

收稿日期: 2026-01-17 收到初稿, 2026-02-10 收到修订稿。

作者简介: 孔令波(1998-), 男, 博士生, 主要从事铝合金挤压铸造、半固态加工及新能源汽车一体化压铸技术等研究工作。E-mail: lingbokong@foxmail.com

通信作者: 姜巨福, 男, 二级教授, 博士生导师。E-mail: jiangjufu@hit.edu.cn

引用格式: 孔令波, 姜巨福, 王迎, 等. 热处理对挤压铸造 AlCu5Mn1Mg 铝合金飞轮壳微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (5): 497-505.

KONG Lingbo, JIANG Jufu, WANG Ying, et al. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of AlCu5Mn1Mg aluminum alloy flywheel housings produced by squeeze casting [J]. Foundry, 2026, 75 (5): 497-505.

随着环境污染和能源短缺问题的加剧,绿色、高效的生产模式正在成为工业发展的新趋势。在汽车制造领域,轻量化生产备受青睐。有研究表明,车身每减重10%,将会使得油耗下降8%,排放量减少4%^[1]。铝合金作为一种密度低、比强度高的轻质金属,同时兼备耐腐蚀性强、易于加工和回收等优点,在汽车行业,已逐步替代了传统的钢铁材料,成为轻量化设计的关键结构和功能选材。汽车电池托盘^[2]、汽车轮毂^[3]、汽车底盘副车架^[4]、一体化压铸后地板^[5]等汽车关键零部件已经采用铝合金进行制造。

挤压铸造也称液态模锻,是一种金属液在高机械压力作用下定向凝固的近净成形先进技术^[6],在20世纪60年代中期被苏联人首先运用于工业生产^[7]。挤压铸造结合了铸造和锻造的特点,具有减少缩孔、减轻偏析、细化晶粒、改善组织、提升成形件表面质量等优点,被广泛用于铝合金结构件生产^[8-9]。钟皓南等人在利用ProCAST软件模拟挤压铸造A356合金右悬置托臂温度场的过程中,辅助以机器学习的手段,并通过反向传播神经网络实现了A356合金挤压铸件的全域力学性能预测^[10]。刘桂超等人研究挤压压力对ZL109铝合金的微观组织和力学性能影响时发现,增加挤压压力使得初生Si颗粒、共晶硅颗粒和 α -Al晶粒的尺寸降低,但是过高的压力使得抗拉强度和伸长率有所下降^[11]。

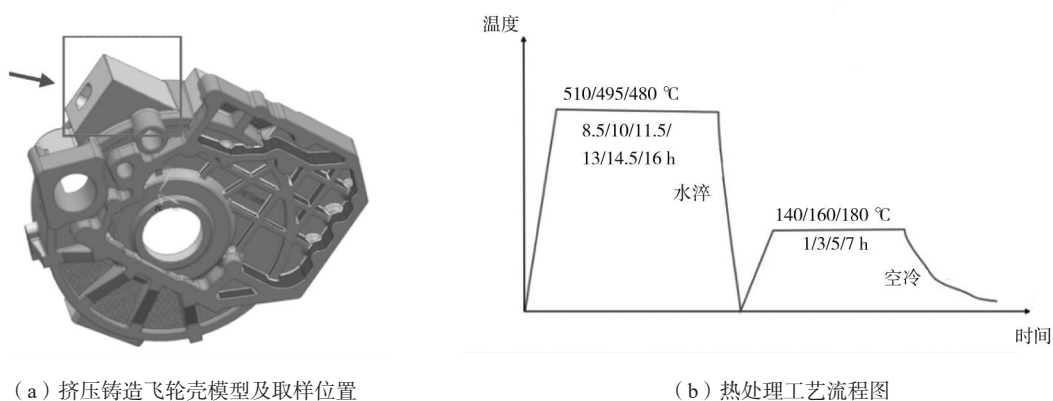
对于可热处理强化的铝合金而言,热处理通常能再次调控材料的微观组织结构,提升材料的力学性能。郑元凯在研究挤压铸造Al-Cu合金的热处理工

艺时发现,固溶处理后,共晶相 Al_2Cu 发生熔断,同时,挤压铸造Al-Cu合金经过热处理后溶质分布发生分层现象^[12]。Zhang等人发现Al-Cu合金经过T6热处理,铸件中析出大量的 θ' 纳米析出相,增加了合金的强度^[13]。

基于上述研究背景,本课题以挤压铸造AlCu5Mn1Mg铝合金飞轮壳为对象,开展热处理工艺研究。系统探究固溶温度、固溶时间、时效温度及时效时间对铸件微观组织与力学性能的影响规律,从而确定该铝合金飞轮壳的最优热处理工艺参数,为其工程化应用提供工艺参考。

1 试样制备与方法

试验使用的飞轮壳铸件通过挤压铸造的方式获得。在铝合金熔炼环节,熔炼温度设置为750℃,当温度到达720℃时,通入高纯氮气,持续20 min,以除去氢气和氧化物夹杂,提高产品质量。飞轮壳采用间接挤压铸造的方式获得。在成形过程中,上下模温度控制在200~220℃,充型速度设置为0.06 m/s,比压设置为16 MPa,保压时间设置为25 s。挤压铸造过程中,铝液通过气动装置顺着流道被压入12 500 kN挤压铸造机,合模挤压即完成制造。研究试样取自飞轮壳的悬置口,位置如图1(a)所示。通过XRF测定该试验件的化学成分如表1所示。其中,Cu元素是主要的强化元素,Mn元素的加入可以达到细化晶粒的作用,同时能阻止铝合金发生再结晶,提高再结晶温度,减小热裂倾向,Mg则可以显著提高材料的强度。



(a) 挤压铸造飞轮壳模型及取样位置

(b) 热处理工艺流程图

图1 取样位置及热处理工艺方案

Fig. 1 Sampling location and heat treatment process scheme

表1 AlCu5Mn1Mg铝合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of AlCu5Mn1Mg aluminum alloys
 $w_B/\%$

Cu	Mn	Mg	Ti	V	Zn	Al	Fe	Si
5.75	1.16	0.377	0.256	0.016	0.004	余量	0.188	0.151

采用差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry)测试材料的结晶温度区间和相变温度,试验的初始温度为30℃,升温速率10 K/min,通氩气保护,气体流量为50 mL/min,温度升至800℃停止。DSC曲线如图2所示,曲线存在两个吸热峰,前一个

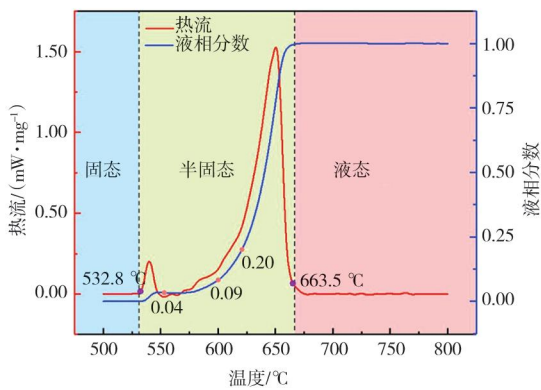


图2 AlCu5Mn1Mg铝合金DSC曲线
Fig. 2 DSC curves of AlCu5Mn1Mg aluminum alloy

峰是低熔点共晶体熔化吸热，而后一个峰是 α (Al)相熔化吸热，AlCu5Mn1Mg铝合金的固相线温度为532.8 $^{\circ}$ C，液相线温度为663.5 $^{\circ}$ C。

挤压铸造AlCu5Mn1Mg铝合金的固相线温度为532.8 $^{\circ}$ C，由于存在低熔点共晶相以及铸造过程中成分偏析，固溶温度应低于532.8 $^{\circ}$ C，以防铸件发生熔化，温度设置为510 $^{\circ}$ C、495 $^{\circ}$ C、480 $^{\circ}$ C。保温时间不宜过短，否则影响固溶效果，固溶时间依次确定为8.5 h、10 h、11.5 h、13 h、14.5 h、16 h。时效温度确定为140 $^{\circ}$ C、160 $^{\circ}$ C、180 $^{\circ}$ C，时效时间依次确定为1 h、3 h、5 h、7 h。试验方案如图1 (b)和表2所示。

表2 热处理工艺方案
Tab. 2 Heat treatment process plan

试样序号	固溶温度/ $^{\circ}$ C	固溶时间/h	冷却方式	时效温度/ $^{\circ}$ C	时效时间/h	冷却方式
1	510	10	室温水冷	160	5	室温空冷
2	495	10	室温水冷	160	5	室温空冷
3	480	10	室温水冷	160	5	室温空冷
4	495	8.5	室温水冷	160	5	室温空冷
5	495	11.5	室温水冷	160	5	室温空冷
6	495	13	室温水冷	160	5	室温空冷
7	495	14.5	室温水冷	160	5	室温空冷
8	495	16	室温水冷	160	5	室温空冷
9	495	10	室温水冷	140	5	室温空冷
10	495	10	室温水冷	180	5	室温空冷
11	495	10	室温水冷	160	1	室温空冷
12	495	10	室温水冷	160	3	室温空冷
13	495	10	室温水冷	160	7	室温空冷

用于金相显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 观察的试样，依次选用400 $^{\#}$ 、800 $^{\#}$ 、1 000 $^{\#}$ 、1 200 $^{\#}$ 、1 500 $^{\#}$ 、2 000 $^{\#}$ 的砂纸进行打磨，用金刚石作为研磨介质将打磨后的试样在抛光机上进行机械抛光。利用Keller试剂腐蚀抛光表面，腐蚀液成分为95 mL H₂O+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+1 mL HF，腐蚀后用流水冲洗残余腐蚀液，再用酒精擦拭，吹风机风干，腐蚀时间因不同热处理参数而不同，在腐蚀时，可以重复以上过程，进行短时多次腐蚀，直至晶粒分明、晶界清晰。

采用20 kN万能试验机进行拉伸力学性能测试。拉伸前，对试样表面进行打磨，去除氧化皮。用游标卡尺测量拉伸段中部的厚度与宽度并记录。硬度采用维氏硬度计测定，测试前，将试样用砂纸打磨，并进行机械抛光。硬度计的载荷设置为9.087 N，保压15 s，分别在硬度试样上取五个点测试，结果取平均值。

2 试验结果及分析

2.1 固溶处理对挤压铸造 AlCu5Mn1Mg 铝合金飞轮壳微观组织的影响

图3为挤压铸造AlCu5Mn1Mg铝合金的原始铸态组织。从图中可以看出晶粒为蔷薇晶和等轴晶混合分布，晶界较为明显，呈网状分布，晶粒大小不一。组织主要由大量 α -Al基体和非平衡共晶相组成。Al元素主要分布在晶粒内部，而靠近晶界的位置则有其他合金元素 (主要是Cu元素) 富集，同时晶粒内也存在一些呈点状分布的第二相。

固溶处理是将双相或多相组织加热到固溶度线上某一温度，保温足够长的时间，取出后淬火处理，获得均匀的饱和固溶体的过程，Cu原子的固溶度、在母相中的分布等因素都会改变热处理后铸件的组织 and 性能^[14]。固溶处理是一种扩散型相变，Cu原子在扩散

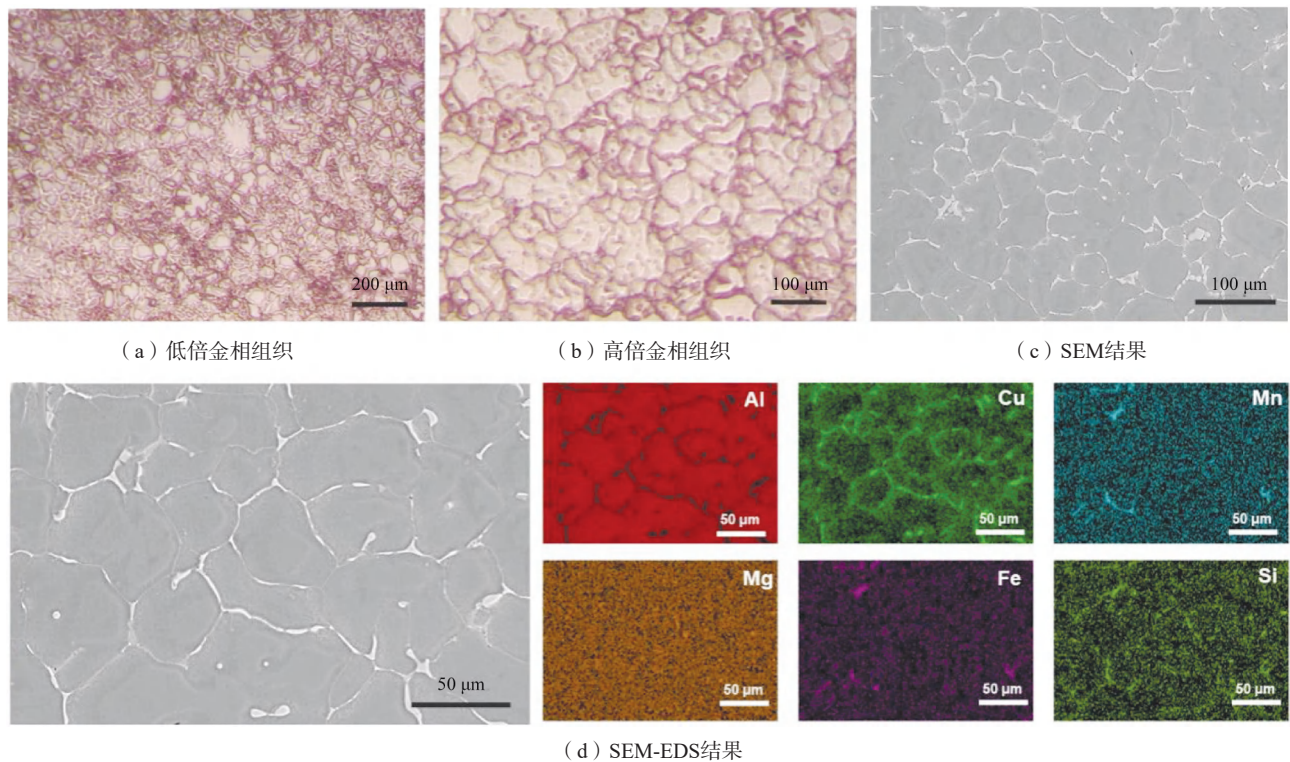


图3 挤压铸造AlCu5Mn1Mg铝合金的原始铸态组织

Fig. 3 Original as-cast microstructures of squeeze-cast AlCu5Mn1Mg aluminum alloy

过程中, 需要获得足够的扩散驱动力, 温度和浓度梯度是影响扩散驱动力的主要因素^[15]。固体的扩散是个缓慢的过程, 因此对固溶温度和固溶时间的要求非常严格。温度过高, 低熔点共晶相熔化, 影响热处理效果, 温度过低, 则扩散缓慢, 固溶程度不佳。对于固溶时间的把控也非常关键, 时间长固溶效果好, 但是晶粒发生粗化, 又会降低材料的综合性能^[16]。

图4为通过不同固溶温度处理后, 统一进行160 °C时效5 h的合金微观组织形貌。热处理过程中组织变化有以下三个过程: 枝晶消除和第二相溶解, 过饱和固溶体脱溶, 晶粒长大。经过480 °C固溶后的合金组织细小, 晶粒大小没发生太大改变, 同时第二相未得到有效溶解, 仍然分布在晶界处, 495 °C和510 °C晶界处的第二相明显减少, 这是由于温度升高, 溶质原子扩散

能力增强。随着温度的升高, 晶粒尺寸提高, 510 °C时有晶粒合并长大的现象。在固溶过程中, Cu原子不断溶于 α 固溶体中, 一般地, 固溶温度越高, Cu原子扩散能力越强, 时效后第二相数量越多。从金相上也能看出这一趋势。然而, 如果固溶温度设置过高, 晶粒发生长大, 粗大的晶粒又会使材料性能下降。

图5为通过不同固溶时间处理后, 统一进行160 °C时效5 h的合金微观组织形貌。随着固溶时间的延长, 晶界处的合金元素向晶粒中心(α -Al基体)逐步扩散, 同时晶粒尺寸变大, 晶界逐步消融, 在固溶14.5 h和16 h时, 部分晶界已经不明显, 甚至一些晶粒合并成一个晶粒。其实质是在充分固溶后, 经过急冷, 抑制了第二相的分解, 在室温下获得了亚稳定的 α -Al固溶体, 在进行人工时效时, 新相与母相存在化学自由能

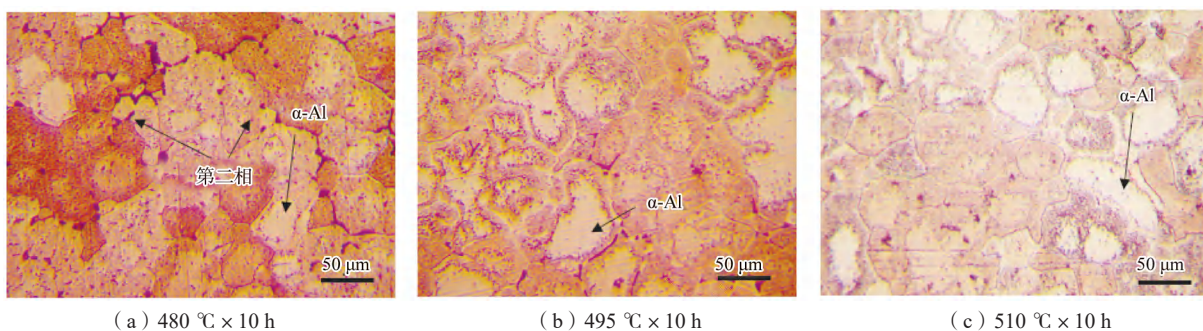


图4 不同固溶温度下进行160 °C时效5 h后的金相组织

Fig. 4 Metallographic structures after aging at 160 °C for 5 h under different solution temperatures

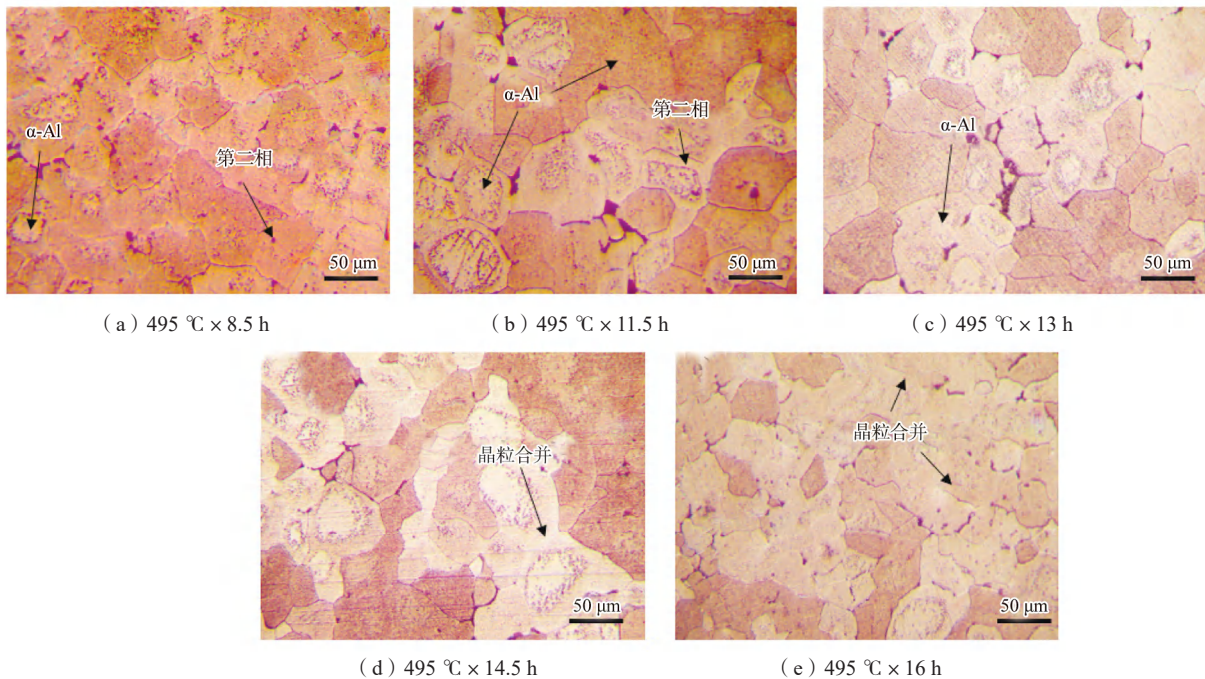


图5 不同固溶时间下进行160 °C时效5 h后的金相组织

Fig. 5 Metallographic structures after aging at 160 °C for 5 h under different solution times

差,在该扩散驱动力的作用下,Cu原子等合金元素向铝基体扩散,形成Cu原子聚集区并弥散分布。由于该铸件的合金元素主要分布在晶界处,所以固溶时间越长,扩散效果越好。

2.2 固溶处理对挤压铸造 AlCu5Mn1Mg 铝合金飞轮壳力学性能的影响

图6显示了挤压铸造AlCu5Mn1Mg铝合金飞轮壳力学性能随固溶温度的变化规律。与原始铸件相比,热处理显著提升了飞轮壳的力学性能,495 °C下,提升最大,伸长率提高了70.8%,抗拉强度提高了39.0%,综合性能最优,所以确定495 °C为最佳固溶温度。强度和

硬度呈现出随固溶温度增加先升高后降低的趋势,这是由于,低于最佳温度时,基体中没能溶解足够多的合金元素,时效后第二相析出不明显,存在较多的过剩相,强化效果不明显,当固溶温度高于最佳值时,固溶度提升已经有限,同时晶粒发生长大,所以510 °C时综合性能不佳。

从图7可以看出,随着固溶时间的延长,抗拉强度呈现出先减小后增加的趋势,这主要是第二相沉淀强化和晶粒长大二者共同作用的结果。伸长率和硬度变化没有明显规律,主要是受到材料内部缺陷和组织形貌的影响,即使同一个部位,也存在不同热处理取样位置的差别,故伸长率和硬度变化无规律。综合性能

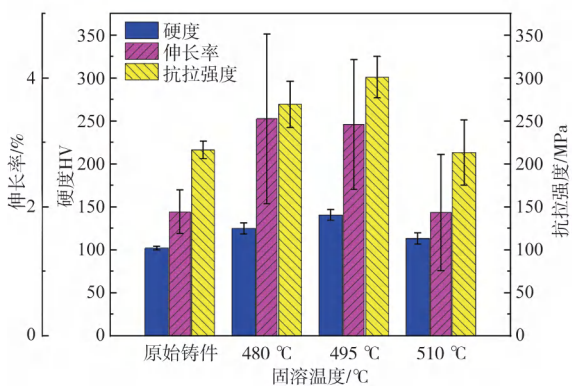


图6 不同固溶温度下进行160 °C时效5 h后的力学性能变化规律
Fig. 6 Evolution laws of mechanical properties after aging at 160 °C for 5 h under different solution temperatures

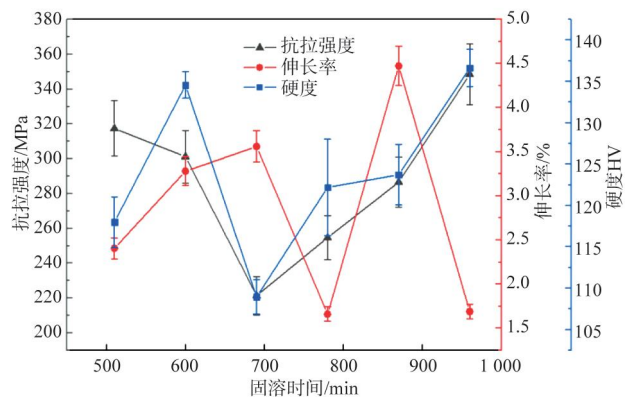


图7 不同固溶时间下进行160 °C时效5 h后的力学性能变化规律
Fig. 7 Evolution laws of mechanical properties after aging at 160 °C for 5 h under different solution times

最好的参数为固溶10 h, 抗拉强度为301.23 MPa, 伸长率为3.28%。故确定最佳固溶时间为10 h。

2.3 时效处理对挤压铸造 AlCu5Mn1Mg 铝合金飞轮壳微观组织的影响

铝铜合金是典型的热处理强化合金, 时效析出是强化机制的关键, 铝合金第二相的析出数量、大小、形貌直接决定了强化效果^[17]。而第二相的析出受时效参数的影响, 通过调控时效参数, 可以达到提高合金强度的目的。合金在固溶处理后, 是一种不稳定的饱和固溶体, 有自发脱溶的趋势, 微观上, 脱溶过程中

先后形成G.P.区、 θ'' 相、 θ' 相, 最终形成平衡相。脱溶时能量符合一般的固态相变规律, 脱溶驱动力是新相与母相的化学自由能差, 阻力则是形成脱溶相的界面能和应变能, 晶体缺陷、合金成分、时效温度等是影响脱溶动力学的因素。

图8和图9分别为不同时效温度和时效时间下的金相组织形貌, 与原始组织相比, 合金经过140 °C时效5 h后, 晶粒形貌发生了很大的变化, 组织主要由等轴晶组成。在180 °C时效5 h下, 有大量的溶质原子聚集, 呈细小的点状分布在晶界和晶粒内部。在160 °C保温7 h时, 晶界变得模糊, 晶粒发生合并长大。

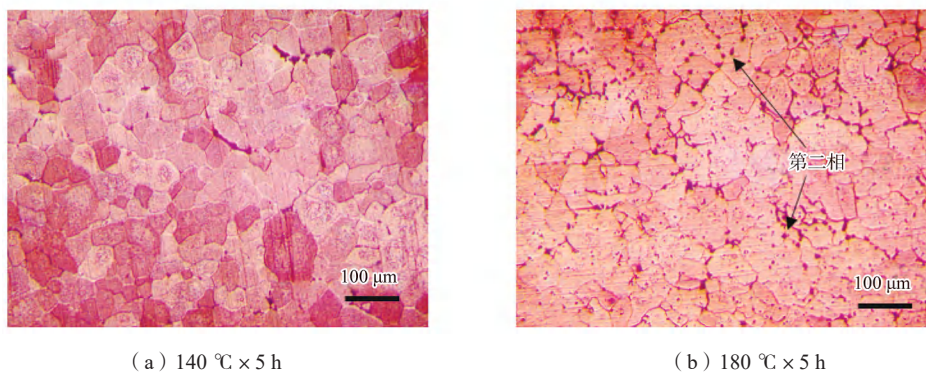


图8 经过495 °C固溶10 h后不同时效温度下的金相组织

Fig. 8 Metallographic structures under different aging temperatures after solution treatment at 495 °C for 10 h

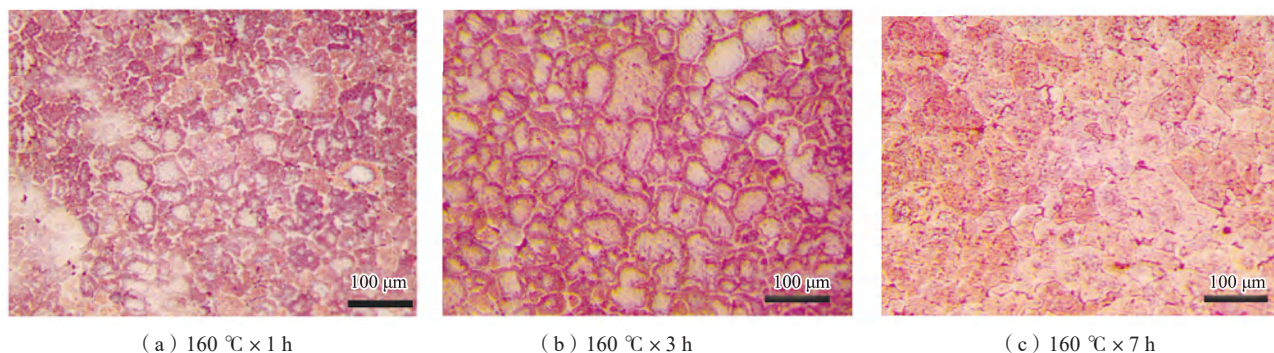


图9 经过495 °C固溶10 h后不同时效时间下的金相组织

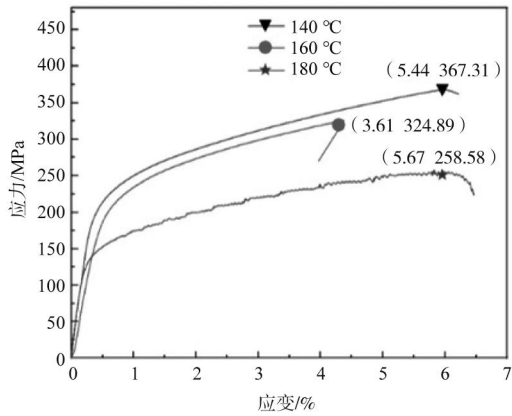
Fig. 9 Metallographic structures under different aging times after solution treatment at 495 °C for 10 h

2.4 时效处理对挤压铸造 AlCu5Mn1Mg 铝合金飞轮壳力学性能的影响

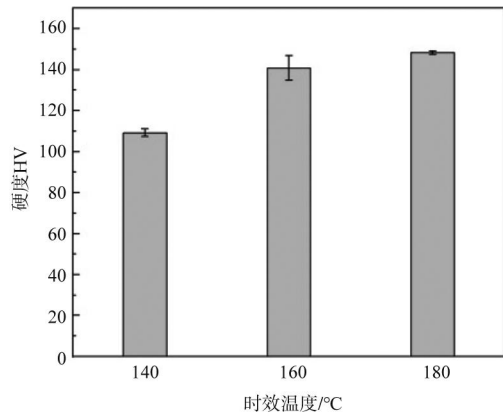
由图10 (a) 可以看出, 通过时效处理显著提升了材料的抗拉强度和伸长率, 140 °C时性能提升最明显。在180 °C下, 拉伸曲线存在PLC效应^[18-19]。通过对比金相组织, 由于溶质原子偏聚, 呈点状分布, 在塑性变形过程中, 位错经过溶质原子团时, 被第二相粒子钉扎, 位错运动受阻碍, 故强度上升, 当变形力增加, 粒子脱钉, 位错继续向前运动, 强度下降, 位错在运动过程中反复钉扎和脱钉, 最终形成锯齿状的拉伸曲

线。PLC效应是塑性变形的失稳形式之一, 在生产中应当避免, 所以时效温度不能达到180 °C。

图10 (b) 为硬度随时效温度变化的柱状图, 硬度呈现出随温度升高而增加的趋势。一般而言, 强度和硬度没有必然联系, 但强度高的材料硬度往往也高, 本研究在关于时效温度的热处理试验中却出现了随着时效温度的增加, 强度降低、硬度增加的情况。这是由于当时效温度提高时, 第二相粒子析出进程加快, 故180 °C时效硬化最为明显, 硬度达到最大值, 而由于存在PLC效应, 所以强度降低。此外, 本研究中, 维



(a) 保温5 h后的拉伸力学性能



(b) 保温5 h后的硬度变化

图10 经过495 °C固溶10 h后不同时效温度下的力学性能变化规律

Fig. 10 Evolution laws of mechanical properties under different aging temperatures after solution treatment at 495 °C for 10 h

氏硬度是一种显微硬度、受晶粒尺寸，晶粒形态等影响较小^[20-21]，而强度则不仅仅受到第二相粒子的影响。140 °C时效时，晶粒细小，晶界强化使得强度提升。

图11是以时效时间为变量的抗拉强度、伸长率以及硬度的变化规律曲线，随着时效时间的延长，伸长率减小，抗拉强度和硬度总体呈现增加的趋势，3 h强度低主要还是受到内部缺陷的影响。抗拉强度和硬度受第二相数量的控制，时效时间延长，第二相析出数量增加，时效沉淀强化效果明显，使得抗拉强度和硬度呈现出增加的趋势。

2.5 断口形貌

图12和图13为固溶14.5 h和固溶16 h后的拉伸试样断口形貌。经过14.5 h固溶后，断口形貌存在韧窝，表明该参数下，塑性较好。而固溶16 h，断口形貌显示，拉伸试样内部存在微观缩孔。挤压铸造工艺通常能通过压力作用而减少缩孔缩松缺陷，然而本研究的飞轮壳形状结构复杂，尺寸大，壁厚差高达10 : 1，因此在

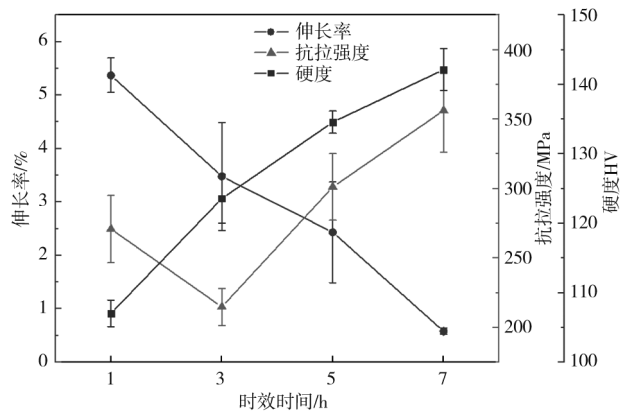
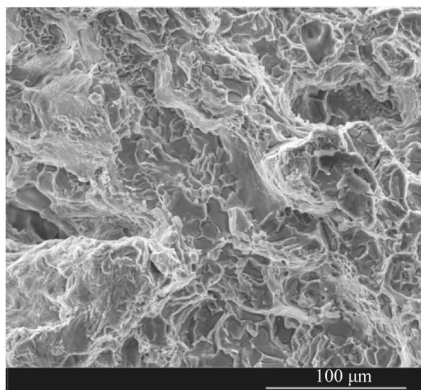


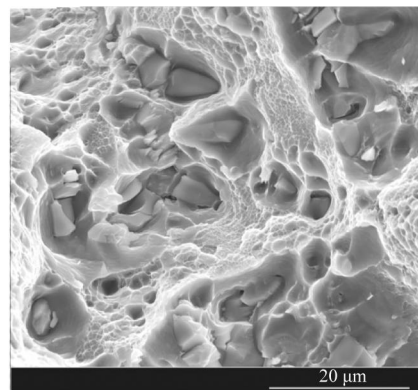
图11 495 °C固溶10 h后在160 °C时效温度下保温不同时间的力学性能变化规律

Fig. 11 Evolution laws of mechanical properties with different holding times at 160 °C aging temperature after solution treatment at 495 °C for 10 h

厚壁位置仍然存在一些缩孔缺陷。微观缩孔往往是裂纹源萌生的地方，所以导致塑性降低。



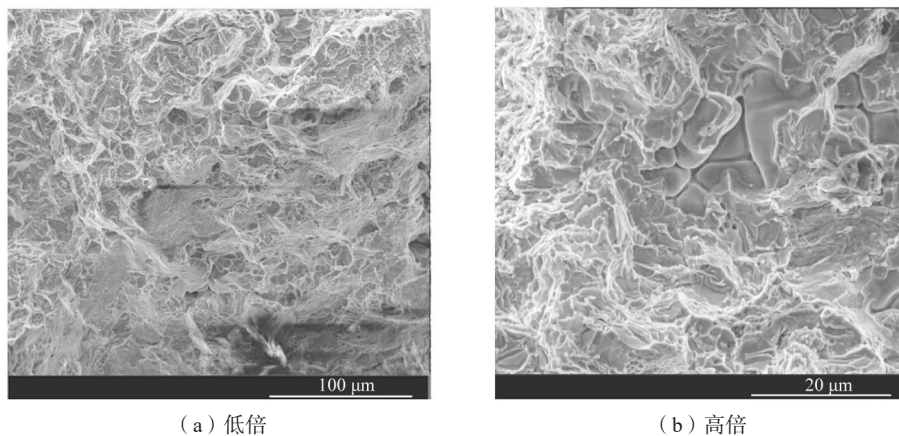
(a) 低倍



(b) 高倍

图12 固溶14.5 h后的拉伸断口形貌

Fig. 12 Tensile fracture morphologies after solution treatment for 14.5 h



(a) 低倍

(b) 高倍

图13 固溶16 h后的拉伸断口形貌

Fig. 13 Tensile fracture morphologies after solution treatment for 16 h

3 结论

铝铜合金是可热处理强化的合金，合理的热处理工艺可以显著提升其力学性能。通过微观组织观察和力学性能测试等手段，对挤压铸造AlCu5Mn1Mg铝合金飞轮壳的热处理工艺进行了系统的研究，揭示了固溶温度、固溶时间、时效温度、时效时间四个参数对合金微观组织和力学性能的影响规律，得出以下结论：

(1) 原始铸件组织为蔷薇晶和等轴晶混合分布，晶粒度差异较大。随着固溶温度的升高，时效后，第二相数量增多，但是过高的固溶温度使得晶界消融，部分晶粒发生合并长大。随着固溶时间的延长，晶界处的合金元素向晶粒中心（Al基体）逐步扩散，并分布均匀，同时晶粒尺寸变大，晶界逐步消融。时效时间对组织调控较为明显，随着时效时间的延长，枝晶

数量减少，等轴晶数量增加，晶粒尺寸变得均匀，同时第二相数量增加，在时效7 h时，晶界变得模糊，晶粒发生合并长大。

(2) 原始铸件的抗拉强度为216.65 MPa，伸长率为1.92%，通过热处理显著提升了材料的性能。固溶温度为495 ℃时，性能提升最大，伸长率提高了70.8%，抗拉强度提高了39.0%。抗拉强度呈现出随固溶时间先减小后增加的趋势，这是第二相沉淀强化和晶粒长大二者共同作用的结果。由于内部缺陷的影响，不同固溶时间下，伸长率和硬度变化没有明显规律。综合性能最好的参数为固溶10 h，抗拉强度为301.23 MPa，伸长率为3.28%。在180 ℃时效下，拉伸曲线存在PLC效应。

(3) 挤压铸造AlCu5Mn1Mg铝合金飞轮壳构件的最佳热处理工艺为495 ℃固溶10 h，取出淬火处理；140 ℃时效5 h，取出空冷处理。

参考文献：

- [1] 马鸣图, 李志刚, 易红亮, 等. 汽车轻量化及铝合金的应用[J]. 世界有色金属, 2006(10): 10-14.
- [2] 沈冰. 铝合金在新能源汽车电池托盘轻量化中的应用与性能评估[J]. 专用汽车, 2025(9): 42-44.
- [3] 章科举, 金康, 张波, 等. 6082铝合金汽车空气悬挂减震器支撑臂锻造工艺研究及数值仿真[J]. 锻压技术, 2025, 50(8): 55-63.
- [4] 李连驰, 马小军, 刘海滨, 等. Mg含量对汽车底盘副车架用AlSi₇Mg₂铸造铝合金组织及性能的影响[J]. 铸造, 2025, 74(4): 494-499.
- [5] 查敏, 顾焘, 马品奎, 等. 轻合金大型一体化结构部件压铸成形技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(8): 1009-1022.
- [6] 周照耀, 曹小兵, 秦杰, 等. 机械振动对挤压铸造A356铝合金组织与性能的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 46-51.
- [7] 齐丕骧. 面向21世纪的挤压铸造技术[J]. 特种铸造及有色合金, 2002(增刊1): 209-213.
- [8] 白彦华, 石瑛楠, 李荣德. 挤压铸造ZA27合金的力学性能及摩擦磨损性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2008(1): 73-76.
- [9] 万里, 罗吉荣, 兰国栋, 等. 挤压铸造过共晶A390合金的组织与力学性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008(8): 92-95.
- [10] 钟皓南, 马万里, 白文辉, 等. 基于机器学习的挤压铸造A356合金右悬置托臂全域力学性能预测[J]. 铸造, 2025, 74(10): 1336-1343.
- [11] 刘桂超, 王月雷, 李玉满, 等. 挤压压力对挤压铸造ZL109铝合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2023, 72(9): 1158-1162.
- [12] 郑元凯. 挤压铸造Al-Cu合金显微组织和力学性能研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2022.
- [13] ZHANG Z W, GAO M Q, NING Y H, et al. Improving the

- defects and mechanical properties via secondary loading in a squeeze casting heat-treated Al-Cu alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 36 (33) : 2971–2976.
- [14] ZHANG S H, ZHANG S M, LI F D, et al. Effect of heat treatment on the microstructural evolution and high-temperature mechanical properties of Al-Cu-Mn-Mg-Zr alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1039: 183231.
- [15] AKOPYAN T K, MILOVICH F O, LUKYANCHUK A A, et al. New mechanisms and approaches in design and heat treatment of Al-Cu-Mn-Zr (-Sn, Si) based casting alloys aiming to increase heat resistance via formation of α (AlMnSi) phase dispersoids assisted by θ' precipitates [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2025, 947: 149217.
- [16] LONG S, JIANG Y P, XIA R Z, et al. Recrystallization behavior and kinetic analysis of an Al-Cu-Li alloy during hot deformation and subsequent heat treatment [J]. *Materials Characterization*, 2024, 208: 113640.
- [17] ZOU G T, ZHANG R Q, JIANG G Z, et al. Synergistic effects of superplastic forming and post heat treatment on microstructure and mechanical properties of heat-treatable aluminium alloy: a case study on 2A97 Al-Cu-Li alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2025, 946: 149070.
- [18] 刘子轩, 张鹏, 刘刚, 等. 铝合金中Portevin-Le Chatelier效应的研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2023, 42 (10) : 787–795.
- [19] XU J B, HOLMEDAL B R, HOPPERSTAD O S, et al. Constitutive models for the PLC effect in AA5182 aluminium alloy [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2026, 310: 111123.
- [20] 李长富, 杜炳鑫, 李晓丹, 等. 激光定向能量沉积Cu/Al复合材料的显微组织和维氏硬度 [J]. *材料工程*, 2025, 53 (10) : 132–141.
- [21] 翟莲娜, 王滨. 最新国内外常用维氏硬度试验标准的差异 [J]. *理化检验 (物理分册)*, 2025, 61 (6) : 31–35.