

Mg 含量对汽车底盘副车架用 AlSi_7Mg_x 铸造铝合金组织及性能的影响

李连驰, 马小军, 刘海滨, 苏为强

(湖北航特装备制造股份有限公司, 湖北荆门 448000)

摘要: 基于汽车底盘副车架安全性能的考虑, 采用金属型铸造工艺及 AlSi_7Mg_x 铝合金制备了汽车底盘副车架, 并从其本体上进行试棒取样, 研究了 Mg 含量对其组织和性能的影响; 选用合适成分的材料生产, 避免性能不足或成本增加。研究表明, 随着 Mg 含量 (0.28%~0.33%, 质量分数, 下同) 的增加, 试棒微观组织共晶硅细化且析出比增大, 同时 Mg_2Si 相随之增多, 抗拉强度由 282.95 MPa 增加至 309.88 MPa, 伸长率由 7.79% 增加至 10.72%, 布氏硬度由 HBW77 增加至 HBW88.4, 屈服强度从 246.73 MPa 减小至 228.40 MPa。其中 Mg 含量为 0.3% 时, 材料的综合性能达到最佳且避免了增加成本, 屈服强度 236.97 MPa、抗拉强度 302.44 MPa、伸长率 9.27%, 布氏硬度 HBW83.4。

关键词: Mg 含量; 铸造铝合金; 金相组织; 力学性能

作者简介:

李连驰 (1999-), 男, 工程师, 主要研究方向为铸造铝硅合金成型工艺及热处理工艺研究。电话: 15727245679, E-mail: li.lianchi@hangte.cn

通信作者:

马小军, 男, 工程师。电话: 13593782933, E-mail: ma.xiaojun@hangte.cn

中图分类号: TG146.2;
TG113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)
04-0494-06

收稿日期:

2024-10-31 收到初稿,
2024-12-25 收到修订稿。

汽车行业发展至今, 消费者对汽车的安全性要求越来越高, 车企也在为汽车的安全性能不断进行材料革新和技术革新。其中底盘副车架在保障汽车安全性中发挥着重要作用。从材料上看, 目前市场上主要分为铝合金副车架和钢制副车架。相比于传统的钢制副车架, 铝合金副车架通常由 Si-Mg 系铝合金铸造制成, 具备质量轻、成形加工性能优良、耐腐蚀性能好和易于回收再利用等优点^[1-2]。并且在发生碰撞时, 由于 Al-Si-Mg 系合金的特点, 副车架能更有效地将承受的纵向力向左右各两道纵梁处分散, 能吸收更多的碰撞能量^[3-4]。因此, 应用铝合金副车架成为实现汽车轻量化的重要途径, 同时也对铝合金副车架的抗拉强度、屈服强度及伸长率等力学性能提出了更高要求。

随着 Si-Mg 系铸造铝合金的广泛应用, 针对其力学性能、晶相的形成机理, 有关汽车用铸造铝合金的研究重点逐渐转变为分析合金组分对合金整体性能的影响。陈忠伟等研究了 Mg 含量分别为 0、0.35% 和 0.70% 的 Al-7%Si-Mg 铸造合金的微观组织和力学性能, 结果表明随着合金中 Mg 含量的增加合金的抗拉强度呈增大趋势、伸长率呈降低趋势^[5]。乔振等研究了不同含 Li 含量对 Al-7Si-0.5Mg 合金显微组织和性能的影响, 结果表明随着 Li 含量的增加, 凝固组织中初晶硅数量增多, 且尺寸变大, 其形状也由卵状逐渐变为三角状, 并且合金的伸长率逐渐下降, 抗拉强度逐渐升高^[6]。潘英才等研究了 Si、Mg 含量变化对 Al-Mg-Si-Li 合金组织和性能的影响, 结果表明随着 Si 含量增加, 组织中初晶 Si 呈粗大化和不规则化增长, 随着 Mg 含量的增加, 组织中 α -Al 相和初晶 Si 细化且数量减少, 共晶组织增多, 合金的力学性能得到提高, 但过量的 Mg 使得合金出现鱼骨状的 Mg_2Si 组织, 降低了合金的力学性能^[7]。牛艳萍等研究了 Si 含量对 Al-Si-Mg 合金铸造性能的影响, 结果表明随着 Si 含量的提高, Al-Si-Mg 合金的流动性、抗拉强度均得到提升, 但伸长率和热导率有所下降^[8]。李佳双等研究了 Si、Mg 对 Al-Mg-Si 合金显微组织与显微硬度的影响, 结果表明随着 Si 含量的增加, 组织中 α -Al 枝晶变得细小, 合金显微硬度也随之提高, 随着 Mg 含量的增加, α -Al 初生晶粒逐渐增大, 合金显微硬度先增大后减小^[9]。胡欧林等研究了 Mg、Cu 含量变

化对Al-Si-Mg系合金T6热处理后组织与性能的影响,结果表明随着Mg含量的增加,合金的二次枝晶臂间距减小, Mg_2Si 强化相增多,随着Cu含量的增加,共晶Si由片状逐渐转变成细小弥散分布的球状^[10]。目前,有关合金组分对合金组织和性能的影响研究较多,但这些理论上的研究很少涉及到实际工程中的应用,关于元素含量变化对汽车零部件热处理后性能的影响研究较少。

本文以某品牌AlSi₇Mg_x合金副车架为研究对象,重点分析在T6热处理工艺的条件下, Mg含量对铝合金副车架微观组织的影响及力学性能的变化趋势,以期望为优化铝合金整体式副车架的力学性能以及企业改善铸件力学性能提供参考。

1 试验过程与方法

本试验采用A356铝合金(重庆顺博)作为副车架的基体材料,其化学成分如表1所示。使用集中熔炼

炉(一种塔式设备,负责将固体铝锭融化成铝液,方便后续将铝液转运至坩埚炉内进行后续处理)对A356铝合金锭进行集中熔炼,每6 h进行一次打渣、除气工艺。确保金属液无氧化渣后转运至坩埚炉内,待熔体温度达到720 ℃左右,先后将精炼细化剂AlTi₅B合金、变质剂Al-Sr中间合金压入坩埚中,并使用石墨棒搅拌均匀,期间使用Al锭以及纯度为99.99%的Mg锭等进行元素含量的调整,保证铝液中合金元素的含量在标准范围内。通过调整Mg锭的加入量分别制成Mg含量为0.28%、0.30%和0.33%的待浇注金属液,之后在坩埚炉内进行二次打渣,进一步确保铝液质量。二次打渣完成后,通入氮气进行除气,减少铝液内的含氢量,减少铸件内部针孔。金属液制备期间通过直读光谱仪检测,每个铝液样本共取样成分点3个,每个点位严格控制Mg含量处于0.28%~0.33%,并确保保温时间不超过8 h。随后将熔体转运至低压铸造机,调整熔体温度为715 ℃,以低压铸造的方式生产出不同Mg含量的AlSi₇Mg_x铝合金前副车架。

表1 A356铝合金化学成分
Tab. 1 Chemical composition of A356 alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	杂质	Al
6.8~7.2	≤0.11	≤0.05	≤0.10	0.28~0.40	≤0.10	0.10~0.15	0.03	余量

浇注完成后,对所得不同Mg含量的铸件进行切锯清刺等处理去除加工余量,图1所示为AlSi₇Mg_x铝合金前副车架的毛坯件。将Mg含量分别为0.28%、0.30%和0.33%的毛坯件各取5件进行表2所示的T6热处理。对热处理后的铸件按照客户要求的位置取样,并通过线切割制备金相试样和标准拉伸试棒,图2所示为取样位置及拉伸试棒尺寸示意图。通过计算3组不同Mg含量铸件的力学性能试验平均值,作为衡量所得铸件力学性能的依据。

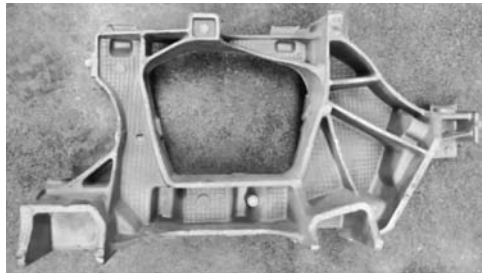


图1 某款前副车架的毛坯图
Fig. 1 Rough drawing of a certain front subframe

表2 AlSi₇Mg_x铝合金热处理工艺
Tab. 2 Heat treatment process of A356 alloy

	固溶处理		时效处理		参照标准
	固溶温度/℃	保温时间/h	时效温度/℃	保温时间/h	
A356	530 ~ 540	6 ~ 8	160 ~ 170	3 ~ 8	GB/T 25745—2010

2 结果与分析

2.1 金相组织

使用线切割获得试样尺寸约为6 mm × 6 mm × 10 mm,选择较为平整的面进行打磨,直至表面没有明显的切

割断面后进行抛光;随后使用超声波清洗仪清洗试样;最后使用体积分数为5%的HF酸腐蚀抛光面约30 s后用酒精冲洗并吹干,用镊子将其放在电子显微镜下观察金相组织。图3所示为不同Mg含量的AlSi₇Mg_x前

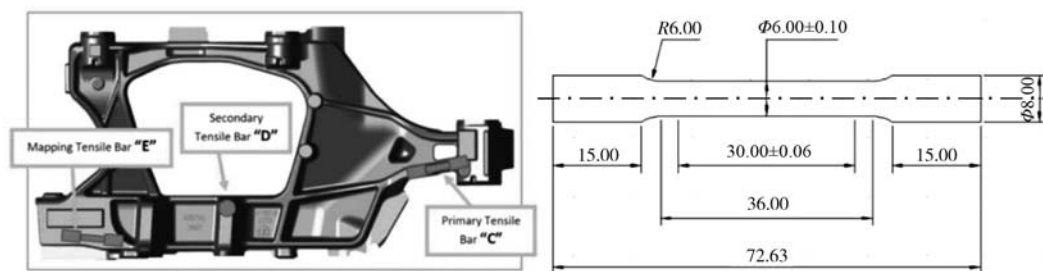


图2 取样位置及拉伸试棒尺寸

Fig. 2 Sampling location and tensile test bar dimensions

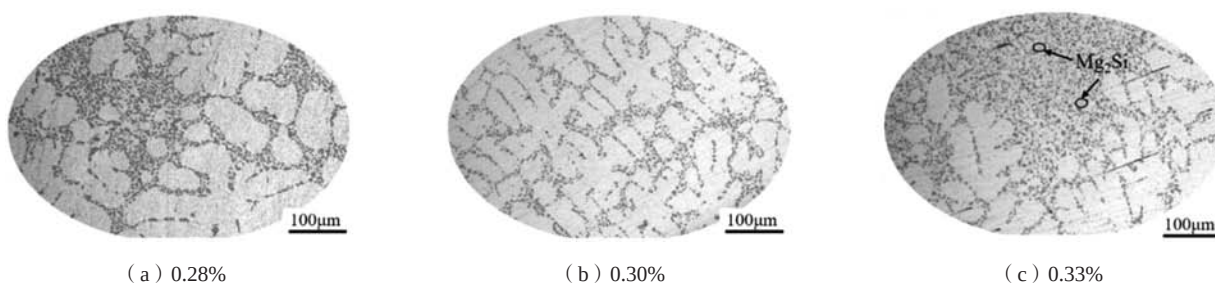


图3 不同Mg含量副车架试样的金相组织

Fig. 3 Metallographic structures of subframe specimens with varying Mg contents

副车架热处理后试样的金相组织图像。从图中可以看出，随着Mg含量的增加，金相组织中的晶粒尺寸随之减小，晶粒尺寸越小，合金的抗拉强度和伸长率越高，这是由于Mg含量的增加会引起成分偏析和形核增加，进而阻碍晶粒长大^[11]。

Mg含量的增加也会改变共晶硅的形态，使其由短棒状或大颗粒转变或细小颗粒状，这种转变对基体 α -Al的割裂作用降低，降低了产生应力集中的可能性，提高了合金的断裂韧性和抗拉性能。图4所示为Mg含量为0.33%的铸件组织XRD图谱。结合图3(c)，可以观察到，当Mg含量为0.33%时，金相组织中有少量呈现深色颗粒状的 Mg_2Si 相，这说明溶解在铝基体中的Mg会与Si反应，形成 Mg_2Si 相，随着Mg含量的增加

Mg_2Si 相的析出量增多，能有效提高合金的抗拉强度和硬度。

为了进一步量化Mg含量对 $AlSi_7Mg$ 前副车架热处理后组织的影响，绘制晶粒尺寸随Mg含量变化的分布直方图如图5所示。由图5可知，加压压力在450 MPa，加压时间5 s的压力环境中铝液进行成型凝固，随着Mg含量的增加，组织中晶粒尺寸呈显著减小的趋势，当Mg含量为0.28%时，晶粒尺寸集中分布在3.5 μm 左右，且晶粒尺寸最大超过了4.5 μm ；当Mg含量为0.30%时，晶粒尺寸集中分布在2.9 μm 左右，99%的晶粒尺寸都在4 μm 以下；当Mg含量为0.33%时，组织中晶粒的尺寸最大仅为3.1 μm 。这表明随着Mg含量的增加，所得铸件的力学性能得到了显著增强。

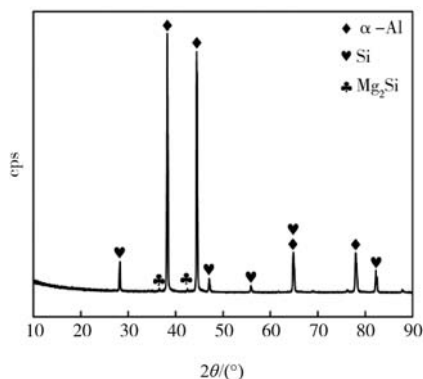


图4 Mg含量为0.33%的XRD图谱

Fig. 4 XRD pattern with Mg content of 0.33%

2.2 力学性能

采用WDW-100万能拉伸试验机、里氏数显硬度计进行铸件屈服强度、抗拉强度、伸长率和硬度等主要力学性能参数测试，试验中设定拉伸速率为0.1 mm/min，试验负荷设定为980 N加载5 s。表4为不同Mg含量的副车架用 $AlSi_7Mg$ 铸造铝合金经过T6热处理后不同试验组试样的力学性能参数。从表4测试结果可以看出，Mg含量在0.28%~0.33%时，所有力学性能均达到客户要求的最低值。另外，通过对比表4中各项力学性能的平均值，可以发现，当Mg含量为0.28%时，试样的抗拉强度、伸长率和硬度值均最小；当Mg含量为0.30%时，试样的屈服强度最大，为246.73 MPa。而当Mg含量为

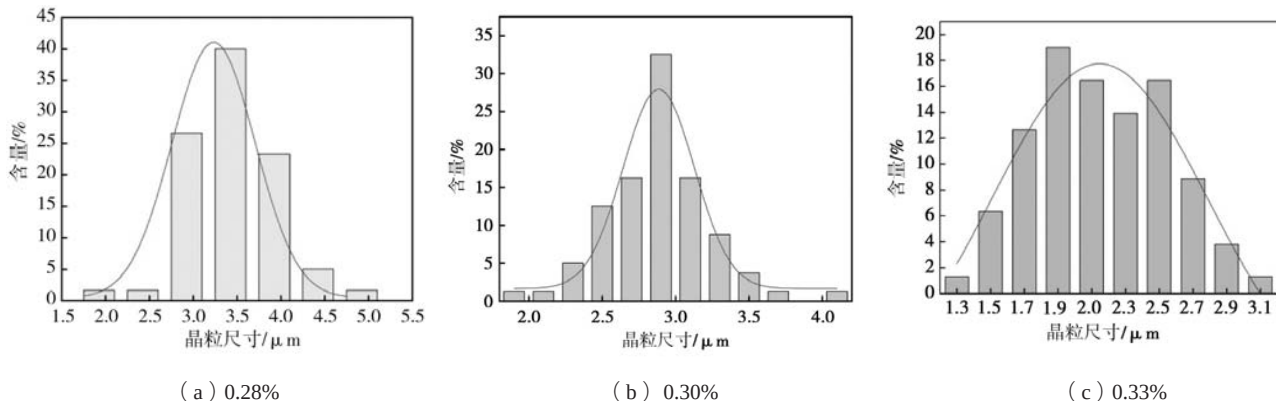


图5 不同Mg含量副车架试样的晶粒尺寸分布直方图

Fig. 5 Histogram of grain size distribution for subframe specimens with various Mg contents

表 4 某款前副车架试样力学性能
Tab. 4 Mechanical properties of a front subframe sample

Mg含量/%	序号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HB
0.28	1-1	246.31	285.04	7.40	78
	1-2	237.69	281.56	8.24	76
	1-3	233.55	288.97	7.86	76
	1-4	235.49	280.08	7.36	77
	1-5	231.78	279.13	8.10	78
	平均值	236.97	282.95	7.79	77
0.30	2-1	249.33	285.41	7.34	80
	2-2	243.61	300.80	9.60	82
	2-3	250.68	307.90	9.80	84
	2-4	243.75	309.17	9.70	83
	2-5	246.3	308.92	9.93	88
	平均值	246.73	302.44	9.27	83.4
0.33	3-1	226.07	305.10	11.40	87
	3-2	226.89	317.15	10.00	85
	3-3	226.74	311.63	11.83	90
	3-4	231.31	308.63	10.10	91
	3-5	230.99	306.88	10.27	89
	平均值	228.40	309.88	10.72	88.4

0.33%时, 试样的抗拉强度、伸长率和硬度值均最大, 但其屈服强度最小。

根据表4中的力学性能的平均值, 可以绘制出不同Mg含量材料的各项性能对比图和趋势图。其中, 图6为不同Mg含量材料的硬度值, 图7为不同Mg含量抗拉试棒的伸长率, 图8为不同Mg含量抗拉试棒的屈服强度和抗拉强度。从图6中可以看出, 随着Mg含量(0.28%~0.3%)的增加, 某款前副车架本体材料的硬度逐渐增大, 到Mg含量为0.33%时, 硬度值达到最大HB88.4。这是由于Mg元素增加, 热处理后析出形成的

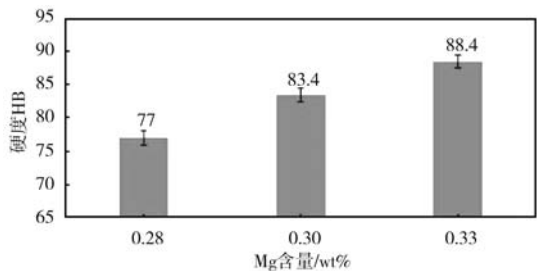


图6 不同Mg含量材料的硬度值

Fig. 6 Hardness values of materials having diverse Mg contents

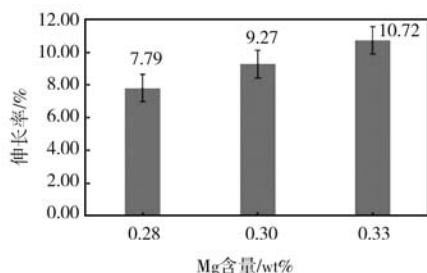


图7 不同Mg含量抗拉试棒的伸长率

Fig. 7 The elongation of tensile test rods with varying Mg contents

Mg₂Si相增多,分布在铝基体中,这个过程称为沉淀硬化,能够显著增强合金的硬度^[12]。

从图7中可以看出,随着Mg含量(0.28%~0.33%)的增加,某款前副车架本体材料的伸长率逐渐增大,这表明随着Mg含量的增加,材料的韧性逐渐增强。其原因在于Mg含量的增加能够细化的共晶硅,使硅相能更均匀地分布于铝基体中,应力分布更加均匀,从而增强了合金材料的韧性^[13]。

从图8中某款前副车架本体材料屈服强度和抗拉强度随Mg含量(0.28%~0.33%)变化的趋势可以看出,

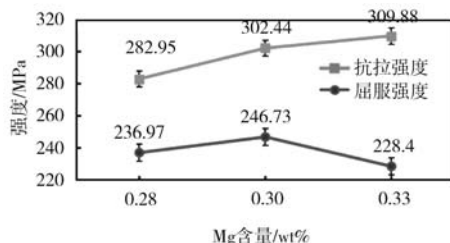


图8 不同Mg含量抗拉试棒的屈服强度和抗拉强度

Fig. 8 The yield strength and tensile strength of tensile test bars with diverse Mg contents

随着Mg含量的增加,材料的抗拉强度随之增大,但屈服强度先增加后减小。抗拉强度增大,是由于当Mg含量增加时,Mg₂Si相增多,这些细小的、分布均匀的Mg₂Si颗粒能有效阻碍位错运动,从而提高合金的抗拉强度^[6]。此外,适当的Mg含量还能优化合金的固溶强化和沉淀强化效果。屈服强度先增大后减小,是由于随着Mg含量的增加并形成更多的强化相Mg₂Si,强化相能够影响材料开始塑性变形的应力水平,屈服强度则随之增加。然而,当Mg含量过高时,可能导致第二相聚集形成较大的粒子,这可能对材料的塑性变形机制产生不利影响,进而可能导致屈服强度的降低。

从以上图表的分析结果可知,为保证某款前副车架本体材料的各项力学性能满足客户要求且避免投料增加导致成本上升,则应选择Mg含量为0.30%的AlSi₇Mg_{0.3}铸造铝合金,此时材料的屈服强度236.97 MPa、抗拉强度302.44 MPa、伸长率9.27%、布氏硬度HB83.4。

3 结论

(1) 随着Mg含量的增加,材料金相组织中晶粒得到细化,共晶硅由短棒状逐渐转变为细小颗粒状,同时Mg₂Si相的析出量增多。

(2) T6热处理后的AlSi₇Mg_x铸造铝合金的抗拉强度、伸长率和硬度值均随着Mg含量(0.28%~0.33%)的增加而增大,而屈服强度则先增大后减小。

(3) 实际生产中可以根据产品力学性能的实际情况,通过调控合金中Mg的含量来改变力学性能,从而使铸件力学性能符合要求的同时不出现性能过剩,某款前副车架本体材料选择Mg含量为0.30%的AlSi₇Mg_{0.3}铸造铝合金最佳。

参考文献:

- [1] 陈来,王占坤,邹纯,等.汽车用铝合金副车架成形工艺及应用现状[J].铸造,2019,68(4):390-395.
- [2] 边明勇.高强度铝合金铸造与热处理技术研究[J].山西冶金,2021,44(5):200-202.
- [3] 成平.消失模铸造用改性A356铝合金的组织性能研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [4] 贲能军,孙瑜,周鹏飞.Mg含量对AlSiMg合金组织演变及性能的影响[J].铸造,2020,69(9):929-933.
- [5] 陈忠伟,介万奇.Mg含量对Al-Si-Mg铸造合金微观组织与力学性能的影响[J].材料科学与工程学报,2004(5):647-652.
- [6] 乔振,赵中魁,孙清洲,等.Li含量对Al-Si-Mg-Li合金组织与性能的影响[J].铸造技术,2010,31(8):1040-1043.
- [7] 潘英才,乔振,赵中魁.Si、Mg含量变化对Al-Mg-Si-Li合金组织和性能的影响[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2011,32(6):617-621.
- [8] 牛艳萍,赵禹凯,王顺成,等.Si含量对Al-Si-Mg合金铸造流动性、热导率和力学性能的影响[J].铸造,2016,65(4):366-370.
- [9] 李佳双,屈敏,崔岩,等.Si、Mg含量对Al-Mg-Si合金显微组织及显微硬度的影响[J].金属热处理,2016,41(12):69-74.

- [10] 胡欧林, 李鹏飞, 芦富敏, 等. Mg和Cu含量对Al-Si-Mg系合金组织和性能的影响 [J]. 上海金属, 2019, 41 (1) : 20-24.
- [11] 翟欢, 李广宇, 蒋文明, 等. Mg含量对体育器材用Al-6Zn-xMg-0.5Cu-0.1Zr铸造铝合金组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2022, 71 (10) : 1256-1261.
- [12] 徐松. 镁含量对Al-10Si-2.5Cu合金挤压铸造组织及性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [13] 胡惠翔, 樊振中, 罗婷瑞, 等. Al-Si-Mg系铸造合金应用现状与高强韧制备研究进展 [J]. 铸造, 2023, 72 (10) : 1227-1234.

Effect of Mg Content on Microstructure and Properties of AlSi_7Mg_x Cast Aluminum Alloy for Automobile Chassis Subframe

LI Lian-chi, MA Xiao-jun, LIU Hai-bin, SU Wei-qiang
(Hubei Hangte Equipment Manufacturing Co., Ltd., Jingmen 448000, Hubei, China)

Abstract:

In consideration of the safety performance of automotive chassis subframes, a metal mold casting process and AlSi_7Mg_x aluminum alloy were used to prepare the automotive chassis subframe, and test bar samples were taken from its body to study the effect of Mg content on its structure and properties. In order to select materials with appropriate composition for production and avoid insufficient performance or increased cost. This study investigates the influence of magnesium (Mg) content on the microstructure and properties of these test rods to identify suitable material compositions for production while avoiding both insufficient and increased costs. The research results indicate that as Mg content increases from 0.28 % to 0.33 %, there is a refinement in the eutectic silicon within the microstructure, accompanied by an increase in precipitation ratio. Concurrently, the Mg_2Si phase also increases accordingly. Specifically, tensile strength rises from 282.95 MPa to 309.88 MPa, elongation improves from 7.79% to 10.72%, and Brinell hardness increased from HBW77 to HBW88.4. However, yield strength decreases from 246.73 MPa to 228.40 MPa. Notably, when Mg content is 0.3%, the comprehensive performance of the material attains its optimum level while avoiding an increase in cost—yield strength measures at 236.97 MPa, tensile strength at 302.44 MPa, elongation at 9.27%, and Brinell hardness at HBW83.4.

Key words:

Mg content; cast aluminum alloy; heat treatment; mechanical properties; yield strength