

汽车轮毂用 A356 铝合金合金化的研究进展

何芳¹, 庄林忠², 何国元¹, 李宏祥², 裔国宇¹

(1. 大亚车轮制造有限公司, 江苏镇江 212300; 2. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: A356合金是目前应用最广的汽车轮毂用铝合金, 但由于其强度不高, 无法满足现代轮毂进一步轻量化的要求。而基于该合金对其成分进一步优化、改进甚至开发出新型高强铸造铝合金无疑是提高力学性能并进一步实现汽车轮毂轻量化最有效的方法之一。本文回顾了国内外在A356合金微合金化方面的研究进展, 并详细阐述了合金元素对其微观组织和力学性能的作用规律, 同时对现代轮毂用新型高强韧铸造铝合金的研发方向进行了展望。

关键词: A356合金; 轻量化; 力学性能; 合金化

轮毂作为汽车当中的一个重要部件, 不仅影响着汽车的安全性和操控性, 而且对汽车的节能与轻量化程度也具有重要的影响。近年来, 汽车轮毂趋于选用质量轻、综合性能好、表面质量高、可回收利用以及成本低的材料制造^[1]。因此, 铝合金汽车轮毂应用优势逐渐越发明显, 在汽车制造、生产中得到广泛应用^[2-3]。A356合金是可热处理强化的铸造铝合金, 具有良好的铸造性能, 广泛应用于各种汽车铸件, 是世界各国广泛采用的汽车车轮材料^[4]。但是该合金强度不高, 在T5状态下其抗拉强度仅为265 MPa, 无法满足现代汽车轮毂进一步轻量化的要求。为了在不降低其他性能的前提下进一步提高该合金的强度, 使该合金能够满足日益增长的汽车轻量化需求, 研究人员从以下四个方面开展了相关研究: ①合金化: 目前研究的合金化元素主要包括Si、Mg、Cu、Mn等, 合金元素主要起强化合金基体, 改善合金组织形貌作用; ②选择更佳的细化剂与变质剂: A356合金细化剂与变质剂种类繁多, 目前研究热点是使用稀土元素作为变质剂, 工业上使用最广泛的细化剂与变质剂为Al-Ti-B与Sr, 细化剂与变质剂的加入可以显著细化基体铝组织, 变质共晶硅形貌, 改善合金力学性能; ③铸造工艺优化: 汽车轮毂成形主要有铸造法与锻造法, 其中低压铸造法应用最广, 随着科技的发展, 半固态成形技术也应用于铝合金制造, 适当的铸造工艺可以获得更优的轮毂并减小生产成本; ④热处理工艺优化: A356合金轮毂使用最广泛的热处理工艺为T6热处理(固溶+人工时效), 目前也研究了间断时效、双级时效等热处理工艺的影响, 优化热处理工艺可以优化共晶硅形态与尺寸, 并改善合金金属间相的形态与分布, 以获得更佳的力学性能。需要指出的是, 现有A356合金基本上已经达到了该合金的强度极限。为了进一步提高车轮材料的强度和韧性, 开发新一代高强汽车轮毂用铸造铝合金无疑是最佳选择。因此, 本文系统总结了国内外在合金元素对A356合金微观组织和力学性能影响领域最新的研究成果, 同时也对该方向的研究趋势予以了展望。

作者简介:

何芳(1968-), 男, 高级经济师, 硕士, 主要从事技术研发及项目管理工作。电话: 0511-86967108

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

04-0431-07

收稿日期:

2020-09-18 收到初稿,

2020-12-20 收到修订稿。

1 合金元素对A356合金的影响

1.1 Si元素的影响

图1为Al-Si合金二元相图^[5]。由相图可以看出, Al-Si合金的共晶点温度为577 °C, 共晶点处Si元素含量为11.7%, 共晶反应为 $L \rightarrow \alpha + Si$, 其中 α 为铝基固溶体, Si为共晶硅组织。而硅元素在铝中的最大溶解度为1.65%, 溶解度随着温度降低而减小, 室温

下仅为0.05%。A356合金中硅元素含量在6.5%~7.5%之间,在该范围内,合金的凝固收缩率小,铝液流动性好,而Si元素过多会增加Si元素的偏析率,造成难以消除的Si偏析现象^[6]。

1.2 Mg元素的影响

A356合金中Mg元素的含量在0.25%~0.45%之间,其在合金中的固溶度较低,同时会降低Al-Si的共晶温度。Mg元素的含量对合金显微组织及力学性能均有显著影响^[8-9]。Al-Si系合金时效处理过程中,富Mg相的析出顺序为^[7]:

Saturated solid solution → GP zones → β'' (Mg_2Si) → β' (Mg_2Si) → β (Mg_2Si)

其中GP zones为G.P.区,即Mg、Si原子富集区,其与合金基体保持共格关系, β'' 与 β' 均为合金时效过程中析出的亚稳相,其与基体为半共格关系,而 β 为稳定的析出相,在时效后期析出,与基体为非共格关系。时效析出的 Mg_2Si 相可以起到析出强化作用,其强度受到Mg含量和时效工艺影响很大。表1为不同Mg含量的Al-7Si-xMg合金对应的硬度以及力学性能^[7]。从表中可以看出,随着Mg含量的增加,合金的抗拉强度也增加,当Mg含量由0.43%提升到0.86%后,合金抗拉强度提高了31 MPa,原因为时效处理后, β (Mg_2Si)相体积分数随着Mg含量的增加而增加,进一步阻碍基体中位错的运动,提高该合金的强度。但是随着Mg含量的增加,伸长率不断下降,当Mg含量由0.43%提升到0.86%后,合金伸长率下降了5.27%,可能与合金中富镁相的形成以及富铁相的形成、形态的改变有关。合金中Mg含量的增加会促进生成富铁相 π 相($Al_9FeMg_3Si_5$ 或者 $Al_8FeMg_3Si_6$),这些富铁相的存在会降低合金的伸长率。此外,Mg含量增加导致合金基体中 Mg_2Si 析出量增多,析出强化效果增强也会导致伸长率下降。

1.3 Cu元素的影响

铜含量的增加会降低A356合金共晶温度,增加凝固过程中的体积收缩和试样的气孔率。其次随着Cu含量的增加,会使氢元素的活度系数和溶解度降低,会促进凝固过程中气孔的形成^[11]。同时Cu的加入能减小 α -Al的二次枝晶臂间距(SDAS)。由于Cu在Al-Si-Mg系合金固溶体中的扩散速度比Mg和Si慢,因此较低的固溶温度会使富Cu相无法完全回溶,而过高的固溶温度有可能导致过烧现象的出现。图2所示为Maria^[10]等人研究的不同Cu含量下的T6态合金析出物的透射电镜图。其中图2a、b和c分别是Cu含量分别为0、0.5%和1.0%条件下的微观组织图片,可以发现当

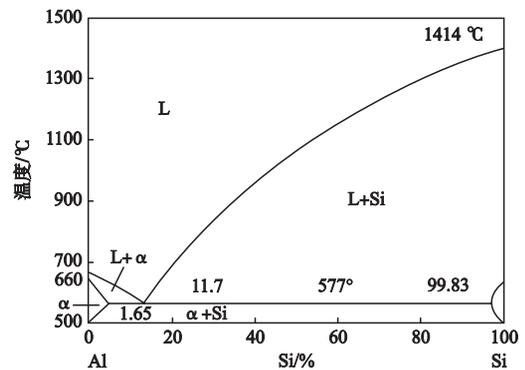
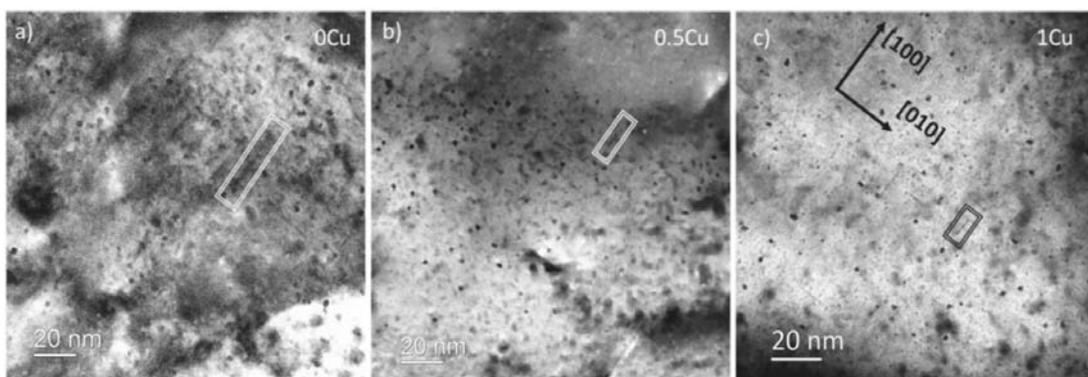


图1 Al-Si合金二元相图

Fig. 1 Binary phase diagram of Al-Si alloy

表1 Al-7Si-xMg合金硬度及力学性能
Table 1 Hardness and mechanical properties of Al-7Si-xMg alloys

Mg /%	T6处理前的硬度 /HV	T6处理后的硬度 /HV	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%
0.43	46.6	113	179	8.24
0.67	45.2	115	198	3.39
0.86	45.4	120	210	2.97



(a) 不添加Cu

(b) 0.5%Cu

(c) 1%Cu

图2 不同Cu含量的合金析出物透射电镜图

Fig. 2 TEM images of precipitates in alloys with different Cu content

Cu含量为0时,析出相主要为 β '相,而Cu含量为0.5%或者1%时,析出相主要为 β '、Q'和C相。其中,Q'相为 $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 四元相,是一种亚稳相,当Cu含量超过1%,开始形成 θ '相, θ '相也是一种亚稳相,其化学式为 Al_2Cu 。

Cu对合金的力学性能有两种作用,一种是产生气孔,从而降低合金强度。图3为Cu含量对合金气孔率的影响^[11],由图可知,无论在何种凝固条件下铸造A356合金,随着Cu含量的增加,合金孔隙率增加,降低合金的力学性能。

另外一种是在时效处理后析出第二相富铜相,阻碍位错运动,产生析出强化作用,同时降低合金伸长率^[12]。当时效温度高于175℃时,四元系Al-Si-Cu-Mg合金能观察到双时效峰,且第一个时效峰具有更高的硬度,这主要与GP区、亚稳相的形成与溶解有关^[9]。图4展示了Kori等^[13]人研究的Cu含量对A356合金硬度以及拉伸性能的影响规律。由图4可知,随着Cu含量的增加,合金硬度、屈服强度以及抗拉强度、断后伸长率均有所增加,当Cu含量由0增加到0.5%时,合金抗拉强度、断后伸长率、硬度分别增加了43.2 MPa、2.06%、HV15.76。

1.4 Mn元素与Cr元素的影响

A356合金不可避免的杂质元素,Fe元素在合金中通常以对合金的力学性能危害较大的富铁金属间化合物析出,常见的有汉字状或鱼骨状的 α -Fe以及针状或者板状的 β -Fe两种。其中, β -Fe对合金力学性能的危害较大。这些富铁相的大小和形状很大程度上取决于铸造时的冷却速度和合金化学成分尤其是熔体中Fe元素的含量。目前,普遍采用Mn元素改变合金中 β -Fe的形态与数量,减少其对合金力学性能的危害^[14-16]。当向合金中加入Mn元素且其含量达到一定值时,铁相晶体开始由原先的沿单一方向生长变为向其他方向同时生长,针片状的富铁相逐渐被汉字状(或者骨骼

状)的 α 富铁相所代替,从而改变富铁相的形貌。图5为A356-0.2Fe以及其加入0.2%Mn后的组织图^[17]。可以看出在A356-0.2Fe中存在针状 β -Fe相,但添加0.2%Mn后,部分 β -Fe变为 α -Fe,减少了富铁相对合金力学性能的危害。

图6为Mn对铸态A356合金力学性能的影响^[18],可以发现,随着Mn含量的增加,合金的抗拉强度、伸长率及断面收缩率均有所增加。当Mn含量为0.08%时,亚共晶Al-Si合金的抗拉强度、伸长率及断面收缩率分

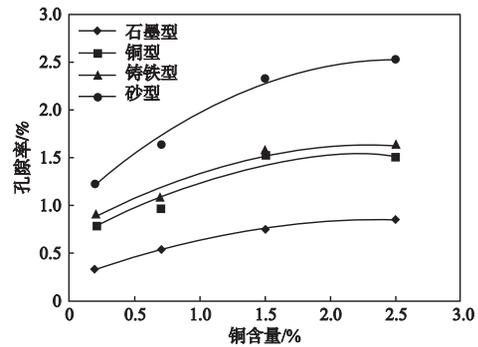


图3 在不同凝固条件下合金孔隙率随Cu含量的变化
Fig. 3 Change of porosity with Cu content under different solidification conditions

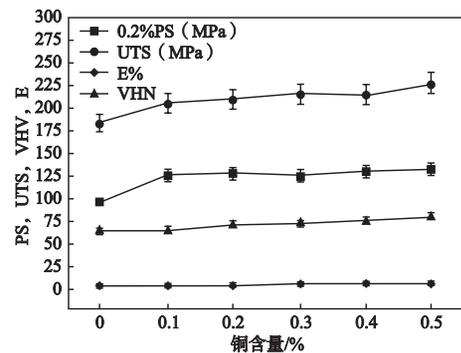
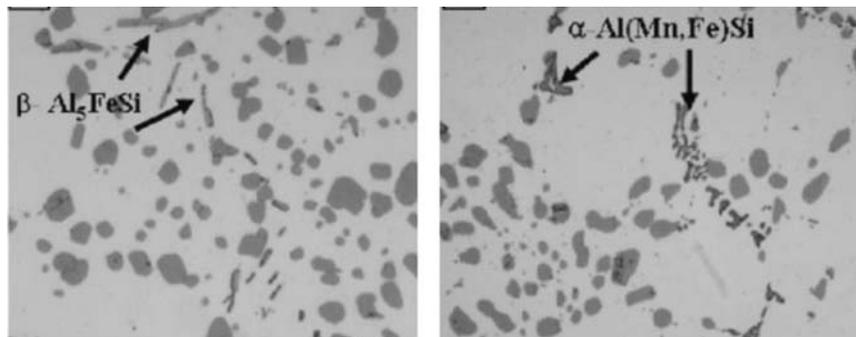


图4 Cu含量对A356.2合金力学性能的影响^[12]
Fig. 4 Effect of Cu content on mechanical properties of A356.1 alloy^[12]



(a) A356-0.2Fe

(b) A356-0.2Fe-0.2Mn

图5 合金的显微结构

Fig. 5 Microstructure of A356-0.2Fe and A356-0.2Fe-0.2Mn alloys

别为188.4 MPa、20.08%和33.3%。与未添加Mn的合金相比,分别增加了20.7%、703.2%和819.9%。随着Mn含量的继续增加,铸锭的抗拉强度、伸长率及断面收缩率趋于平稳。分析得知,相同的铸造工艺条件下,当Mn含量小于0.08%时,添加的Mn元素可以有效地阻止针状的 β -Fe相的长大,转而形成汉字状(或鱼骨状)的 α -Fe,减少针状富铁相的有害作用,使合金的抗拉强度、伸长率及断面收缩率大幅上升。当Mn含量大于0.08%时,针状富铁相的形貌变得较为细小,割裂作用不再明显,铸锭的抗拉强度、伸长率及断面收缩率不再增加,趋于平稳。

Cr元素对合金组织的影响^[19]与Mn元素相近,都能将合金中针状的 β -Fe转变为汉字状(或鱼骨状)的 α -Fe,减少针状富铁相的有害作用。同时,Cr元素的加入会使在合金固溶处理后(540℃保温5h)在枝晶间生成 $Al_{13}Cr_4Si_4$ 相,从而提高固溶态合金的强度,但对时效态的合金强度无明显作用,原因为该弥散体在淬火过程中会成为Mg-Si棒状析出相及Si相颗粒的异质形核点,消耗掉其周围的Mg、Si元素,从而抑制周围 β "-Mg₂Si相在时效过程中的形核、析出,因此降低了 β "-Mg₂Si相的强化效果。

1.5 稀土元素的影响

在实际生产中,目前广泛使用的Al-Sr合金变质剂加入铝合金熔体中容易烧损,产生杂质,过量添加还导致铝合金熔体表面氧化膜被破坏,使得铝合金熔体析氢现象严重,直接导致铝合金熔体铸件产生夹杂、气孔、针孔等缺陷,这些都制约了铸件质量的提升。目前,使用稀土元素作为变质剂对A356合金进行变质处理是研究热点。

目前,关于共晶硅的变质机理尚无明确结论,人们普遍认可的机理是杂质诱发硅相产生孪晶:变质剂原子可吸附在共晶硅表面,与硅晶体的内在台阶相互作用,产生大量孪晶,使硅按孪晶凹谷机制(TPRE)生

长,阻止硅相的各向异性生长,使其成各向同性生长,从而长成短棒状或球状甚至是分叉较多的纤维状^[20]。同时,TPRE机制也被广泛接受^[21]:共晶生长中硅的结晶生长前沿往往是孪晶凹谷。变质后,铝液中变质原子选择性地富集在孪晶凹谷处,阻碍了硅原子向孪晶凹谷处长大的速度,使生长受到抑制,被迫改变生长方向,同时也促使硅晶体发生高度分歧最终生长为纤维状。

Yu等^[22]人研究稀土Ce对A356合金的影响,发现1%Ce对合金的变质效果最好,但是共晶硅相并没有被显著细化,而在变质后的合金中发现了Ce-23Al-22Si和Al-17Ce-12Ti-2Si-2Mg相。虽然Ce对合金的强度没有明显影响,当Ce含量由0增加到1.0%时,合金T6态抗拉强度由275 MPa变为273 MPa,但是Ce的加入能提高合金的伸长率,当Ce含量由0增加到1.0%时,合金T6态伸长率由3.14%增加到5.38%。

Kang等^[23]人研究了稀土Ce与Mg的混合加入对A356合金的影响,发现Ce与Mg的单独加入对合金的细化作用有限,但混合加入后其能产生显著的细化作用,将共晶硅由板状变质为纤维状。Mg和Ce的混合加入在合金基体中产生大量的沉淀物,这些沉淀物的存在阻碍了Si相的生长,同时产生成分过冷进而变质共晶硅相,Mg与Ce的混合加入使得合金平均晶粒尺寸下降了47.6%,SDAS下降了38.9%,同时较大地提升了合金的力学性能;当Mg和Ce的含量分别为0.75%与0.1%时,合金抗拉强度较其含量分别为0.33%与0%时提高了53 MPa,伸长率提高了1.1%。

Yu等^[24]人研究了La的加入对合金显微结构和力学性能的影响。结果发现1%的La能对共晶硅产生充分的变质效果,但是其对合金的力学性能没有明显影响。而Qiu^[25]等人研究了变质剂Sr和La的混合加入对合金的复合影响。结果发现,合金中加入0.5%Al-6Sr-7La后合金的SDAS下降到17.9 μ m,而且共晶硅相被充分变质。因为其微观组织的改变,合金的力学性能也得到

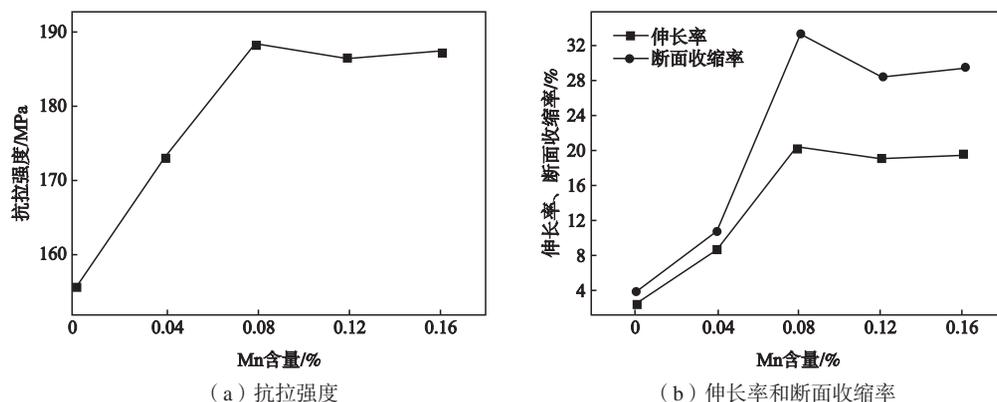


图6 Mn含量对A356合金力学性能的影响

Fig. 6 Effect of Mn content on mechanical properties of A356 alloy

了较大的提升, 屈服强度、抗拉强度以及伸长率分别提高了13.8%、7.7%和52.4%。

Shi等^[26]人研究了Gd元素对铸态和T6态合金显微结构及力学性能的影响。发现0.2%的Gd可以显著细化 α -Al晶粒, 且对合金中的共晶硅产生充分变质作用, 使其变成细小的颗粒均匀分布在T6态合金基体中。同时Gd会引进针状、块状或者棒状的 GdAl_2Si_2 颗粒, 经过T6处理后, 这些颗粒会弥散分布在合金基体中。同时, Gd的加入和T6热处理也会降低针状 β -Fe对合金的损害, 所以0.2%Gd能有效地提升合金的力学性能, 其抗拉强度提高了近54 MPa, 伸长率提高了2.7%。

随着研究的进行, 越来越多稀土元素对A356合金的影响机理被研究, 包括了Eu、Er、Sc、Nd、Ho等稀土元素^[27-35]。目前为了满足更高的使用要求, 一些研究人员将稀土元素与其他合金元素一起加入到A356合金中, 或者使用混合稀土来获得更高的力学性能^[35-43]。比如: 姚等^[35]人采用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和差热扫描量热法(DSC)等手段研究了富Ce混合稀土加入量对A356铝合金显微组织和力学性能的影响。结果表明, 随着RE含量0.2%增加到0.6%, 初生 α -Al相的体积分数增加, 二次枝晶臂间距减小, 共晶硅呈细小纤维状。添加0.4%RE时, 初生 α -Al相的体积分数为56.4%。DSC升温曲线表明, 添加0.2%~0.6%RE使得三元共晶反应的峰值温度和熔化焓减小, 共晶熔化峰值温度提高。DSC降温曲线表明, 随着RE含量的增加, 初生 α -Al相形核温度降低, 但是稀土化合物相的存在弱化了其细化效果; 共晶反应温度随着RE元素的加入降低了1.9~2.8℃。拉伸试验结果表明, 添加RE提高了铸态铝合金的抗拉强度和屈服强度, 分别提高了8.15 MPa、5.30 MPa, 但是合金的伸长率降低了0.45%。

1.6 其他合金元素的影响

目前, 除了研究了上述合金元素对A356合金的影响外, 研究人员也研究了Ca、Sn、Mo^[44-46]等合金元素对A356合金的影响。

Zhang等^[44]人研究了碱土金属Ca对A356合金的影

响, 发现Ca元素的加入能细化初生 α -Al组织, 变质共晶硅, 细化 β -Fe相, 同时也能降低合金SDAS, 从而达到全面提高合金力学性能的效果。当Ca含量由0增加到0.6%时, 合金抗拉强度、屈服强度、断后伸长率分别提高了32.92%、9.49%、80%。

Chen等^[45]人研究了添加Mo对A356合金析出相的影响及其高温力学性能的作用, Mo元素加入后在合金中形成了热稳定的弥散相, 在提高合金常温力学性能的同时也提高了合金高温力学性能。

Mohamed等^[46]人研究发现在A356合金加入Sn元素后, Sn元素会代替Si元素与Mg形成 Mg_2Sn 相, Mg_2Sn 与 Mg_2Si 相相比其质软, 导致合金强硬度降低但塑性提高, 同时Sn元素也能提高合金流动性, 改善合金富铁相。

2 展望

随着科学技术的不断发展进步, 汽车轮毂必将实现轻量化以满足现代节能环保的社会主题。A356.2合金由于其良好的综合性能以及适当的生产成本目前依然被广泛应用于铝合金轮毂制造业, 但其强度不高难以满足轻量化的要求, 目前研究员们也研发出了具有更佳力学性能的6061变形铝合金锻造轮毂。然而, 限于成本要求, 今后相当长时间以内, 低压铸造铝合金仍然将是轮毂制造业的主流。未来的发展也将集中于现有A356合金的合金化改性和A356合金低压铸造和先进热处理工艺优化。特别指出的是, 微合金化必将在新型高强韧铸造铝合金的开发上显示明显的优势。系统总结和理解微合金化元素对于A356基合金的微观组织与力学性能的影响规律, 包括研发更新一代的晶粒细化剂和变质剂等, 都将在未来的研究中获得高度重视。伴随着新一代高强韧铸造铝合金的研发, 轮毂的轻量化发展趋势将越来越明显。目前, 材料基因工程(MGE)在新材料的研发和应用中的作用越来越显著, 同样伴随着计算机、大数据、人工智能等领域的快速发展, 都将为铝合金轮毂用合金材料的设计及其制造起到积极促进作用, 从而带动汽车等行业的整体快速发展和技术进步。

参考文献:

- [1] 聂晓朋, 杨磊, 张世琪. 汽车轮毂材料发展现状和制作工艺 [J]. 科技资讯, 2017, 15 (26): 92-94.
- [2] 钟强强. 简述铝合金汽车轮毂发展现状 [J]. 上海有色金属, 2014, 35 (3): 128-133.
- [3] 徐一展. 汽车铝合金轮毂的应用和分析 [J]. 河南建材, 2019 (1): 188-189.
- [4] 怯喜周, 王研, 陶然, 等. 稀土Er对A356.2合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (12): 2527-2531.
- [5] 田荣璋. 铸造铝合金 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006: 91-92.
- [6] 郭有军. A356.2合金铸锭中Si元素的偏析现象 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008 (4): 319-320, 246.
- [7] MUSA Yıldırım, DURSUN Özyürek. The effect of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy [J]. Materials and Design, 2013 (51): 767-774.

- [8] CHEN R, XU Q, GUO H, et al. Correlation of solidification microstructure refining scale, Mg composition and heat treatment conditions with mechanical properties in Al-7Si-Mg cast aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 685: 391–402.
- [9] FORTINI A, MERLIN M, FABBRI E, et al. On the influence of Mn and Mg additions on tensile properties, microstructure and quality index of the A356 aluminum foundry alloy [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 2: 2238–2245.
- [10] MARIA Teresa Di Giovanni, EVA Anne Mørtzell, TAKESHI Saito, et al. Influence of Cu addition on the heat treatment response of A356 foundry alloy [J]. *Materials Today Communications*, 2019, 19, 342–348.
- [11] SHABESTARI S G, MOEMENI H. Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153: 193–198.
- [12] 朱志华, 马路路, 刘华. Cu对稀土A356合金组织及力学性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37 (6): 683–686.
- [13] KORI S A, PRABHUDEV M S, CHANDRASHEKHARAI AH T M. Studies on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy with minor additions of copper and magnesium [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2009, 62 (4-5): 353–356.
- [14] QIU K, WANG R C, PENG C Q, et al. Effect of individual and combined additions of Al-5Ti-B, Mn and Sn on sliding wear behavior of A356 alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25 (12): 3886–3892.
- [15] YU J H, KIM S W, SON H W, et al. Microstructural and mechanical characteristics of A356 Alloys as a function of Mn content and cast thickness [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 19, 1704–1708.
- [16] 刘涛, 苏光. Mn对A356铝合金铁相形貌组织和力学性能的影响 [J]. *铸造*, 2014, 63 (7): 647–650.
- [17] KIM H Y, HAN S W. The influence of Mn and Cr on the tensile properties of A356-0.20Fe alloy [J]. *Materials Letters*, 2006, 60 (15): 1880–1883.
- [18] 赵鑫, 付莉超, 蔡成, 等. 锰对A356合金中富Fe相的影响 [J]. *铸造技术*, 2014, 35 (12): 2776–2779.
- [19] ZHAN Hongyi, HU Bin. Analyzing the microstructural evolution and hardening response of an Al-Si-Mg casting alloy with Cr addition [J]. *Materials Characterization*, 2018 (142): 602–612.
- [20] LU S Z, HELLAWEELL A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1987, 18 (10): 1721–1733.
- [21] DAY M G, HELLAWEELL A. The Microstructure and crystallography of aluminium-silicon eutectic alloys [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1968, 305 (1483): 473–491.
- [22] TSAI Yu-Chou, LEE Sheng-Long, LIN Chih-Kuang. Effect of trace Ce addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2011, 34 (5): 609–616.
- [23] KANG J, SU R, WU D Y, et al. Synergistic effects of Ce and Mg on the microstructure and tensile properties of Al-7Si-0.3Mg-0.2Fe alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019: 796.
- [24] TSAI Yu-Chou, CHOUA Cheng-Yu, LEE Sheng-Long, et al. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009: 157–162.
- [25] QIU C, MIAO S, LI X, et al. Synergistic effect of Sr and La on the microstructure and mechanical properties of A356.2 alloy [J]. *Materials & Design*, 2016: 114.
- [26] SHI Z M, WANG Q, SHI Y, et al. Microstructure and mechanical properties of Gd-modified A356 aluminum alloys [J]. *Journal of Rare Earths*, 2015, 33 (9): 1004–1009.
- [27] SHI Z M, WANG Q, ZHAO G, et al. Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 626: 102–107.
- [28] PANDEE P, PATAKHAM U, LIMMANEEVICHITR C. Microstructural evolution and mechanical properties of Al-7Si-0.3Mg alloys with erbium additions [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017: 728.
- [29] XU C, WANG F, MUDASSAR H, et al. Effect of Sc and Sr on the eutectic Si morphology and tensile properties of Al-Si-Mg alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26 (4): 1605–1613.
- [30] PRAMOD S L, RAVIKIRANA, RAO A K P, et al. Effect of Sc addition and T6 aging treatment on the microstructure modification and mechanical properties of A356 alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016: 438–450.
- [31] TANG Q, ZHAO J, WANG T, et al. The effects of neodymium addition on the intermetallic microstructure and mechanical properties of Al-7Si-0.3Mg-0.3Fe alloys [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2018: 741.
- [32] QIU H, YAN H, HU Z. Effect of samarium (Sm) addition on the microstructures and mechanical properties of Al-7Si-0.7Mg alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 567: 77–81.
- [33] WANG Qiang, SHI Zhiming, LI Hong. Effects of Holmium Additions on Microstructure and Properties of A356 Aluminum Alloys [J]. *Metals*, 2018, 8 (10): 849.
- [34] FENG M, YAN G, XUAN Z, et al. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2015, 650: 896–906.
- [35] 姚丽娟, 坚增运, 朱满, 等. 富铈混合稀土对A356铝合金凝固组织和力学性能的影响 [J]. *铸造*, 2016, 65 (2): 166–171.
- [36] 成平, 樊自田, 赵忠, 等. 富Ce稀土对Al-Si7-Mg0.8合金消失模凝固组织性能影响 [J]. *铸造*, 2010, 59 (8): 833–837.
- [37] 倪红军, 林万里, 孙宝德, 等. 铝熔体用稀土熔剂的使用效果及分析 [J]. *铸造*, 2001, 50 (2): 74–77.

- [38] ZHANG Shaochen, LENG Jinfeng, WANG Zhibin. Investigation on the modification behavior of A356.2 alloy with Yb-La composite modifier [J]. *Materials Research Express*, 2018: 154–160.
- [39] ZHU Man, JIAN Zengyun, YAO Lijuan. Effect of mischmetal modification treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of Al-7.0%Si-0.3%Mg foundry aluminum alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46 (8) : 2685–2694.
- [40] XU Cong, XIAO Wenlong, ZHENG Ruixiao. The synergic effects of Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy [J]. *Materials & Design*, 2015, 88.
- [41] JIANG M Z, YU Y C, LI H, et al. Effect of Rare Earth Cerium Addition on Microstructures and Mechanical Properties of Low Carbon High Manganese Steels [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2017, 36 (2) : 145–153.
- [42] LIU Wenyi, XIAO Wenlong, XU Cong. Synergistic effects of Gd and Zr on grain refinement and eutectic Si modification of Al-Si cast alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017 (693) : 93–100.
- [43] MARCO Colombo, ELISABETTA Gariboldi, ALESSANDRO Morri. Influences of different Zr additions on the microstructure, room and high temperature mechanical properties of an Al-7Si-0.4Mg alloy modified with 0.25%Er [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018 (713) : 151–160.
- [44] ZHANG Jia-hong, XING Shu-ming, AO Xiao-hui, et al. Effect of Ca modification on the elemental composition, microstructure and tensile properties of Al-7Si-0.3Mg alloy [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2019, 26 (11) : 1457.
- [45] CHEN S, LIU K, CHEN X G. Precipitation behavior of dispersoids and elevated temperature properties in Al-Si-Mg foundry alloy with Mo addition [J]. *Journal of Materials Research*, 2019: 217.
- [46] MOHAMED A M A, SAMUEL F H, SAMUEL A M, et al. Influence of Tin Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg and Al-Si-Mg Casting Alloys [J]. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 2008, 39, 490–501.

A356 Aluminum Alloy for Automobile Wheel Hubs-Research Progress and Influence of Alloying Elements on Its Microstructure and Properties

HE Fang¹, ZHUANG Lin-zhong², HE Guo-yuan¹, LI Hong-xiang², YI Guo-yu¹

(1. Dare Wheel Manufacturing Co., Ltd., Zhenjiang 212300, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract:

Nowadays, A356 alloy is the most widely used alloy for automotive wheels. However, its low mechanical properties are restricting its widespread application to modern lightweight wheels. Further optimizing A356 alloy composition or developing a new type of high-strength cast aluminum alloy for automobile wheels is one of the most effective methods for realizing the lightweight requirements of modern wheels. In this review, we briefly summarized the latest research progress of A356 alloy for automobile wheel hubs, and expounds the influence rule of alloying elements on the microstructure and mechanical properties. At the same time, the development tendency of novel cast aluminum alloys with high strength and ductility is also proposed in this paper.

Key words:

A356 alloy; lightweight; mechanical properties; alloying