

稀土元素变质 A356 铝合金的研究进展

杜青春 臧立根 董艳宾
(包头盛泰汽车零部件制造有限公司)

摘要 总结了目前国内外采用稀土对 A356 铝合金变质的研究进展,归纳了稀土元素对 A356 铝合金的变质效果。综合目前的研究结果,结合商业化 A356 铝合金应用的实际情况,认为采用 DOE 成分设计方法对相对价廉的二元、甚至多元稀土或稀土与其他元素的复合变质体系进行成分设计是有前景且符合实际的。

关键词 A356 铝合金;稀土元素;变质

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2020.02.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Rare Earth Element Reinforced A356 Alloy

Du Qingchun, Zang Ligen, Dong Yanbing
(Baotou Shengtai Auto Parts Manufacture Co., Ltd.)

Abstract: The research progress in rare earth modification of A356 alloy was reviewed. The modification effects of various RE elements on A356 alloy were reviewed. Combined with commercial application of A356 alloy, the method of relatively cheap binary, even multi-component rare earth or rare earth complex modification systems with other elements is a promising and practical direction by DOE composition design.

Key Words: A356 Alloys, Rare Earth Element, Modification

A356 铝合金是含 Si、Mg 增强元素的 Al-Si 系亚共晶铸造铝合金,由于其密度小、成形性和耐蚀性好等特点,被广泛应用于汽车、航空航天器制造等领域。尤其在铸造铝合金车轮领域,国内每年消耗该合金约 200 余万 t。

目前采用 Ti、Sr 变质 A356 铝合金制造的车轮,热处理后轮辐抗拉强度与伸长率不超过 270 MPa 与 5%。随着对产品品质、性能需求的不断提升,对 A356 铝合金强度与伸长率的要求也越来越高。添加稀土元素既能净化熔体又能细化 α -Al 晶粒与针片状 β -Si 相,还能消除 β -AlFeSi 相的有害作用,因此,具备多种功效的稀土进行变质成为探索的热点。本课题总结了目前国内外采用稀土元素改善 A356 铝合金组织与性能研究的进展,可为 A356 铝合金的应用与研究提供参考。

1 A356 铝合金特性

A356 铝合金凝固时先析出 α -Al 相,残余液相达到共晶成分时析出 α -Al 相与 β -Si 相的共晶组织而凝固,随温度进一步降低,过饱和的 α -Al 相中析出 Mg_2Si 相。

所以 A356 铝合金组织主要是由 α -Al+ Mg_2Si + β -Si 组成。针片状 β -Si 对基体的割裂作用使合金的力学性能受到影响^[1]。

通常提升 A356 铝合金性能的主要途径为增加可溶于 α -Al、并在凝固时可作为异质形核质点的元素,或引入可阻碍 α -Al 枝晶生长的相,从而细化基体晶粒;同时球化 β -Si 相,消除针片状 Si 对基体的割裂作用。目前 A356 铝合金通过加入 Ti、Sr(0.02%~0.06%)元素细化 α -Al 晶粒、减小二次枝晶间距及改善针片状 β -Si 相形态来改善合金性能^[2]。热处理也是 A356 铝合金常用的增强手段,T6 处理可有效促进 β -Si 相在 α -Al 相中的回溶,与 Mg 形成更多均布的 Mg_2Si 增强相;同时也促进 β -Si 相溶断与细化^[3],从而达到改善铝合金性能的目的。

2 稀土变质的研究进展

2.1 单一元素变质效果

据报道,Er^[4~6]、Eu^[7]、Gd^[8]、Y^[9~11]、Nd^[12,13] 等元素均对 α -Al 与 β -Si 晶粒具有细化作用。随着铝合金中

收稿日期:2019-11-01;修改稿收到日期:2019-11-14

基金项目:内蒙古自治区科技厅科技重大专项资助项目(2018 年度);内蒙古自治区科技创新引导资助项目(KCMST2018017)

第一作者简介:杜青春,男,1978 年出生,工程师,内蒙古包头(014046),电话:0472-4192924,E-mail:dujie111_0@163.com

引用格式:杜青春,臧立根,董艳宾. 稀土元素变质 A356 铝合金的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2020,40(2):152-155.

DU Q C, ZANG L G, DONG Y B. Research progress in rare earth element reinforced A356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(2): 152-155.

稀土含量增加,晶粒细化作用先增加后减小,在某一值时达到最优,稀土含量再增加会形成过变质,导致晶粒粗化。关于 Sc 的细化效果有两种观点,PRAMOD S L 等^[14]认为铝合金中含 0.2%~0.4% 的 Sc 时,随 Sc 含量

增加,对合金中 α -Al 相与 β -Si 相细化效果明显;而黄吉等^[15]与何兵等^[16]认为,Sc 的最佳含量为 0.2%,超过该含量会导致 β -Si 相粗化。各元素最优含量及其对 A356 铝合金性能的影响见表 1。

表 1 不同稀土元素对 T6 态 A356 铝合金组织与性能的影响

Tab.1 Effects of various RE elements on microstructure and properties of A356 alloy

编号	元素	$w_B/\%$	效果			最佳含量/ %	最佳力学性能			
			α -Al	β -Si	β -Fe		抗拉强度/MPa	提高幅度/%	伸长率/%	提高幅度/%
1	Er	0.1~0.4	改善	改善	-	0.3	311.2	32.4	8.6	91.0
2	Eu	0.02~0.1	改善	改善	-	0.1	265.0	6.0	14.7	53.0
3	Sc	0.1~0.4	改善	改善	改善	0.4	300.0	25.0	8.4	40.0
4	Ga	0.1~0.4	改善	改善	改善	0.2	289.4	23.0	8.2	50.0
5	Y	0.1~0.7	改善	改善	改善	0.3	383.8	26.7	4.8	70.0
6	Nd	0.01~0.09	改善	改善	改善	0.03	302.0	14.8	3.1	47.6
7	La	0.2~1.0	-	改善	-	1.0	273.0	0	6.92	0
8	Ce	0.2~1.0	-	改善	-	1.0	273.0	0	5.38	0

稀土对 α -Al 相的细化机理一般认为有两种。一种为促进形核机理,如 Eu 与 Al、Si 形成的 Al_2Si_2Eu 可作为核心,增加了 α -Al 相的形核率,从而细化基体相。另一种为抑制生长机理,Er、Sc、Gd、Y、Nd 等与合金中 Al、Si 元素形成 Al_3Er 、 Al_3Sc 、 $GdAl_2Si_2$ 、 Al_2Si_2Y 、 $Al-Si-Nd$ 等化合物颗粒,在基体相生长前沿形成成分过冷,从而抑制 α -Al 相的生长,达到晶粒细化的效果。该类元素对 β -Si 相的细化机理均为在凝固前沿富集,改变 β -Si 相生长方向或抑制其生长,达到细化和变质的目的;Sc、Gd、Y、Nd 对 β -AlFeSi 相亦有细化作用^[17],其机理均为抑制生长机制。

添加 Er、Eu、Gd、Y、Nd 后,A356 铝合金的力学性能随合金中元素含量增加呈抛物线趋势,在晶粒细化最佳点达到极值^[14]。其中,添加 0.3% 的 Y,A356 铝合金 T6 热处理后的抗拉强度最高,达 383.8 MPa,但伸长率偏低,只有 4.85%。这可能与 Fe 含量(1.0%)及热处理因素有关。Er 含量为 0.3% 的效果次之,T6 处理后最大抗拉强度与伸长率分别达 311.2 MPa 及 8.6%。Eu 含量为 0.1%,对铝合金的伸长率提升效果最好,T6 处理后其伸长率达 14.7%。

La^[18]与 Ce^[19]对 A356 铝合金的作用相似,含量在 1.0% 时对共晶 Si 具有细化作用,当其含量大于 0.6% 时对 A356 铝合金伸长率提升有帮助,但由于形成 Al-Ti-La-Mg、Al-Si-La 与 Al-Ce-Ti-Si-Mg、Al-Si-Ce 等脆性化合物,其含量在 0.2%~1.0% 之间,铝合金的力学性能均未得到明显改善。

2.2 复合添加变质效果

在不同稀土元素对 A356 铝合金性能改善机制与效果逐步清晰的情况下,鉴于目前部分元素价格高昂及单一元素改善效果偏低等问题,采用成本相对低廉的元素复合添加引起研究者的关注,但目前该方面的报道还不是很多。

徐佐等^[20]研究了 Mg、Ce 复合添加对 A356 铝合金的增强作用并指出,提高 Mg 含量可有效增强 Ce 对 β -Si 相的变质效果。KANG J 等^[21]的研究进一步验证了徐佐的观点,Mg 可有效增强 Ce 对 α -Al 相及 β -Si 相的细化作用。而 Mg 与 Ce 的复合添加可提高 A356 铝合金力学性能,Mg 含量为 0.75%、Ce 含量为 0.1% 的 A356 铝合金经 T6 处理后抗拉强度与伸长率分别达 313 MPa 与 5.7%,见表 2。但 Mg、Ce 的最佳复合添加

表 2 不同元素复合添加对 A356 铝合金组织与性能的影响

Tab.2 Effects of various element compound addition on microstructure and mechanical properties of A356 alloy

编号	元素	$w_B/\%$	效果		最佳含量/ %	最佳力学性能				热处理 状态
			α -Al	β -Si		抗拉强度/MPa	提高幅度/%	伸长率/%	提高幅度/%	
1	Mg	0.35~0.75	改善	改善	0.75	313	20.3	5.7	23.9	T6
	Ce	0.10			0.10					
2	Sr	0.01~0.04	改善	改善	0.02	287	13.9	10.2	168.0	T6
	Ce	0.016~0.064			0.032					
3	Zr	0.25~1.0	改善	改善	0.25	322	22.9	3.4	50.0	T6
	Gd	0.4			0.40					
4	Sb	0.05~0.20	-	改善	0.05	317	10.8	9.7	70.2	铸态
	Te	0.01~0.10			0.05					

量仍需深入研究。

WU D Y 等^[22]研究 A356 铝合金中添加 0.2%~0.8% 的 Al-5Sr-8Ce 中间合金的结果表明, A356 合金中 α -Al 相与 β -Si 相的尺寸随 Al-5Sr-8Ce 添加量增加而减小, 含量大于 0.4% 后细化效果不明显。与未添加 Al-5Sr-8Ce 中间合金相比, 含量为 0.4% 时 A356 铝合金的综合性能最好, 见表 2。可见 Sr、Ce 复合添加对 A356 铝合金伸长率的改善明显。另外, Sr、Ce 复合添加后可缩短固溶时间约 190 min, 这对工程应用具有实际意义, 可节约热处理的能耗, 提升生产效率。

LIU W Y 等^[23]研究发现, Zr 与 Gd 复合添加显著细化了 A356 铝合金中 α -Al 相, 同时获得了较 Zr、Gd、Sr 单独添加更细小的纳米级共晶 Si 颗粒, 说明复合添加具有更好的细化效果。Gd 含量为 0.4% 时, 随 Zr 含量的增加合金晶粒逐步细化, 当 Zr 含量超过 0.25%, 细化作用逐步弱化, 同时 A356 铝合金的力学性能也达到峰值, 见表 2。

胡中潮等^[24]研究了 A356 铝合金中添加 Sb、Te 对其组织与性能的影响。结果表明, Sb、Te 对共晶 β -Si 均有细化作用, 单独添加时, 含量在 0.1% 时达到较好的变质效果, 相比而言, Te 的细化效果稍优于 Sb。混合添加 0.05% 的 Te 与 0.05% 的 Sb 时变质效果最好, 此时 A356 铝合金的力学性能也达到最佳。

由上可见, 复合添加较单一稀土表现出更好的增强效果, 有些单一添加效果不明显的元素如 Ce, 在复合添加时表现出了良好的效果。从表 2 看出, 4 个复合体系中有 3 个变质后 A356 铝合金性能超过 300 MPa。其中 Sr、Ce 复合变质虽在抗拉强度上的提高改善效果不及其他 3 个体系, 但对伸长率的提高上表现优异。

3 结论与展望

目前的研究给出了各稀土元素及不同元素二元混合添加对 A356 铝合金变质的影响。综合来看, 这些研究仍处于效果与机理探究的阶段。试验最佳结果与目前商业化应用 Sr、Ti 变质 A356 铝合金性能比较的报道较少, 哪些元素仍具有挖掘的潜质尚不明确。另外, 从报道的情况来看, 即便是稀土最佳添加点时 A356 铝合金的力学性能仍与 A-U5GT、ZL205A^[25] 等高强铝合金的性能相差甚远, 所以采用单纯的稀土元素实现对 A356 铝合金性能增强的前景并不乐观。

关于对同一稀土元素最佳添加比例的不同观点, 一方面与试验条件有关, 另一方面也与研究的方法有关。近年来随着试验设计 (DOE) 技术的不断推广, 该方法已在科学研究、工业生产最佳工艺参数探寻等领域取得了良好的使用效果。DOE 是采用正交试验与统计方法

对试验或工艺参数进行主动设计变化, 从而用最少的试验筛选并取得最优参数组合的一种试验方法。随 Minitab 及 SAS-JMP 等软件的普及, DOE 的计算分析日益普及。Minitab 软件中有一项“混料设计”功能, 专门用于分析不同组分与组成物特性间关系及最佳含量确定的模块, 至少可以同时研究 3 个组分变化对研究特性的影响规律与最佳含量范围。但目前该方法在材料研究领域的应用较少, 在材料领域最佳含量的分析仍停留在有限的试验点上, 可尝试引入 DOE 中混料设计模块对元素最佳添加比例进行分析以提高研究的效率与分析的准确度。

基于部分稀土的价格、可获得性及单一添加效率、工艺便捷性等问题, 如 Mg、Cu、Sr、Ce、Er 等价格相对便宜的二元、三元甚至多元稀土或稀土与其他元素的混合变质体系将是未来有待探索的化学增强方式, 但目前此方面仍缺乏一些必要的数据与结论, 亟待进一步的研究与探索。

参 考 文 献

- [1] 钱翰成, 吴奇峰, 赵建华, 等. 铸造亚共晶铝硅合金绿色化规划探讨[J]. 特种铸造及有色合金, 2002(6): 1-4.
- [2] 姜峰, 索忠源. 热处理对不同 Sr 含量变质 A356 铝合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 29-33.
- [3] CAVALIERE P, CERRI E, LEO P. Effect of heat treatments on mechanical properties and damage evolution of thixoformed aluminum alloys[J]. Materials Characterization, 2005, 55: 35-42.
- [4] 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, 2015, A626: 102-107.
- [5] COLOMBO M, GARIBOLDI E. Er addition to Al-Si-Mg based casting alloy: Effects on microstructure, room and high temperature mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 1 234-1 244.
- [6] 张丽凤, 王社则, 田博彤. 稀土 Er 对汽车轮毂用 A356 铝合金组织与性能的影响[J]. 上海金属, 2019, 41(3): 67-72.
- [7] MAO F, YAN G Y. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 896-906.
- [8] SHI Z M, WANG Q. Microstructure and mechanical properties of Gd modified A356 aluminum alloys[J]. Journal of Rare Earths, 2015, 33(9): 1 004-1 009.
- [9] WAN B B, CHEN W P. Effect of trace yttrium addition on the microstructure and tensile properties of recycled Al-7Si-0.3Mg-1.0Fe casting alloys[J]. Material Science & Engineering, 2016, A666: 165-175.
- [10] 张建新, 高爱华. 微量 Y 对 Al-Mg-Si 系合金组织性能的影响[J]. 航空材料学报, 2011, 32(1): 6-9.
- [11] 卢亚琳, 于小健. 稀土 Y 对 A356 铝合金微观组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(10): 2 415-2 418.

TiAl 合金铸锭发展现状及制备方法探讨

周中波 卫 娜 张利军 吴天栋
(西安西工大超晶科技发展有限公司)

摘 要 综述了 TiAl 合金的发展,针对采用真空自耗电弧熔炼制备 TiAl 合金铸锭时易出现成分不均匀和开裂问题,从过程控制、工艺改进、采用新的熔炼方法等方面进行了探讨,并给出了解决措施。

关键词 TiAl 合金;真空自耗电弧熔炼;铸锭;成分均匀性;裂纹

中图分类号 TG146.23 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2020.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development Status and Preparation Technologies of TiAl Alloy Ingot

Zhou Zhongbo, Wei Na, Zhang Lijun, Wu Tiandong
(Xi'an Super Crystal Sci-Tech Development Co., Ltd.)

Abstract: The development of TiAl alloy was reviewed. Aiming at the problems in composition uniformity and cracking in the preparation of TiAl alloy ingots, it is analyzed for the process control, process improvement and new technologies for melting, and the measures to solve the problems were put forward.

Key Words: TiAl Alloys, Vacuum Consumable Arc Melting, Ingot, Composition Uniformity, Crack

随着航空发动机推重比的不断提高^[1],一方面涡轮入口温度持续增高,要求在高温下材料具有较高的强度、优良的抗蠕变和抗氧化等综合性能;另一方面要提高推重比,需减轻发动机自身的质量,因此开发新型耐高温轻质合金具有重要的现实意义。高温钛合金在航

空发动机中的用量占发动机总质量的 25% 以上^[2],但传统的固溶钛合金高温稳定性差及抗氧化性能不良,最高使用温度一般不超过 650 °C,不能满足航空发动机热端部件的服役要求^[3]。而镍基高温合金的使用温度虽然能达 1 100 °C,接近合金的初熔温度,且其密度较大,

收稿日期:2019-11-03;修改稿收到日期:2019-11-25

基金项目:西安博士后创新基地科研基金资助项目(16)

第一作者简介:周中波,男,1983 年出生,高级工程师,西安(710200),电话:15319902880,E-mail: bopie@163.com

引用格式:周中波,卫娜,张利军,等. TiAl 合金铸锭发展现状及制备方法探讨[J]. 特种铸造及有色合金,2020,40(2):155-159.

ZHOU Z B, WEI N, ZHANG L J, et al. Development status and preparation technologies of TiAl alloy ingot[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(2):155-159.

[12] TANG Q, ZHAO J H. The effects of neodymium addition on the intermetallic microstructure and mechanical properties of Al-7Si-0.3Mg-0.3Fe alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 741: 161-173.

[13] 檀廷佐,姚正军,袁灿,等. 稀土钕对亚共晶铝硅合金组织及性能的影响[J]. 机械工程材料,2012,36(11): 36-40.

[14] PRAMOD S L, RAVIKIRANA. Effect of Sc addition and T6 aging treatment on the microstructure modification and mechanical properties of A356 alloy[J]. Material Science & Engineering, 2016, A674: 438-450.

[15] 黄吉,程和法. Sc 对 A356 铝合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2015,35(12): 1 318-1 321.

[16] 何兵,覃铭. Sc 含量对 Al-Si 铸造铝合金组织与力学性能的影响[J]. 铸造技术,2017,38(10): 2 360-2 364.

[17] TZENG Y C, WU C T. Effects of Scandium addition on iron-bearing phases and tensile properties of Al-7Si-0.6Mg alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2014, A593: 103-110.

[18] TSAI Y C, CHOU C Y. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487: 157-162.

[19] TSAI Y C, LEE S L. Effect of trace Ce addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, 34(5): 609-616.

[20] 徐佐,吴大勇. Mg 与稀土 Ce 混合添加对 A356.2 铝合金组织与性能的影响[J]. 铸造,2016,65(9): 855-859.

[21] KANG J, SU R. 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: 267-278.

[22] WU D Y, KANG J. Utilizing a novel modifier to realize multi-refinement and optimized heat treatment of A356 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 628-640.

[23] LIU W Y, XIAO W L. Synergistic effects of Gd and Zr on grain refinement and eutectic Si modification of Al-Si cast alloy[J]. Journal Material Science & Engineering, 2017, A693: 93-100.

[24] 胡中潮,于慧. Sb、Te 变质对 ZL101 合金组织和性能的影响[J]. 铸造,2018,67(6): 502-506.

[25] 李元元,郭国文. 高强韧铸造铝合金材料研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2000(6): 45-47.

(编辑:栗万仲)