

稀土元素在铸造镁合金中的应用及研究进展

李华成^{1, 2}, 冯志军^{1, 2}, 占亮^{1, 2}, 郝建飞^{1, 2}, 李泽华^{1, 2}, 何昊^{1, 2}

(1. 沈阳铸研科技有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 铸造镁合金中添加稀土元素可显著改善镁合金的工艺性能、力学性能与耐热性能。本文系统总结了稀土元素在Mg-Al、Mg-Zn、Mg-RE铸造合金中的应用现状及研究进展, 探讨了稀土元素对铸造镁合金组织性能影响规律及作用机理, 梳理归纳了添加稀土元素常用铸造镁合金的力学性能, 总结了铸造镁合金稀土元素强化作用机制, 并对高性能稀土铸造镁合金的发展趋势与未来应用进行了展望。

关键词: 稀土元素; 力学性能; 铸造镁合金; 强化机制

镁合金是目前世界上最轻的金属结构材料之一, 比重小, 比强度和比刚度高, 能承受较大的冲击、振动载荷, 对碱、汽油、煤油、苯及矿物油的耐蚀性好, 还有优良的切削加工性能和抛光性能^[1]。在交通运输、航空航天、汽车、医疗器械等领域具有广阔的应用前景, 同时镁合金轻量化效果显著, 在军工武器装备、3C等产品轻量化中有广泛应用。但镁合金也存在熔炼过程极不稳定, 铸造缩松、热裂缺陷严重, 高温强度、抗蠕变性能、耐腐蚀性能较差等问题, 限制了其广泛应用^[2]。稀土元素在镁合金中有很好的固溶度, 稀土元素的添加可有效细化晶粒尺寸, 对合金的室温、高温力学性能提升显著, 且熔炼时阻燃效果明显。因此, 本文综述了稀土元素对铸造镁合金组织和力学性能的影响规律, 并进一步总结了稀土在镁合金中的强化机理, 提出了高性能镁合金稀土合金化的思路。

1 含稀土铸造镁合金研究现状

1.1 Mg-Al-RE 系镁合金

Mg-Al系合金具有铸造性能良好、生产成本较低等优点, 但合金的室温、高温力学性能较低、耐热性差, 限制了其应用。Mg-Al合金中存在基体均匀分布的连续析出相和以层片状分布于晶界的非连续析出相, 然而形貌粗大的非连续析出相恶化了合金的力学性能^[3]。添加RE元素后, 可以抑制非连续相的析出, 提高Mg-Al系镁合金的高温力学性能, 目前已经开发的含稀土元素Mg-Al系合金有AZ合金、AS合金、ACM合金等。

Zhang等^[4]在AZ61合金中加入稀土Sm后, 合金的铸态组织包括Al₂Sm和Mg₁₇Al₁₂相, 稀土合金化后晶粒细化效果显著, 经过热处理后, 添加了2%Sm的合金力学性能得到提高。Wang等^[5]探究了微量Gd对铸态AZ91合金组织和力学性能的影响, 添加Gd后, 合金中形成Al₃Mn₃Gd相, 作为非均匀形核的质点, Mg₁₇Al₁₂相被显著细化, 随着Gd含量增加, 合金的抗拉强度和伸长率提升显著, 当Gd含量在0.5%时, 合金的铸态性能优异。陈雷和Wang等^[6-7]在AZ80合金中加入Nd后, 粗大连续的Mg₁₇Al₁₂相转为细小和断续分布, 合金中形成了杆状Al₁₁Nd₃相和块状Al₂Nd相, 稀土相显著延迟了时效时间, 热处理后屈服强度显著提高。

在镁合金中添加不同的稀土元素会降低彼此在镁基体中的固溶度, 改善析出相形貌, 合金的强化效果增强。Jiang等^[8]在AZ80合金中复合添加了稀土Nd和Gd, 随着

作者简介:

李华成(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为高强度稀土合金化镁合金制备。E-mail: 381165765@qq.com

通讯作者:

冯志军, 男, 研究员, 博士生导师。电话: 024-25375708, E-mail: 13909816093@139.com

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

04-0359-06

收稿日期:

2022-11-30 收到初稿,
2023-02-02 收到修订稿。

Gd的添加,合金中 $Al_{11}RE_3$ 相逐渐向 Al_2RE 相转变,继续添加Gd后,稀土相发生团聚,导致合金性能下降。

AS系合金具有较好的力学性能和蠕变性能,不过随着Si含量增加,基体中会形成粗大的 Mg_2Si 相,降低合金的力学性能。朱文杰等^[9]研究了Ce对Mg-5Al-2Si力学性能的影响,合金铸态组织中出现 $Al_{11}Ce_3$ 、 $CeSi_2$ 相,随着Ce含量的增加, $CeSi_2$ 相逐渐增加, $Al_{11}Ce_3$ 相

逐渐减少,Ce的添加有效细化了 Mg_2Si 相的尺寸、形貌、分布,当Ce添加量为0.4%时,铸态合金的室温力学性能最佳。LIU等^[10]在Mg-7Al-1Si合金中复合加入了0.5%Gd和0.5%Ca后,合金表现出最小的蠕变比,原因是Gd的加入形成了 Al_2Gd 相, $Mg_{17}Al_{12}$ 相减少,同时 Mg_2Si 相细化,提高了合金的蠕变性能。表1为部分Mg-Al系合金力学性能及其强化相。

表1 部分Mg-Al系镁合金力学性能与强化相
Table 1 Mechanical properties and strengthening phases of the Mg-Al magnesium alloys

合金	状态	UTS/MPa	YS/MPa	EL/%	强化相	文献
AZ61+2%Sm	T6	252	146	5.1	Al_2Sm 、 $Mg_{17}Al_{12}$	[4]
AZ91+0.5%Gd	F	230	—	8.0	Al_2Gd	[5]
AZ80+0.6%Nd	T6	221	164	4.1	$Al_{11}Nd_3$ 、 Al_2Nd	[6]
AZ80+1.0%Nd	T6	231	141	4.4	$Al_{11}Nd_3$ 、 Al_2Nd	[7]
AZ80+0.6%Nd+0.6%Gd	F	215	145	8.3	$Al_{11}Re$ 、Al-RE-Mn	[8]
Mg-5Al-2Si-0.4Ce	F	205	—	16.6	Mg_2Si 、 $Al_{11}Ce_3$ 、 $CeSi_2$	[9]

1.2 Mg-Zn-RE 系合金

Zn在镁中最大固溶度为6.2%,固溶度随温度的降低而下降,是Al之外十分有效的合金化元素,具有固溶和时效双重强化作用。Mg-Zn合金析出序列为:SSSS(过饱和固溶体)→GP区→ β'_1 (Mg_4Zn_7)→ β'_2 ($MgZn_2$)→ β ($MgZn$ 或 Mg_2Zn_3)^[11-12]。Nie^[13]研究了Mg-Zn合金中不同析出相对基面滑移的阻碍作用,根据图1所示,时效析出的柱面盘状析出相强化效果最好,杆状相次之,基面盘状相强化效果最差。

在Mg-Zn合金中添加稀土元素可以提高合金的铸造性能和蠕变抗力,ZM2合金就是在($Zn=3.5\% \sim 5.0\%$, $Zr=0.5\% \sim 1.0\%$)基础上添加0.7%~1.7%Ce。代晓腾^[14]等研究了不同Ce含量的Mg-6Zn合金在热处理下的组织变化影响,随着Ce含量的增加,Mg-Zn相形成受到抑制, $MgZnCe$ 相逐渐增多,固溶处理后Mg-Zn相完全固溶, $Ce_5(Mg,Zn)_4$ 相转变为 $Mg_{17}Ce_2$ 相,时效处理后Zn原子再以 $MgZn$ 、 $MgZn_2$ 相形式析出,第二相种类仍为 $Mg_{17}Ce_2$ 相。Wang等^[15]研究

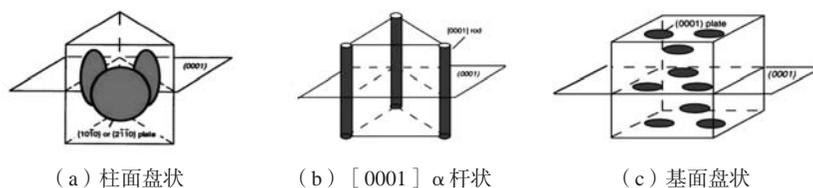


图1 Mg-Zn合金不同析出相类型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different precipitates in the Mg-Zn alloy

了在Mg-4.2Zn-0.7Zr合金中添加了1.5%富Ce混合稀土的组织 and 力学性能的影响,合金在325℃时效10h热处理后,细小致密的短棒状 β'_1 相在晶粒内部析出,合金的力学性能提高,其抗拉强度、屈服强度、伸长率分别达到247 MPa、159 MPa、15.6%。

章继涛^[16]发现在Mg-5Zn-0.6Zr镁合金中添加稀土Gd后,粗大的网状 $MgZn_2$ 相显著细化,形成了2~5 μm 细小弥散分布 $MgZnGd$ 相,阻碍位错运动,性能得到提升;当Gd的添加量在1%时,力学性能最优,抗拉强度和伸长率分别达到223 MPa和7.6%。

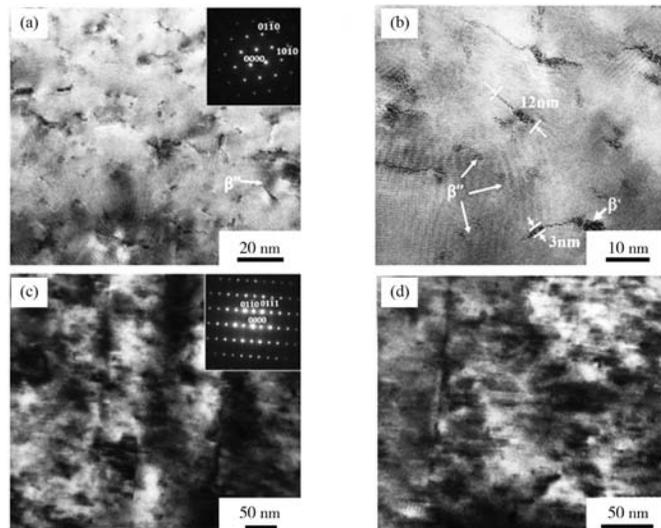
不同稀土元素添加到Mg-Zn系合金中,RE元素之

间会发生置换,提升合金性能,赵永成等^[17]在Mg-6Zn-1.5Y-0.8Zr合金中分别添加了1%、2%、3%的稀土Sm,Sm分别置换了 $Mg_3Y_2Zn_3$ 和 Mg_3YZn_6 中的Y,形成 $Mg_3(Y,Sm)_3Zn_3$ 和 $Mg_3(Y,Sm)Zn_6$ 相,并主要存在于后者中,当Sm添加量2%时,相比没有添加Sm合金,其抗拉强度和伸长率提高15%以上。白雪^[18]探究了Nd对Mg-6Zn-1.5Y-0.8Zr合金影响,与添加Sm相似,添加Nd同样置换了 $Mg_3Y_2Zn_3$ 和 Mg_3YZn_6 中的Y,形成 $Mg_3(Y,Nd)_2Zn_3$ 和 $Mg_3(Y,Nd)Zn_6$ 相,但主要存在于前者中,相比没有添加Nd的合金,抗拉强度和伸长率提高了25%以上。

1.3 Mg-RE 系合金

Mg-RE系合金是开发高性能镁合金的重要方向, RE元素在镁合金中固溶度越大, 强化效果越明显, Nd、Y、Gd在镁中的固溶度依次增大。Mg-Gd系合金的时效析出有4个阶段: α -Mg $\rightarrow\beta''$ (DO19) $\rightarrow\beta'$ (COBC) $\rightarrow\beta_1$ (FCC) $\rightarrow\beta$ (FCC)^[19]。周丽萍等^[20]探究了Mg-12Gd合金的时效析出行为, 主要析出相为 β' 相, 随着时效时间的增加, 析出相的尺寸增长速度减慢, 合金的硬化效果先增强后减弱, 在225℃时效16 h后, 在该温度下合金的强化效果最佳。Mg-Gd系合金中同时添加多种稀土元素对合金的强化效果提升显著, 例如GN、VW合金^[21-22]。VW合金是利用稀土Y代替部分Gd, 时效过程中析出大量的 β' 相, 合金的抗拉与屈服强度显著提高, 但该合金的伸长率较低。GN合金是利用轻稀土Nd代替部分Gd, 时效过程中析出DO19结构的 β'' 相, 合金硬化效果显著, 但韧性下降, 相比VW合金, 其屈服强度较低。Mg-Y系合金强化原因同样是DO19结构的 β'' 亚稳相形成, 其典型商业牌号有WE43^[23]等。

在Mg-RE系合金中加入少量Zn可以提高合金伸长率, 改善镁合金的焊接性能。ZM6(Nd=2.0%~2.8%, Zn=0.2%~0.7%, Zr=0.4%~1.0%)是具有代表性的Mg-Nd系铸造镁合金。艾江^[24]探究了Nd对ZM6合金力学性能的影响, 添加Nd后合金组织得到细化, 晶界上析出Mg₁₂(Nd, Zn)相, 随着Nd的增加, 合金的硬度和抗拉强度增加, 当Nd含量超过3%时, 室温抗拉强度开始下降。Zhan等^[25-26]在Mg-2.6Nd-0.5Zn-0.5Zr合金中加入1.5%Gd后, Mg₁₂Nd相的热稳定性提高, 合金经固溶时效处理后, 晶内析出相明显增多, 继续添加到4.5%Gd, 合金组织中出现Mg₁₂Gd、Mg₅Gd相, 在530℃固溶8 h后, 大部分共晶相已固溶到基体中, 在205℃时效16 h后, 析出尺寸大约为0.5~3.0 μm的强化相, 其尺寸比铸态合金更细小, 力学性能显著提高。Xie等^[27]研究了Gd对Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr合金组织性能的影响, 随着Gd含量增加, 合金中时效析出带增多, β'' 析出相的长径比增加、体积分数增大, 如图2所示, 合金性能显著提高。表2为部分Mg-RE系合金的力学性能数据。



(a) 和 (b) 为 β'' 和 β' 在 $B=[0001]$ a 方向上的明场相分布; (c) 和 (d) 为 $B=[1120]$ a 方向

图2 TEM透镜下合金200℃时效16 h的基体析出相

Fig. 2 TEM micrographs results of the matrix precipitation of the base alloy aging at 200 °C for 16 h

表2 部分Mg-RE系合金力学性能
Table 2 Mechanical properties of the Mg-RE magnesium alloys

合金	状态	UTS/MPa	YS/MPa	EL/%	文献
Mg8Gd2.5Nd0.5Zr	T6	251	228	3.5	[21]
Mg6Gd2.5Y1Nd0.5Zr	T6	289	241	4.1	[22]
WE43	T6	345	196	7.3	[23]
Mg2.6Nd1.5Gd0.5Zn0.5Zr	T6	295	165	7.5	[26]
Mg4.5Gd2.6Nd0.5Zn0.5Zr	T6	325	205	4.0	[27]
Mg4.5Gd3Nd0.2Zn0.5Zr	T6	343	200	5.4	[28]

Mg-RE合金中添加一定量Zn元素后, 合金的力学、耐热性能得到提高。M. Matsuda等^[28]在Mg-1Zn-2Y合金快速凝固中发现了长周期堆叠顺序(LPSO)结构, 在LPSO结构中存在4种类型堆叠结构10H、14H、18R、24R。Zn元素可以促进LPSO相的形成, 同时也是 β 系列沉淀相颗粒组成元素, 时效时LPSO相结构阻碍 β 相粒子长大, 当 β 系列沉淀颗粒和LPSO相共存时, 镁合金的力学性能和耐蚀性进一步提高。孟娇等^[29]研究了Zn对Mg-Gd-Zn-Zr合金组织与性能的影响, 随着Zn含量增多, LPSO相的体积分数也增加, 合金性能开始

下降,但抗蠕变性能仍高于WE54合金,其制备的Mg-11Gd-1Zn-0.5Zr铸造镁合金抗拉强度达到416 MPa,伸长率为7.1%。胡捷^[30]研究了不同Y的含量对Mg-10Gd-1Zn-0.5Zr镁合金组织与力学性能的影响,添加Y后,合金中形成的第二相增多,同时Y可以成为异质结晶核心,阻碍晶粒的长大,当Y添加量从1%增加到2%时,合金中粗大的条状Mg₅(Gd、Y、Zn)、片层状的Mg₁₂(Gd、Y)Zn和LPSO相减少,鱼骨状的LPSO相阻碍了晶粒的长大,颗粒状的Mg₂₄(Gd、Y、Zn)₅相增多,合金抗拉强度、屈服强度分别从229 MPa和166 MPa提高至237 MPa和189 MPa。孟令刚^[31]研究发现Y/Zn比小于2.3时,铸态下晶界处第二相全部转为具有LPSO结构的Mg₁₀(Gd、Y)Zn相,Mg-5Gd-2Y-2Zn-0.5Zr获得优异的高温抗拉强度240 MPa,比同等稀土含量的WE43提高近30 MPa。Nd在Mg-Gd-Y-Zn-Zr合金中抑制了LPSO相的形成,LPSO相的体积分数和β相颗粒析出数量减少,合金性能得到强化。Zhang等^[32]发现在Mg-8Gd-5Y-2Zn-0.5Zr合金中添加Nd可提高固溶和时效态力学性能,随着Nd含量增加,晶粒尺寸先减少后增大,LPSO相显著减少,Mg₅(Gd、Y、Zn)相增加,当Nd含量为0.5%时,合金的综合力学性能达到最优,其抗拉强度、屈服强度、伸长率分别达到308 MPa、252 MPa、5.3%。

2 稀土对铸造镁合金强化作用机制

2.1 细晶强化

金属晶体是由许多晶粒组成的多晶体,单位体积内的晶粒数目越多,晶粒越细,当细晶粒受到外力作用后塑变较分散,塑变较均匀,应力集中较小,而且晶粒越细晶界面积越大,晶界越曲折,越不利于裂纹的扩展,通过细化晶粒可以提高金属材料力学性能。

细化晶粒对提高合金强度和塑性有重要意义,屈服强度与晶粒尺寸之间的重要联系。根据霍尔佩奇公式:

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{0.5} \quad (1)$$

式中: σ_s 为屈服强度,MPa; σ_0 为单晶体的屈服强度,MPa; K 为Taylor系数; d 为晶粒尺寸,mm。例如在Mg-Al系合金中加入Gd、Sm、Nd、Ce等稀土元素后,晶粒尺寸显著细化,性能显著提高。Bonnah^[33]在AZ91合金复合添加1.5%Sm和0.8%Ca后,铸态晶粒尺寸由239 μm降至66 μm,铸态组织显著细化。吴安如等^[34]在AZ91合金中加入0.5%Ce后,晶粒细化效果显著,晶粒尺寸由108 μm减小到42 μm。表3所示为常用稀土元素添加后对Mg-Al合金的晶粒细化效果。

2.2 热处理强化

合金元素固溶到α-Mg基体中时,其原子半径和弹

表3 稀土对Mg-Al系合金晶粒细化效果
Table 3 Effects of the rare earths on grain refinement of the Mg-Al alloys

合金成分	原始晶粒尺寸/μm	细化后晶粒尺寸/μm	文献
AZ61+2%Sm	100	50	[4]
AZ91+0.5%Gd	160	100	[5]
AZ80+1.0%Nd	440	125	[6]
AZ91+1.5%Sm+0.8%Ca	239	66	[33]
AZ91+0.5%Ce	108	42	[34]

性模量与基体元素存在差异,基体会产生点阵畸变,阻碍位错运动,称为固溶强化。当合金元素在基体的固溶度随温度变化时,便从基体中析出强化相,也称为时效强化。铸造镁合金时效处理后,合金强度得到提高,伸长率有所降低,时效强化效果与析出相尺寸、形态、体积分数、硬度及与基体的共格位向关系有关。张玉^[35]研究了新型Mg-6Zn-2Sm-0.4Zr合金的热处理工艺,经450℃固溶保温28 h后,晶界处共晶相逐渐溶解,晶粒尺寸随着固溶时间增加明显上升,200℃时效保温过程力学性能随着保温时间增加呈现先上升后下降的趋势,12 h时达到峰时效,抗拉强度达258 MPa、伸长率为14.4%。Gu等^[36]研究了双级时效热处理工艺对EV31合金组织性能的影响,与200℃单级时效相比,双级时效保温时间由16 h降至2 h,析出相尺寸减少50%,析出密度增加一倍,如图3所示,抗拉强度由273 MPa增至288 MPa,伸长率由4.9%升至6.6%。

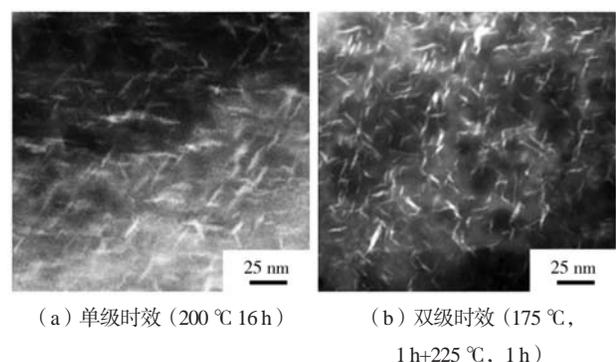


图3 时效处理下β'相分布的STEM像

Fig. 3 HADDF-STEM images of distribution of the β' phase

2.3 弥散强化

合金熔体在凝固时会析出弥散分布的高熔点化合物相,在晶粒内呈弥散质点或粒状分布,在塑性和韧性下降不大前提下,可显著提高合金的强度和硬度,且颗粒尺寸越细小、分布越弥散均匀,强化效果越好,是一种有效的材料强化手段。根据Orwan位错强化

机制,在发生塑性变形时,位错线不能直接切割第二相粒子,但在外力作用下位错线可以绕过第二相粒子形成大量位错环,位错不断增殖,位错数量和密度显著增加,位错影响区的晶格畸变能大幅提升,位错运动阻力增加,材料得到有效强化。通过控制弥散相的形貌、尺寸、数量,可有效提高合金的力学及耐热性能。

3 总结与展望

(1) Mg-Al系铸造合金高温性能差,易产生疏松、热裂等缺陷,可通过控制合金析出相种类及数量,研究析出相组织形貌、分布与热处理工艺对Mg-Al系铸造合金组织性能的影响,分析单相稀土与复合稀土添加对合金微观组织与耐热性能的影响,扩大Mg-Al系铸造合金应用范围。

(2) Mg-Zn系铸造合金添加RE元素可显著细化晶粒尺寸,改善合金力学性能,但单一的热处理工艺未能将稀土元素的有益添加效果进行充分发挥;添加复合稀土元素并结合系统地精密热处理工艺,可在显著提高合金材料力学性能、高温性能,明显改善铸态微观组织的基础上,大幅降低生产成本,缩短制造周期。

(3) Mg-RE系铸造合金高含量RE元素的添加加剧了偏析缺陷的发生,选用复合稀土添加工艺结合合金成分与凝固冷速调控,在Mg-RE系合金中形成有益的LPSO相可显著提高合金的综合力学性能;构建出Mg-RE系铸造合金组织-成分-性能共步协控耦合模型,为高强高韧耐热耐蚀Mg-RE系铸造合金及产品开提供工艺支撑。

参考文献:

- [1] 《轻金属材料加工手册》编写组.轻金属材料加工手册(上册)[M].北京:冶金工业出版社,1979.
- [2] 蒋斌,刘文君,肖旅,等.航空航天用镁合金的研究进展[J].上海航天,2019,36(2):9.
- [3] BALASUBRAMANI N, SURESH M, SRINIVASAN A, et al. Observation of the suppression of $Mg_{17}Al_{12}$ formation in a La-containing AZ91 alloy[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(19): 8374-8376.
- [4] ZHANG Qing, LI Quanan, CHEN Jun, et al. Grain refinement strengthening of Sm in AZ61 alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3752(1433): 171-174.
- [5] WANG J S, LI X B. Simultaneously improving strength and ductility of AZ91-type alloys with minor Gd addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 689-699.
- [6] 陈雷,姜楠,孟令刚,等.稀土Nd对AZ80镁合金显微组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,37(5):576-580.
- [7] WANG Yaxiao, FU Junwei, YANG Yuansheng. Effect of Nd addition on microstructures and mechanical properties of AZ80 magnesium alloys[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 1322-1328.
- [8] 姜楠,陈雷,孟令刚,等. Effect of neodymium, gadolinium addition on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(6): 632-637.
- [9] 朱文杰,李德江,曾小勤,等. Ce对铸造Mg-5Al-2Si合金中Mg₂Si相改性及力学性能的影响[J].铸造,2019,68(7):679-683.
- [10] LIU Jian, WANG Wuxiao, ZHANG Sha, et al. Effect of Gd-Ca combined additions on the microstructure and creep properties of Mg-7Al-1Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 620: 74-79.
- [11] BUHA J. Characterisation of precipitates in an aged Mg-Zn-Ti alloy[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2009, 472(1/2): 171-177.
- [12] BUHA J, OHKUBU T. Natural aging in Mg-Zn(-Cu) alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(9): 2259-2273.
- [13] NIE J F. Effects of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in magnesium alloys[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(8): 1009-1015.
- [14] 代晓腾,马鸣龙,李永军,等.热处理对Mg-6Zn-xCe合金组织与导热性能的影响[J].中国有色金属学报,2021,31(3):639-648.
- [15] WANG Yingdong, WU Guohua, LIU Wencai, et al. Influence of heat treatment on microstructures and mechanical properties of gravity cast Mg-4.2Zn-1.5RE-0.7Zr magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2013, 23(12): 3611-3620.
- [16] 章继涛.稀土Gd对Mg-5Zn-0.6Zr镁合金铸态组织与力学性能的影响[J].铸造,2017,66(3):242-245.
- [17] 赵永成,颜世宏,李宗安,等.稀土元素Sm对Mg-Zn-Y合金组织结构和力学性能的影响[J].稀有金属,2011,35(5):667-672.
- [18] 白雪,王小明,王志刚,等.稀土Nd对Mg-Zn-Y合金组织结构和力学性能的影响[J].材料导报B,2013,27(7):8-12.
- [19] 汤伊金,章桢彦,靳丽,等. Mg-Gd系合金时效析出研究进展[J].中国有色金属学报,2014,24(1):8-24.
- [20] 周丽萍,曾小勤,李德江,等. Mg-12Gd合金的时效析出行为[J].中国有色金属学报,2015,25(6):1409-1416.
- [21] 蔚晓嘉,刘邱祖,韩世平.热处理对Mg8Gd2.5Nd0.5Zr合金组织和力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2017,27(1):82-88.

- [22] 石洪吉, 邓运来, 张凯, 等. Nd 含量对 Mg-6Gd-2.5Y-0.5Zr 合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2017, 27 (9): 1785-1793.
- [23] LIU Zhijie, WU Guohua, LIU Wencai, et al. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of sand-cast Mg-4Y-2Nd-1Gd-0.4Zr magnesium alloy-science direct [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (7): 1540-1548.
- [24] 艾江. 稀土Nd对ZM6镁合金力学性能的影响 [J]. 陶瓷, 2019 (3): 31-37.
- [25] 占亮, 乐启焱, 冯志军, 等. 铸造镁合金Mg-2.6Nd-1.5Gd-0.5Zn-0.5Zr组织和性能研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1298-1303.
- [26] ZHAN Liang, LE Qichi, FENG Zhijun, et al. Effect of Gd addition on mechanical and microstructural properties of Mg-xGd-2.6Nd-0.5Zn-0.5Zr cast alloys [J]. China Foundry, 2020, 17 (03): 34-40.
- [27] XIE He, WU Guohua, ZHANG Xiaolong, et al. The role of Gd on the microstructural evolution and mechanical properties of Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr alloy [J]. Materials Characterization, 2021, 175: 111076.
- [28] MATSUDA M, II S, KAWAMURA Y, et al. Variation of long-period stacking order structures in rapidly solidified Mg97Zn1Y2 alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 393 (1-2): 269-274.
- [29] 孟姣, 薛烽, 孙晶晶, 等. Zn含量对Mg-Gd-Zn合金显微组织与力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44 (10): 2429-2434.
- [30] 胡捷, 程仁菊, 李上民, 等. Y对Mg-10Gd-xY-1Zn-0.5Zr (x=1, 2) 镁合金铸态显微组织和力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2021, 35 (Z2): 456-459.
- [31] 孟令刚. Mg-Gd-Y-Zn-Zr合金长周期结构形成机制与组织性能研究 [D]. 辽宁: 大连理工大学, 2014.
- [32] ZHANG Xingguo, MENG Linggang, FANG Canfeng, et al. Effect of Nd on the microstructure and mechanical properties of Mg-8Gd-5Y-2Zn-0.5Zr alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 586 (dec.1): 19-24.
- [33] REDEEMINA C B, FU Y, HAO H. Microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy with minor additions of Sm, Si and Ca elements [J]. China Foundry, 2019, 16 (5): 319-325.
- [34] 吴安如, 付庆琳, 艾孝文, 等. Ce对AZ91镁合金组织演变及力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (3): 247-251.
- [35] 张玉, 黄晓锋, 马振铎, 等. 热处理工艺对Mg-6Zn-2Sm-0.4Zr镁合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2017, 27 (10): 1961-1969.
- [36] GU Kan, ZENG Xiaoqin, CHEN Bin, et al. Effect of double aging on mechanical properties and microstructure of EV31A alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (9): 2606-2614.

Application and Research Progress of Rare Earth Elements in Casting Magnesium Alloys

LI Hua-cheng^{1,2}, FENG Zhi-jun^{1,2}, ZHAN Liang^{1,2}, HAO Jian-fei^{1,2}, LI Zhe-hua^{1,2}, HE Hao^{1,2}

(1. Shenyang Zhuyan Science and Technology Limited Company, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co. Ltd., CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

The technical properties, mechanical properties and heat resistance of cast magnesium alloys can be significantly improved by adding rare earth elements. This paper systematically summarized the application status and research progress of the rare earth elements in Mg-Al, Mg-Zn and Mg-RE casting alloys. It also discussed the effect of rare earth elements on the microstructure and properties of the cast magnesium alloys and the mechanism of action. The mechanical properties of the cast magnesium alloys with rare earth elements and the strengthening mechanism of the rare earth elements were summarized. The development trend and future application of high performance rare earth cast magnesium alloys were also prospected.

Key words:

rare earth element; mechanical properties; cast magnesium alloy; strengthening mechanism