DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20150359

添加 Al-5Ti-B 和 Al-2Zr-Er 对铸态铝锌镁合金力学性能的影响

丁 俭[1],靳子惠[1],杜喜望[1],赵乃勤[2],赵维民[1],夏兴川[1],刘利华[3]

(1.河北工业大学 材料科学与工程学院,天津 300130;2.天津大学 材料科学与工程学院,天津 300072;
3.中信戴卡股份有限公司,河北 秦皇岛 066003)

摘 要:铝锌镁合金以其优异的力学性能广泛应用于航空、航天、交通运输等工业领域,而铝合金的细化一直是铝加工行业的研究重点.为细化晶粒并提高其力学性能,本文将传统细化剂 Al-Ti-B 与 RE 复合添加到铝锌镁合金中,借助于 XRD、光学显微镜、扫描电镜、拉伸实验等测试方法研究了不同细化剂对 Al7Zn2.4Mg 合金组织及其力学性能的影响.试验结果表明,合金中加入 Al-5Ti-B 和 Al-Zr-Er 后细化效果明显,单独添加 Al-Ti-B 的细化效果最好,但仍有少部分的晶粒保留的树枝晶形态.随着 Al-Ti-B 和 Al-Zr-Er 添加量的增多,合金的晶粒发生明显变化,塑性也随之增加,其中,添加 0.4wt.%Al-5Ti-B 细化剂对合金的塑性影响最大,而抗拉强度呈先增大后减小的趋势,复合添加 0.2wt.%Al-2Zr-Er 和 0.2wt.%Al-5Ti-B 细化剂的合金晶粒圆整且未出现树枝晶,晶界析出物最少平均抗拉强度最高.Al-Ti-B 和 Al-Zr-Er 均可细化铸态铝锌镁合金的晶粒,同时添加两种细化剂更有利于提高合金的综合力学性能.

关键词:铝锌镁合金;晶粒细化;力学性能;铸态组织;Al-Ti-B;Al-Zr-Er

中图分类号:TG146 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-0299(2017)02-0039-06

Effect of Al-5Ti-B and Al-2Zr-Er on mechanical properties of As-cast Al-Zn-Mg alloys

DING Jian[1], JIN Zihui[1], DU Xiwang[1], ZHAO Naiqin[2], ZHAO Weimin[1], XIA Xingchuan[1], LIU Lihua[3]

(1.School of Material Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130,China;2.School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072,China;3.CITIC Dicastal Limited by Share Ltd, Qinhuangdao 066003,China)

Abstract: Al-Zn-Mg alloys have been extensively used for structural applications in aerospace and transportation industry due to their excellent mechanical properties. Moreover, the grain refinement of aluminum allolys is the research focus these years. In order to refine grain size and enhance the mechanical properties of Al-Zn-Mg alloys, traditional refiner Al-5Ti-B and RE were added into the cast alloy. The mechanical behavior of Al7Zn2.4Mg alloys with different Al-5Ti-B and Al-2Zr-Er addition was investigated using X-ray diffractometry (XRD), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and mechanical test (MET). The experimental results show that the addition of Al-2Zr-Er and Al-5Ti-B can significantly refine the grain size. However, some dendrites still remain at the mere addition of Al-Ti-B as refiner . At the same time, plasticity increases with the addition of Al-Ti-B and Al-Zr-Er. The specimen which has 0.4wt.%Al-5Ti-B has the most obvious effect on its plasticity, whereas the result is not the same for tensile strength. The tensile strength of the specimen first increases then decreases with the contents of Al-Ti-B increasing. Alloys with 0.2wt.% Al-2Zr-Er and 0.2wt.% Al-5Ti-B contents change the growth morphology from dendritic to fine equiaxed grain. It exhibits less precipitation on the grain boundary and higher tensile strength during tensile test. The experimental results show that both two refiners can significantly refine the grain size, but co-addition of 0.2wt.%Al-2Zr-Er and 0.2wt.% Al-5Ti-B is more useful to its comprehensive mechanics performance.

Keywords: Al-Zn-Mg; Zr; Er; grain refining; mechanical property; rare earth; Al-Ti-B

收稿日期:2015-12-26. **网络出版时间**:2017-04-12.
基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA031002).
作者简介:丁 俭(1977—),女,副教授,博士;
赵乃勤(1961—),女,教授,博士生导师;
赵维民(1959—),男,教授,博士生导师.
通信作者:丁 俭,E-mail:djian0122@126.com.

Al-Zn-Mg 合金是迄今为止应用范围较广的一种合金,该合金强度高,其自然时效倾向较大,不需要热处理就可以得到较高强度.此外,该合金还具有高模量、低密度以及良好的热变形性能等优点,是航空航天、交通运输和其他工业部门的重要

结构材料之一.铝及铝合金的细化是铝加工业的研究重点[1]. 在众多细化晶粒方法中,添加生核剂简便易行,是国内外的常用方法[2].目前,使用最多的铝合金晶粒细化剂是 Al-Ti-B 系列晶粒细化剂[3],Al-Ti-B 作为传统细化剂在铝锌镁合金中有重要的作用[3-4].但 Al-Ti-B 的冶金质量差,夹杂物含量高,在细化铝及铝合金的同时也污染了铝及铝合金.

稀土元素以其独特的原子核结构广泛应用于生产中的各个领域.尽管其在铝合金中的应用起步较晚,但发展很快,且稀土是典型的活性元素,能减小铝合金的枝晶间距,防止合金产生偏析,还可以消除气孔,去除合金中的杂质.因此,目前稀土大量用于改善铝锌镁合金的组织,提高合金的力学性能[5-7].稀土元素 Er 在铝合金中可形成高温稳定相 Al_3Er 相[8-9],同时合金中的 Al_3Er 也可以作为形核时的非均质核心[10-11].而 Al_3Zr 与基体共格也可有效提高合金的抗拉强度.Al_3Er、Al_3Zr协同作用,强烈钉扎位错和晶界, 阻止位错重组和亚晶界的迁移, 延缓亚晶的形核和长大.

中南大学张新明等人[11]在铝锌镁铜合金中加入稀土元素 Er、Zr 和 Y,试验表明合金中添加 Zr,复合添加 Er、Y 和复合添加 Zr、Er 和 Y 均可明显细化晶粒,其中以单独添加 Zr 的细化效果最好.黄兰萍等[12]在铝锌镁合金中加入微量的 Zr 和 Er,发现单独添加微量 Er 以及 Er、Zr 复合添加对铝锌镁合金的细晶作用远小于单独添加微量 Zr.但 Er、Zr 复合添加的铝锌镁合金的抗应力腐蚀性能优于单独添加微量 Er、Zr 的铝锌镁合金,且 Er、Zr 复合添加的铝锌镁合金综合性能最好.

本文研究了在铸态铝锌镁合金中加入不同含量的 Al-5Ti-B、Al-2Zr-Er 对基体的组织及对力学性能的影响.

1 实　验

本实验基体材料为 Al7Zn2.4Mg 合金,Al-Er 中间合金、Al-Zr 中间合金、工业纯铝,Al-5Ti-B 中间合金,主要合金元素成分如表 1 所示.实验中按照计算称取一定量的工业纯铝、Al-Er 中间合金和 Al-Zr 中间合金,利用北京物科光电技术有限公司生产的 WK 系列真空电弧炉,在 Ar_2 保护气氛下进行熔炼,制备 Al-2Zr-Er 细化剂.

本实验采用天津市通达实验电炉厂出品的 SG 节能坩埚电阻炉进行合金的熔炼,熔炼温度为 750 ℃,待 Al7Zn2.4Mg 合金熔化后经过一次精炼、保温、除渣后,加入细化剂,再进行第二次精炼、保温、除渣.将熔炼好的金属液体浇注于铜模中.待铜模中的合金完全凝固成锭后,取同一部位的铸态试样,砂纸打磨并抛光后使用 keller 试剂腐蚀 12 s 备用.采用 OLYCIA M3 观察材料的晶界、晶粒大小以及组织组成物.使用 Nova Nano SEM450 扫描电镜观察材料的表面形貌.利用 UTM5105X 型电子万能实验机进行拉伸试验,取 4 个拉伸试样的平均值.采用日本理学 smart Lab X 射线衍射仪对制备的 Al-2Zr-Er 细化剂进行物相分析,扫描角度为 10°~90°.

本实验除了制备铸态的铝锌镁试样外,还分别在铝锌镁基体中加入了 0.4 wt.%Al-5Ti-B、0.4 wt.%Al-2Zr-Er以及复合添加0.2 wt.% Al-5Ti-B 和 0.2 wt.% Al-2Zr-Er.利用 4 种成分的试样比较不同含量细化剂对铝锌镁基体的力学性能的影响.

表 1　实验原料的化学成分(质量分数/%)

Table 1　The composition of different master alloys((wt.%))

合金	化学成分				
Al-Zn-Mg	Zn	Mg	Cu	Al	
	6.980	2.420	0.230	余量	
Al-Zr	Zr	Fe	Si	Cu	Al
	10.120	0.045	0.042	0.008 7	余量
Al-Er	Er	Fe	Si	Al	
	9.370	0 .065	0.043	余量	
Al-Ti-B	Ti	B	Fe	Mn	Al
	5.000	1.000	0.100	0.025	余量
工业纯铝	Mg	Cu	Fe	Si	Al
	0.004	0.003	0.140	0.070	99.800

2 结果与讨论

2.1 Al-2Zr-Er 细化剂的 XRD 谱图

图 1 为合金的 XRD 谱图,可以看到,在细化剂 Al-2Zr-Er 中除基体 α(Al)外,还可见到第二相 Al_3Zr 明锐的衍射峰.但由于 Al_3Zr 与α(Al)的点阵常数非常接近,Al_3Zr 的主峰与 Al 的主峰几乎完全重合,因此 XRD 谱中有重叠峰.而本实验中 Al-Zr-Er 细化剂里 Zr、Er 的含量非常低,由于 XRD 分析设备精度有限,无法准确检测出来.

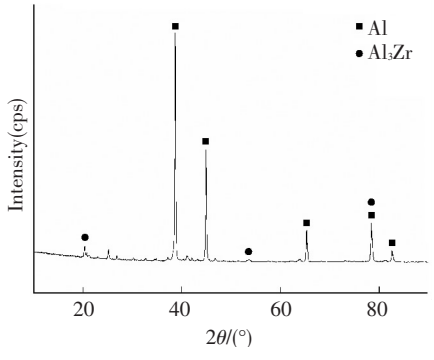


图 1　Al-2Zr-Er 细化剂 XRD 谱图

Fig.1　XRD of Al-2Zr-Er

2.2　铸态铝锌镁合金微观组织的分析

图 2 是不同成分 Al-Zn-Mg 合金在铸态下的显微组织.由 2(a)可见,合金成分为铝锌镁基体的合金组织全部为粗壮的树枝晶,晶粒粗大,平均枝晶间距为 28.71 μm.图 2(b)中复合添加 0.2wt.%Al-2Zr-Er和 0.2wt.%Al-5Ti-B 细化剂的合金组织,其基体的树枝晶大量减少,全部变为细小的等轴晶,平均晶粒尺寸在 50 μm 左右.图 2(c)中添加 0.4wt.%Al-2Zr-Er 的合金中晶粒尺寸减小很多,但仍有明显的树枝晶存在,平均枝晶间距为 18.31 μm.图 2(d)中添加 0.4wt.%Al-5Ti-B的合金微观组织晶粒尺寸最为细小,大部分为等轴晶,只有少部分的晶粒仍然保留树枝晶的形态,平均晶粒尺寸为 45 μm 左右.添加0.4wt.%Al-2Zr-Er的合金和添加0.4wt.%Al-5Ti-B的合金相较于基体,其晶粒尺寸变小.由此推断知,单独添加0.4wt.%Al-5Ti-B的合金和复合添加 0.2wt.%Al-2Zr-Er和 0.2wt.%Al-5Ti-B的合金的晶粒细化最为明显.

图 3 为加入铝锌镁合金细化剂前后的 SEM 图片.

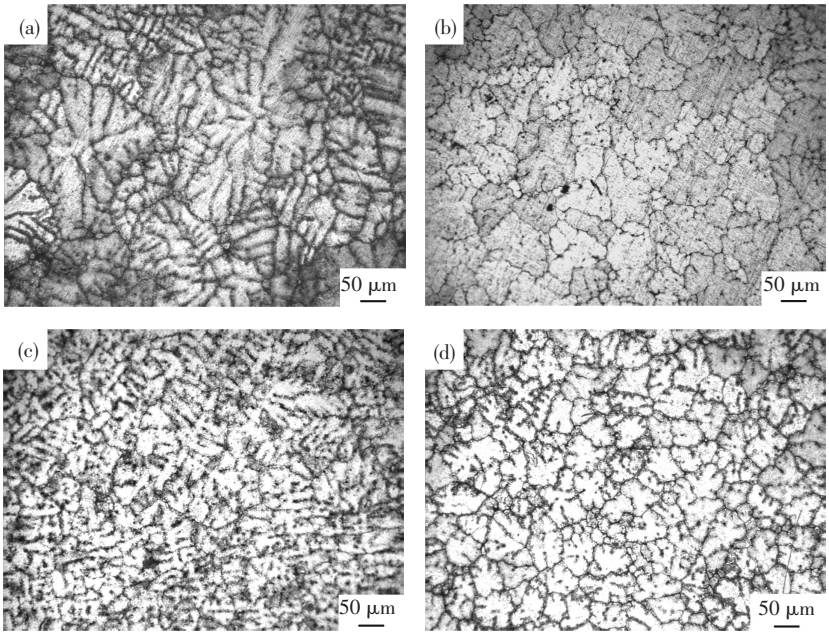


图 2　不同成分 Al-Zn-Mg 合金铸态组织

Fig.2　Microstructure of cast Al-Zn-Mg alloy with different content:(a) matrix alloy; (b) co-addition of 0.2wt.%Al-2Zr-Er and 0.2wt.% Al-5Ti-B; (c) addition of 0.4wt.% Al-2Zr-Er; (d) addition of 0.4wt.% Al-5Ti-B

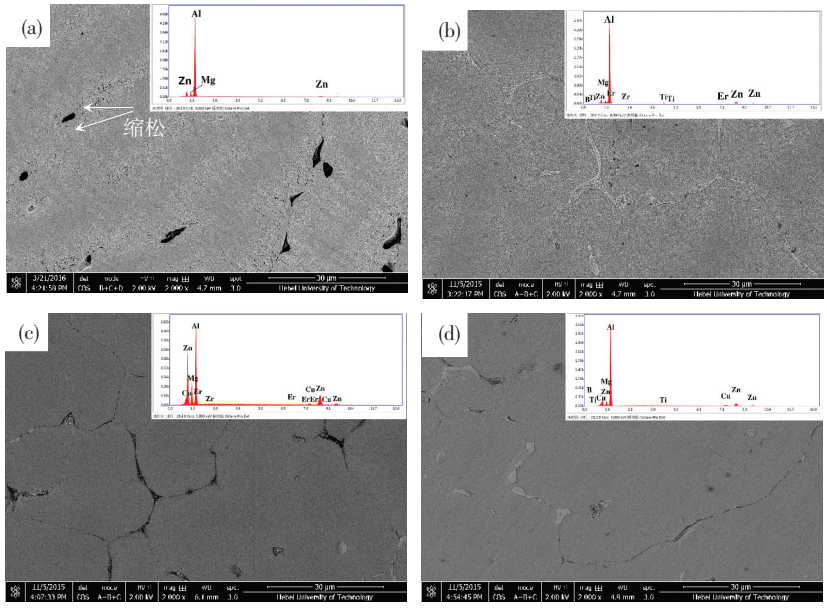


图 3　Al-Zn-Mg 合金加入不同细化剂后的 SEM 形貌和能谱图

Fig.3　SEM images and EDS of cast Al-Zn-Mg alloys: (a) matrix alloy; (b) co-addition of 0.2wt.%Al-2Zr-Er and 0.2wt.% Al-5Ti-B; (c) addition of 0.4wt.% Al-2Zr-Er; (d) addition of 0.4wt.% Al-5Ti-B

由图 3(a)可知,在铸态铝锌镁合金中,η 相主要以不规则的形状不连续地分布在晶界处,且在晶界附近和晶内沉淀相周围存在着明显的缩松;结合图 3(b)发现,复合添加 0.2wt.%Al-2Zr-Er和0.2wt.%Al-5Ti-B后,缩松减少,且晶界处和晶粒内部第二相增加,晶界处第二相连续成条,有些偏聚成块;只添加 0.4wt.%Al-2Zr-Er,第二相除少量分布在晶粒内部,主要以长条状和块状分布在晶界上,在某些微观缺陷部位也会产生第二相的聚集,块状第二相的尺寸不超过 8 μm;添加 0.4wt.%Al-5Ti-B细化剂,晶粒内部显微缩松几乎消失,第二相沿晶界析出.

2.3 铸态铝锌镁合金的力学性能

图 4 是添加不同成分的细化剂对铸态铝锌镁合金拉伸性能的影响.铝锌镁合金加入细化剂前后抗拉强度的结果如表 2 所示.由图 2 可见,由于铸态铝锌镁合金的显微组织为粗大的枝晶,合金的拉伸性能较低,抗拉强度为 216 MPa;复合添加0.2wt.%Al-2Zr-Er 和 0.2wt.%Al-5Ti-B 细化剂的铸态铝锌镁合金晶粒全部为等轴晶,抗拉强度和塑性均得到提高,且抗拉强度提高最多,提高了 35.2%,最高值达到了 307 MPa.添加 0.4wt.%Al-2Zr-Er的合金的组织相对铸态铝锌镁合金虽然变得细小,但大部分晶粒仍保持树枝晶的形态,因此,抗拉强度与未添加任何细化剂的铸态铝锌镁基体合金相比提高不多,平均抗拉强度相对于基体合金提高了 8.3%,但由于晶粒细化其塑性明显提高,由应力应变曲线可知,其延伸率仅次于添加 0.4wt.%Al-5Ti-B 的铝锌镁合金;添加 0.4wt.%Al-5Ti-B 的铸态铝锌镁合金晶粒最为细小,但仍有少部分的树枝晶存在,塑性延伸率提高幅度最大,合金抗拉强度提高了 25.5%;同时,对比基体合金和以上 3 种合金,通过应力应变曲线观察,发现随着 Al-2Zr-Er和 Al-Ti-B 添加量的增多,合金的塑性都有上升的趋势.上述结果表明,通过复合添加 0.2wt.%Al-2Zr-Er 和 0.2wt.%Al-5Ti-B 使铸态铝锌镁材料的抗拉强度提高了 35.2%,比单一添加 Al-5Ti-B 或者 Al-2Zr-Er 对于铸态铝锌镁基体的抗拉强度的影响大,这有利于满足铝锌镁合金作为铸造合金使用时的高强度性能要求,且随着 Al-2Zr-Er 和 Al-Ti-B 的添加量的增多,合金的塑性也逐渐提高.

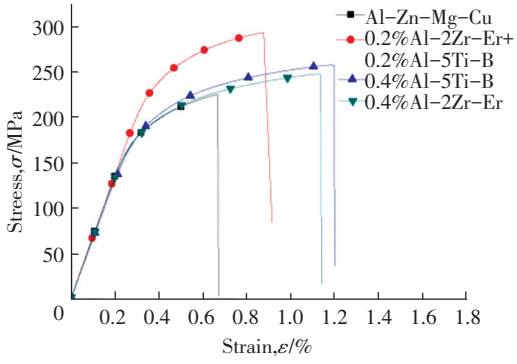


图 4 铸态 Al-Zn-Mg 合金的拉伸曲线

Fig.4 Tensile curves of cast Al-Zn-Mg alloy

表 2 铸态 Al-Zn-Mg 合金的抗拉强度

Table 2 Tensile strength of cast Al-Zn-Mg alloy

合金	成分	抗拉强度/MPa				平均抗拉强度/MPa	幅值/%	延伸率/%
1	Al-Zn-Mg 合金	216	221	217	219	216	0	0.68
2	复合添加 0.2wt.%Al-2Zr-Er 和 0.2wt.%Al-5Ti-B 细化剂	307	293	292	278	292	35.2	0.89
3	添加 0.4wt.%Al-2Zr-Er 细化剂	225	247	235	227	234	8.3	1.11
4	添加 0.4wt.%Al-5Ti-B 细化剂	273	280	264	267	271	25.5	1.20

Al-5Ti-B 添加到铝合金熔体后,$TiAl_3$相逐渐溶解,释放出游离的 Ti 原子,在凝固结晶过程中,TiB_2粒子由于其高熔点而保留在铝熔体中,部分 Ti 原子在其表面上偏聚形成 $TiAl_3$,即 $TiAl_3$ 和 TiB_2粒子都参与到 Al 晶粒的异质形核中[4].因此,添加微量的 Al-5Ti-B 可以使铝锌镁的显微组织从粗大的树枝晶细化为细小均匀的等轴晶.由图 2 可见,单独添加 0.4wt.%Al-5Ti-B 的合金和复合添加 0.2wt.% Al-2Zr-Er 和 0.2wt.% Al-5Ti-B的合金的晶粒细化最为明显,合金的抗拉强度也高于其他两种成分的合金,而添加 0.4wt.%Al-5Ti-B的铸态铝锌镁合金晶粒最为细小,因此,延伸率也最高.

在铝合金中复合添加微量 Er、Zr 元素,一部分的 Zr、Er 作为溶质原子将 α-Al 的晶格位置上溶剂原子进行置换而形成置换式固溶体,因此,在 Al 中形成了 Zr、Er 的固溶体,通过固溶强化机制达到强化基体的目的.由 X 射线衍射谱可知,另一

部分的 Zr、Er 在凝固时与铝锌镁基体析出初生金属间化合物 Al_3Er、Al_3Zr,并减小了晶粒尺寸.Al_3Zr与 Al 晶格常数接近,因此,与 Al 的错配度较低,晶格畸变也较小,是 α-Al 的优良的异质形核核心,因而细化效果好[13].Er 对于 Al 合金也有一定的细化作用,这符合稀土元素在铝合金中作用的一般规律[14-15].且 Al_3Er、Al_3Zr 热稳定性高[16],均匀的分布于基体中,当位错在基体中迁移时,位错必须绕过这些弥散的硬质颗粒形成 Orowan 环[17],使得位错迁移的阻力增大,抑制了基体内位错的迁移,提高了合金的强度.

另一方面,在 Al-Zn-Mg 合金中,合金的主要强化相为 Al2Zn3Mg3(T 相)、MgZn2(η 相)、Al2Cu(θ 相)等[18].与此同时,如图 2 和图 3 所示,在添加 Al-2Zr-Er 后,生成 Al_3Zr、Al_3Er 第二相粒子[16],使晶界上第二相粒子数量增加.相对于基体合金,在加入中间合金后,合金中的微观缺陷减少,且晶界处的第二相分布更加均匀,第二相主要以细小的短杆状存在;但在局部区域会造成第二相的聚集,使第二相以块状或连续的长条状分布在晶界处.这些在晶界处均匀分布的第二相组织,作为硬质相可阻碍变形过程中晶界的迁移,改善合金的强度.

3　结　论

1)合金中加入 Al-5Ti-B 和 Al-Zr-Er 后细化效果明显,对比添加同等含量的 Al-Ti-B 和 Al-Zr-Er,Al-Ti-B 的细化效果最好,但仍有少部分的晶粒保留的树枝晶形态.

2)加入细化剂后的合金力学性能均有一定程度的提高,随着 Al-Ti-B 和 Al-Zr-Er 添加量的增多合金的晶粒发生明显变化,塑性也随之增加,其中添加 0.4wt.%Al-5Ti-B 细化剂对合金的塑性影响最大,而抗拉强度呈先增大后减小的趋势,复合添加 0.2wt.%Al-2Zr-Er 和 0.2wt.%Al-5Ti-B 细化剂的合金平均抗拉强度增量最高.

3)通过将两种细化剂 Al-Ti-B 和 Al-Zr-Er 复合加入到铝锌镁合金中,在合金凝固时增加了异质形核核心,细化晶粒,并通过细晶强化,固溶强化,第二相强化等强化机制提高合金的综合力学性能.

Al-Ti-B 和 Al-Zr-Er 都可以细化铸态铝锌镁合金的晶粒,同时添加两种细化剂更有利于提高合金的综合力学性能.

参考文献:

[1] 许晓嫦, 刘志义, 党朋,等. 室温强塑性变形下回溶和再析出的机理研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(2):178-181.
XU Xiaochang, LIU Zhiyi, DANG Peng, et al. Mechanism of re-dissolution and re-precipitation of second phases in Al-Zn-Mg-Cu alloy under severe plastic deformation [J]. Materials Science and Technology, 2005,13(2):178-181.

[2] 郑开宏,王顺成,徐静, 等. Al-5Ti-1B 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金铸态组织与力学性能的影响[J].兵器材料科学与工程, 2014, 37(4): 36-40.
ZHENG Kaihong, WANG Shuncheng, XU Jing, et al. Effect of Al-5Ti-B on microstructure and mechanical properties of as-cast Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(4):36-40.

[3] 刘相法,边秀房.铝合金组织细化用中间合金[M]. 长沙:中南大学出版社,2012.

[4] MA T F, CHEN Z Y, NIE Z R, et al. Microstructure of Al-Ti-B-Er refiner and its grain refining performance [J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31(6):622-627.

[5] MURTY B S, KORI S A, CHAKRABORTY M. Grain refinement ofaluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying [J]. International Materials Reviews, 2002, 47(1): 3-29.

[6] 刘俊生,潘清林,李文斌,等.含 Sc 超高强 Al-Zn-Cu-Mg-Zr 合金的热变形行为和微观组织[J].材料科学与工艺, 2010,18(2):289-292.
LIU Junsheng, PAN Qinglin, LI Wenbin, et al. Studies on deformation behavior and microstructure evolution of super-high strength Al-Zn-Cu-Mg-Zr alloy containing Sc [J]. Materials Science And Technology,2010,18(2):289-292.

[7] MENG Y, CUI J, ZHAO Z, et al. Effect of Zr on microstructures and mechanical properties of an Al, Mg, Si, Cu, Cr alloy prepared by low frequency electromagnetic casting[J]. Materials Characterization, 2014, 92(6):138-148.

[8] FANG H C, CHAO H, CHEN K H. Effect of Zr, Er and Cr additions on microstructures and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 610(610):10-16.

[9] 杨军军, 聂祚仁, 金头男,等. 稀土铒在 Al-Zn-Mg 合金中的存在形式与细化机理[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(4):620-626.
YANG Junjun, NIE Zuoren, JIN Tounan, et al. Form andrefinement mechanism of element Er in Al-Zn-Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(4): 620-626.

[10] HUANG X, PAN Q, LI B, etal. Microstructure, mechanical properties and stress corrosion cracking of Al-Zn-Mg-Zr alloy sheet with trace amount of Sc[J].

Journal of Alloys & Compounds, 2015, 650:805-820.

[11] 张新明, 朱航飞, 李国锋,等. 微量 Zr,Er 和 Y 对 Al-Zn-Mg-Cu合金铸态组织的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(6):1196-1200.
ZHANG Xingming, ZHU Hangfei, LI Guofeng, et al. Effects of mini Zr, Er, Y on microstructures of cast Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Central South University (Science and Technology),2008,39(6):1196-1200.

[12] 黄兰萍,陈康华,李松.微量 Zr,Er 对 Al-Zn-Mg 合金组织与性能的影响[J].稀有金属材料与工程, 2009, 38(10): 1778-1782.
HUANG Lanping, CHEN Kanghua, LI Song. Effect of trace Zr and Er on Mechanical properties of Al-Zn-Mg alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009,38(10):1778-1782.

[13] SHI Y, PAN Q, LI M, et al. Effect of Sc and Zr additions on corrosion behaviour of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 612 (41):42-50.

[14] LI G, ZHAO N, LIU T, et al. Effect of Sc/Zr ratio on the microstructure and mechanical properties of new type of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 617:219-227.

[15] WANG S H, MENG L G, YANG S J, et al. Microstructure of Al-Zn-Mg-Cu-Zr-0.5Er alloy under as-cast and homogenization conditions [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(7):1449-1454.

[16] 李燕,文胜平,高坤元,等.Al-Er-Zr 合金的时效析出过程[J].中国有色金属学报, 2013, 23(2): 336-342.
LI Yan, WEN Shengping, GAO Kunyuan, et al. Aging and precipitation evolution of Al-Er-Zr alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2):336-342.

[17] LI G, ZHAO N, LIU T, et al. Effect of Sc/Zr ratio on the microstructure and mechanical properties of new type of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 617:219-227.

[18] 王少华. 高强铝合金电磁铸造及强韧化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.

(编辑 吕雪梅)