

以镁、锌、铝为主要合金元素的应用合金研究进展

李明珍,王世栋,叶秀深,李 权,吴志坚,火 焱

(中国科学院青海盐湖研究所,青海 西宁 810008)

摘 要:以镁、铝、锌为主要合金元素的镁铝合金材料是轻合金的基础,评述了镁合金和铝合金的优缺点及应用概况,介绍了 Zn、RE、Mn、Cu 等主要元素对合金微观组织、铸造性能、力学性能和抗腐蚀性能的影响。随着轻合金综合性能不断提高和改进,其应用前景更加广阔。

关键词:镁、铝合金;应用;性能改进

中图分类号:TG146.2

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2015)04-0066-07

前 言

镁、锌、铝是构成轻合金的主要元素,Mg-Zn-Al 三元合金因具有比强度和比刚度高、导热导电性能好、阻尼减震性和电磁屏蔽性强、易加工成形、废料易回收等优点,在汽车工业、电子工业、航空航天、家用电器、医疗器械等领域被广泛应用,成为轻合金的基础^[1-3]。近年来,随着汽车工业及航空航天的飞速发展,使用轻合金材料镁、铝及其合金已经成为汽车、飞行器等减重的重要措施^[4]。

1 镁合金的主要优缺点及应用简述

镁的熔点为 650 ℃,密度为 1.74 g·cm⁻³。纯镁的力学性能很低,但和铝、锌、锆、稀土等元素构成的合金及热处理后其强度大大提高。镁中加入 Al、Zn、Mn、Zr 及稀土等能制成 Mg-Al 系、Mg-Al-Zn 系、Mg-Mn 系、Mg-Zn-Zr 系、Mg-RE-Zr 系镁合金。Al 能提高合金的强度、铸造性能和耐蚀性;Zn 既能产生固溶强

化,又能产生时效强化,提高强度;Mn 和 Zr 能细化晶粒,净化合金,提高耐蚀性和耐热性;Mg-RE 系的固溶体和稀土化合物耐热性高,原子扩散慢,利于抗蠕变,是优良耐热镁合金的合金化元素。镁合金是目前工业上应用的最轻的合金,其比强度和比刚度高,具有优良的减振性能、电磁屏蔽性能、机械加工性能、散热性能和铸造性能,镁合金还具有尺寸稳定和便于回收利用的优点,以其独特的优势已成为 21 世纪重要的商用轻质结构材料^[5-7]。

在全球范围内,镁合金已连续 10 年保持 15%~25% 的增长率,这在现代工程结构材料中前所未有的。我国镁合金的用量自 2001 年以来,呈连年增长的态势,到 2009 年,用量已突破 40×10⁴ t。镁合金由于在实现轻量化、降低能源消耗、减少环境污染等方面具有显著作用,在国防工业、汽车工业、电子工业、医疗器械及健身器材等各个领域得到广泛使用,其中 80% 应用在汽车工业。世界汽车的镁合金用量正在以年均 20% 的速度增长,而这其中以 AZ 和 AM 两个 Mg-Al 系列的应用最为广泛^[8]。未来十几年,我国载货车和轿车对镁合金的需求量将以每年 7%~10% 的速度递增,2015 年预估可

收稿日期:2014-12-15;修回日期:2015-08-05

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAE01B04)和中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-06)资助

作者简介:李明珍(1973-),女,高级实验师,主要从事盐湖资源开发与应用研究工作。Email:lmzh1998@163.com。

通信作者:火 焱。Email:xnhuoyan@21cn.com。

达 6.9×10^4 t, 2020 年可达 7.56×10^4 t。世界各大汽车公司都已把采用镁合金零件的数量作为自身产品技术领先的标志。目前,汽车仪表、座位架、方向操作系统部件、引擎盖、变速箱、进气歧管、轮毂、发动机和安全部件上都有镁合金压铸产品的应用。在国防工业领域,为了提高武器远程精确打击和机动战术性能,武器装备的轻量化至关重要。目前,镁合金被应用于制造飞机、导弹、飞船、卫星、轻武器等重要武器装备的零部件。

然而,由于镁合金存在的显著缺点使其应用范围远不如铝合金。例如,①高温力学性能较差,当温度升高时,强度和抗蠕变性能大幅下降;②化学性质活泼,使镁合金在熔炼加工过程中易氧化燃烧;③耐腐蚀性能差;④室温条件下塑性变形能力差,加工成型能力弱^[9-10]。基于以上缺点,限制了镁合金的大量应用,因此对镁合金性能改善的研究就显得尤为重要^[11-12]。

2 铝合金的主要优缺点及应用简述

铝合金是现代文明的重要基础材料之一,因其具有高比强度和比模量、良好的导热性、导电性、断裂韧性,耐腐蚀,抗疲劳,而且可以焊接,冲压性能也好,可以铸件、压铸件、锻件和模锻件、板材、带材和箔材、挤压型材和管材以及粉末冶金零件的形式使用,以及生产成本低等一系列无可比拟的优越特性,获得了十分广泛的应用,成为各行业发展的基础材料,诸如在航空航天、军工兵器、交通运输、汽车船舶、建筑桥梁、电子电器、五金家具、机械动力、石油化工、农林渔牧、医疗卫生、文体娱乐等领域用作重要的结构件和装饰材料^[13-14]。尽管铝合金具有上述优点和特点,但是因铝的缺点和弱点,使合金本身带有缺点。主要包括,①铝的硬度比较低,与此同时其耐磨性也比较差;②铝的熔点比较低,铝和铝合金的使用温度不可超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此其温度的使用受到限制;③铝的电极电位很负,铝与异种金属接触时,容易作为阳极产生严重的电偶腐蚀;④铝合金在建筑材料当中相比其它材料耐碱性比较差^[15]。

目前全世界已正式注册的铝合金达千种以上,最常用的有 450 种,为世界经济的发展和人类文明的进步做出了巨大贡献。但是,随着科技的进步,国民经济和国防军工的现代化发展及人民生活水平的提高,有些合金已被淘汰。因此,急需研发性能更优异的新型铝合金^[16]。Al-Zn-Mg 合金在铝合金性能改进上有较好的发展,Zn 是铝合金中常用的合金化元素,在 Al 中溶解度极大,Zn 以固溶体的形式存在于铝合金基体中,起固溶强化作用,使合金的强度和硬度升高。Mg 是铝合金中主要强化元素,当 Mg 含量较低时,基本溶于铝中,随着镁含量的升高,与铝形成的固溶体增多,固溶强化作用增强,使合金强度和硬度升高^[17]。

作为高强高韧镁合金的主体,Al-Zn-Mg-Cu 系合金具有高的比强度和硬度、较好的耐腐蚀性能和较高的韧性、优良的加工性能及焊接性能,广泛应用于航空航天领域,成为该领域中重要的结构材料之一。近几十年来,开发高强高韧铝合金新材料成为铝合金发展的重要方向。锌与镁在铝合金中是形成强化相的主要元素,对合金产生明显的强化作用^[18]。当 Zn:Mg = 5:2 ~ 7:1 (质量分数) 时,其主要强化相为 MgZn 及 MgZn₂,合金的强度随着锌含量的增加而增加,但当锌含量超过 7% 时,合金与断裂韧性相关的性能急剧降低,焊接性能、耐蚀性能显著恶化。镁的含量超过形成 MgZn₂ 相所需的量时,还会产生补充强化作用^[19]。

3 含锌和铝的镁合金性能改进

3.1 Mg-Zn-Al 三元合金

金属镁是耐腐蚀性能最差的金属之一,力学性能低,故纯镁不能用作结构材料,必须通过合金化和工艺优化来进行改性,镁合金的合金化成分包括 Zn、Al、Mn、Cu、Ni、RE、Li、Ag、Zr、Si 等^[20-21],这些合金化成分对镁合金的性质影响很大。例如,锌和锆的加入会提升合金的韧性,锰的加入会改善合金的抗腐蚀性能,稀土的加入能改善合金的抗腐蚀性能及高温力学性能。Fe 等杂质对镁合金的负面影响较大,是限制镁

合金应用的重要原因之一^[22]。在这些合金中, 镁的含量通常在 85% 以上^[20-21]。

作为镁合金的主要合金化元素之一, 锌对镁合金的强化作用十分显著, 锌具有与镁相同的晶体结构(hcp), 原子半径相近, 易形成连续固溶体。质量分数约 2% 的 Zn 可溶入 Mg 中, 起固溶强化作用, 其余的 Zn 则会与 Mg 形成镁锌化合物。Zn 对镁合金的主要影响有, ①Zn 能固溶于镁合金中, 对镁合金起到固溶强化的作用, 少量的 Zn 可以增加镁合金中其它元素的固溶度, 进而提高其它元素的固溶强化作用; ②Zn 的加入能够去除合金中的杂质元素, 提高合金的耐腐蚀性能; ③Mg 与 Zn 的共晶温度仅为 342 °C, 增加含 Zn 量, 可以降低镁合金的熔点, 从而降低铸造生产所必需的过热温度。随着含 Zn 量的增加, 材料的硬度增加, 抗腐蚀性能得到提高。但是, 含 Zn 量过多不仅会造成材料的密度增大, 而且镁锌化合物增多, 会导致材料的脆性增加^[23-24]。

Al 是现有“标准牌号”镁合金中常用的合金元素, 作用与 Zn 相似, 除固溶强化镁固溶体之外, 还可与 Mg、Zn 形成化合物。由于 Al 的密度比 Zn 小得多, 增加 Al 含量, 降低 Zn 含量, 可以有效地减小镁合金的密度^[23-24]。Al-Mg 二元合金的共晶成分为 32.3% Al、67.7% Mg, 共晶温度 437 °C。在镁合金中加入 Al, 能有效地降低合金的液相线温度。但 Al 含量不易过多, 否则显微组织中会出现大块状的 γ 相 ($Mg_{17}Al_{12}$), 导致材料的脆性增大, 也不利于后续的固溶热处理。高锌镁合金中加入一定量的 Al, 可以形成结构更为复杂的化合物 $Mg_{32}(ZnAl)_{49}$, 这种化合物具有更高的显微硬度, 且更加弥散, 从而使材料的强度和硬度均有所提高^[24]。

在镁合金中加入常用的合金化元素锌和铝, 制成的 Mg-Zn-Al 三元合金具有高温性能较好、成本较低和铸造性能较好等方面的优势, 被认为是一种具有发展前途的高温抗蠕变镁合金, 然而这种合金的抗拉强度和冲击韧度有待进一步提高^[25-27]。在 Mg、Zn、Al 三元成分的基础上, 加入 RE、Mn 等成分可使合金的性能得到进一步改善。

3.2 Mg-Zn-Al-RE 四元合金

稀土是我国的特有资源, 同时也是镁合金的重要合金化元素, 对镁合金的性能有重要的影响。大部分稀土元素与镁的原子尺寸接近, 由于弥散分布的、热稳定颗粒相的存在, 使镁合金表现出较好的耐热性能。稀土元素可降低镁在液态和固态下的氧化倾向。以稀土为主要合金元素的铸造镁合金, 在室温和高温下固溶强化和沉淀硬化效果好。只要加入适当的稀土元素, 合金的晶粒被细化, 性能得到改善^[28]。

Mg-Zn-Al 系镁合金的晶粒粗大, 显微组织中第二相主要呈网状结构分布在合金的基体中, 影响了合金的力学性能。因此, 改善该系合金中第二相的形状和分布状态, 是改善该系合金力学性能的有效途径。在该系合金中加入少量 Ce, 可以有效地改善合金中第二相的形状、分布, 并细化合金的晶粒尺寸^[25]。在 Mg-Zn-Al 系镁合金中添加稀土元素之后, 合金的铸态组织得到细化, 并在显微组织中形成了铝的稀土相, 合金的时效峰值稍有提高, 时效峰值的出现时间因为稀土元素的添加而有所滞后。添加稀土元素使合金的室温拉伸性能得到提高^[29]。

在高锌镁合金, 如 ZA155 ($Mg_{80}Zn_{15}Al_5$) 中加入稀土之后, 合金的基体组织得到了细化, 力学性能得到提高。①ZA155 合金变质前晶粒粗大, 晶界上的三元相呈连续和半连续网状分布, 加入富铈混合稀土变质后, ZA155 合金铸态显微组织由 α -Mg 相、 φ ($Al_2Mg_5Zn_2$) 相、 τ [$Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$] 相、少量 $Mg_{17}Al_{12}$ 相和富铈的 $Mg_3Al_4Zn_2RE$ 化合物相所组成, 基体组织明显细化; ②在 ZA155 合金中加入富铈混合稀土变质后, 大部分富铈混合稀土与镁、锌、铝结合生成高熔点、高热稳定性的粒状和针状富铈稀土化合物相 ($Mg_3Al_4Zn_2RE$), 从而改善了晶界相的分布, φ ($Al_2Mg_5Zn_2$) 相和 τ [$Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$] 相由原来的网状分布变得不连续, 呈细条状和块状分布; ③ZA155 铸态合金的宏观硬度值随着富铈混合稀土加入量的增加而增大, 当加入 1.5% 的 RE 时, ZA155 合金的室温抗拉强度达到峰值 203 MPa, 比变质前

提高了21%,冲击韧度达到峰值 4.50 J/cm^2 ,比变质前提高了50%^[30-31]。

含锌7%~14%、铝3%~8%、稀土0.3%~1.5%(重量百分组成,其余为镁和不可避免的杂质)的高锌镁合金可以采用电阻坩埚炉熔炼,使用已商品化的镁合金覆盖熔剂,无需加入Be,或采用气体保护,能直接在大气环境中进行熔炼,稀土以中间合金的形式加入。该镁合金的着火点 $\geq 740^\circ\text{C}$,铸态拉伸强度 $\sigma_b \geq 200 \text{ MPa}$,延伸率 $\delta \geq 1.4\%$,经过固溶热处理后,强度 $\sigma_b \geq 260 \text{ MPa}$,延伸率 $\delta \geq 3\%$ ^[32]。

对 τ -型Mg-Zn-Al-RE高锌变形镁合金进行处理,可以提高其时效硬化效应。该合金中Zn的重量百分比为6%~10%,Zn/Al比为2~3,RE主要包括Er或富钇混合稀土,其重量百分比为0.1%~1.0%。首先对该合金的铸锭进行均匀化处理,然后通过热加工使合金中的非平衡化合物破碎,最后采用两步渐变式固溶处理促进化合物尽可能溶解。经过这样的处理,可有效促进Mg-Zn-Al三元高锌镁合金中非平衡共晶化合物的溶解,提高基体中Zn、Al的过饱和度,增强高锌变形镁合金的时效硬化效应。与常规T6处理相比,处理时间缩短,提高了生产效率^[33]。

3.3 Mg-Al-Zn-Mn 四元合金

Mg-Al-Zn-Mn四元合金可作牺牲阳极,其特点是密度小、理论容量大、电位负、极化率低,对钢铁的驱动电压较大($>0.6 \text{ V}$),适用于电阻率较高的土壤和淡水中金属构件的保护^[34]。根据镁合金中其它3种元素含量的不同,镁合金牺牲阳极的性能不同,其中性能较好和获得广泛应用的主要是Mg-6Al-3Zn-Mn合金,其表面溶解均匀,电流效率大于50%。铝是牺牲阳极中的主要合金元素,可与镁形成 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 强化相,提高合金的强度。但向工业镁中单独添加铝时,可形成大量的MgAl、 Mg_2Al_3 、 Mg_4Al_3 等金属间化合物,这些金属间化合物的存在,会增大镁的自腐蚀速度,加速固溶体的破坏。锌可降低镁的腐蚀率,减小镁的负差异效应,提高阳极电流效率。微量的锰可抵消杂质铁、镍的不良影响,当锰的添加量为0.3%时,

可使铁的允许含量达到0.02%,但同时电流效率也会有所降低。因此,杂质铁的含量以及相应的锰含量应尽可能低。铝、锌、锰的同时存在可进一步降低对工业镁中杂质含量的要求。为了获得良好的电化学性能,Mg-Al-Zn-Mn合金中的杂质含量应严格控制,在合金成分相近的条件下,杂质少的合金电流效率明显高于杂质多的合金^[35-36]。

3.4 Mg-Zn-Al-RE-Mn 五元合金

含Zn 15%、Al 5%、RE 1.5%的高锌镁合金中加入Mn后,其显微组织与力学性能发生了变化,含RE的高锌镁合金中原来的针状组织得到了不同程度的球化。随着Mn粉加入量的增加,合金的硬度逐渐增大,冲击韧性、强度先增后减,出现峰值。当Mn含量为0.4%时,冲击韧性达到最大值 5.06 J/cm^2 ,强度也达到最大值 227.2 MPa 。此时,合金组织的晶粒最细最均匀,针状组织也得到最大程度的改善,由原来的细长针状组织变成短粗棒状^[37]。由Mg、Zn、Al、Mn和RE可以制成高温高强镁合金,其组成为Mg-(6~10)Zn-(3~5)Al-0.3Mn-(0.5~1.5)RE。加入RE之后,晶粒细化,形成新相,合金的室温和高温力学性能得到提高,克服了ZAC8506镁合金加钙易氧化的缺点,制备工艺简单^[38]。

4 含锌和镁的铝合金性能改进

以上内容涉及以镁为大量主成分,以锌、铝等为少量添加成分的镁应用合金研究的进展及相关知识产权情况。近期,对于以铝为大量主成分,以锌、镁等为少量添加成分的Al-Zn-Mg系铝合金的研究也有一些专利和文献报道。Al-Zn-Mg系铝合金在航空工业有广泛的用途^[39],近期的研究进展主要体现在以下两方面。

4.1 耐腐蚀性能改进

铝与锌、镁组成的合金,强度及焊接性能良好,但耐腐蚀性能不理想。制备以Mg和Zn为主要元素、Ti和Zr次要元素、Cr和Mn为微量

元素的铝基合金,可使铝合金的耐腐蚀性能得到改进。合金的具体组成(按照质量份)为,1~1.5 份的 Mg、5.5~6 份的 Zn、0.01~0.03 份的 Ti、0.1~0.14 份的 Zr、0.01~0.02 份的 Cr 和 0.01~0.02 份的 Mn^[40]。通过熔炼过程中永磁搅拌、二次净化、双极实效等步骤,可制得性能良好的铝-锌-镁合金型材^[41]。含有锌、镁、铜的铝基合金的抗剥落腐蚀性能可得到一定的改进,该合金中含有 5.5%~10.0% 的锌、1.75%~2.6% 的镁和 1.8%~2.75% 的铜,在改善合金抗剥落腐蚀性能的同时,合金的断裂韧性也得到了一定的改善^[42]。向无铜的 7xxx 合金中添加银可以改善合金的均匀腐蚀和剥落腐蚀,并提高合金的强度^[43]。

4.2 综合性能调整

向合金中添加合金化元素,添加量过多时往往使合金的一些性能受到损害,各种添加元素相互补充、相互完善,才能有利于合金综合性能的提高。以往的 Al-Zn-Mg 系超塑性合金中含 Zn 量都在 5% 以上(有的达到 10.7%),Zn 是有利于超塑性的合金元素,但 Zn 含量过高时对合金的综合性能和光亮度都有所损害。在 Al-Zn-Mg 合金中添加 RE 后,在降低 Zn 含量的同时可使合金具有良好的超塑性。Al-Zn-Mg-RE 超塑性合金的室温强度($\sigma_b = 390 \text{ MPa}$)与低碳钢的相当,可用于成形加工仪器仪表壳罩件、塑料制品的成形模具、复杂形状的构件以及汽车或飞机的零部件。对于 Al-Zn-Mg 系合金,加入适量的 RE,改善了晶粒尺寸因素和晶粒取向因素,增强了合金的超塑性效应,可拓宽超塑变形的温度范围,提高超塑变形的速度,降低超塑变形的抗力^[44]。

已有 Al-Zn-Mg-Cu 合金具有相对较高的强度、适宜的抗腐蚀性能和适宜的断裂韧性,通过添加 Zr 等其它元素可使合金的强度和断裂韧性得到进一步的改善,该铝合金含有 1.95%~2.5% 的 Cu、1.9%~2.5% 的 Mg、8.2%~10% 的 Zn、0.05%~0.25% 的 Zr、Si 和 Fe 的最高含量为 0.15%,Mn 的最高含量为 0.1%,其余为 Al、伴随元素及杂质^[45]。

7xxx Al-Zn-Mg-Mn-Sc 合金经挤压后

可用于制备自行车管,然而由该合金制备的焊接件易产生应力腐蚀断裂。7xxx Al-Zn-Mg-Mn-Cu-Sc 合金可用于制造飞机、轮船、地面交通工具、娱乐和体育器材等的零件,然而该合金容易产生均匀腐蚀,有些情况下焊接性能也不够好。向 Al-Zn-Mg-Sc 合金中添加一定量的 Ag 和 Sn 等,可使合金具有较高的强度和很好的抗腐蚀性能,改善合金的加工性能,提升合金在高温下的挤压性能和挤压速度,而且该合金可以被加工成各种形状^[46]。以上以铝为大量主成分,以锌、镁等为少量添加成分的 Al-Zn-Mg 系铝合金的研究进展也可为以镁为大量主成分,以锌、铝等为少量添加成分的镁应用合金的研究提供有益的借鉴和参考。

5 总结与展望

随着科技的进步,轻合金综合性能不断提高和改进,使其应用前景更加广阔。同时也对镁铝合金材料的技术进步提出了更高的要求,进一步加强镁铝合金作为应用合金的研究与开发是摆在我们面前的迫切任务。

目前 Mg-Zn 系应用镁合金主要是首先制备金属镁、金属锌及其它金属,然后将这些金属按照合适的比例通过一定的熔炼工艺熔炼,经过加工成型得到应用合金零部件。制备过程比较长,能耗高,制备金属本身的能耗较高,经过二次熔炼制备合金,会使能耗更高,氧化损失增加。此外,这种制备应用合金的方法所得到的合金成分也不够均匀,有待加强研究。对 Mg-Zn-Al 系合金的合金元素加入方法及配合使用方面还有待深入,热处理工艺没有成形,其它应用性能的研究也还不足,尤其是高锌镁合金(Zn 含量高于 5%)的研究尚处于起步阶段。因此,如何在 Mg-Zn-Al 系合金的研究成果上进行高锌镁合金的成分、熔炼工艺、热处理工艺和合金元素的选择及加入方法上进行优化;其它耐腐蚀性能、阻尼性能、高温热稳定性能、蠕变性能等应用性能方面的研究加以深入,通过技术突破和设备的更新,不断降低镁铝合金的冶炼成本,扩大应用已成镁、铝合金领域的当务之急。

参考文献:

- [1] 曹樑,李中权,刘文才,等. 镁合金高温力学性能研究进展[J]. 轻金属, 2013 (6): 48-53.
- [2] 李超. 锌镁比 7085 铝合金时效以及淬火敏感性的影响[D]. 长沙: 中南大学材料科学与工程学院, 2012.
- [3] 陆刚. 铝、镁、钛合金材料在汽车工业中的应用和发展[J]. 上海有色金属, 2006, 27(2): 43-48.
- [4] 彭晓东,刘江. 轻合金在汽车工业中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 1999(1): 1-5.
- [5] 杨明波,潘复生,李忠盛,等. Mg-Al 系耐热镁合金中的合金元素及其作用[J]. 材料导报, 2005, 19(4): 46-49.
- [6] 陈振华,严红革,陈吉华,等. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 19-20.
- [7] 徐红霞,张修丽. 21 世纪的绿色环保材料-镁合金[J]. 上海工程技术大学学报, 2007, 21(4): 322-325.
- [8] 杨明波,潘复生,张静. Mg-Al 系耐热镁合金的开发及应用[J]. 铸造技术, 2005, 26(4): 331-335.
- [9] 丁文江,吴玉娟,彭立明,等. 高性能镁合金研究及应用的新进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(8): 37-44.
- [10] 刘红湘,戴永年,马文会,等. 中国镁工业研究方向探讨[J]. 轻金属, 2007 (1): 46-49.
- [11] 王渠东,丁文江. 镁合金研究开发现状与展望[J]. 世界有色金属, 2004 (7): 8-11.
- [12] 卫爱丽. 新型镁铝锌合金组织与性能的研究[D]. 太原: 太原理工大学材料学院, 2010.
- [13] 刘静安. 俄国铝合金研发现状与技术发展趋势[J]. 世界有色金属, 2007 (4): 17-19.
- [14] 张新明,刘胜胆. 航空铝合金及其材料加工[J]. 中国材料进展, 2013, 32(1): 39-55.
- [15] 余美琼. 铝及铝合金表面处理技术新进展[J]. 化学工程与装备, 2008(6): 84-89.
- [16] 刘静安. 铝加工技术发展与挑战[J]. 中国金属通报, 2013(2): 16-21.
- [17] 黄韦,程和法,周运海,等. 合金元素对 Al-Zn-Si-Mg 系合金组织和性能的影响[J]. 铸造设备与工艺, 2013 (2): 14-16.
- [18] 刘晓涛,崔建忠. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 47-51.
- [19] 甘卫平,范洪涛,许可勤,等. Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金研究进展[J]. 铝加工, 2003 (3): 6-12.
- [20] Aihua, A L, Mishra, R K. Sachdev, A K. High ductility/strength magnesium alloys: US, 8,361,251 B2[P]. 2013-01-29.
- [21] Gerold B, Mueller H, Loeffler J, et al. Magnesium alloy and the respective manufacturing method: US, 8,293,031 B2 [P]. 2012-10-23.
- [22] D. J. Zuliani. Magnesium-aluminum-zinc alloy: US, 5,055,254[P]. 1991-10-08.
- [23] 姚三九,刘卫华,陈日月. 高锌镁合金研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2001 (5): 18-19, 46.
- [24] 姚三九. 铝对高锌镁合金力学性能的影响[J]. 铸造, 2002, 51(6): 355-357, 368.
- [25] 张照光,张金山,丁苏沛,等. Al-Ce-Sb-Ti 中间合金对高锌镁合金的细化效果[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(6): 558-561.
- [26] Zhang J, Zhang Z, Zhang Y, et al. Effect of Sb on microstructure and mechanical properties in Mg-10Zn-5Al high zinc magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 377-382.
- [27] Wang J, Shi N, Wang L, et al. Effect of zinc and mischmetal on microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Mn alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2010, 28(5): 794-797.
- [28] 郭探,王世栋,叶秀深,等. 熔盐电解法制备稀土合金研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2012, 42(1): 1-9.
- [29] 刘宏伟,罗承萍,刘江文. 钇及混合稀土对镁铝锌合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2003 (5): 14-17.
- [30] 田爱环,张金山,杜二玲,等. 富铈混合稀土对 ZA155 高锌镁合金组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2008, 57 (8): 783-787.
- [31] 田爱环,张金山,许春香,等. 混合稀土对高锌镁合金组织和力学性能的影响[J]. 铸造设备研究, 2007 (3): 16-18.
- [32] 姚三九. 高锌铝稀土镁合金: 中国, 2003128312.8[P]. 2003-07-11.
- [33] 张静,杨亮,左汝林. 一种提高高锌变形镁合金时效硬化效应的工艺方法: 中国, 201310133532.8[P]. 2013-04-17.
- [34] 龙晋明,郭忠诚,樊爱民,等. 牺牲阳极材料及其在金属防腐工程中的应用[J]. 云南冶金, 2002, 31(3): 142-148.
- [35] 马丽杰,郭忠诚,宋曰海,等. 镁合金牺牲阳极及其在防腐蚀工程中的应用[J]. 四川化工与腐蚀控制, 2003, 6 (3): 38-42.
- [36] 苏鹏,杜翠薇,李晓刚,等. AZ63 镁合金牺牲阳极的研究进展[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 101-109.
- [37] 吉党生,郭清理. 稀土铝锰对高锌镁合金组织和性能的影响[J]. 铸造设备与工艺, 2009 (2): 27-29.
- [38] 关绍康,王迎新,赵红亮,等. 一种含稀土高锌镁合金及其制备方法: 中国, 2003126341.0[P]. 2003-09-05.
- [39] Fernandes M T, Dorward R C. Aluminum-magnesium-scandium alloys with zinc and copper: US, 6,139,653[P]. 2000-10-31.
- [40] 张培良,苏振佳,王刚,等. 一种铝-锌-镁合金: 中国, 201210532770.1[P]. 2012-12-11.