

Mg-Zn-Ca 合金研究进展

刘人杰 曹富荣
(东北大学材料科学与工程学院)

摘 要 近年来,镁合金因为其更高的比强度和比刚度引起了广泛的关注。然而,由于镁合金的塑性和韧性较低,以及室温下成形性差,限制了其应用范围。镁合金的成形性和延展性可以通过添加一些元素来改善,如 Zn 和 Ca 元素。Mg-Zn-Ca 系合金,由于其低成本、良好的沉淀硬化性能和抗蠕变性,以及良好的生物降解性,受到越来越多的关注。介绍了 Mg-Zn-Ca 合金近年来的研究进展,并对国内外 Mg-Zn-Ca 合金的材料研究、合金化以及加工方法等进展做了总结,随后对 Mg-Zn-Ca 合金的发展进行了展望。

关键词 Mg-Zn-Ca 合金;合金化;力学性能;加工方法;复合材料

中图分类号 TG146.22;TG146.1⁺3

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Mg-Zn-Ca Alloys

Liu Renjie, Cao Furong

(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University)

Abstract: In recent years, magnesium alloys have attracted much attention because of their lower density, higher specific strength and higher specific stiffness. However, due to the low plasticity and toughness of magnesium alloy and the poor formability at room temperature, the application of magnesium alloy was limited. The formability and ductility of magnesium alloys can be improved by adding some elements, such as zinc and calcium. Mg-Zn-Ca alloys have attracted more and more attention due to their low cost, good precipitation hardening properties, creep resistance and good biodegradability. The research progress in Mg-Zn-Ca alloys in recent years was summarized focusing on material research, alloying and processing methods of Mg-Zn-Ca alloys at home and abroad, and the future development of Mg-Zn-Ca alloys was prospected.

Key Words: Mg-Zn-Ca Alloy, Alloying Method, Mechanical Properties, Processing Method, Composites

镁合金因其密度低、比强度高、阻尼性能好等特点^[1,2],在汽车、航空航天、生物等领域中具有很高的应

收稿日期:2021-04-07;**修改稿收到日期:**2021-04-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51334006)
第一作者简介:刘人杰,男,1996 年出生,硕士研究生,沈阳(110819),E-mail:782382151@qq.com
通信作者:曹富荣,男,1964 年出生,研究员,沈阳(110819),E-mail:cfr-lff@163.com
引用格式:刘人杰,曹富荣. Mg-Zn-Ca 合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 268-1 272.
LIU R J, CAO F R. Research progressin Mg-Zn-Ca alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 268-1 272.

[13] 李道忠,丁武学,孙宇,等. AISi7Mg 轮毂半固态流变挤压铸造成形数值模拟[J]. 铸造技术, 2020, 41(5): 474-479.

[14] 郑鹏,徐骏,张志峰,等. A357 铝合金半固态流变压铸数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(1): 43-46,124.

[15] 岑尧,高倩. 基于 ProCAST 的 TiB₂/7075 复合材料流变压铸数值模拟[J]. 热加工工艺, 2019, 48(7): 90-93,97.

[16] 高倩,杨滨. 7075 及 TiB₂/7075 复合材料流变压铸数值模拟[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17): 72-75.

[17] 高倩,杨滨,甘贵生. 蛇形管浇注制备 TiB₂/7075 半固态浆料及数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(9): 937-940.

[18] 管仁国,赵占勇,陈礼清,等. AZ31 镁合金型材连续流变挤压成形过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 923-929.

[19] RAGAB K A, BOUAICHA A, BOUAZARA M. Optimization of casting design parameters on fabrication of reliable semi-solid aluminum suspension control arm[J]. Journal of Materials Engineer-
ing & Performance, 2017, 26(9): 4 450-4 461.

[20] 周冰,康永林,朱国明,等. 强制对流传变成形制备 7075 铝合金半固态浆料及其数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(4): 1 109-1 116.

[21] DAS P, BHUNIYA B, SAMANTA S K, et al. Studies on die filling of A356 Al alloy and development of a steering knuckle component using rheo pressure die casting system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 293-311.

[22] 胡勇,何柏林,闫洪. 镁基复合材料半固态压铸过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1 260-1 266.

[23] 房元明,徐骏,高志华,等. 7075 铝合流变压铸数值模拟及实验研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(11): 1 180-1 187.

[24] 张莹,倪泽联,韩婧潇,等. 基于流变学模型的镁合金流变铸轧数值模拟[J]. 热加工工艺, 2013, 42(3): 35-37,40.

(编辑:刘晨辉)

用价值。与钢铁、铝、钛合金相比,镁合金的主要缺点是强度相对较低,延展性差,严重制约了镁合金的大规模工业应用^[3,4]。

研究者发现在各种元素中,Zn 与 Ca 元素价格低廉,可以显著削弱基体组织,并且镁合金中含有 Ca、Zn 等无毒元素,可以提高其强度和生物降解率。Ca 的加入会减少 γ 相的数量,形成高熔点的金属间化合物 Mg_2Ca 相,从而提高高温蠕变抗力。此外,Ca 是人体骨骼中的主要成分,可以加速骨骼生长。Zn 元素可以有效细化镁合金的晶粒尺寸,提高镁合金的强度。Zn 与 Mg 可形成多种 Mg-Zn 金属间化合物,如 $MgZn$ 、 Mg_2Zn_8 、 $MgZn_2$ 相等。镁合金中的 Zn 和 Ca 可形成稳定的 $Ca_2Mg_6Zn_3$ 金属间化合物。但目前 Mg-Zn-Ca 合金的性能还有一些不足,如塑性及耐蚀性差,另外,有些 Mg-Zn-Ca 合金强度略差,但是其具有成本低廉、沉淀硬化性能优异和生物相容性好等特点,具有广阔的应用前景。对于 Mg-Zn-Ca 合金现阶段的研究主要有以下 4 个方面:①改变 Mg-Zn-Ca 合金中 Zn 和 Ca 元素的含量;②添加一种或多种元素的 Mg-Zn-Ca 合金;③改变常规的加工方法或条件(如加工温度,加工速度)等;④制备 Mg-Zn-Ca 复合材料。

1 Mg- x Zn- x Ca 合金

ZAREIAN Z 等^[5]研究了铸态和挤压状态下 Mg-2Zn- x Ca 合金(Ca 质量分数在 0~5% 范围内)的晶粒细化和力学性能。发现 Ca 的加入有效地细化了铸锭的晶粒尺寸,在高 Ca 含量下,获得了枝晶组织。铸态合金在低 Ca 含量时提高了拉伸性能,这是由于晶粒的细化效应,但在高 Ca 时恶化,则是由于晶界第二相的形成。铸态 Mg-2Zn-0.3Ca(ZX20)合金的抗拉强度为 228 MPa,伸长率为 20%;在热挤压过程中,可观察到明显的晶粒细化、第二相粒子的断裂和弥散。当 Ca 含量大于 1% 时,晶粒细化程度可以忽略,当 Ca 含量较高时,可以观察到挤压缺陷。Mg-2Zn-1Ca(ZX21)合金的抗拉强度为 283 MPa,伸长率为 29%,获得了 Mg-2Zn- x Ca 合金较好的力学性能组合。

ZHAO L Q 等^[6]研究了 Zn 含量对 Mg- x Zn-0.2Ca ($x=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$, 质量分数/%)合金组织和力学性能的影响。发现 Mg-1.5Zn-0.2Ca 合金具有良好的强度和塑性组合,其抗拉强度为 270 MPa,伸长率约为 30%。

MALEKI E 等^[7]研究了 Ca(0~3%)对铸态和挤压态 Mg-5Zn 铸态合金组织和力学性能的影响。发现在 Mg-5Zn 合金中加入 Ca,形成了 $Ca_2Mg_6Zn_3$ 相。加

入 3% 的 Ca 后,Mg-5Zn 铸态合金的晶粒尺寸从 305 μm 减小到 84 μm ,晶粒尺寸减小了 72%。在铸态条件下,添加 0.1% 的 Ca 结果较理想,可使抗拉强度和伸长率分别从 205 MPa 和 7.9% 提高到 245 MPa 和 13.8%。

Ca 含量的增加使热挤压后合金的晶粒尺寸减小,当 Ca 含量为 3% 时,晶粒尺寸为 4 μm 。试验发现,含 Ca 镁合金挤压后的抗拉强度和伸长率都得到了提高,添加 0.1% 的 Ca,可显著提高铸态合金的抗拉强度和伸长率。

2 添加一种或多种元素的 Mg-Zn-Ca 合金

元素合金化是提高镁合金生物相容性、耐蚀性和力学性能的有效技术之一,对 Mg-Zn-Ca 合金进行合金化,也是目前研究的一种简单有效的方法。

2.1 Mg-Zn-Ca-Mn 合金

为了使镁合金应用更广泛,低成本无稀土 Mg-Zn-Ca 合金是更理想的选择。但 Mg-Zn-Ca 合金的耐腐蚀性差是制约其广泛应用的主要问题。Mg-Zn-Ca-Mn 合金不含稀土元素,并且一定量的 Mn 可以提高耐蚀性,所以,目前含 Mn 的镁合金(如 Mg-2.0Zn-0.2Mn^[8]、Mg-1.2Mn-1.0Zn^[9]及 Mg-Zn-Ca-Mn 合金)的研究得到研究者重视。

JIANG M G 等^[10]利用挤压法制备了 Mg-0.21Zn-0.30Ca-0.14Mn(简称 ZXM)合金。挤压过程通过晶粒细化和织构改性,获得了良好的强度和塑性平衡。图 1 为均匀化和挤压态 ZXM 和 AZ31 合金的力学性能。可以看出,300 $^{\circ}C$ 下挤压的 ZXM 合金屈服强度为 307 MPa,伸长率为 20.6%。在 350 $^{\circ}C$ 挤压后,获得了几乎完全弥散的组织(DRX 分数为 96%)和含有稀土织构成分的显著弱化的基底织构,从而获得高压缩/屈服比为 0.8,伸长率为 30.0%,屈服强度为 164 MPa。

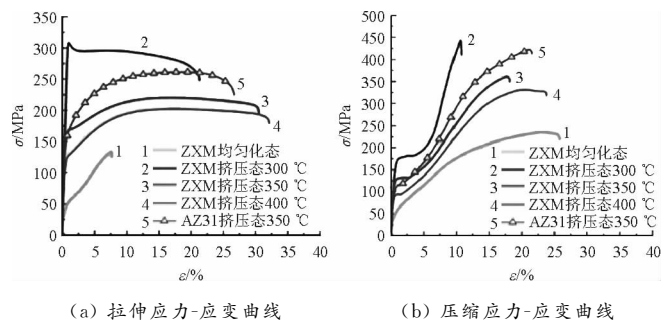


图 1 均匀化和挤压态 ZXM 和 AZ31 合金的拉伸应力-应变曲线、压缩应力-应变曲线^[10]

Fig.1 Tensile and compressive stress-strain curves of the as-homogenized and as-extruded ZXM and AZ31 alloys^[10]

为了实现镁合金的力学性能协同效应,HUA Z M

等^[11]设计并制备了一种新型 Mg-1.0Zn-0.45Ca-0.35Sn-0.2Mn(XZTM1000)合金。经热轧和退火后,新合金板材具有优异的力学性能,屈服强度约为 270 MPa,伸长率约为 21%。

2.2 Mg-Zn-Ca-Sr 合金

Sr 的加入可以提高镁合金的生物相容性和生物活性,细化其微观组织,从而提高其腐蚀性能和力学性能,使 Mg-Zn-Ca-Sr 合金成为一种具有良好发展前景的骨植入材料^[12,13]。

MENG X 等^[14]在 Mg-2Zn-0.3Ca 合金中加入 Sr,制备了 Mg-2Zn-0.3Ca- x Sr($x=0,0.1,0.3,0.5$ 和 1,质量分数/%)铸态镁合金,研究了 Sr 的加入对其组织、力学性能和降解行为的影响。发现随着 Sr 含量增加,合金的平均晶粒尺寸明显变小且变得均匀。少量 Sr 的加入也细化了晶界和枝晶间的第二相。Sr 元素在晶粒与第二相的界面处明显增加。Mg-2Zn-0.3Ca-0.3Sr 合金的弯曲强度和抗压强度分别为 (441 ± 18) MPa 和 (317 ± 13) MPa。在模拟体液中的电化学测试表明,Sr 的加入会轻微降低 Mg-Zn-Ca-Sr 合金的耐蚀性。

LIU H N 等^[15]研究了 Mg-3Zn-1Ca-0.5Sr 合金在不同冷却方式(风冷、温水冷却和冰水冷却)下的冷却梯度,研究了冷却速度对组织和腐蚀性能的影响。合金组织由 α -Mg、 $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$ 和 $\text{Mg}_{17}\text{Sr}_2$ 相组成。随着凝固冷却速度增加,合金晶粒细化,Zn 和 Sr 偏析减少,Zn 和 Sr 的分布更加均匀,腐蚀速率先增大后减小。

研究微量 Sr 对三元 Mg-Zn-Ca 合金腐蚀性能和力学性能的影响是一个十分有意义的课题。

2.3 Mg-Zn-Ca-RE 合金

稀土(RE)元素加入镁合金中会削弱基体结构或导致稀土组织组分的形成,一些稀土元素价格较为昂贵,但铈(Ce)或镧(La)由于与重稀土元素相比相对便宜,并因其具有较高的组织弱化效率而备受关注,如 Mg-Zn-Ca-La 和 Mg-Zn-Ca-Ce^[16]等。

DU Y Z 等^[17,18]研究了 Mg-Zn-Ca-La 合金在变形过程中的动态析出行为。由于在 Mg-Zn-Ca-La 合金变形后发现大量细小析出物,说明 Mg-Zn-Ca-La 合金发生了动态析出。通过检测得到晶界析出物主要为 $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$ 和 Mg_4Zn_7 ,晶内析出物主要为 Mg_4Zn_7 。另外研究了 Mg-6Zn-0.7Ca-0.2La 合金,发现挤压态 Mg-6Zn-0.7Ca-0.2La 合金具有良好的强度和塑性,屈服强度为 261 MPa,伸长率为 20.7%。获得高强度的主要原因是由于晶粒细化和第二相的析出,而获得高塑性的原因则是由于细小的均匀组织和较弱的织构。典型的挤压镁合金的应力-应变曲线见图 2^[18]。

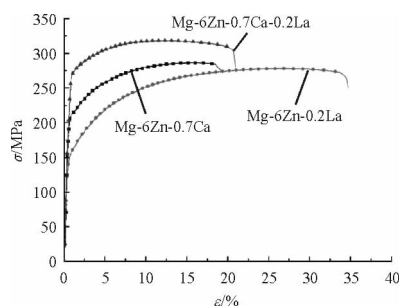


图 2 3 种挤压镁合金的应力-应变曲线

Fig.2 Typical stress-strain curves of the as-extruded magnesium alloys

从图 2 可以看出,挤压态 Mg-6Zn-0.7Ca-0.2La 合金的塑性比单一微合金化 Mg-6Zn-0.2La 合金的塑性低,而屈服强度显著增加。Mg-6Zn-0.7Ca-0.2La 合金的强度和塑性均优于挤压态 Mg-6Zn-0.7Ca 合金。可见对 Mg-Zn-Ca 合金进行合金化,是提高其性能的有效手段。

TONG L B 等^[19]将挤压 Mg-5.3Zn-0.5Ca-0.5Ce/La 合金温轧后,屈服强度由 163 MPa 提高到 316 MPa。通过温轧,在强度(>310 MPa)和塑性(接近 9.5%)之间实现了良好的平衡。试验发现,低应变轧制可激活拉伸孪晶,随着轧制进行,可以激活动态再结晶。

PENG W Q 等^[20]研究了在 Mg-6Zn 合金中添加 Ca 或添加 Ca 和 Ce 两种元素后的性能,发现 Ca 和 Ce 的复合添加明显改善了 Mg-6Zn 合金挤压后的力学性能。显微组织分析表明,Ca 或 Ca-Ce 的加入细化了动态再结晶组织,促进了动态析出,改善了织构。挤压态 Mg-6Zn-0.7Ca-0.2Ce 合金表现出良好的强韧性组合,屈服强度为 287 MPa,伸长率为 16.9%。

3 改变常规加工方法或加工条件

Mg-Zn-Ca 合金的常规加工方法有锻造、挤压、轧制、剧烈塑性变形等。为了进一步研究 Mg-Zn-Ca 合金,可以通过改变加工方法(如粉末冶金法,搅拌摩擦焊等)或加工条件(如温度,挤压速率等)来了解其性能。

TONG L B 等^[21]通过等通道角挤压(ECAP)(250 °C,4 道次)加工 Mg-5.0Zn-0.6Ca-0.3Mn 合金,然后采用低温挤压,以 5:1 的挤压比和 1.0 mm/s 的挤压速度,在低温(100 °C 和 150 °C)下挤压成形,获得了超细晶 Mg-Zn-Ca-Mn 合金,通过晶粒细化和织构改性,成功制备出高屈服强度(332.8 MPa)和高塑性(17.9%)的挤压镁合金。

ZHONG M B T 等^[22]采用无烧结粉末冶金法制备了 Zn 含量特别高的 Mg-19Zn-1Ca 合金和 Mg-19Zn-1Ca+1SiO₂ 纳米复合材料。发现合金的屈服强度为

202 MPa, 纳米复合材料的屈服强度、抗压强度和伸长率分别为 208 MPa、380 MPa 和 17%, 抗拉强度和伸长率与合金比变化不明显。

MARTYNENKO N 等^[23]采用 ECAP 工艺对 Mg-1.0Zn-0.3Ca 镁合金进行了组织细化。ECAP 使镁合金横截面和纵截面的平均晶粒尺寸分别从初始状态的 $106.0 \pm 2.05 \mu\text{m}$ 减小到 $4.0 \pm 0.19 \mu\text{m}$ 和 $8.0 \pm 0.18 \mu\text{m}$, 对 Mg-1.0Zn-0.3Ca 镁合金有一定的强化作用, 屈服强度、抗拉强度和伸长率分别从 92、194 MPa 和 12.8% 提高到 106 MPa、215 MPa 和 23.9%。

LI W J 等^[24]采用半固态搅拌辅助超声振动和 280 °C 超低速挤压 (0.01 mm/s) 制备了 $\text{SiC}_p/\text{Mg-4Zn-0.5Ca}$ 复合材料。发现与以往的颗粒增强镁基复合材料相比, $\text{SiC}_p/\text{Mg-4Zn-0.5Ca}$ 复合材料不仅具有较高的屈服强度 (322.7 MPa) 和抗拉强度 (409.1 MPa), 而且具有良好的塑性 (10.1%)。

NIE K B 等^[25]采用多向锻造 (MDF) 和挤压 (EX) 相结合的方法制备了 TiC 纳米粒子增强 Mg-4Zn-0.5Ca 基纳米复合材料。与仅单一 MDF 相比, 经 MDF+EX 变形后纳米复合材料的晶粒尺寸显著减小。随着 MDF 道次的增加, 对温度为 310 °C 经 3 道次 MDF 后的纳米复合材料进行挤压, 其屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 404 MPa、450.3 MPa 和 5.2%, 更多的加工技术会被用来对 Mg-Zn-Ca 合金进行加工, 以期合金获得更好的性能及更广阔的应用范围。

4 制备复合材料

利用 β -TCP 颗粒 (β -tricalcium phosphate, β -磷酸三钙)、HA (hydroxyapatite, 羟基磷灰石) 及 MgO 等制备镁基复合材料^[26~28]也是提高 Mg-Zn-Ca 合金性能的有效手段之一。

LIN G Y 等^[29]为了提高镁合金的耐蚀性和力学性能, 设计并制备了新型可生物降解的 Mg-3Zn-0.2Ca 基复合材料, 通过添加不同含量的 MgO 纳米粒子 (0.1、0.2、0.3 和 0.5, 质量分数/%) 制备复合材料。试验采用最佳固溶处理 ($450 \text{ }^\circ\text{C} \times 48 \text{ h}$) 和热挤压工艺制备了 MgO/Mg-3Zn-0.2Ca 复合材料。发现当 MgO 含量为 0.5% 时, MgO/Mg-3Zn-0.2Ca 复合材料的抗拉强度提高到 $329.03 \pm 2.01 \text{ MPa}$, 屈服强度提高了 22.81%, 而伸长率没有明显降低。

YUAN Q 等^[30]研究了冷却速率对可生物降解 β -TCP/Mg-Zn-Ca 复合材料微观组织和腐蚀行为的影响。发现更快的冷却速度可以细化第二相和晶粒尺寸, 并产生更均匀的微观组织。细化的微观组织使 β -TCP 颗粒分布更加均匀, 有利于提高复合材料的耐蚀性。

NEDA A 等^[31]采用粉末冶金法制备了 nHA/Mg-5Zn-0.3Ca 生物复合材料。研究了不同质量分数的 nHA (1%、2.5% 和 5%) 作为增强剂对 Mg-5Zn-0.3Ca 合金腐蚀性能的影响。通过浸泡试验和电化学技术研究生物复合材料在 SBF 溶液中的耐蚀性。结果表明, 添加 1% 和 2.5% 的 nHA 可提高镁合金的耐蚀性。

5 结 语

虽然近几年来对 Mg-Zn-Ca 合金性能的研究取得了不小的进展, 但是目前 Mg-Zn-Ca 合金的各种性能还有很多不足。由于晶界、析出相或晶体取向会阻碍位错滑移, 各种 Mg-Zn-Ca 合金强度提高的同时往往伴随着塑性的牺牲; 合金存在由于较强的化学活性和表面氧化膜的多孔性和脆性所导致的耐蚀性差的问题。这些不足也是制约其应用的重要原因。为了改善 Mg-Zn-Ca 合金的应用效果, 扩大合金的应用范围, 需要更多新型的加工方法 (如硬板热锻与 MDF 技术的结合) 和发掘更多元素组合 (如 Gd 和 Mn、Y 和 Bi 等稀土元素与非稀土元素同时对 Mg-Zn-Ca 合金进行合金化) 来对 Mg-Zn-Ca 合金进行性能上的改善, 借此来弥补 Mg-Zn-Ca 合金的缺陷, 并实现 Mg-Zn-Ca 合金的大量应用。

参 考 文 献

- [1] MORDIKEB L, EBERT T. Magnesium: Properties-applications-potential [J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, A302(1): 37-45.
- [2] ANIL K, SANTOSH K, MUKHOPADHYAY N K. Introduction to magnesium alloy processing technology and development of low-cost stir casting process for magnesium alloy and its composites[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, 6(3): 245-254.
- [3] SHI D F, PÉREZ-PRADO M T, CEPEDA-JIMÉNEZ C M. Effect of solutes on strength and ductility of Mg alloys [J]. *Acta Materialia*, 2019, 180: 218-230.
- [4] ZUBAIR M, SANDLÖBES S, WOLLENWEBER M A, et al. On the role of Laves phases on the mechanical properties of Mg-Al-Ca alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2019, A756: 272-283.
- [5] ZAREIAN Z, EMAMY M, MALEKAN M, et al. Tailoring the mechanical properties of Mg-Zn magnesium alloy by calcium addition and hot extrusion process [J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, A774: 138 929.
- [6] ZHAO L Q, WANG C, CHEN J C, et al. Development of weak-textured and high-performance Mg-Zn-Ca alloy sheets based on Zn content optimization [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 849: 156 640.
- [7] MALEKI E, SHAHRI F, EMAMY M. Microstructure and tensile Properties of Mg-5Zn alloy containing Ca[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27: 1 565-1 577.
- [8] ZHANG E L, YIN D S, XU L P, et al. Microstructure, mechanical and corrosion properties and biocompatibility of Mg-Zn-Mn alloys for biomedical application[J]. *Materials Science and Engineering*

- ing, 2009, C29(3): 987-993.
- [9] XU L P, YU G N, ZHANG E L, et al. In vivo corrosion behavior of Mg-Mn-Zn alloy for bone implant application[J]. Journal of Bio-medical Materials Research, 2010, A83(3): 703-711.
 - [10] JIANG M G, XU C, NAKATA T, et al. Development of dilute Mg-Zn-Ca-Mn alloy with high performance via extrusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 668(25): 13-21.
 - [11] HUA Z M, WANG B Y, WANG C, et al. Development of low-alloyed Mg-Zn-Ca-Sn-Mn alloy with high strength-ductility synergy by sub-rapid solidification and hot rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 855(1): 157-317.
 - [12] LIU H N, LI Y J, ZHANG K, et al. Microstructure, hot deformation behavior, and textural evolution of Mg-3% Zn-1% Ca-0.5% Sr alloy[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55: 12 434-12 447.
 - [13] 王建利, 万银, 朱美玲, 等. Sr 元素对 Mg-Zn-Ca 合金非晶形成能力和耐蚀性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2 151-2 158.
 - [14] MENG X, JIANG Z T, ZHU S J, et al. Effects of Sr addition on microstructure, mechanical and corrosion properties of biodegradable Mg-Zn-Ca alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 838: 155-611.
 - [15] LIU H N, ZHANG K, LI X B, et al. Microstructure and corrosion resistance of bone-implanted Mg-Zn-Ca-Sr alloy under different cooling methods[J]. Rare Metals, 2021, 40: 643-650.
 - [16] LANGELEIER B, KORINEKB A, DONNADIEU P, et al. Improving precipitation hardening behavior of Mg-Zn based alloys with Ce-Ca microalloying additions[J]. Materials Characterization, 2016, 120: 18-29.
 - [17] DU Y Z, GE Y F, JIANG B L. Dynamic precipitation behavior of a Mg-Zn-Ca-La alloy during deformation[J]. JOM, 2019, 71: 2 202-2 208.
 - [18] DU Y Z, ZHENG M Y, QIAO X G, et al. Strength and ductility balance on an extruded Mg-Zn-Ca-La alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(5): 1 600-842.
 - [19] TONG L B, ZHANG J B, ZHANG Q X, et al. Effect of warm rolling on the microstructure, texture and mechanical properties of extruded Mg-Zn-Ca-Ce/La alloy[J]. Materials Characterization, 2016, 115: 1-7.
 - [20] PENG W Q, WANG Y Z, JIANG D B, et al. Improving microstructure and mechanical properties in Mg-6 mass% Zn alloys by combined addition of Ca and Ce[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A656: 67-74.
 - [21] TONG L B, CHU J H, SUN W T, et al. Development of high-performance Mg-Zn-Ca-Mn alloy via an extrusion process at relatively low temperature[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 825: 153-942.
 - [22] ZHONG M B T, PARANDE G, MANAKARV I, et al. Using low-temperature sinterless powder method to develop exceptionally high amount of zinc containing Mg-Zn-Ca alloy and Mg-Zn-Ca/SiO₂ nanocomposite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 853: 156-957.
 - [23] MARTYNENKO N, LUKYANOVA E, SEREBRYANY V, et al. Effect of equal channel angular pressing on structure, texture, mechanical and in-service properties of a biodegradable magnesium alloy[J]. Materials Letters, 2018, 238: 218-221.
 - [24] LI W J, DENG K K, ZHANG X, et al. Microstructures, tensile properties and work hardening behavior of SiC_p/Mg-Zn-Ca composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 2 215-2 223.
 - [25] NIE K B, ZHU Z H, MUNROE P, et al. Microstructure and mechanical properties of TiC nanoparticle-reinforced Mg-Zn-Ca matrix nanocomposites processed by combining multi-direction forging and extrusion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(9): 2 394-2 412.
 - [26] AHMADKHANI A D, FEDEL M, SOHI M H, et al. Corrosion behavior of magnesium and magnesium-hydroxyapatite composite fabricated by friction stir processing in Dulbecco's phosphate buffered saline [J]. Corrosion Science, 2016, 104: 319-329.
 - [27] ZHENG H R, YU L T, LYU S Y, et al. Insight into the role and mechanism of nano MgO on the hot compressive deformation behavior of Mg-Zn-Ca alloys[J]. Metals, 2020, 10(10): 1 357-1 362.
 - [28] LY XUANNAM, YANG S, NGUYEN T. Effect of equal channel angular pressing as the pretreatment on microstructure and corrosion behavior of micro-arc oxidation (MAO) composite coating on biodegradable Mg-Zn-Ca alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 395: 125-923.
 - [29] LIN G Y, LIU D D, CHEN M F, et al. Preparation and characterization of biodegradable Mg-Zn-Ca/MgO nanocomposites for biomedical applications [J]. Materials Characterization, 2018, 144: 120-130.
 - [30] YUAN Q, HUANG Y, LIU D B, et al. Effects of solidification cooling rate on the corrosion resistance of a biodegradable β -TCP/Mg-Zn-Ca composite[J]. Bioelectrochemistry, 2018, 124: 93-104.
 - [31] NEDA A, CHANGIZ D, MOHAMMAD A S. In vitro degradation and cytotoxicity of Mg-5Zn-0.3Ca/nHA biocomposites prepared by powder metallurgy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(9): 1 745-1 754.

(编辑:张正贺)

特立镁为比亚迪供应镁压铸方向盘

近日,青海盐湖特立镁有限公司为比亚迪汽车定制的汽车方向盘即将送往位于西安的比亚迪汽车生产线,此次生产的方向盘全部采用金属镁一次压制成型技术。

目前,特立镁联合上海宝钢技术中央研究中心、上海交通大学、上海理工大学、重庆大学、青海大学等多家科研机构和院校,在镁合金性能改进、镁合金压铸产品,尤其在新能源汽车、航空、通讯器材等领域进行开拓与创新,并在高性能镁合金压铸件开发关键技术研究与示范、新能源汽车国产飞轮混动系统轻量化降噪合金壳体的开发与应用、室温可折弯镁合金薄板生产技术研发等项目上积极投入。

特立镁公司系青海盐湖工业股份有限公司全资子公司,位于青海甘河工业园区,是从事以镁/铝合金产品制造的压铸企业。据介绍,目前,特立镁已生产各类汽车零部件、通讯类滤波器、热管理模块等产品 56 种,完成了 88 万件产品的交付。

(摘自中国有色网)