DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.02.021

挤压变形对 Mg-Zn-Zr 合金组织与耐蚀性能的影响

惠忠涛,闫　明
(西安科技大学,陕西 西安 710054)

摘　要:对铸态 Mg-Zn-Zr 合金进行了往复挤压变形和正挤压变形处理,研究了 3 种状态下的 Mg-Zn-Zr 合金的显微组织、物相组成和耐腐蚀性能。结果表明,铸态 Mg-Zn-Zr 合金晶粒较为粗大,平均尺寸约在 160 μm,晶界处可见蠕虫状共晶组织的存在,晶内还可见粗大第二相颗粒;经过往复挤压和正挤压变形后,Mg-Zn-Zr 合金发生了明显的动态再结晶,铸态下蠕虫状共晶组织以及枝晶消失,细小第二相质点在基体中均匀分布;往复挤压 Mg-Zn-Zr 合金的耐腐蚀性能最好,其次为正挤压 Mg-Zn-Zr 合金,二者均高于铸态 Mg-Zn-Zr 合金。

关键词:正挤压;往复挤压;Mg-Zn-Zr 合金;组织;耐蚀性能

中图分类号:TG146.2;TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)02-0217-04

Influence of Extrusion Deformation on Microstructure and Corrosion Resistance of Mg-Zn-Zr Alloy

HUI Zhongtao, YAN Ming
(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Reciprocating extrusion and extrusion deformation were carried out on Mg-Zn-Zr alloy, the microstructure, phase composition and corrosion resistance of Mg-Zn-Zr alloy were studied. The results show that the grains of as-cast Mg-Zn-Zr alloy are coarse, the average size is about 160 μm, the vermicular eutectic structure can be seen at grain boundary, and coarse second phase particles can be seen in grain boundary. After reciprocating extrusion and forward extrusion deformation, dynamic recrystallization of Mg-Zn-Zr alloy is observed, fine second phase particles are uniformly distributed in the matrix. The corrosion resistance of Mg-Zn-Zr alloy by reciprocating extrusion is the best, followed by forward extrusion of Mg-Zn-Zr alloy, both of which are higher than that of as-cast Mg-Zn-Zr alloy.

Key words: forward extrusion; reciprocating extrusion; Mg-Zn-Zr alloy; microstructure; corrosion resistance

Mg-Zn-Zr 合金作为商业镁合金中强度最高的一种,由于兼具密度轻、消震性好、易于加工等特性,而被广泛应用于航空、汽车、体育设施和运动器械等方面[1]。随着近年来体育事业在国内的快速发展,体育设施和运动器械的开发与应用在国内呈现出井喷态势,其质量优劣直接影响运动项目的普及程度及运动水平,而运动器械的选材则是决定体育设施、运动器械优劣最重要的因素。质量轻、强度高、韧性好、耐老化等特性的要求,使得 Mg-Zn-Zr 合金在体育器材上得到了成功应用,然而其较差的耐腐蚀性能在一定程度上限制了其更广泛的应用[2,3]。本文主要从挤压变形角度,考察了挤压变形工艺对体育器材用 Mg-Zn-Zr 合金组织与耐蚀性能的影响,结果可为高性能体育器材用 Mg-Zn-Zr 合金的开发与广泛应用提供参考。

1　试验材料与方法

选用体育器材常用的 Mg-Zn-Zr 合金为原材料,其主要元素的化学成分 w (%) 为:5.47 Zn、0.25 Zr、0.11 Mn,余量为 Mg。

在 RJ-2 溶剂保护电阻炉中熔炼 Mg-Zn-Zr 合金,浇注温度为 720 ℃,铜模浇注成 ϕ50 mm 圆锭,从铸锭中部切取铸态试样(记为铸态)。铸锭经过铣面后在单辊快速凝固装置中制备薄带,单次熔化量为 120 g、氩气喷射压力为 0.03 MPa、加热保温时间为 15 min、真空度为 18 Pa;将制备的薄带进行人工粉碎后装入压制模具,在可调速 NT35-220 型四柱液压机上进行挤压处理,挤压温度为 320 ℃、挤压比为 10、挤压道次为 6,挤压后得到 ϕ20 mm 试样。分别将 ϕ20 mm 试样进行往复挤压和正挤压处理得到

收稿日期:2018-03-21
作者简介:惠忠涛(1979-),陕西渭南人,硕士,副教授.研究方向:体育器械材料加工等.电话:13629279209,E-mail:huizhongtao777@126.com

ϕ6 mm 棒材，分别记为往复挤压和正挤压试样。

不同状态的试样采用线切割方法制备成块状，然后进行粗磨、细磨和抛光处理，再采用4%硝酸酒精溶液进行腐蚀后，在Nikon光学显微镜上观察金相组织；透射电镜试样经过手工打磨至60 μm厚，分别进行机械减薄、双喷离子减薄后，在JEOL-2010型透射电子显微镜上观察；物相分析在德国D8 ADVANCE型X射线衍射分析仪上进行，扫描步长为0.015°；采用失重法测定不同状态的合金试样的腐蚀速率，试样预先经过打磨和丙酮清洗后烘干，然后在3.5%NaCl溶液中常温浸泡，之后在沸腾的络酸+硝酸银溶液中浸泡5 min去除表面腐蚀产物，然后进行清水冲洗后烘干，分别用电子天平称量腐蚀前后的质量，以3组试样的腐蚀失重结果的平均值作为测试结果，腐蚀速率=(腐蚀前质量-腐蚀后质量)/(试样表面积×浸泡时间)；电化学性能测试在CHI 660型电化学工作站中进行，测试试样预先经过打磨和抛光，标准三电极体系，被测试样为工作电极、辅助电极为铂电极、参比电极为饱和甘汞，扫描速率为0.005 V/s。

2 试验结果与讨论

2.1 铸态

铸态体育器材用Mg-Zn-Zr合金的金相组织如图1。可以看出，铸态Mg-Zn-Zr合金晶粒较为粗大，平均尺寸约在160 μm，晶界处可见蠕虫状共晶组织的存在，晶内还可见颗粒状第二相，结合文献可知[4]，这些第二相可能为MgZn、$MgZn_2$、Mg_2Zn_3以及少量的Zr-Zn相。在合金凝固过程中，由于溶质再分配作用，合金中的元素会发生一定程度的偏析，造成共晶组织或者第二相质点分布不均匀现象。

2.2 往复挤压

图2为Mg-Zn-Zr合金经过往复挤压处理后的金相组织，可见，铸态下的蠕虫状共晶组织以及枝晶消失，同时可见细小的黑色第二相质点在基体中均匀分布。这可能是由于往复挤压处理可以细化合金晶粒、第二相和夹杂物的缘故，使得共晶组织或者第二相较为均匀地分布在α-Mg基体中。在往复挤压过程中，较大的塑性变形会使得合金晶粒组织发生严重畸变，在热挤压共同作用下，合金会发生动态再结晶现象[5]，与此同时，共晶组织和第二相也会在往复挤压过程中破碎细化成小颗粒，然后在整个基体中均匀分布。

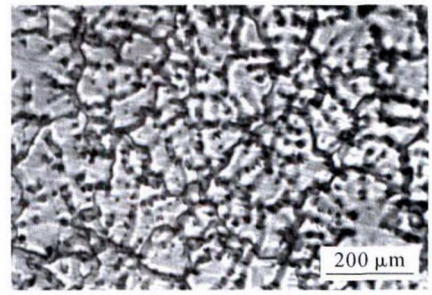


图1 铸态Mg-Zn-Zr合金的金相组织
Fig.1 Microstructure of as cast Mg-Zn-Zr alloy

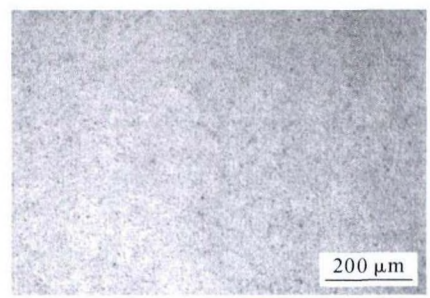
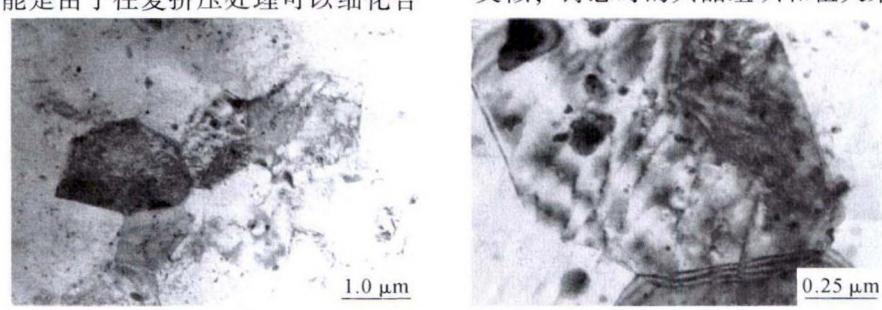


图2 往复挤压后的Mg-Zn-Zr合金的金相组织
Fig.2 Microstructure of Mg-Zn-Zr alloy after reciprocating extrusion

图3为经过往复挤压后的Mg-Zn-Zr合金的透射电镜显微形貌。可以发现，经过往复挤压处理后，Mg-Zn-Zr合金发生了明显的动态再结晶，再结晶晶粒较为细小，尺寸约在1~3 μm，此外，在晶界和晶内都可见弥散分布的细小纳米级第二相颗粒，颗粒尺寸约为200 nm。

2.3 正挤压

Mg-Zn-Zr合金经过正挤压处理后的金相组织如图4。与往复挤压后的Mg-Zn-Zr合金的金相组织类似，铸态时的共晶组织和粗大第二相颗粒基本消



(a)低倍　　(b)高倍

图3 往复挤压后的Mg-Zn-Zr合金的TEM组织
Fig.3 TEM images of Mg-Zn-Zr alloy after reciprocating extrusion

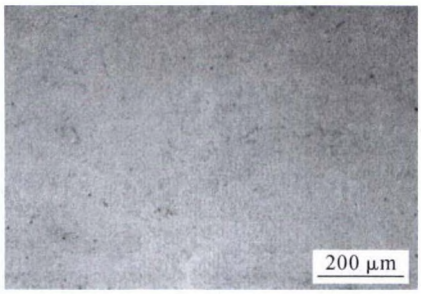


图 4 正挤压 Mg-Zn-Zr 合金的金相组织
Fig.4 Microstructure of Mg-Zn-Zr alloy after forward extrusion

失，细小第二相黑色质点在合金基体中呈现均匀分布特征，局部区域可见细小第二相质点聚集。

图 5 为经过正挤压处理后的 Mg-Zn-Zr 合金的 X 射线衍射图谱。可以发现，Mg-Zn-Zr 合金的主要物相为 α-Mg 和 $MgZn_2$ 相。对比前述的文献观察结果可知，正挤压处理后的 Mg-Zn-Zr 合金中并没有出现 MgZn 或者 Mg_2Zn_3 相。

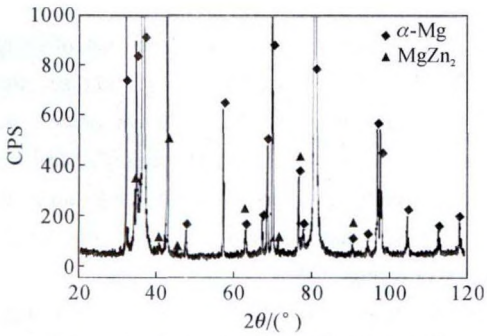


图 5 正挤压 Mg-Zn-Zr 合金的 XRD 图谱
Fig.5 XRD spectra of Mg-Zn-Zr alloy after forward extrusion

经过正挤压处理后的 Mg-Zn-Zr 合金的透射电镜显微组织观察结果如图 6，可见细小第二相部分分布在晶粒内部，如图中区域Ⅰ，而另一部分则分布在晶界处，如图中区域Ⅱ。这主要是由于正挤压过程中，部分溶质元素从过饱和固溶体中析出[6]，在晶内或者晶界处均匀分布所致。

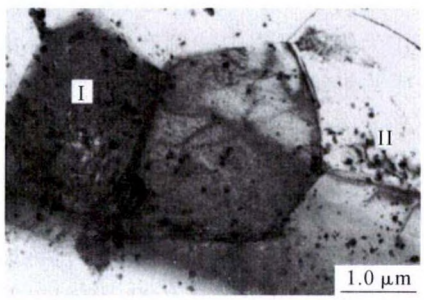


图 6 正挤压 Mg-Zn-Zr 合金的 TEM 形貌
Fig.6 TEM image of Mg-Zn-Zr alloy after forward extrusion

2.4 腐蚀性能

图 7 为 3 种状态的 Mg-Zn-Zr 合金在 3.5%NaCl 溶液中浸泡不同时间得到的腐蚀速率的平均值测量结果。铸态 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀速率为

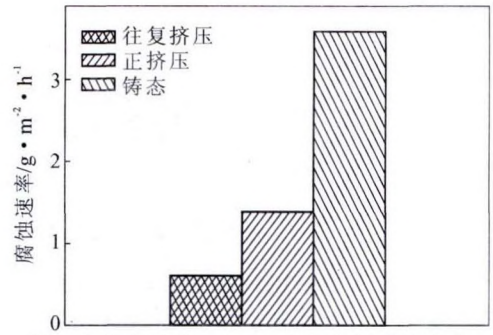


图 7 3 种状态的 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀速率
Fig.7 Corrosion rate of Mg-Zn-Zr alloy with three kinds of states

3.46 g/m²·h，往复挤压 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀速率为 0.68 g/m²·h，正挤压 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀速率为 1.32 g/m²·h。由此可见，3 种不同状态的 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀速率从大至小依次为：铸态 Mg-Zn-Zr 合金>正挤压 Mg-Zn-Zr 合金 > 往复挤压 Mg-Zn-Zr 合金。

图 8 为 3 种状态的 Mg-Zn-Zr 合金在 3.5%NaCl 溶液中的阳极极化曲线。铸态 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀电位为 -1.79 V，往复挤压 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀速率为 -1.51 V，正挤压 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀速率为 -1.64 V。根据腐蚀电位与耐腐蚀性能的对应关系可知[7]，腐蚀电位越正，则材料发生腐蚀的倾向性会越小，更能抵抗外界环境对它的腐蚀。由此可见，往复挤压 Mg-Zn-Zr 合金的耐腐蚀性能最好，其次为正挤压 Mg-Zn-Zr 合金，且都高于铸态 Mg-Zn-Zr 合金，这与失重腐蚀的测试结果保持一致。

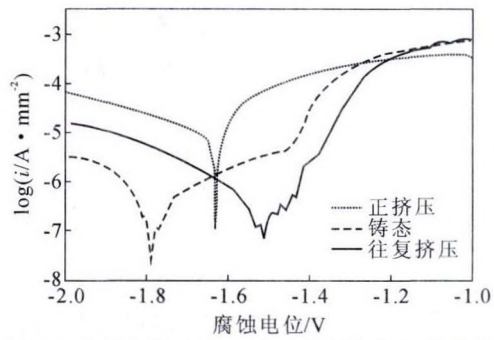


图 8 3 种状态的 Mg-Zn-Zr 合金的阳极极化曲线
Fig.8 Anodic polarization curves of Mg-Zn-Zr alloy with three kinds of states

3 结论

(1)铸态 Mg-Zn-Zr 合金晶粒较为粗大，平均尺寸约在 160 μm，晶界处可见蠕虫状共晶组织的存在，晶内还可见颗粒状第二相。

(2)往复挤压处理 Mg-Zn-Zr 合金发生了明显的动态再结晶，晶粒尺寸约在 1~3 μm，在晶界和晶

（下转第 224 页）

[22] 郑礼胜,王士龙,刘辉. 用钢渣处理含铬废水[J]. 材料保护,1999. 32(5): 54-54.

[23] 张顺雨,贵永亮,袁宏涛,等. 钢渣用于烧结烟气脱硫的动力学分析[J]. 铸造技术,2017(3): 662-665.

[24] 郭秀键. 钢渣处理及资源化综合利用工艺 [J]. 有色冶金设计与研究,2012. 33(6): 17-19.

[25] 黄勇刚,狄焕芬,祝春水. 钢渣综合利用的途径[J]. 工业安全与环保,2005,31(1): 44-46.

[26] 殷琪,杨军,陈昌锋,等. 钢渣微晶玻璃材料的制备与性能表征[J]. 铸造技术,2017(1): 54-59.

[27] 张春雷. 国内外钢渣再利用技术发展动态及对鞍钢开发钢渣产品的探讨[J]. 鞍钢技术,2003(4): 5-9.

[28] 赵青林,周明凯,魏茂. 德国冶金渣及其综合利用情况[J]. 硅酸盐通报,2006,25(6): 165-171.

[29] 王少宁,龙跃,张玉柱,等. 钢渣处理方法的比较分析及综合利用[J]. 炼钢,2010,26(2):75-78.

(上接第 219 页)

内都可见尺寸约为 200 nm 的细小第二相颗粒。

(3)3 种不同状态的 Mg-Zn-Zr 合金的腐蚀速率从大至小依次为：铸态 Mg-Zn-Zr 合金>正挤压 Mg-Zn-Zr 合金>往复挤压 Mg-Zn-Zr 合金。

参考文献：

[1] 剧锦云,张治民,胡杨. ZK60 镁合金的动态力学行为研究[J]. 热加工工艺,2015,44(9): 115-117.

[2] 吴毅,陈跃峰. 体育器材用镁合金的抗腐蚀性能研究[J]. 铸造技术,2015,36(12): 2852-2854.

[3] 李鑫,江静华,赵永好. 组织超细化对 ZK60 镁合金腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护,2015,36(11): 1030-1037.

[4] 林金保,任伟杰,王心怡. 挤压态 ZK60 镁合金室温拉-压不对称性研究[J]. 金属学报, 2016,52(3): 264-270.

[5] 杨亚琴,张治民,李保成. 热挤压态 ZK60 镁合金动态力学行为研究[J]. 热加工工艺,2015,44(11): 41-42.

[6] 王景璐. 镁合金运动器材的耐腐蚀性能研究 [J]. 铸造技术,2015,36(7): 1685-1688.

[7] M. K. Lei, P. Li, H. G. Yang. Wear and corrosion resistance of Al ion implanted AZ31 magnesium alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(9-11): 5182-5185.

RX 榕霞®

福建省榕霞石英砂有限责任公司
漳浦县榕霞矿业开发有限公司

公司简介
Company

我公司创办于1976年，是国内较早从事石英砂系列产品生产、销售一体化经营的综合性企业。公司拥有丰富的优质石英砂矿产资源，矿区面积1000多亩，年开采量可达40万吨。公司生产的石英砂产品具有SiO2含量高，含泥量低、角形系数小等特点，是高品位的天然石英砂。

“榕霞”天然石英砂系列产品现广泛应用于国内铸造行业、机械制造行业、全国各水处理行业及玻璃制造、钢铁冶金行业等，质量达到国际先进水平。公司已通过ISO9001、ISO14001管理体系认证，先进的生产工艺及完善的品质保障体系确保了产品质量的长期稳定，专业的销售团队为客户提供优质完善的售后服务。

产品主要理化性能

Sio2 > 98%	角形系数 < 1.3
灼烧减量 < 0.5%	含泥量 < 0.3%
含水量(干砂) < 0.2%	耐温 > 1700℃

地址:福建省晋江市金井 电话:0595-85332410 85332410 传真:0595-85331410 www.rxsgy.com E-mail:rxsgy@163.com