文章编号: 1004-0609(2012)07-1863-08

往复挤压 Mg-4Al-4Si 镁合金的显微组织与力学性能

宋佩维

(陕西理工学院 材料科学与工程学院, 汉中 723003)

摘 要:研究往复挤压对 Mg-4Al-4Si (AS44)合金显微组织和性能的影响。结果表明: 往复挤压显著地细化晶粒, 改善组织的均匀性; 往复挤压 4 道次和 8 道次后, Mg₂Si 颗粒尺寸由铸态下的约 120 μm 分别减小至 3 和 2 μm, α-Mg 基体晶粒尺寸由铸态下的约 50 μm 分别减小至 9 和 8 μm,形成了较为细小、弥散分布的 Mg₂Si 颗粒和细小 的等轴晶组织。合金的力学性能随往复挤压道次的增加而显著提高,挤压 8 道次时,合金的极限抗拉强度、屈服 强度和伸长率分别达到 251.7 MPa、210.5 MPa 和 14.8%,与铸态合金相比,上述力学性能指标分别提高了 131.3%、 191.1%和 469.2%;挤压态合金拉伸断裂形式为微孔聚合型韧性断裂。

关键词: Mg-4Al-4Si 镁合金; 往复挤压; 组织细化; 力学性能

中图分类号: TG376.2 文献标志码: A

Microstructures and mechanical properties of Mg-4Al-4Si magnesium alloy by reciprocating extrusion

SONG Pei-wei

(School of Materials Science and Engineering, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

Abstract: Effects of reciprocating extrusion (RE) on microstructures and mechanical properties of Mg-4Al-4Si (AS44) alloy were investigated. The results show that the microstructures of the alloy are refined and uniformed obviously by RE. After RE for 4 passes and 8 passes, the as-cast Mg₂Si particle sizes decrease from about 120 μ m to 3 and 2 μ m, respectively, the as-cast α -Mg grain sizes decrease from about 50 μ m to 9 and 8 μ m, respectively. The fine equiaxed grains are formed with homogeneous distribution of fine Mg₂Si particles. The mechanical properties of alloy are improved obviously with increasing the RE passes. After RE 8 passes, the ultimate tensile strength, yield strength and elongation of alloy reach 251.7 MPa, 210.5 MPa and 14.8%, respectively. The previous mechanical data are increased by 131.3%, 191.1% and 469.2% compared with as-cast AS44, respectively. The fracture forms of RE alloy are ductile rupture.

Key words: Mg-4Al-4Si magnesium alloy; reciprocating extrusion; microstructure refine; mechanical property

近年来,节能与减排日益受到重视,追求轻量化、 高性能已成为航空航天及汽车制造业发展的必然趋 势。镁合金作为最轻的金属结构材料,具有密度低、 比强度和比刚度高、导热性好、电磁屏蔽效果佳、易 回收、资源丰富等优点,在汽车、航空航天和电子产 品等领域有着广阔的应用前景^[1-4]。但是,由于镁合金 强度低、抗蠕变性能差、塑性差和耐蚀性差等原因, 使其应用范围受到一定的限制^[5]。与钢铁和铝合金在 工程中的应用相比,镁业的应用规模只有铝业的1/50、 钢铁工业的1/160^[6]。因此,研究与开发高性能镁合金, 扩大其应用范围已成为当务之急。其中,开发蠕变抗 力较高的耐热镁合金是目前研究的热点之一。

Mg-Al-Si 合金是 20 世纪 70 年代德国大众汽车公司开发的压铸耐热镁合金。当温度为 170 ℃ 时, AS41

基金项目: 陕西省教育厅自然科学专项科研计划资助项目(2010JK470); 陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2010JM6009) 收稿日期: 2011-08-19; 修订日期: 2012-04-12

通信作者: 宋佩维, 副教授, 博士; 电话: 13892633273; E-mail: spwsyh@163.com

的蠕变强度比 AZ91 和 AM60 的高,具有良好的伸长 率、屈服强度和抗拉强度,可应用于汽车发动机的变 速箱、电动机架等。该合金具有良好高温性能的主要 原因是在晶界处形成细小弥散分布的稳定析出相 Mg₂Si。因此,它具有高熔点(1 085 ℃)、低密度(1.9 g/cm3)、高弹性模量等^[7]特点。然而,这种合金只能采 用压铸,而不能采用砂型或金属型铸造,因为在较慢 的冷速下, 脆性 Mg₂Si 相呈粗大的汉字状, 极大地降 低材料的伸长率和抗拉强度,恶化力学性能^[8]。因此, 如何细化 Mg₂Si 相颗粒是提高这类合金性能的关键。 采用微合金化^[8-10]、快速凝固^[3]技术细化组织;此外, 还有采用机械合金化、热挤压和粉末冶金等方法细化 含 Si 镁合金。尽管上述方法在细化组织、提高性能方 面取得了效果,但也存在不足。如合金化会使材料的 抗腐蚀性能下降,且细化能力有限;快速凝固在制备 大体积块材方面有较大的困难;机械合金化、热挤压 和粉末冶金方法存在工序多、污染和氧化严重等缺 点[11]。作为大塑性变形技术的往复挤压工艺[12-13]是一 种新的独特的晶粒细化方法,可以直接对不同初始状 态的材料进行往复挤压,其特点是材料在进行正挤压 的同时又受到镦粗变形,挤压前后试样的形状保持不 变,可往复多次进行挤压变形,产生较大的累积应变, 使基体组织发生动态再结晶而细化,得到超细的等轴 晶组织;同时,也使粗大的第二相硬质颗粒发生破碎、 细化,呈弥散状分布,从而使材料获得优异的力学性 能。采用往复挤压工艺, CHU 等^[12]对颗粒增强 6061 Al 复合材料、RICHERT 等^[13]对 AlMg5 合金、LEE 等^[14] 对 7075 铝合金、王渠东等^[15]对 ZK60 合金及 GUO 和 SHECHTMAN^[16]对 Mg-6Zn-1Y-0.6Ce-0.6Zr 合金进行 研究,取得了较好的效果。

在前期研究工作中^[17-19],采用往复挤压技术对 Si 含量较高(2.0%,质量分数,下同)的 Mg-4Al-2Si (AS42) 合金组织进行细化,制备出了室温与高温性能良好的 AS42 镁合金。

如果进一步提高 Si 含量(4.0%),并采用往复挤压 技术研究、开发耐热性能更好的 Mg-4Al-4Si(AS44)高 温镁合金,将具有重要的工程应用价值和理论指导意 义。本文作者研究铸态 Mg-4Al-4Si(AS44)合金经过不 同道次往复挤压后组织与性能的变化规律,重点探讨 Mg₂Si 相颗粒的细化效果与细化机制。

1 实验

1.1 制备铸态试样

研究用 Mg-4Al-4Si(AS44)合金的名义化学成分 (质量分数)为 Al 4.0%、Si4.0%,其余为 Mg。该合金 中 Si 是以自制的 Al-Si 中间合金形式加入的。合金在 SG2-5-10 型井式坩埚炉中采用工业专用保护剂进行 熔炼。当熔体温度达到 740 ℃时加入中间合金,用石 墨棒搅拌熔体约 3 min,然后保温 10 min 使中间合金 充分溶解,使 Al、Si 的含量达到设计要求。再经过精 炼后于 720 ℃下保温 20 min 浇注到石墨模中,铸成 *d* 50 mm×120 mm 的铸锭。对铸锭进行 420 ℃、保温 12 h 的均匀化处理。

1.2 往复挤压铸态试样

使用专用模具,在 YJ32-3150KN 液压机上对铸态合金进行往复挤压。图 1 所示为往复挤压结构示意 图。首先将试样 3 装入挤压筒内,在 350 ℃、6 MPa 下进行预挤压,使试样充满型腔,然后再升温进行正式挤压。挤压为温度 380 ℃,压力 9 MPa,挤压比为 12.7:1,挤压速度为 3 mm/min。施加压力使两顶杆 A、B 以相同速度向同一方向运动,挤压筒 2 、5 和模芯 4 静止不动。当试样被完全压入挤压筒 5 内时挤压停止,这时就完成了第一次挤压。在此挤压过程中,试样在挤压筒 2 内受到了正挤压变形,而在挤压筒 5 内受到了镦粗变形。然后,杆 A、B 再以相同速度、同时反向运动,完成第二次挤压。如此往复进行挤压,使材料的组织得到细化。最后去掉一端的顶杆(如杆 A),挤出试件。本实验定义试样通过模芯的次数为挤压道次,实验挤压道次为 4、8。



图1 往复挤压结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of reciprocating extrusion apparatus: 1—Ram A; 2—Container A; 3—Billet; 4—Neck die; 5— Container B; 6—Ram B

1.3 组织与性能检测

将铸态和不同挤压道次下的试样制取金相试样。 试样浸蚀剂为 60 mL 乙醇 + 20 mL 醋酸 + 19 mL H₂O + 1 mL HNO₃; 显微组织观察在 Olympus 光学显 微镜上进行;硬度检验在 HV-120 维氏硬度计上进行; 拉伸试验采用 d 6 mm×30 mm 标准短试样在 WDW3100 电子万能拉伸机上进行;用 JSM-6700F 型 扫描电镜观察断口形貌。

2 结果与分析

2.1 显微组织细化

2.1.1 Mg₂Si 相组织细化

图 2 所示为铸态 AS44 合金的 XRD 谱。由图 2 可 见,合金主要由 α-Mg 基体、β-Mg₁₇Al₁₂ 相和 Mg₂Si 相组成。

图 3 所示为不同道次往复挤压 AS44 合金中 Mg₂Si 相的横截面组织。由图 3 可见,铸态合金中 Mg₂Si 相颗粒有 3 种形式存在:粗大的骨骼状、块状 和汉字状。骨骼状颗粒尺寸达 120 µm 左右(见图 3(a)); 挤压 4 道次时,试样边缘的 Mg₂Si 相颗粒已较为细小, 平均尺寸约 3 µm 左右(见图 3(b));试样心部尚有少



图 2 铸态 AS44 合金 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of as-cast AS44 alloy

量比较粗大的 Mg₂Si 相颗粒,尺寸约 20 μm(见图 3(c)); 挤压 8 道次时,试样边缘 Mg₂Si 相颗粒进一步细化,



20 µm

in AS44 alloys during different reciprocating extrusion passes: (a) As-cast; (b) Margin, 4 passes; (c) Center, 4 passes; (d) Margin, 8 passes; (e) Center, 8 passes 分布较均匀,尺寸约 2 μm 左右(见图 3(d));试样心部 Mg₂Si 相颗粒也基本上得到完全细化,只剩极少量较 粗大的 Mg₂Si 相颗粒,粗大颗粒尺寸约 20 μm(见图 3(e))。

试样边缘与心部组织细化程度不同的主要原因是由于往复挤压过程中,试样边缘部位受到的挤压变形较剧烈、应力较大,所以 Mg₂Si 相颗粒的细化效果较好,而心部区域受到的挤压变形相对较小、应力也较小,所以 Mg₂Si 相颗粒的细化效果就较差。

经计算, Mg-4Al-2Si (AS42)合金中 Mg₂Si 相的体积分数为 3.8%, AS44 合金中 Mg₂Si 相的体积分数为 7.6%。与 AS42 合金相比,由于 Si 含量增大,使得 AS44 合金中 Mg₂Si 相的体积分数明显增加, Mg₂Si 相颗粒形貌也发生显著变化,由最初的相对细小的汉 字状转变为粗大的骨骼状和块状,导致往复挤压破碎 Mg₂Si 相颗粒所需应力急剧增加,与往复挤压 8 道次

AS42 合金^[17]中 Mg₂Si 相颗粒的细化相比, AS44 合金的细化效果相对较差。

2.1.2 基体组织细化

图 4 所示为不同道次往复挤压 AS44 合金中 α-Mg 基体的横截面组织。由图 4 可见,铸态合金的晶粒较 粗大,平均尺寸约在 50 μm 左右(见图 4(a))。挤压过 程中发生了动态再结晶,晶粒得到细化。挤压 4 道次 时,试样边缘和心部的晶粒尺寸均约为 9 μm(见图 4(b) 和(c));挤压 8 道次时,试样边缘和心部的晶粒尺寸均 约为 8 μm(见图 4(d)和(e))。可见,往复挤压使基体组 织得到较充分的细化,而且试样边缘和心部晶粒的细 化程度基本均匀、一致。

同样,与往复挤压 8 道次时 AS42 合金的晶粒尺 寸为 1.5 μm 相比^[17], AS44 合金中 α-Mg 基体组织的 细化效果相对较差。实际上, Mg₂Si 相颗粒的细化程 度对基体组织的细化效果有显著影响。大量细小、弥



(b) Margin, 4 passes; (c) Center, 4 passes;(d) Margin, 8 passes; (e) Center, 8 passes

第 22 卷第 7 期

散分布的 Mg₂Si 相颗粒一方面能够成为再结晶形核 位置,细化晶粒;另一方面能够有效抑制晶粒长大, 从而促进晶粒细化。可见,欲使 AS44 合金中基体晶 粒更加细小,那么进一步细化 Mg₂Si 相颗粒就非常 重要。

2.1.3 Mg₁₇Al₁₂相组织细化

根据研究结果^[18],结合图 4 可知,铸态 AS44 合 金中的 β-Mg₁₇Al₁₂相实际上也有 3 种形式:1)存在于 α-Mg 晶界上的白色离异共晶;2)从 α-Mg 固溶体中 析出的黑色二次相;3)在早期凝固阶段长大形成的游 离态、点状、黑色相。由于二次β-Mg₁₇Al₁₂相和点状 β-Mg₁₇Al₁₂相含量太少,在普通光镜下无法分辨,实 际上所能看到的主要是离异共晶β-Mg₁₇Al₁₂相。而往 复挤压后β-Mg₁₇Al₁₂相己非常细小,与破碎的 Mg₂Si 颗粒混在一起,在普通光镜下已难以分辨。

2.1.4 细化机制

Mg₂Si 颗粒的脆韧性转变温度为 450 ℃^[7],在 380 ℃下挤压会使颗粒发生脆性断裂。往复挤压实际上是 正向挤压和镦粗过程的复合。在不断的挤压、镦粗过 程中, Mg₂Si 颗粒不断地破碎、细化。同时,在挤压 过程中,破碎的 Mg₂Si 颗粒趋于沿纵向流动而进行重 新分布,在镦粗过程中,破碎的 Mg₂Si 颗粒则趋于沿 横向流动而进行重新分布^[20-21],如此多次往复挤压, 使颗粒趋于均匀、弥散分布。

根据粒子发生破碎的已有研究结果^[20-21],可以推 知 Mg₂Si 颗粒的破碎与细化机制主要有 3 种可能: 1) 弯曲折断机制,对弧形或树枝状颗粒而言,一个大角 度弯曲很容易在瞬间发生并使颗粒发生断裂; 2) 短纤 维加载机制,对长条状颗粒而言,由于高的拉应力的 转移与颗粒纵横比成一定比例,此时的应力将使它发 生断裂; 3) 剪切机制,对于不易破碎的等轴晶粒而言, 当它通过挤压模壁区域时,若受到的剪切应力足够大 时将发生断裂。而且, 3 种破碎机制的难易程度差异 较大:颗粒依弯曲机制破碎较易,依短纤维加载机制 破碎居中,依剪切机制破碎最难。同时,发生破碎的 颗粒在高温下(380 ℃)由于曲率效应将发生圆整化。

在 AS44 铸态合金中, Mg₂Si 颗粒存在 3 种形态: 骨骼状、块状和汉字状。根据上述破碎、细化机理可 推知, 骨骼状和汉字状 Mg₂Si 颗粒将依弯曲机制而破 碎成块状或条状; 条状颗粒依短纤维加载机制而破碎; 多边形块状 Mg₂Si 颗粒将依剪切机制而破碎。其中, 汉字状颗粒破碎较易, 骨骼状颗粒破碎较难, 多边形 块状颗粒破碎最难。这就解释了挤压态 AS44 合金中 Mg₂Si 颗粒的细化程度与挤压态 AS22 合金的相比, 效果较差的主要原因了。即由于铸态 AS44 合金中存 在大量粗大的骨骼状 Mg₂Si 颗粒,初次挤压后形成大量块状颗粒,导致往复挤压破碎颗粒所需应力急剧增加,使得颗粒继续细化比较困难,细化效果相对较差; 而铸态 AS42 中存在较多的是汉字状 Mg₂Si 颗粒,其 细化则较为容易,细化效果也较为理想。

往复挤压过程的计算机模拟表明^[22],材料在挤压 模具(见图 1)内的 I 区与 II 区连接倒角处变形最剧烈, 最大应力也分布在该倒角处,材料通过挤压筒倒角处 附近区域时,受到的剪切应力最大,块状 Mg₂Si 颗粒 在此区域发生了破碎。这也就是试样边缘和心部的 Mg₂Si 颗粒破碎效果产生差异的根本原因,如图 3 和 4 所示。

基体组织由于动态再结晶而细化,亦有诸多研 究^[20,23-24]。挤压使材料发生强烈塑性变形,从而产生 大量的位错和剧烈的晶界扭曲,这就为动态再结晶提 供了驱动力;另外,挤压破碎的细小第二相颗粒也可 成为动态再结晶的晶核,激活更多的动态再结晶,从 而加快再结晶形核并阻止再结晶晶粒的长大;更重要 的是动态再结晶也会累积,最终使材料发生非连续完 全动态再结晶而细化^[20]。可以推知,往复挤压 AS44 合金也将通过以下 4 个方面的作用使基体晶粒得到细 化:1)通过累积动态再结晶,使再结晶得以彻底完成; 2)提供大量均匀分布的第二相,使其成为再结晶形核 位置;3)增加晶内缺陷(如增加位错密度、晶界畸变 加剧)使再结晶形核数目增多;4)大量细小、弥散分 布的第二相抑制晶粒长大。

2.2 力学性能

往复挤压 AS44 合金的力学性能如表 1 所列。

表1 往复挤压 AS44 合金的力学性能

Table 1Mechanical properties of reciprocating extrusionAS44 alloys

Pass	HV	$\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	σ₀.₂/MPa	$\delta_5/\%$	•
0	66.5	108.8	72.3	2.6	-
4	68.5	232.8	148.8	7.8	
8	61.8	251.7	210.5	14.8	

由表 1 可知, 挤压 4 道次时, AS44 合金的硬度最高, 为 68.5 HV。随挤压道次的增加, 合金的强度和 塑性不断提高。挤压 8 道次时, 抗拉强度 σ_0 为 251.7 MPa, 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 达到 210.5 MPa, 伸长率 δ 为 14.8%。 与铸态相比, 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别提高 了 131.3%、191.1%和 469.2%。往复挤压后合金的抗 拉强度、屈服强度和伸长率的大幅度提高, 得益于基 研究表明^[17], Mg-4Al-2Si(AS42)合金往复挤压 8 道次时,抗拉强度 σ_b 为 283.5 MPa,屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为 269.1 MPa,伸长率 δ 为 19.3%。尽管挤压态 AS44 合 金的力学性能较铸态 AS44 合金有较大幅度的提高, 但是与往复挤压 8 道次的 AS42 合金相比^[17–18],其力 学性能仍处于较低水平,主要原因是 Mg₂Si 相颗粒的 细化效果较差。

如果采用合金化或其它先进的凝固技术等,将粗大的骨骼状 Mg₂Si 相颗粒转变为相对细小的汉字状 Mg₂Si 相颗粒,再经过后续的大塑性变形技术,如往 复挤压等,就可以得到更加细小、弥散分布的 Mg₂Si 相颗粒及细小、均匀的基体组织,将会使合金的力学 性能得到更进一步的提高。

2.3 断口形貌

图 5 所示为 AS44 合金在不同状态下的室温拉伸 断口的 SEM 像。由图 5 可见,铸态合金的 Mg₂Si 相 颗粒较为粗大,结合图 4(a)可知,基体的晶粒也很粗 大,断口上有解理台阶和撕裂棱,呈现准解理脆性断 裂的特征(见图 5(a)),力学性能较差。经过4道次往复 挤压后,骨骼状 Mg₂Si 相颗粒得到破碎,形成大小不 一的多边形块状;原来的多边形块状 Mg₂Si 相颗粒得 到了初步细化;汉字状 Mg₂Si 已经较细小了,基体组 织迅速细化;断口韧窝较小、密度较大,细小的 Mg₂Si 颗粒存在于韧窝底部,呈现韧性断裂的特征;但是, 仍然存在部分较粗大的块状 Mg-Si 相颗粒(见图 5(b))。 经过8道次的往复挤压后,块状 Mg₂Si 相颗粒进一步 细化;汉字状 Mg₂Si 相颗粒呈细小、弥散状分布于基 体组织中; 基体组织的细化则不十分明显, 断口韧窝 也较小、密度较大,细小的 Mg₂Si 颗粒存在于韧窝底 部,呈现韧性断裂特征。此时,仍存在个别较粗大的 块状 Mg₂Si 相颗粒, 但与挤压 4 道次相比, 已大为减 少(见图 5(c))。这时的力学性能也得到了进一步的提 高,如表1所列。

3 结论

1) 往复挤压可显著细化 AS44 合金中的 Mg₂Si 相 颗粒。随挤压道次的增加, Mg₂Si 相颗粒逐步细化。 往复挤压 4 和 8 道次后, Mg₂Si 颗粒尺寸由铸态下的 120 μm 分别减小至 3 和 2 μm, 呈细小、弥散形式分 布于基体组织中。但在挤压 4 和 8 道次后,试样心部



图 5 铸态及挤压态 AS44 合金试样拉伸断口的 SEM 像 Fig. 5 SEM images of fracture for as-cast and reciprocating extrusion AS44 alloys after tensile test: (a) As-cast; (b) 4 passes; (c) 8 passes

仍存在少量较粗大的 Mg₂Si 相颗粒,尺寸约 20 μm。

2) 往复挤压可显著细化 AS44 合金的基体组织。 挤压过程中发生了动态再结晶,使晶粒得到细化。往 复挤压 4 和 8 道次后,α-Mg 基体晶粒尺寸由铸态下的 约 50 μm 分别减小至 9 和 8 μm,形成了较为细小、均 匀的再结晶等轴晶组织。

3) 往复挤压可使 AS44 合金的力学性能大幅度提高。挤压 8 道次时,抗拉强度为 251.7 MPa,屈服强度达到 210.5 MPa,伸长率为 14.8%。与铸态合金相比,上述力学性能指标分别提高了 131.3%、191.1%和 469.2%。合金力学性能提高的主要原因在于基体组织的细晶强化和 Mg₂Si 相的弥散强化作用。

1868

4) 合金室温拉伸的断裂形式随铸态和挤压态而 发生变化。铸态合金的拉伸断裂形式为准解理脆性断 裂; 往复挤压4和8道次时,合金拉伸断裂形式为微 孔聚合型韧性断裂。

REFERENCES

- LIN H K, HUANG J C, LANGDON T G. Relationship between texture and low temperature superplasticity in an extruded AZ31 Mg alloy processed by ECAP [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402: 250–257.
- [2] KIM H K, LEE Y I, CHUNG C S. Fatigue properties of a fine-grained magnesium alloy produced by equal channel angular pressing [J]. Scripta Mater, 2005, 52: 473–477.
- [3] YOON S C, HONG S J, HONG S I, KIM H S. Mechanical properties of equal channel angular pressed powder extrudates of a rapidly solidified hypereutectic Al-20wt%Si alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 449/451: 966–970.
- [4] 陈 彬,林栋樑,曾小勤,卢 晨,彭颖红.挤压和等通道角挤压制备高强度 Mg97Y2Zn1 镁合金[J].中国有色金属学报,2010,20(4):613-619.

CHEN Bin, LIN Dong-liang, ZENG Xiao-qin, LU Chen, PENG Ying-hong. High strength $Mg_{97}Y_2Zn_1$ alloy processed by extrusion and equal channel angular pressing [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 613–619.

[5] 李英杰,张秀芝,李 锋,陈立佳.等通道转角挤压 Mg-1Zn-2Nd合金的力学性能[J].特种铸造及有色合金,2010, 30(5):408-410.

LI Ying-jie, ZHANG Xiu-zhi, LI Feng, CHEN Li-jia. Mechanical properties of Mg-1Zn-2Nd magnesium alloy by equal channel angular pressing [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(5): 408–410.

 [6] 刘天模,刘建忠,卢立伟,袁晗琦,时秀玲,潘复生.双向双 通道变通径挤压 AZ31 镁合金的显微组织及变形行为[J].
 中国有色金属学报,2010,20(9):1657-1664.

LIU Tian-mo, LIU Jian-zhong, LU Li-wei, YUAN Han-qi, SHI Xiu-ling, PAN Fu-sheng. Microstructure and deformation behavior of dual-directional extrudedAZ31 magnesium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1657–1664.

- [7] 藏树俊,周 琦,马 勤,安 亮.金属间化合物 Mg₂Si 研究进展[J]. 铸造技术, 2006, 27(8): 866-870.
 ZANG Shu-jun, ZHOU Qi, MA Qin, AN Liang. Research progress of intermetallic compound Mg₂Si [J]. Foundry Technology, 2006, 27(8): 866-870.
- [8] YUAN Guang-yin, LIU Man-ping, DING Wen-jiang, AKIHISAI. Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Si-based

alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 57: 314–320.

 [9] 黄晓锋, 王渠东, 曾小勤, 朱燕萍, 卢 晨, 丁文江. 钕对 Mg-5Al-1Si 高温蠕变及组织性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(3): 361-364.
 HUANG Xiao-feng, WANG Qu-dong, ZENG Xiao-qin, ZHU

Yan-ping, LU Chen, DING Wen-jiang. Effect of neodymium on microstructure and high temperature creep properties of Mg-5Al-1Si magnesium alloy [J]. Journal of the Rare Earth Society, 2004, 22(3): 361–364.

- [10] 王 岩, 戚文军, 郑飞燕, 翁康荣, 赵红亮. Ca、Sr 对 AS21 镁 合金显微组织的影响[J]. 铸造, 2010, 59(7): 658-661.
 WANG Yan, QI Wen-jun, ZHENG Fei-yan, WENG Kang-rong, ZHAO Hong-liang. Effects of Ca and Sr on microstructure of AS21 magnesium alloy [J]. Foundry, 2010, 59(7): 658-661.
- [11] 陈勇军, 王渠东, 李德江, 林金保, 翟春泉, 丁文江. 往复挤 压工艺制备超细晶材料的研究与发展[J]. 材料科学与工程学 报, 2006, 24(1): 152-155. CHEN Yong-jun, WANG Qu-dong, LI De-jiang, LIN Jin-bao, ZHAI Chun-quan, DING Wen-jiang. Research and development of ultrafine-grained materials fabricated by cyclic extrusion

of ultrafine-grained materials fabricated by cyclic extrusion compression [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006, 24(1): 152–155.

- [12] CHU Hsu-shen, LIU Kuo-shung, YEH Jien-wei. Aging behavior and tensile properties of 6061Al-0.3 μm Al₂O_{3P} particle composites produced by reciprocating extrusion [J]. Scripta Material, 2001, 45: 541–546.
- [13] RICHERT M, STUWE H P, ZEHETBAUER M J, RICHERT J, PIPPAN R, MOTZ C, SCHAFLER E. Work hardening and microstructure of AlMg₅ after severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 355: 180–185.
- [14] LEE Shih-wei, YEH Jien-wei, LIAO Yong-shun. Premium 7075 aluminum alloys produced by reciprocating extrusion [J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6: 936–943.
- [15] 王渠东,林金保,彭立明,陈永军. 往复挤压变形对 ZK60 镁 合金力学性能的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(1): 55-58.
 WANG Qu-dong, LIN Jin-bao, PENG Li-ming, CHEN Yong-jun. Influence of cyclic extrusion and compression on the mechanical property of Mg alloy ZK60 [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(1): 55-58.
- [16] GUO X F, SHECHTMAN D. Reciprocating extrusion of rapidly solidified Mg-6Zn-1Y-0.6Ce-0.6Zr alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188: 640–644.
- [17] 宋佩维, 井晓天, 郭学锋. 往复挤压 Mg-4Al-2Si 镁合金的组织细化与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 111-117.

SONG Pei-wei, JING Xiao-tian, GUO Xue-feng. Structures refinement and mechanical properties of Mg-4Al-2Si Mg alloy by reciprocating extrusion [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(1): 111–117.

- [18] 宋佩维. 往复挤压 Mg-4Al-2Si 镁合金的显微组织与高温力学 性能[J]. 金属热处理, 2010, 35(2): 19-23.
 SONG Pei-wei. Microstructure and elevated temperature mechanical properties of Mg-4Al-2Si alloy by reciprocating extrusion [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(2): 19-23.
- [19] 宋佩维. 往复挤压 Mg-4Al-2Si 镁合金的晶粒细化[J]. 中国有 色金属学报, 2010, 20(4): 606-612117.
 SONG Pei-wei. Grain refine of Mg-4Al-2Si magnesium alloy by reciprocating extrusion process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 606-612117.
- [20] YUAN S Y, YEH J W, TSAU G H. Improved microstructure and mechanical properties of 2024 aluminum alloy produced by a reciprocating extrusion method [J]. Materials Transactions, JIM, 1999, 40: 233–241.

- [21] YEH J W, LIU W P. The cracking mechanism of silicon particles in an A357 aluminum alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(11): 3558–3567.
- [22] 叶永南,刘 君,郭学锋,徐春杰,张忠明. 热力耦合数值模 拟往复挤压 AZ31 成形过程[J]. 兵器材料科学与工程,2007,6: 10-13.

YE Yong-nan, LIU Jun, GUO Xue-feng, XU Chun-jie, ZHANG Zhong-ming. Numerical simulation on reciprocating extrusion of AZ31 alloy by thermal-mechanical coupling method [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 6: 10–13.

- [23] GALIYV A, KAIBY R, GOTTSTEIN G. Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60 [J]. Acta Materialia, 2001, 49(7): 1199–1207.
- [24] SITDIKOV O, KAIBYSHEV R. Dynamic recrystallization in pure magnesium [J]. Materials Transactions, 2001, 42(9): 1928–1937.

(编辑 何学锋)