

挤压对 AZ91 铸造镁合金力学性能的影响

Effect of Extrusion on Mechanical Properties of AZ91

Cast Magnesium Alloy

李淑波¹, 吴 昆², 郑明毅², 熊守美¹

(1 清华大学 机械工程系先进成形制造重点实验室, 北京 100084;

2 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

LI Shu-bo¹, WU Kun², ZHENG Ming-yi², XIONG Shou-mei¹

(1 Key Laboratory for Advanced Manufacturing by Materials

Processing Technology, Department of Mechanical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 School of Materials Science

and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 对挤压变形前后的 AZ91 镁合金进行了微观组织和力学性能研究。结果表明: 挤压成形后合金的抗拉强度和塑性均得到提高; 孪晶的产生, 导致挤压合金室温压缩的应力-应变曲线上有屈服平台出现; 晶粒尺寸强烈影响合金的强度。室温时, 挤压合金的流变强度较铸态的高, 而高温压缩的强度则较铸态的低。

关键词: AZ91 合金; 挤压变形; 孪晶; 力学性能

中图分类号: TG146 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2006)12-0054-04

Abstract: The microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy before and after extrusion were investigated. The results showed that tensile strength and ductility of extruded AZ91 alloy were greatly enhanced compared with the sample of as-cast AZ91 due to grain refinement. Obvious yield phenomenon can be observed at true stress-strain curve of compression of extruded alloy as the result of twinning. The flow stress was strongly influenced by the grain size. Flow stress of as-extruded AZ91 alloy were higher than that of the as-cast alloy at room temperature, but the flow stress of as-extruded alloy was obviously decreased with the increase of deformation temperature.

Key words: AZ91 alloy; extrusion deformation; twin; mechanical property

AZ91 属于 Mg-Al-Zn-Mn 系铸造镁合金, 由于其良好的铸造性能而成为目前工业中最常用的压铸镁合金之一。然而, AZ91 镁合金具有密排六方晶体结构, 承受的变形量有限, 特别是在低温变形条件下更是如此, 因此常通过热加工来生产镁合金, 结果表明, AZ91 合金可通过挤压、轧制等方式进行热加工^[1-3]。其中挤压成形的条件没有轧制的条件苛刻, 因此挤压成为铸造镁合金常用的热加工方式。同时挤压还具有细化晶粒的作用, 能同时提高合金的强度和塑性。

徐春杰^[4]等对 AZ91 合金进行热挤压, 发现通过挤压变形, 合金的晶粒显著细化, 抗拉强度、屈服强度、延伸率等力学性能均得到提高。于宝义^[1]的研究结果认为挤压比对合金的力学性能有很大的影响, 通过控制挤压比实现对组织形态的控制, 可以获得较高力学性能的挤压管材。Ravi Kumar^[5]分别在 335, 370, 415 °C 对 AZ91 合金进行热挤压, 发现随着挤压温度的

降低, 合金的晶粒尺寸减小。关于铸态和挤压态合金在室温和高温时压缩性能差别的报道较少, 因此, 本工作以常用的铸造 AZ91 合金为研究对象, 对其进行常规的热挤压, 通过对挤压前后镁合金的室温和高温力学性能测试, 分析了挤压对合金力学性能的影响。

1 实验材料及方法

实验材料为 AZ91 铸造镁合金, 其化学成分(质量分数/%)为: 8.5~9.5 Al, 0.45~0.9 Zn, 0.15~0.23 Mn, 0.02 Si, 余量为 Mg。制备方法: 将工业用的 AZ91 合金铸锭在 800 °C 融化后注入 $\phi 105\text{mm}$ 的模具中, 施加 50 MPa 的压力, 保压 5 min 后退模。溶液的浇注温度约为 700 °C, 注入前将模具预热至 423 °C。在融化合金过程中使用 MgCl₂+CaF₂ 精练剂。

挤压工艺参数的选择对材料整体性能和表面质量

有很大的影响。温度过高和速度过快,会在材料的表面产生裂纹;在给定温度下,速度过低会产生低速撕裂⁶⁾。为了获得表面质量良好的挤压材料制品,必须选择合理的挤压工艺参数。根据对合金在不同温度和应变速率条件下的压缩后试样的表观形貌观察⁷⁾,确定 AZ91 镁合金的最佳变形条件:温度在 350~400℃ 范围内、应变速率在 0.01~0.1 s⁻¹ 范围内。因此,确定挤压工艺参数:坯料的温度为 375℃,挤压模具的温度为 320℃,压头的运动速度 4~5 mm/min,出料速度为 48~60 m/min,根据实际工程需要,挤压比固定为 12:1。挤压是在 7500 kN 卧式水压机上进行的。挤压前,将铸锭车削成 $\phi 97$ mm 的坯料。图 1 为挤压后合金的表观形貌。可以看出,在此工艺下挤压出的合金棒材表面光滑,质量较好,表明此工艺条件适宜镁合金挤压成形。

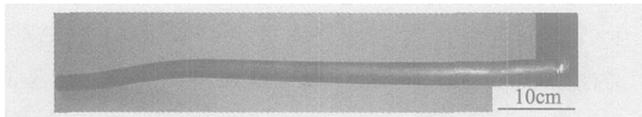


图 1 挤压态 AZ91 镁合金的表观形貌

Fig. 1 Macroscopic view of as-extruded AZ91 magnesium alloy

对挤压前后的材料进行了拉伸和压缩实验。拉伸

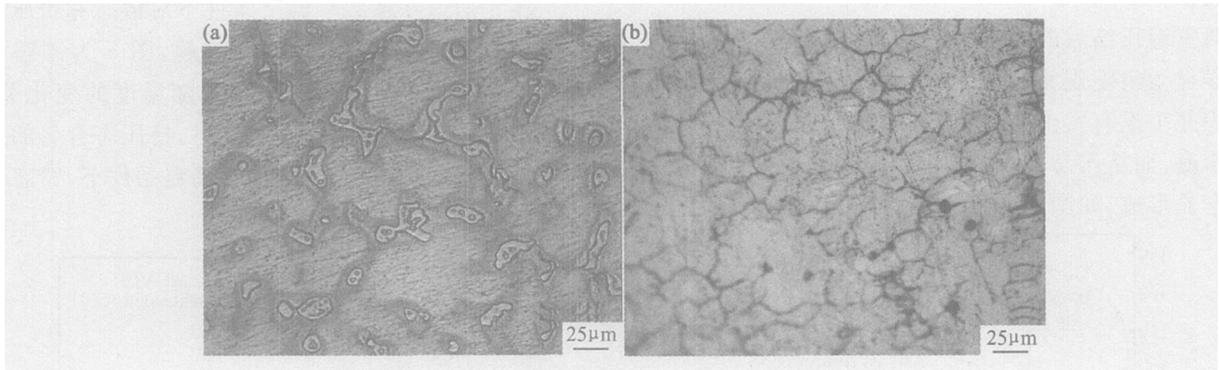


图 2 AZ91 镁合金的显微组织 (a) 挤压前; (b) 挤压后

Fig. 2 Microstructure of AZ91 magnesium alloys (a) as cast; (b) as-extruded

2.2 挤压对室温力学性能的影响

2.2.1 拉伸性能

表 1 为挤压前后 AZ91 镁合金的拉伸力学性能。从表 1 可以看出,与铸态相比,挤压后合金的抗拉强度、屈服强度和延伸率均得到提高。其中抗拉强度提高了 63%,屈服强度提高了 129%,延伸率提高了 83%。

与铝合金相比,晶粒细化对改善镁合金强度和塑性的效果更明显,即晶粒细化不仅能提高镁合金的强度,还能改善其塑性。根据 Hall-Petch 公式($\sigma = \sigma_0 +$

实验在 Instron 5569 万能电子试验机上进行,拉伸速度为 0.5 mm/min,试样的标距为 15 mm,截面为 2 mm × 6 mm。压缩实验在 Gleeble-1500D 热模拟试验机上进行,压缩试样为柱状,尺寸为 $\phi 8$ mm × 12 mm,压缩实验温度选择室温和高温两种,压缩的应变速率为 0.01 s⁻¹,高温压缩的温度为 250, 300, 350, 400, 450℃。挤压材料的拉伸和压缩试样均沿挤压方向截取。利用光学显微镜进行微观组织观察,试样均沿垂直于挤压方向截取,经粗磨、细磨、抛光后用苦味酸+酒精进行腐蚀。

2 结果及分析

2.1 挤压对微观组织的影响

图 2 为挤压前后 AZ91 镁合金的显微组织。从图 2a 可以看出, AZ91 镁合金的铸态显微组织是由 Al 和 Zn 在 Mg 中的固溶体及沿晶界不连续分布的 Mg₁₇Al₁₂ 金属间化合物组成。挤压后(见图 2b),晶界上几乎看不到 Mg₁₇Al₁₂ 金属间化合物,说明挤压变形使得 Mg₁₇Al₁₂ 相发生破碎,并离散分布于 α 固溶体中,同时可见挤压变形过程中合金发生了动态再结晶,再结晶的晶粒大致呈等轴状。

$Kd^{-1/2}$, 其中 σ 为屈服应力, σ_0 为单晶屈服应力, K 为常数, d 为晶粒尺寸),合金强度随晶粒尺寸的减小而增加。一般而言,常数 $K \propto M^2$ (M 为 Taylor 因子),常数 K 随 Taylor 因子的增大而增大,而 Taylor 因子通常取决于滑移系数目。相对体心立方和面心立方晶体而言,密排六方结构的晶体滑移系数少,因此相应的 Taylor 因子大(Mg 为 6.5, Al 为 3.06)。镁的 Hall-Petch 系数 K 为 280 MPa · m^{1/2},而纯铝相应的系数为 68 MPa · m^{1/2},所以晶粒尺寸对镁及其合金的强度影响较大⁸⁾。从图 2b 可见, AZ91 镁合金在挤压过程中发生了动态再结晶,晶粒得到细化,因而挤压后合金的

屈服强度得到提高。挤压导致的晶粒细化是提高合金强度的主要原因。其次, 还有研究认为, 镁及其合金的性能与织构具有强烈的依赖关系。镁合金经挤压后, 沿挤压方向形成基面织构, 而沿基面拉伸的强度性能要高于其他方向^[9]。

表 1 挤压和铸态 AZ91 镁合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of as-extruded and as-cast AZ91 magnesium alloys

Alloy	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	E / GPa	δ / %
As-cast	205	102	46	6
As-extruded	336	234	47	11

2.2.2 压缩性能

图 3 为挤压前后 AZ91 镁合金在室温、应变速率为 0.01s^{-1} 条件下压缩的真应力-应变曲线, 为了比较, 图 3 中同时给出沿挤压方向拉伸的应力-应变曲线。可以看出, 沿挤压方向拉伸和压缩的断裂强度相近, 但压缩时在较低的应力下就发生明显的屈服, 随后由于具有高的加工硬化率, 压缩强度增加很快, 而拉伸曲线则没有明显的屈服现象; 比较铸态和挤压态合金的压缩曲线可见, 挤压合金的屈服强度和断裂强度均高于铸态合金的, 铸态合金压缩的曲线上也没有明显的屈服现象。

对室温压缩后的铸态和挤压态 AZ91 镁合金进行了光学显微组织观察。结果表明, 铸态试样压缩前后的组织几乎没有发生变化, 只在晶界附近可观察到少量的孪晶, 而挤压态的试样压缩后在晶粒内部可见大量的孪晶形成, 如图 4 所示。

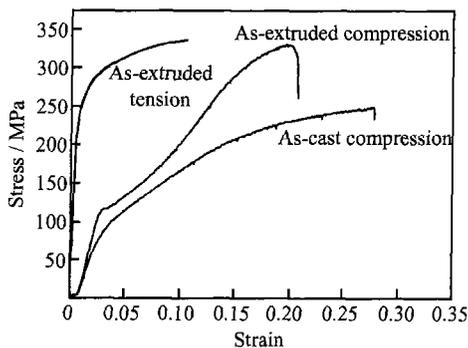


图 3 AZ91 镁合金拉伸和压缩的应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile and compressive stress-strain curves of AZ91 magnesium alloy

密排六方的镁 $c/a < \sqrt{3}$, K_1 和 K_2 之间的夹角 $\neq 90^\circ$, 基面 (0002) 将平分两个 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶所夹的锐角 ($86^\circ 18'$), 而 $\{1010\}$ 面将平分该锐角的补角 ($93^\circ 42'$)。研究表明^[10], 镁如果产生 (1012) 孪生, 则基面将受到

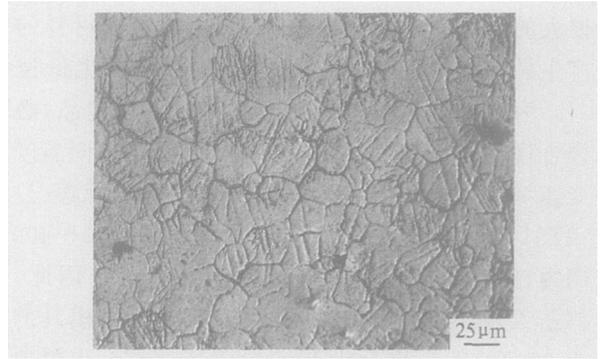


图 4 挤压态 AZ91 镁合金室温压缩后的显微组织

Fig. 4 Microstructure of as-extruded AZ91 magnesium alloy compressed at room temperature

压缩, 而柱面将会拉长。所以如果一个单晶体的基面平行于加载方向时, 压缩载荷可能产生孪生, 而拉伸载荷就不会出现孪生。当平行基面压缩时, 镁合金会发生 (1012) 孪生^[11]。根据上述理论可知, 挤压后 AZ91 镁合金中的 (0002) 基面平行于挤压方向, 当平行基面 (挤压方向) 压缩时会产生 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶, 而平行基面拉伸时没有孪晶产生, 孪晶的产生会导致压缩时的加工硬化率较大。

2.3 挤压对高温压缩性能的影响

在相同应变速率和温度条件下对铸态和挤压态的 AZ91 镁合金进行了高温压缩实验, 图 5 为铸态和挤压态 AZ91 镁合金压缩峰值应力随温度的变化关系。从图 5 可以看出, 在室温下压缩时, 挤压态合金的压缩强度高于铸态合金的强度, 而在高温条件下, 铸态合金的强度则高于挤压态合金的强度。

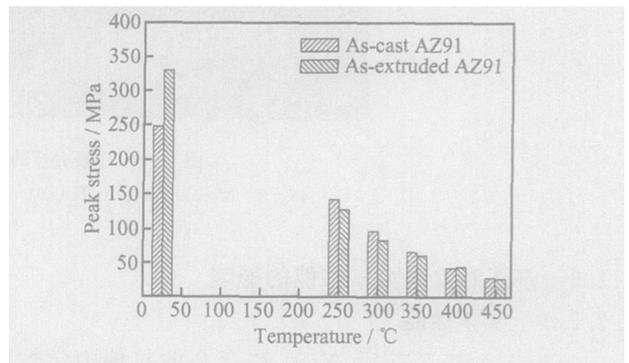


图 5 峰值应力随温度的变化曲线 ($\dot{\epsilon} = 0.01\text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Variation of compressive peak stress with temperatures ($\dot{\epsilon} = 0.01\text{s}^{-1}$)

对于多晶材料, 晶界因其特殊的结构而表现出特殊的性能, 当晶粒变形时位错不能穿越晶界层, 晶界成为位错运动的障碍。但晶界本身的强度是随温度而发生变化的, 当温度低于约 $0.5T_m$ (T_m 为熔点, 单位: $^\circ\text{C}$) 时晶界层的强度比晶内高, 成为强化层, 而当温度高于

约 $0.5T_m$ 时晶界层的强度低于晶粒内部,产生粘滞流动,晶界成为弱化层^[12]。镁的晶界扩散系数较铝高两个数量级^[13],因此高温下镁的晶界弱化作用也甚于铝。挤压后镁合金的晶粒尺寸得到极大的细化,晶界所占的比例增大,当在室温条件下变形时,晶界起到的是强化作用,随着变形温度的升高,晶界反而成为弱化层,导致挤压态合金的强度低于铸态合金的强度。

3 结论

(1) 挤压后,AZ91 镁合金的拉伸强度和塑性均得到提高,抗拉强度由铸态的 205MPa 提高到 336MPa,延伸率由铸态的 6% 提高到 11%。

(2) 室温下平行挤压方向对 AZ91 镁合金进行压缩,由于孪晶的产生,导致在压缩的应力-应变曲线上有屈服平台出现。

(3) 挤压细化了晶粒尺寸,导致室温压缩时挤压态合金的强度远高于铸态合金的强度,而高温压缩时,挤压态合金的强度低于铸态合金的强度。

参考文献

[1] 于宝义,包春玲,宋鸿武,等. 挤压 AZ91D 合金管件组织和力学性能的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(4): 223- 225.

[2] WEI Y H, WANG Q D, ZHU Y P, et al. Superplasticity and grain boundary sliding in rolled AZ91 magnesium alloy at high strain rates[J]. Mater Sci Eng, 2003, A 306(1- 2): 107- 115.

[3] PÉREZ-PRADO M T, DEL BALLE J A, RUANO O A. Achieving high strength in commercial Mg cast alloys through large strain rolling[J]. Mater Letter, 2005, 59(26) : 3299- 3303.

[4] 徐春杰,张忠明,郭学锋,等. 热挤压 AZ91D 镁合金的组织与力学性能[J]. 西安理工大学学报, 2005, 21(4) : 356- 360.

[5] RAVI KUMAR N V, BLANDIN J J, DESRAYANUD C, et al. Grain refinement in AZ91 magnesium alloy during thermomechanical processing[J]. Mater Sci Eng, 2003, A359(1- 2): 150- 157.

[6] 曾文凡,张绪虎. SiCw/2Al4Al 复合材料的挤压研究[J]. 稀有金属, 1999, 23(3): 177- 180.

[7] 李淑波. AZ91 合金和 SiCw/AZ91 复合材料的高温压缩变形行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

[8] 陈振华,夏伟军,严红革,等. 镁合金材料的塑性变形理论及其技术[J]. 化工进展, 2004, 23(2): 127- 135.

[9] MABUCHI I M, CHINO Y, IWASAKI H, et al. The grain size and texture dependence of tensile properties in extruded Mg-9Al-1Zn[J]. Mater Trans, 2001, 42(7) : 1182- 1189.

[10] 肖林. 密排六方金属的塑性变形[J]. 稀有金属材料与工程, 1995, 24(6): 21- 28.

[11] PARTRIDGE P G. The crystallography and deformation modes of hexagonal close packed metals[J]. Metallurgical Reviews, 1967, 12: 169- 194.

[12] 王德尊. 金属力学性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1993.

[13] WATANABE H, MUKAIT, MABUCHI M, et al. Superplastic deformation mechanism in powder metallurgy magnesium alloys and composites[J]. Acta Mater, 2001, 49(11): 2027- 2037.

收稿日期: 2006-07-17; 修订日期: 2006-09-12

作者简介: 李淑波(1975-), 女, 博士后, 研究方向为抗高温蠕变镁合金的研究与开发, 联系地址: 北京清华大学机械系(100084)。

(上接第 53 页)

[11] 韩劲,李玉宝,严永刚,等. n-HA/PA66/HDPE 复合生物材料的制备和性能研究[J]. 功能材料, 2005, 36(1): 146- 149.

[12] 沈健,嵇根定,胡柏星,等. 填充聚乙二醇包覆硅灰石对聚丙烯性能的影响[J]. 功能材料, 1992, 23(6): 361- 371.

[13] 袁锦瑶,高峰,刘建威,等. 聚烯烃接枝马来酸酐接枝率的测定——聚乙烯接枝[J]. 现代塑料加工应用, 1993, 3: 26- 30.

[14] SERPE G, JANRRIN J, DAWANS F. Morphology-processing relationship in polythylene-polyamide blends [J]. Polym Eng Sci, 1990, 30(9): 553- 559.

[15] ROOVER B D, SCLAVONS M, CARLIER V. Molecular characterization of maleic anhydride-functionalized polypropylene [J]. J Polym Sci: Part A: Polym Chem, 1995, 33(5): 829- 842.

[16] 谢晶曦,常俊标,王绪明. 红外光谱在有机化学和药物化学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 189- 201, 281- 287.

[17] OHMAE H, OKAZAKI M, HINO T. Encyclopedia of materials science and engineering [M]. Oxford: Pergamon Press, 1986.

[18] MUNEHISA YASUNIVA, RYOSUKE ENOSHITA, TETU OTAKEMURA. X-ray studies of polyethylene under high pressure[J]. J Appl Phys, 1976, 15(8): 1421- 1428.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30270399)

收稿日期: 2005-10-25; 修订日期: 2006-03-09

作者简介: 左奕(1972-), 女, 博士研究生, 从事生物材料的研究, 联系地址: 四川大学分析测试中心(东区)(610064)。