

## 均匀化处理对 AZ91 镁合金组织和力学性能的影响 \*

金军兵 王智祥 刘雪峰 谢建新

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要** 为改善铸态 AZ91 镁合金的力学性能和成形加工性能, 对铁模铸造试样进行了均匀化退火处理, 退火温度范围为 350—450 ℃, 退火时间范围为 5—24 h. 均匀化退火后  $Mg_{17}Al_{12}$  相呈细小的颗粒状分布在  $\alpha$ -Mg 基体上, 枝晶偏析大部分得到消除. 力学性能实验结果表明, 铸态 AZ91 镁合金的抗拉强度约为 163 MPa, 延伸率为 3.2%; 经过 380 ℃, 15 h 均匀化退火, 可获得最高延伸率达 11.2%, 抗拉强度 243 MPa; 经过 420 ℃, 5 h 均匀化退火, 可获得最高强度达 246 MPa, 延伸率达 10%.

**关键词** 镁合金, 均匀化, 显微组织, 力学性能

中图分类号 TG166.4

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2006)10-1014-05

## EFFECT OF HOMOGENIZING TREATMENT ON MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF AZ91 MAGNESIUM ALLOY

JIN Junbing, WANG Zhixiang, LIU Xuefeng, XIE Jianxin

School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Correspondent: XIE Jianxin, professor, Tel: (010)62332254, E-mail: jxxie@mater.ustb.edu.cn

Supported by Key Tackling Project of Science and Technology of Chongqing Metropolis

(No. CSTC.2004AA4003)

Manuscript received 2005-12-13, in revised form 2006-05-25

**ABSTRACT** In order to improve the mechanical properties and the workability of as-cast AZ91 magnesium alloy, homogenizing annealing treatment was carried out, the annealing temperatures ranged from 350 to 450 ℃ and the holding times from 5 to 24 h. After homogenizing treatment, the fine  $Mg_{17}Al_{12}$  phase distributed in the  $\alpha$ -Mg matrix, and dendritic segregation is almost eliminated. The tensile strengths of the as-cast AZ91 alloys, homogenized at 380 ℃ /15 h and 420 ℃ /5 h are about 163, 243 and 246 MPa, respectively, while the elongations are about 3.2%, 11.2% and 10%, respectively.

**KEY WORDS** magnesium alloy, homogenizing, microstructure, mechanical property

镁合金是目前工业应用中最轻的金属结构材料之一, 在航空、汽车和电子通信等领域得到日益广泛的应用. 镁合金具有资源较为丰富, 其产品易于回收利用等特点, 在能源与资源日益成为影响社会可持续发展的形势下, 其开发和利用越来越受到重视<sup>[1-3]</sup>. AZ91 镁合金是商业应用最广泛的镁合金之一, 铸态组织由基体  $\alpha$ -Mg 和  $Mg_{17}Al_{12}$  析出相组成, 其中  $Mg_{17}Al_{12}$  绝大部分呈粗大的网状分布在晶界, 只有少量的颗粒状  $Mg_{17}Al_{12}$  分布在晶内<sup>[4,5]</sup>. 晶界处粗大的  $Mg_{17}Al_{12}$  合金相在变形时容易形成裂纹源, 产生裂纹<sup>[6]</sup>, 使得 AZ91 的应用仅限于铸造态合金. 采用砂型铸造或铁模铸造时, AZ91 镁合金的

性能较差, 抗拉强度为 150—170 MPa, 延伸率为 2%—3%. 采用压铸成形时, 由于  $Mg_{17}Al_{12}$  的分布得到改善, 压铸件的力学性能可达抗拉强度 240 MPa、屈服强度 160 MPa、延伸率 4.5%. 有研究报道, 对压铸件进行 T6 处理 (410 ℃ 固溶 9 h+205 ℃ 时效 8 h) 后, 抗拉强度可提高到 280 MPa, 屈服强度可提高到 180 MPa, 伸长率可达 5%—6%<sup>[7]</sup>. 上述结果表明, 改善  $Mg_{17}Al_{12}$  的分布对于提高 AZ91 合金的性能有重要意义. 黄光胜等<sup>[8]</sup>以及彭建等<sup>[9]</sup>的研究发现, AZ31B, ZK60 镁合金经过均匀化退火可消除铸态组织的枝晶偏析, 提高镁合金的成形性能. 但国内外关于 AZ91 镁合金的均匀化退火工艺及其对力学性能的影响未见报道. 为简化 AZ91 镁合金的成形工艺, 扩大其应用范围, 同时探讨其用作变形镁合金 (首先需显著改善其塑性) 的可能性, 本工作提出了采用均匀化退火改善 AZ91 镁合金组织和性能的思路<sup>[10]</sup>, 研究确定了最佳的均匀化退火工艺参数.

\* 重庆市科技攻关重点资助项目 CSTC.2004AA4003

收到初稿日期: 2005-12-13, 收到修改稿日期: 2006-05-25

作者简介: 金军兵, 男, 1981 年生, 硕士生

## 1 实验方法

实验采用直径 93 mm 的 AZ91 镁合金铸坯，采用金属模浇铸而成，分析所得化学分析成分（质量分数，%）为 Al 8.40, Zn 0.88, Mn 0.34, Si 0.014, Fe 0.02, Ni 0.01, Cu 0.01, Mg 余量。均匀化退火温度选择 350、380、420、450 °C；保温时间选择 5、10、15、24 h。

试样从离铸坯中心约 2/3 距离处用线切割切取。试样均匀化退火采用管式电阻炉加热，保温结束后出炉空冷。金相试样采用 5% 的硝酸酒精溶液进行侵蚀，采用金相显微镜观察均匀化前后的显微组织。采用扫描电镜观察断口形貌和第二相组织形貌。在 MTS 材料试验机上测试材料的力学性能，拉伸试样按 GB/T16865-1997 标准加工。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 均匀化退火前后的显微组织

铸态合金的组织如图 1 所示，除了  $\alpha$ -Mg 基体外，存在着大量粗大的网状  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相，主要以不规则形状连续分布在晶界上，如图 1a 中的黑色相和图 1b 中的白色相。图 1b 中白色的  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 周围存在颜色较深的灰色部分，被认为是非平衡凝固产生的  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 离异共晶体，由共晶反应后的冷却过程中  $\alpha$ -Mg 固溶体中析出的二次  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 和  $\alpha$ -Mg 组成<sup>[11,12]</sup>。

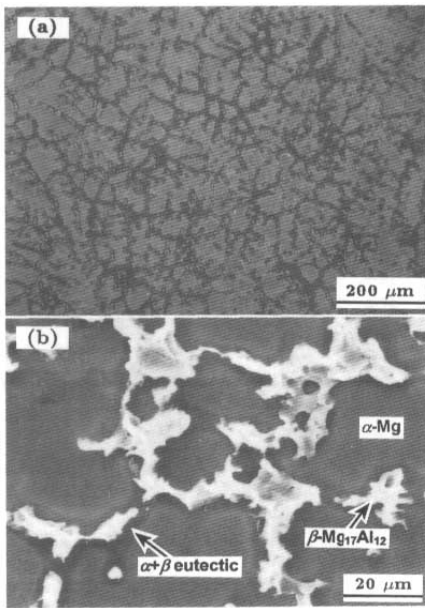


图 1 AZ91 合金的铸态组织

Fig.1 OM (a) and SEM (b) morphologies of as-cast AZ91 alloy. Net-like Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> phase ( $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) distributed along the boundaries of the matrix  $\alpha$ -Mg, ( $\alpha + \beta$ ) eutectic (deeply dark zones in Fig.1b) appeared between  $\alpha$ -Mg and  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>

350、380、420 °C 均匀化退火不同时间的组织如图 2 所示（450 °C 均匀化退火不同时间的组织与 420 °C 均匀化退火相应时间的情形基本相同，故未在图中同时给出）。由图可知，均匀化退火后，第二相的数量和形态发生了很大变化。在同一温度下，随着退火时间的延长，枝晶偏析减少，第二相数量也减少，分布变得越均匀；而在相同的退火时间下，随着退火温度的升高，枝晶偏析减少，第二相数量也减少，分布变得越均匀。在 350 °C 保温 5 h 时，均匀化后组织与铸态组织（图 1）相比，枝晶偏析只得到部分消除；保温时间增加到 24 h 时，枝晶偏析得到进一步的消除，晶界上的第二相数量减少，且分布明显变得非连续，但仍以分布在晶界为主。380 °C 下保温 5 h 的组织形态与 350 °C 保温 24 h 的组织形态相近，枝晶偏析与第二相数量基本相同。在 380 °C 下保温 15 h，大部分枝晶偏析得到消除，第二相主要集中在晶界上，也有少量分布在晶内。在 420 °C 下退火时，退火时间的变化对第二相颗粒的大小和分布的变化影响较小，枝晶偏析得到完全消除，第二相均匀弥散分布在  $\alpha$ -Mg 基体和晶界处。

由图 2 可知，在 350—420 °C、5—24 h 的条件范围内，提高均匀化温度对 AZ91 镁合金组织的影响比延长保温时间的影响要显著得多。

由图 1、2 的结果可知，在均匀化退火的加热升温以及保温过程中，分布在晶界以及枝晶间粗大的脆性 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相溶解在  $\alpha$ -Mg 中；在冷却过程中，Al 从过饱和的  $\alpha$ -Mg 固溶体中脱溶析出沉淀相 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub><sup>[13,14]</sup>，主要呈细小的颗粒状均匀分布在  $\alpha$ -Mg 基体中。

### 2.2 均匀化退火对抗拉强度和延伸率的影响

图 3 为铸态和两种条件均匀化后 AZ91 合金典型的拉伸曲线。三种条件下，拉断前应力-应变曲线基本重合，即均匀化退火基本不对拉伸曲线的形状产生影响，材料的屈服强度  $\sigma_{0.2}$  基本保持不变，约为 100 MPa。

图 4 为温度和保温时间对抗拉强度及延伸率的影响曲线，由图可知，AZ91 合金铸态时的抗拉强度约为 163 MPa，延伸率约为 3.2%。保温时间对抗拉强度和延伸率的影响规律一致。在不同均匀化温度下，随着保温时间的延长，抗拉强度和延伸率都呈现先增加，然后降低的趋势。这是因为均匀化退火使得位于晶界的粗大第二相数量减少，分布变得越均匀，有利于抗拉强度的提高。

而随着保温时间的延长，由图 2 可知，第二相进一步溶于基体，晶界上弥散的第二相颗粒减少，且晶粒有长大倾向，故抗拉强度和延伸率均呈下降趋势。

均匀化温度对抗拉强度和延伸率的影响呈现两种不同的规律。在较低温度下（350 和 380 °C）均匀化时，抗拉强度和延伸率在保温时间为 15 h 处达到最大值；在较高温度下（420 和 450 °C）均匀化时，抗拉强度和延伸率在保温时间约为 5 h 处达到最大值，此后随保温时间的延长抗拉强度和延伸率缓慢降低。可见，在均匀化退火温

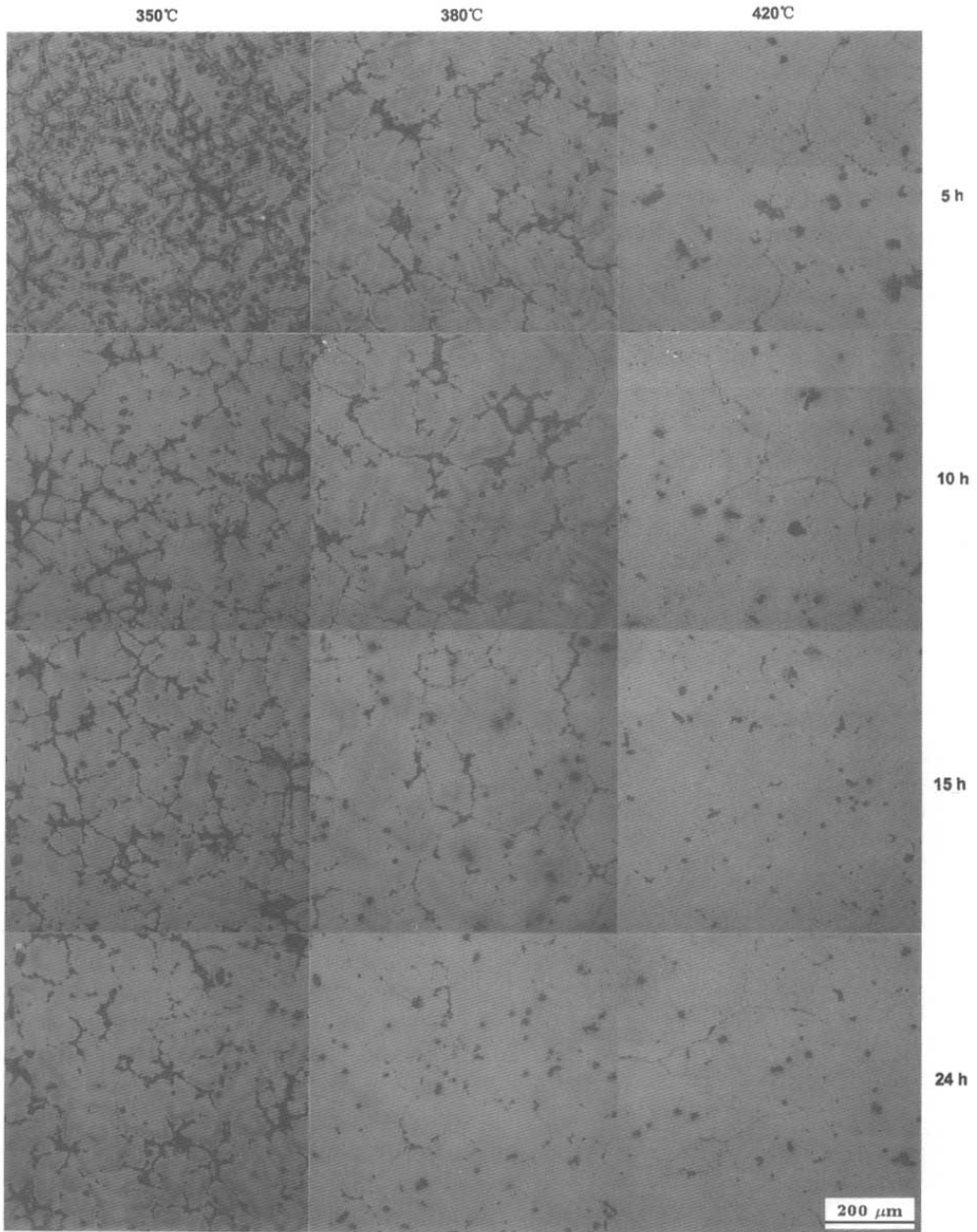


图2 AZ91合金在不同条件下均匀化的显微组织  
Fig.2 Microstructures of AZ91 alloy homogenized at different conditions

度较低时,需要相对较长的保温时间才能达到理想的均匀化效果;而均匀化退火温度较高时,较短的保温时间就能达到理想的均匀化效果。此外,图4的结果表明,均匀化退火温度在380℃以上时,可通过选择不同的退火保温时间获得显著的均匀化退火效果;而当均匀化退火温度为

350℃时,无论选择多长的退火保温时间,均难以获得显著的均匀化退火效果。

AZ91合金的抗拉强度在420℃,5h的均匀化条件下达到最大(约为246MPa),此时延伸率为10%;而在380℃,15h的均匀化条件下延伸率达到最大值(约

为 11.2%)，此时抗拉强度约为 243 MPa。以上两种均匀化退火制度所得到的抗拉强度几乎一致，而延伸率有一定的差别。从工业应用的实际角度看，选择 420 ℃，5 h 的均匀化退火条件较为有利：可获得较理想的均匀化效果，抗拉强度和延伸率都得到了显著提高，且均匀化时间较短，有利于缩短生产周期。

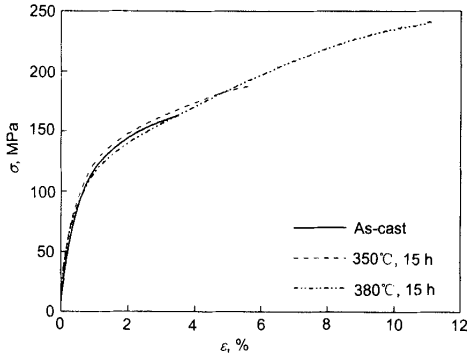


图 3 铸态和退火态 AZ91 合金的典型拉伸曲线

Fig.3 Typical tensile stress-strain curves of as-cast and homogenized samples

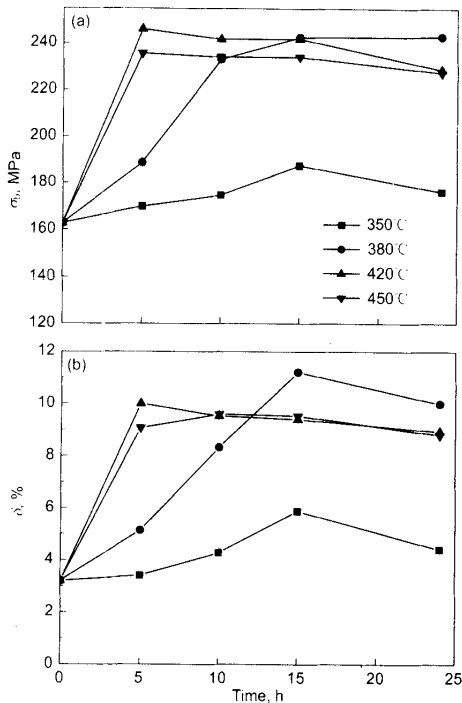


图 4 退火工艺参数对力学性能的影响

Fig.4 Effects of homogenizing temperature and holding time on ultimate-tensile strength (a) and elongation (b)

此外，根据图 2 所示的均匀化退火后的组织形貌，尚难以说明为什么 AZ91 合金的延伸率在 380 ℃，15 h 的均匀化退火条件下达到最大，需要从  $Mg_{17}Al_{12}$  的形貌、层间距、取向等方面进行更为深入的研究。

综上所述可知，选择合适的均匀化退火制度，可以使 AZ91 镁合金的抗拉强度从铸态的 163 MPa 提高到 240 MPa 以上，提高约 50%；延伸率则可从铸态的 3.2% 增加到 10% 以上。即均匀化退火可显著地改善 AZ91 铸态合金的力学性能，使其接近典型 7xxx 合金（铸态）的力学性能指标水平，表明了该合金具有用作变形镁合金的潜力。

2.3 断口形貌分析

图 5a 和 b 分别为 AZ91 镁合金铸态和退火态拉伸试样断口形貌。由图可知，AZ91 合金铸态试样的断口具有沿晶断裂特性，局部地方整个晶粒被拉出，断口由粗糙的、类似鹅卵石的小颗粒组成，表现为较强的脆性断裂倾向。均匀化退火后，AZ91 合金的拉伸断口形貌发生明显变化，晶间断裂和沿晶断裂减少，解理断裂和塑性断裂区明显增加，断口中存在解理台阶、河流花样和韧窝，具有准解理断裂的特性。以上结果说明均匀化退火后 AZ91 合金的塑性得到了显著改善，宏观表现为退火后材料的延伸率得到了大幅度的提高。

AZ91 镁合金铸态组织晶界上存在粗大的网状  $Mg_{17}Al_{12}$  相，塑性变形时， $Mg_{17}Al_{12}$  相易破碎产生裂纹，且在  $Mg_{17}Al_{12}$  相与  $\alpha$ -Mg 基体的界面上由于应

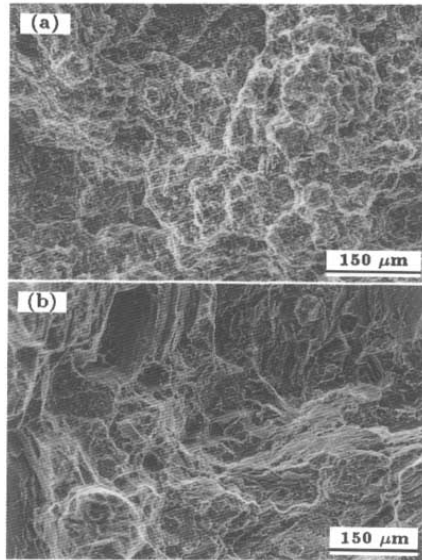


图 5 AZ91 镁合金的拉伸断口形貌

Fig.5 Fractographs of AZ91 alloys as-cast (a) and homogenized at 380 ℃ for 15 h



力集中易产生裂纹,从而导致发生沿晶断裂,致使 AZ91 合金的抗拉强度和延伸率都很低. 均匀化退火后,晶间粗大的网状  $Mg_{17}Al_{12}$  相消失,晶间结合力增强,因此断口中解理断裂区和塑性断裂区增加,沿晶断裂和晶间断裂区显著减少, AZ91 合金的塑性和抗拉强度得到显著改善. 以上结果从另一个侧面说明,施行适当的均匀化退火处理, AZ91 合金具有用作变形镁合金的潜在可能.

### 3 结论

(1) 在 350—450 °C、5—24 h 的均匀化退火条件范围内,随退火温度的升高和保温时间的延长, AZ91 铸造合金晶界以及枝晶间粗大的网状  $Mg_{17}Al_{12}$  相逐渐减少,  $\alpha$ -Mg 基体中细小颗粒状的  $Mg_{17}Al_{12}$  相增加;但当退火温度高于 420 °C 时,温度和时间的影响均变得较不显著.

(2) 通过均匀化退火, AZ91 合金的强度和延伸率显著提高,采用合适的退火温度和保温时间,可使合金的强度提高 50% 以上,延伸率可从 3.2% 提高到 10% 以上;而屈服强度则基本保持不变,约为 100 MPa.

(3) 从工业应用的角度看, AZ91 合金在 420 °C、5 h 的条件下均匀化退火可获得较理想的效果,既可显著改善合金的力学性能,获得抗拉强度 240 MPa,延伸率 10%,又有利于缩短生产周期;而从获得最高延伸率、提高其成形性能的角度看,最佳均匀化退火条件为 380 °C、15 h. 此时抗拉强度为 243 MPa,几乎与 420 °C、5 h 时的相同,而延伸率上升到 11.2%.

(4) 均匀化退火后的力学性能以及试样拉伸断口形貌特点表明,施行适当的热处理制度(如 420 °C、5 h 或 380 °C、15 h), AZ91 合金具有用作变形镁合金的潜力.

本文的研究工作得到北京有色金属研究总院谢水生教授的帮助,谨致谢忱.

### 参考文献

- [1] Agfion E, Bronfin B. *Mater Sci Forum*, 2000; 350-351: 19
- [2] Cahn R W, Haasen P, Kramer E J. *Materials Science and Technology*. New York: VCH Publishers Inc, 1996
- [3] Mordike B L, Ebert T. *Mater Sci Eng*, 2001; A302: 37
- [4] Dahle A K, Lee Y C, Nave M D, Schaffer P L, StJohn D H. *J Light Met*, 2001; (1): 61
- [5] Yan Y Q, Zhang T J, Zhou L, Deng J. *Rare Met*, 2004; 23: 220
- [6] Lü Y Z, Wang Q D, Ding W J. *Mater Lett*, 2000; 44: 265
- [7] Zhang Y Z, Zhang K, Cui D J, Wu X P, Fan J Z, Cui B, Zheng Y X, Lei J. *Foundry*, 2000; 49(12): 74  
(张永忠, 张奎, 崔代金, 吴绪平, 樊建中, 崔波, 郑宇新, 雷健. 铸造, 2000; 49(12): 74)
- [8] Huang G S, Wang L Y, Huang G J, Pan F S. *J Chongqing Univ (Nat Sci)*, 2004; 27(11): 18  
(黄光胜, 汪凌云, 黄光杰, 潘复生. 重庆大学学报(自然科学版), 2004; 27(11): 18)
- [9] Peng J, Zhang D F, Yang C M, Ding P D. *J Mater Eng*, 2004; (8): 32  
(彭建, 张丁非, 杨椿楣, 丁培道. 材料工程, 2004; (8): 32)
- [10] Xie J X, Liu X F, Wang Z X, Jin J B. *China Pat, CN200510126459.7*, 2005-12-12  
(谢建新, 刘雪峰, 王智祥, 金军兵. 中国发明专利, CN200510126459.7, 2005-12-12)
- [11] Liu Z, Zhang K, Zeng X Q. *Theoretical Basis and Applications of Magnesium-Base Alloys*. Beijing: China Machine Press, 2002  
(刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2002)
- [12] Cho S S, Chun B S, Won C W. *J Mater Sci*, 1999; 34: 4311
- [13] Duly D, Brechet Y. *Acta Metall Mater*, 1994; 42: 3035
- [14] Duly D, Simon J P, Brechet Y. *Acta Metall Mater*, 1995; 43: 101

# 均匀化处理对AZ91镁合金组织和力学性能的影响

作者: [金军兵](#), [王智祥](#), [刘雪峰](#), [谢建新](#), [JIN Junbing](#), [WANG Zhixiang](#), [LIU Xuefeng](#),  
[XIE Jianxin](#)  
作者单位: [北京科技大学材料科学与工程学院, 北京, 100083](#)  
刊名: [金属学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [SCI](#) [PKU](#)  
英文刊名: [ACTA METALLURGICA SINICA](#)  
年, 卷(期): 2006, 42(10)  
被引用次数: 25次

## 参考文献(14条)

1. Agfion E;Bronfin B [Magnesium Alloys Development towards the 21<sup>st</sup> Century](#)[外文期刊] 2000(0)
2. Cahn R W;Haasen P;Kramer E J [Materials Science and Technology](#) 1996
3. Mordike B L;Ebert T [查看详情](#) 2001
4. Dahle A K;Lee Y C;Nave M D;Schaffer P L St. John D H [查看详情](#) 2001(01)
5. Yan Y Q;Zhang T J;Zhou L;Deng J [Mechanical properties and microstructures of a wrought AZ91 alloy](#)  
[期刊论文]-[Rare Metals](#) 2004(3)
6. Lü Y Z;Wang Q D;Ding W J [查看详情](#) 2000
7. 张永忠;张奎;崔代金;吴绪平 樊建中 崔波 郑宇新 雷健 [查看详情](#) 2000(12)
8. 黄光胜;汪凌云;黄光杰;潘复生 [均匀化退火对AZ31B镁合金组织与性能的影响](#)[期刊论文]-[重庆大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(11)
9. 彭建;张丁非;杨椿楣;丁培道 [ZK60镁合金铸坯均匀化退火研究](#)[期刊论文]-[材料工程](#) 2004(08)
10. 谢建新;刘雪峰;王智祥;金军兵 [查看详情](#) 2005
11. 刘正;张奎;曾小勤 [镁基轻质合金理论基础及其应用](#) 2002
12. Cho S S;Chun B S;Won C W [查看详情](#) 1999
13. Duly D;Brechet Y [查看详情](#) 1994
14. Duly D;Simon J P;Brechet Y [查看详情](#) 1995

## 本文读者也读过(6条)

1. [王智祥](#). [谢建新](#). [刘雪峰](#). [李静媛](#). [张丁非](#). [潘复生](#). [WANG Zhixiang](#). [XIE Jianxin](#). [LIU Xuefeng](#). [LI Jingyuan](#). [ZHANG Dingfei](#). [PAN Fusheng](#) [形变及时效对AZ91镁合金组织和力学性能的影响](#)[期刊论文]-[金属学报](#)2007, 43(9)
2. [刘生发](#). [黄尚宇](#). [徐萍](#). [LIU Shengfa](#). [HUANG Shangyu](#). [XU Ping](#) [Ce对AZ91镁合金铸态组织细化的影响](#)[期刊论文]-[金属学报](#)2006, 42(4)
3. [刘生发](#). [王慧源](#). [Liu Shengfa](#). [Wang Huiyuan](#) [Sr对AZ91镁合金铸态组织的影响及其细化机制](#)[期刊论文]-[稀有金属材料与工程](#)2006, 35(6)
4. [杨君刚](#). [ZHAO Mei-juan](#). [蒋百灵](#). [YANG Jun-gang](#). [ZHAO Mei-juan](#). [JIANG Bai-ling](#) [均匀化退火对AZ91D镁合金组织与性能的影响](#)[期刊论文]-[材料热处理学报](#)2008, 29(4)
5. [王智祥](#). [刘雪峰](#). [谢建新](#). [WANG Zhixiang](#). [LIU Xuefeng](#). [XIE Jianxin](#) [AZ91镁合金高温变形本构关系](#)[期刊论文]-[金属学报](#)2008, 44(11)
6. [张诗昌](#). [魏伯康](#). [林汉同](#). [王立士](#) [钇及铈镧混合稀土对AZ91镁合金铸态组织的影响](#)[期刊论文]-[中国有色金属学报](#) 2001, 11(z2)

## 引证文献(25条)

1. WANG Qiang, 高家诚, WANG Yong, 李伟, NIU Wen-juan [均匀化退火对WE43镁合金铸坯组织和性能的影响](#)[期刊论文]-[材料热处理学报](#) 2008(4)
2. 赵美娟, 杨君刚, 蒋百灵 [缓慢凝固速度对AZ91D镁合金组织的影响](#)[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2008(3)
3. 时惠英, 陈梓山, 张菊梅, 蒋百灵 [β-Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>相析出形态对AZ91镁合金力学性能的影响](#)[期刊论文]-[金属热处理](#) 2010(1)
4. 张康, 张奎, 李兴刚, 李永军, 马鸣龙, 徐玉磊 [均匀化热处理对AZ151镁合金显微组织的影响](#)[期刊论文]-[稀有金属](#) 2009(3)
5. 王瑞权, 陈体军, 马颖 [热处理对细晶AZ91D镁合金组织和性能的影响](#)[期刊论文]-[中国铸造装备与技术](#) 2009(6)
6. 李卫民 [固溶及时效处理对AZ80镁合金显微组织的影响](#)[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2008(22)
7. 白彦华, 何淼, 于宝义, 吴永广, 杨继伟 [固溶处理对挤压WE43镁合金的影响](#)[期刊论文]-[沈阳工业大学学报](#) 2009(1)
8. 张丁非, 张红菊, 刘荣桑, 段红玲, 石国梁 [AZ91D镁合金凝固过程分析](#)[期刊论文]-[材料导报](#) 2007(z2)
9. 陈先华, 刘娟, 张志华, 潘复生 [镁合金热处理的研究现状及发展趋势](#)[期刊论文]-[材料导报](#) 2011(23)
10. 李继文, 任畅, 孟瑶, 高舜翔 [均匀化处理对AZ31镁合金组织和性能的影响](#)[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2011(22)
11. 王智祥, 刘柏雄, 袁孚胜 [AZ91镁合金热挤压压力能参量的研究](#)[期刊论文]-[轻金属](#) 2009(4)
12. 张菊梅, 王志虎, 蒋百灵 [T6处理对AZ91镁合金析出相β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>及断裂性能的影响](#)[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2011(2)
13. 廖慧敏, 龙思远, 原帅, 董泰山 [挤压铸造AZ81镁合金均匀化热处理工艺研究](#)[期刊论文]-[铸造](#) 2010(1)
14. 王志虎, 张菊梅, 蒋百灵 [热处理对AZ61A镁合金显微组织及力学性能的影响](#)[期刊论文]-[金属热处理](#) 2009(1)
15. 张菊梅, 蒋百灵, 王志虎, 夏鹏举, 葛凯晨 [固溶处理对AZ80镁合金显微组织的影响](#)[期刊论文]-[特种铸造及有色合金](#) 2008(1)
16. 杨君刚, ZHAO Mei-juan, 蒋百灵 [均匀化退火对AZ91D镁合金组织与性能的影响](#)[期刊论文]-[材料热处理学报](#) 2008(4)
17. 张菊梅, 蒋百灵, 王志虎, 袁森, 夏鹏举 [固溶及时效处理对AZ80镁合金显微组织的影响](#)[期刊论文]-[金属热处理](#) 2007(10)
18. ZHANG Ju-mei, JIANG Bai-ling, WANG Zhi-hu, YUAN Sen, NAN Hong-qiang, LUO Hong-bin [Influence of aging modes on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy](#)[期刊论文]-[中国铸造](#) 2007(4)
19. 黄东男, 李静媛, 谢建新 [模具结构对AZ91镁合金挤压成形性能的影响](#)[期刊论文]-[塑性工程学报](#) 2009(4)
20. 赵青才, 严红革, 盛绍顶, 陈振华 [快速凝固/粉末冶金AZ91镁合金的组织及性能](#)[期刊论文]-[热加工工艺](#) 2007(24)
21. 李静媛, 陈雨来, 陈长江, 曹亮 [对高Al镁合金挤压变形影响因素的研究](#)[期刊论文]-[材料工程](#) 2009(8)
22. 王智祥, 谢建新, 刘雪峰, 李静媛, 张丁非, 潘复生 [形变及时效对AZ91镁合金组织和力学性能的影响](#)[期刊论文]-[金属学报](#) 2007(9)
23. 赵亚忠, 潘复生, 彭建 [铍添加及铸锭均匀化退火对ZK20镁合金组织与性能的影响](#)[期刊论文]-[中国有色金属学报](#) 2010(6)
24. 吴立鸿, 马全仓, 关绍康, 龙思远 [半连续铸造AZ70镁合金的纯净化及均质化](#)[期刊论文]-[特种铸造及有色合金](#) 2008(4)
25. 张菊梅, 蒋百灵, 王志虎, 袁森, 夏鹏举 [固溶温度对AZ80镁合金析出相β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>及性能的影响](#)[期刊论文]-[材料热处理学报](#) 2007(6)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_jsxb200610003.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jsxb200610003.aspx)