

文章编号:1673-9981(2009)02-0085-04

AZ31 镁合金变形行为的研究进展

孙付涛¹, 韩 晨², 陈拂晓¹, 杨永顺¹, 郭俊卿¹

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要:介绍了 AZ31 镁合金的优良性能及变形行为的特点, 讨论了合金元素对 AZ31 合金性能的影响, 重点对目前镁合金加工方法的研究进展及发展方向进行了综述。

关键词:AZ31 镁合金; 变形行为; 性能; 加工方法

中图分类号: TG306

文献标识码: A

镁合金是实际应用中最轻的金属结构材料^[1], 具有较高的比强度和比刚度, 力学性能、切削加工性能和铸造性能优良, 特别适用于进行高效率的压铸生产。镁合金还具有优良的耐腐蚀性能、良好的导电性及电磁屏蔽性等优点。尤其值得一提的是镁及镁合金具有优良的减振性能, 从而使其在许多应用中具有降低振动和噪音的能力。镁合金在电子、航空航天、交通工具、体育用品等行业中的应用日益广泛^[2]。

由于镁合金为密排六方结构, 室温下塑性变形能力较差, 所以目前镁合金制品大都采用铸造成形, 这大大限制了镁合金的应用范围。为扩大镁合金的应用范围, 利用各种塑性变形方法来制造镁合金制品是镁合金发展的一大趋势。与铸造成形产品相比, 变形镁合金制品的力学性能更优, 加工成本更低。

AZ31 镁合金的强度较高, 延展性良好, 可用来制造不同厚度的板材及形状复杂的锻件、模锻件及挤压件, 是目前应用最广泛的变形镁合金^[3]。

1 化学成分对 AZ31 镁合金性能的影响

1.1 铝含量的影响

Al 是 AZ31 镁合金的主要合金元素, 通过固溶

强化和形成沉淀析出相, 提高 AZ31 的强度和耐蚀性, 降低合金的塑性^[4]。

Mg-Al 二元合金系富镁侧是共晶型相图, 在 437 °C 时发生共晶反应: $L \rightarrow \alpha(\text{Mg}) + \beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 。铝在镁中的最大溶解度为 12.7% (437 °C), 溶解度随温度的降低而减小, 室温下铝在镁中的溶解度约 2%。在富镁区可以析出第二相 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 。

铸态下 Mg-Al 合金主要由 α 镁固溶体和枝晶间 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相组成。当 $w(\text{Al}) < 10\%$ 时, 随着 Al 含量的增加, Mg 合金的液相线及固相线均降低, Mg 合金的抗拉强度提高; 伸长率则随着 Al 含量的增加先提高后下降。当 $w(\text{Al}) > 4\%$ 时, Mg-Al 合金的耐腐蚀性能迅速提高。因此, 兼顾合金的力学性能和铸造性能, 合金中最佳铝含量 $w(\text{Al})$ 为 8%~9%^[3]。

1.2 锌含量的影响

Zn 是 Mg-Al 系合金中的另一个重要元素。Zn 在镁合金中的溶解度较大, 在二元共晶温度 340 °C 时达 6.2%。在合金中加入少量的 Zn (约 1%), 可显著提高室温下铝在镁基体中的固溶度。同时, Zn 的加入可以提高合金的抗蚀性及力学性能。但 Zn 含量过高会加大合金的结晶温度间隔, 增加了合金的热裂和缩松倾向, 因此, 合金中的 Zn 一般控制在 $w(\text{Zn}) \approx 1\%$ 。

1.3 Al/Zn 比的影响

在 Mg-Al-Zn 合金中, 铝/锌比是值得重视的一

收稿日期: 2008-02-27

作者简介: 孙付涛 (1983-), 女, 河南柘城人, 硕士研究生。

个参数. 对不同 Al/Zn 比的 Mg-Al-Zn 合金进行力学性能的测试结果表明, 当 $w(\text{Al}) < 8\%$ 时, 合金的抗拉强度随 Zn 质量分数的增加而提高, 伸长率下降; 当 $w(\text{Al}) > 8\%$ 时, 随 Zn 含量的增加, 合金的抗拉强度降低, 伸长率提高. 由此可见, 要获得综合力学性能良好的合金, Al, Zn 的含量应有合适的比例. 有人^[5]研究了不同 Zn, Al 含量对 Mg-Al-Zn 合金铸造性能的影响(图 1). 当合金中 $w(\text{Zn}) < 1\%$ 时, Mg-Al-Zn 合金处于可铸造区, 随着 Zn 含量的增加, 合金进入热裂区, 热裂区的范围随 Al 含量的不同而变化; 进一步增加 Zn 含量, 合金进入可铸造区和脆性区. 因此, 要保证 Mg-Al-Zn 合金具有良好的铸造性能, Al, Zn 的含量应有一个合适的比例.

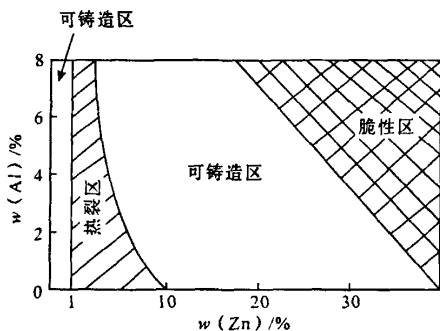


图 1 Zn 含量对镁合金铸件性能的影响^[5]

Fig. 1 Effect of Zn content to performance of magnesium alloy casting

1.4 其他元素的影响

Mn 对提高镁合金的耐腐蚀性能十分有利. Mn 可与合金中的有害杂质 Fe 形成化合物, 以熔渣的形式排除, 消除了 Fe 对镁合金耐蚀性的不利影响, 同时提高了合金的电位. 因此, 用于耐腐蚀性场合的镁铝合金中一般都含有一定量的 Mn. 此外, Mn 还可以细化晶粒, 提高可焊性.

镁铝系合金中需要严格控制的杂质元素有 Si, Cu, Fe, Ni 和 Co 等, 由于它们在镁中的溶解度都很小, 含量很低时就足以在晶界上形成与基体有很大电位差的难溶相, 产生腐蚀. 因此, 必须严格控制这些杂质在合金中的含量.

2 AZ31 合金变形过程的特点

AZ31 镁合金在变形时对温度的改变很敏感, 在低温下进行压缩或挤压变形时, 变形机制主要为基面滑移和孪生, 此时显微结构中有较多的位错和孪晶存在, 整体上呈现变形组织, 因此如果变形速率太快, 材料容易在低应变率下发生断裂. 而在较高的温度下挤压(200 °C 以上), 材料的变形机制会发生改变. 首先, 由于热激活镁基体的棱柱滑移面位错在基面滑移上受阻时, 可发生交叉滑移到棱柱滑移面上, 这种情况在变形温度适当的情况下比较容易发生, 此时动态再结晶还来不及发生, 合金中的位错可发生滑移、攀移, 从而提高合金的塑性变形能力. 在更高的温度下, 动态再结晶发生, 这时晶界可以发生滑动和转动, 参与塑性变形, 细小的再结晶晶粒进一步提高了镁合金的塑性, 甚至出现类似超塑性变形的变形机制.

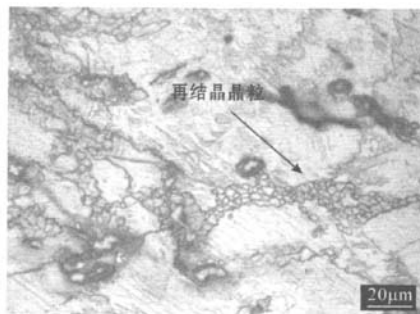


图 2 动态再结晶形成的细小晶粒

Fig. 2 Tiny grains formed during dynamic recrystallization

3 AZ31 合金变形行为的研究现状

S. B. Yi^[6]研究了 AZ31 合金在室温到 250 °C 范围内的拉伸变形行为. 结果表明, 在 150 °C 以上进行拉伸时观察到连续动态再结晶现象. 在 200 °C 时观察到与高激活能 $\langle c+a \rangle$ 滑移面对应的晶体结构组织. 动态再结晶由于再结晶晶粒的转动持续进行. 在 200 °C 时, 尽管发生了动态再结晶, 仍然可以观察到大量的由晶界转动和滑移协同作用产生的典型组织. 在 250 °C 时, 由于另一个变形机制晶界滑移的发

生使细小晶粒组织减少。

为了扩大镁合金的使用范围, Q. Yang 等人^[7]研究了室温下极细晶粒的 AZ31 镁合金的变形行为。通过轧制、压缩、挤压等剧烈变形方法制得细晶粒镁合金。实验结果表明,与粗晶粒的镁合金相比,极细晶粒的镁合金对应变速率的敏感性及流变应力均有一定的上升,延伸率也有所上升。同时,合金的屈服强度显著上升,各向同性更明显。

Z. Q. Sheng^[8]建立了镁合金的流变应力方程。基于密排六方晶体结构的变形机制及数学分析方法,以应变、应变速率及温度补偿因子为参数建立了数学模型。验证发现与三个已发表的实验数据相吻合。

严红革等人^[9]研究了 AZ31 镁合金板材在不同工艺条件下的气胀成形性能。实验表明,胀形高度随温度的升高而增大,且应变速率敏感指数均大于 0.3。在 673 K, 0.7 MPa 下胀形 25 min, 所得胀形件的胀形高度达 23.34 mm, 高径比为 0.67。金相及 SEM 观察可见,在胀形件的顶端晶界处聚集了大量的空洞。通过动态再结晶,晶粒得到了很大细化。并且随变形程度的增大,晶粒细化更明显。AZ31 镁合金板材的超塑性胀形主要由晶界滑移控制,动态再结晶则为重要的辅助机制。

汪凌云等人^[10]研究了 AZ31B 镁合金板材的超塑性及超塑性不稳定性。他们发现,在 723 K, 10^{-3} s^{-1} 的条件下,板料的延伸率可达到 216%, 应变敏感系数为 0.36, 在变形的初级阶段发生了动态再结晶。板料的超塑性成形机制主要为晶界滑移,断裂则主要是由于空洞的长大和链接。

裴群峰等人^[11]研究了 AZ31 镁合金板料的拉伸性能。他们对温热冲压过程进行了数值模拟,研究了拉深温度、压边力等工艺条件对镁合金板材成形性能的影响;并通过极限拉深比实验,对数值模拟结果进行了实验验证。最后得到结果是:在极限拉深温度 150 °C, 极限拉深速度 15 mm/s, 固定压边力的工艺条件下,极限拉深比达到 2.5, 得到如图 3 所示的拉伸件。他们还通过温热交叉轧制工艺制备了成形性能良好的镁合金薄板^[12], 并用此板料进行了盒形件拉延实验。结果发现:采用压边力随凸模行程先增后减的变压边力技术可将盒形件的拉伸深度提高 13.2%。

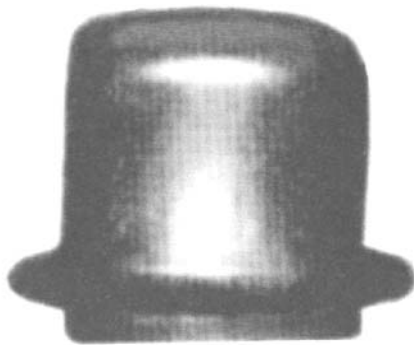


图3 镁合金拉伸件

Fig.3 Magnesium alloy drawings

华中科技大学的夏巨谔等人^[12]对镁合金管材的挤压过程进行了数值模拟,采用 DEFORM-3D 软件,对不同壁厚管材的成形过程进行模拟。研究发现,挤压时管材内壁的金属比外壁的金属流动快,挤压筒与圆锥面过渡处的等效应变值最大,通过工艺试验验证了模拟分析的正确性。

何祝斌等人^[14]研究了 AZ31 镁合金挤压管材的内高压成形性能,胀形实验在其自行研制的内高压成型机上进行,实验温度分别为室温、100、150、200 和 250 °C, 结果表明:变形不是对称发生的,而是集中在管的一侧直至破裂。从破裂时的极限膨胀率来看,150 °C 时表现出最好的成形性能;之后,随着温度的升高,极限膨胀率反而下降,相同温度下,胀形区尺寸较小时得到的极限膨胀率明显大于胀形区较大时的极限膨胀率,双向等拉应变状态下的成形性能要好于平面应变状态下的成形性能。

4 结 语

目前,虽然对 AZ31 镁合金的变形行为及加工工艺的研究已经取得了一定的进展,但适用于镁合金生产的塑性加工技术还不够成熟及完善。为了生产出性能更加优良的镁合金制件,降低生产成本,扩大镁合金的使用范围,作者认为对镁合金的研究应注重以下方面:(1)性能的改善。镁合金具有很多优良的性能,但其强度达不到某些领域的要求。比如,镁合金用于制造汽车轮毂,可以减重、减振,降低油耗,提高行驶的舒适性,但镁合金的强度很难达到 $\sigma_b > 280 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_{0.2} > 180 \text{ MPa}$ 。(2)成形技术的研究。镁合金铸件的综合性能较差,采用塑性加工,可

以得到性能优良的制件。常温下镁合金的塑性较差,而当其处于超塑性状态时,具有优良的塑性和极小的变形抗力,从而有利于塑性加工。挤压是镁合金塑性成形的另一种有效方法。挤压加工时,金属三面受压,有利于变形的发生。挤压成形可制备其他成形方法难以制备的产品,如带凹角和暗槽的型材、大直径和变截面厚度的薄壁管等^[15]。另外,挤压还有细化晶粒的作用,可提高材料的强度和韧性。因此,研究镁合金的挤压成形工艺和超塑性成形工艺具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘正,张奎,曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002:195-207.
- [2] 刘静安. 镁合金加工技术发展趋势与开发应用前景[J]. 轻合金加工技术. 2001,129,1-7.
- [3] 黎文献. 镁及镁合金[M]. 长沙:中南大学出版社,2005:97-102.
- [4] 吕宜振,翟春泉,王渠东,等. 压铸镁合金的应用现状及发展趋势[J]. 铸造,1998(12):50-53.
- [5] 张诗昌,段汉桥,蔡启舟,等. 主要合金元素对镁合金组织和性能的影响[J]. 铸造,2001,50(6):310-340.
- [6] YI S B. Mechanical behaviour and microstructural evolution of magnesium alloy AZ31 in tension at different temperatures[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A424:275-281.
- [7] YANG Q, GHOSH A K. Deformation behavior of ultrafine-grain (UFG) AZ31B Mg alloy at room temperature[J]. Acta Materialia, 2006, 54:5159-5170.
- [8] SHENG Z Q. Modeling flow stress of magnesium alloys at elevated temperature[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A419:202-208.
- [9] 严红革,刘俊伟,陈振华,等. AZ31 镁合金板材超塑性气胀成形研究[J]. 热加工工艺,2006(5):47-50.
- [10] WANG Ling-yun. Superplasticity and superplastic instability of AZ31B magnesium alloy sheet[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16:327-333.
- [11] 苒群峰,李大永,彭颖红,等. AZ31 镁合金板材温热冲压数值模拟与实验研究[J]. 中国有色金属学报,2006(4):580-585.
- [12] 苒群峰,李大永,彭颖红,等. AZ31 镁合金盒形件变压边力温热拉延工艺[J]. 中国机械工程,2006,17(增刊):16-18.
- [13] 夏巨谟,王新云,程俊伟,等. AZ31 镁合金管材挤压过程的数值模拟[J]. 锻压技术,2005(2):49-52.
- [14] 何祝斌,王小松,苑世剑,等. AZ31B 镁合金挤压管材的内高压成形性能[J]. 金属学报,2007(5):534-538.
- [15] 赵文元,夏兰廷. 镁合金成形技术现状及展望[J]. 铸造设备研究,2005(4):47-52.

Research progress on deformation behavior of AZ31 magnesium alloy

SUN Fu-tao¹, HAN Chen², CHEN Fu-xiao¹, YANG Yong-shun¹, GUO Jun-qing¹

(1. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. University of Science and Technology, Beijing 100038, China)

Abstract: The excellent properties and deformation behavior characters of AZ31 magnesium alloy are described in this paper. The influences of alloy elements on the properties of the AZ31 alloy are discussed. And the research progress and development tendency on processing methods of magnesium alloys at present are summarized.

Key words: AZ31 magnesium alloy; deformation behavior; property; processing method