

镁合金锻造工艺及性能提升研究

梅杰¹, 黄定雄²

1. 柳州酸王泵制造股份有限公司 广西柳州 545006

2. 轻驱新能源(柳州)有限公司 广西柳州 545006

摘要: 轻量化及高力学性能要求的复杂结构部件需求越来越多, 传统的制造工艺及材料已不能满足其产品技术要求。采用等温及多次锻造工艺生产的镁合金可满足此技术要求。针对镁合金材料的锻造工艺进行了分析, 并进行了性能提升试验。镁合金通过多次等温锻造后, 其组织结构能得到进一步优化, 晶粒分布更均匀, 抗拉强度提升了20%, 伸长率提升了113%。同时, 多次等温锻造可在热机械作用下修复首次锻造的缺陷, 将材料的致密性进一步提升, 消除首次锻造过程中产生的内部应力, 提高材料的稳定性和使用寿命。在航空航天、生物医药、汽车零部件及轻量化部件批量生产制造中可进行拓展应用。

关键词: 镁合金; 等温锻造; 锻件组织性能

Research on forging process and performance improvement of magnesium alloy

MEI Jie¹, HUANG Dingxiong²

1. Liuzhou Acid King Pump Manufacturing Co., Ltd., Liuzhou 545006, Guangxi, China

2. Zhiqu New Energy Liuzhou Branch Co., Ltd., Liuzhou 545006, Guangxi, China

Abstract: The requirement of complex structural parts were increased which had the demand of lightweight and high mechanical performance, the traditional manufacturing process and materials were not satisfied the technical requirements of the products. Magnesium alloy was satisfied the technical requirements which was manufactured by isothermal and multiple forging process. This paper was analyzed the forging process and made the performance improvement experiment for magnesium alloy. After multiple isothermal forging for magnesium alloy, the microstructure of magnesium alloy was optimized, and the grain distribution was adjusted more uniform, the tensile strength was increased 20%, and the elongation was increased 113%. At the same time, multiple isothermal forging could repaired the defects of the first forging by the action of thermal machinery, which improved the density of the material, eliminated the internal stress during the first forging process, improved the stability and service life of the material. The magnesium alloy will be applied in the mass production of aerospace, biomedical, motor parts and lightweight parts.

Keywords: magnesium alloy; isothermal forging; forgings microstructure performance

第一作者: 梅杰, 高级工程师, 主要研究方向为智能制造、质量控制及数字化等, E-mail: major12@163.com。

1 序言

镁合金是以镁为基础加入其他元素组成的合金,相比铝合金等材料,其承受冲击载荷能力偏高,同时对有机物和碱具有较好的耐蚀性。Al、Mn、Ce、Th、Zn、Cd或Zr是其主要合金元素。锻造加工可将镁锰合金、镁铝合金和镁锌铝合金等材料进行组织及性能的改善提升,具备良好的强度及抗疲劳性等,主要用于航空航天、运输、化工及汽车等工业部门^[1-3]。

在制造工业的发展过程中,镁合金的工艺技术得到了快速提升,产业链也在稳步建立。同时,其原材料价格相对稳定,制造成本偏低,在制造业领域有着广泛的应用市场。

挤压和轧制是镁合金材料成型的主要应用工艺,而锻压工艺相对研究的偏少^[4]。锻造工艺可减少生产步骤,简化生产流程,提高生产效率,而多次锻造可提升物理特性,其中锻造的工艺及参数是至关重要的^[5, 6]。

镁合金材料在首次锻造后,粗大铸态组织已被破碎,但晶粒不均匀或残余缺陷可能依然存在。另外,首次锻造还可能引起内部应力或裂纹缺陷等。而镁合金材料在经过多次锻造后,晶粒得到进一步细化,分布更均匀,各项异性也被削弱,内部组织中的晶界数量也会增加,强度及抗疲劳性等得到了提升。同时多次锻造可在热机械作用下修复缺陷,将材料的致密性进一步提升^[7]。

镁合金材料在等温锻造工艺中,形状和性能指标需同时达到要求,在相对精确的温度及速度下进行锻造的效果会更好。

密度偏小是镁合金的显著特点,也具有散热好及抗拉强度较高的特点。在外力作用下进行成形的过程中,镁合金的变形量较大,可使结构的应力均匀,具有减振的效果,也能降低噪声。镁合金材料在设备加工时精度及过程能力稳定性较好,成品的尺寸一致性较高。

另外,散热快及防电磁干扰也是镁合金的特点。

镁合金材料经多次锻造后可在航空航天、生物医疗、汽车零部件及轻量化部件批量生产制造中进行拓展应用。本文主要对镁合金材料的锻造工艺及

性能提升试验进行分析与研究。

2 镁合金特点及锻造工艺

特征复杂的工件通常采用铸造工艺进行制造,但存在铸件内部砂眼、疏松及裂纹等缺陷,质量控制是铸造工件的一大难题,铸件表面的处理采用抛丸、打磨及抛光等工艺才能满足外观质量需求。相比铸造工艺,锻造成形工艺较简单,镁合金锻件的尺寸和外形稳定性较好,生产效率高。通过锻造加工,材料内部的砂眼、疏松及裂纹等会被消除,材料组织会变得更均匀、细小。

2.1 流动性差

镁合金材料在锻造过程中要考虑其黏性大的特点,如锻造尺寸大的工件,可采用自由锻及模锻结合的方式,同时要增加预热工艺,以能够顺利成形,否则很难达到产品要求,同时也要对其成形后的表面进行抛光处理,从而减少表面缺陷。

2.2 导热性好

镁合金材料因其热传导机制、晶体结构和较高的导热系数而具有良好的导热性能,尤其是在高温状态下会有更好的导热性能,散发热量的速度较快,可快速将热量从高温区传导到低温区,并保持温度分布的整体均匀性,同时降低热应力对产品性能的影响。

2.3 合金软化

镁合金材料的软化温度通常在250~350℃,另外如保温时间过长,也可能导致晶粒变粗,后序的热处理工艺也不能完全恢复强度要求,因此在加热过程中,工艺环节要设置好加热温度范围及保温时间,确保不发生合金软化问题。

2.4 镁合金锻造工艺

镁合金材料按温度情况划分有热锻、等温锻及冷锻,按方式划分有自由锻、模锻。其中,自由锻是将工件放在设备的压装平台上,采用压力使工件在垂直方向受力变形,同时可以调整工件的姿态位置,得到产品所需的外形及尺寸的一种制造方式。主要锻造工艺特征对比见表1。

等温锻主要采用液压机,在工件及模具加热到相同的温度后进行锻压成形的工艺,锻压过程需要以较低的压装速率进行锻压。该锻造过程时间偏长,主要是金属在一定的温度和外部应力的情况下

发生蠕变，材料发生动态后等轴结晶，工件的尺寸精度一致性较高，具有较好的性能指标。

相比其他锻造方式，精确控制温度和速率是等温锻的关键，从坯料工件到成形过程的工艺温度控制需要电气及计算机化。设备方面主要应用液压机或低速压力机，需具备调速功能、保压功能，以及一定的闭合高度与控温系统等。同时，镁合金坯料需要经过预处理，如均匀化处理、表面修整等，以提高其锻造性能、减少缺陷。等温锻的工艺流程主要包括坯料切割、加热、锻坯制备、蚀洗、等温锻造、打磨、表面处理和检验等步骤，在生产中需采

用两次以上的成形方法，并对表面进行处理，确保成品质量的合格率。

镁合金等温锻首次锻造存在材料利用率低、内部缺陷多、晶粒粗大等问题。为解决这些问题，可采用多次锻造。镁合金多次锻造后，可提高材料利用率，进一步优化材料的内部结构，减少内部缺陷，提高材料的利用率和成品率等。同时，还可改善力学性能，多次锻造可使晶粒细化，提高材料的强度和韧性，消除第一次锻造过程中产生的内部应力，提高材料的稳定性和使用寿命，满足更高性能要求的应用场景。

表1 主要锻造工艺特征对比

锻造方式	工艺特性	适用产品	优缺点
热锻	1. 温度范围300~450℃ 2. 材料塑性好，变形抗力低 3. 氧化皮严重，尺寸精度低	曲轴、齿轮坯等	优点：适用大尺寸及高熔点材料 缺点：精度低，需二次加工
冷锻	1. 温度范围：室温 2. 无氧化，尺寸精度高 3. 需大吨位设备，模具易损坏	螺栓、螺母、精密齿轮等	优点：精度高，材料利用率高 缺点：高塑性材料，设备吨位大，投资成本高
等温锻	1. 温度范围：300~400℃ 2. 模具与工件同温，精度高 3. 组织均匀，残余应力低	航空结构件、薄壁件	优点：精度高，组织均匀，适合难变形材料 缺点：模具成本高
自由锻	1. 变形自由 2. 余量大，材料利用率低	大型轴类、轧辊、核电锻件等	优点：适用材料广，无需模具 缺点：精度低，材料利用率低
模锻	1. 精度高 2. 生产效率高 3. 模具成本高	连杆、齿轮、法兰等	优点：精度高，生产效率高 缺点：材料利用率偏低，模具成本高

3 镁合金组织及性能研究

3.1 镁合金熔炼试验

本次用某镁合金进行熔炼试验，主要化学成分见表2。F6和CO₂为混合保护气体，试验过程如下。

1) 用电阻炉对坩埚进行加热，待坩埚呈现暗红色状态后，将镁锭和铝锭添加到坩埚中，直至镁锭和铝锭熔化。

2) 将电阻炉内的温度提升至720℃，添加Mg-10%RE中间合金，熔化后升温至750℃，保温0.5h并搅拌，使其混合均匀。

3) 将模具加热至230℃，保温完成后将熔化的某合金浇注至模具，浇注温度控制在740℃。

4) 冷却后，对铸件的SEM形貌图用软件对晶粒尺寸进行定量检测，结果如图1所示。从图1可看

出，此合金的晶粒偏大且分布不均，β相有网状结晶等，由β-Mg₁₇Al₁₂相和α-Mg相组成。

表2 某镁合金的主要化学成分（质量分数）（%）

Mg	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni
余量	6.5	0.7	0.25	≤0.01	≤0.1	≤0.05	≤0.01

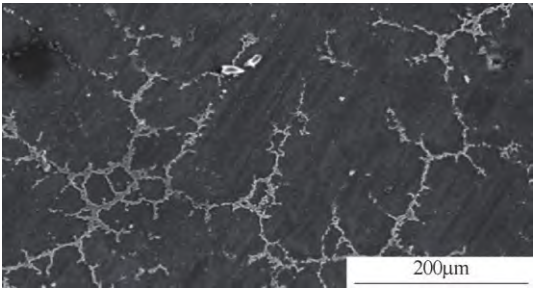


图1 铸态SEM形貌

镁合金材料对变形速率比较敏感,在等温锻过程中,液压机需提供稳定的压力和速度控制,分3个阶段完成,需设定温度范围、压力值、速度及保压时间等。同时,要做好防氧化和防燃措施等。

采用液压机对某镁合金的首次锻造,其工艺流程如图2所示。液压机的参数设置,接触阶段0.002mm/s增加压力到6MPa;变形阶段0.004mm/s增加压力到65MPa;精整阶段0.001mm/s增加压力到85MPa(保压2min)。在坯料的抓取过程需采用高温安全防护,增加辅助工装器具完成转移动作。锻坯尺寸为长600mm、宽300mm、高80mm。

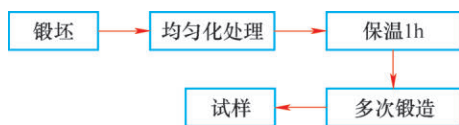


图2 某镁合金试样的工艺流程

工艺流程主要为:将锻坯加热到400℃,保温10h后均匀化处理;再降温至360℃保温1h;将设备的压装面平砧加热到240℃,重复以上的工艺步骤进行两次以上的锻造。

本次试验采用锻比为1.56、1.60、1.63后的SEM形貌分别如图3~图5所示,对应的晶粒平均尺寸分别为77μm、75μm、72μm。

多次锻造和首次锻造应用相同的锻造工艺,采用的锻比为1.75、2.14,经多次锻造后的SEM形貌

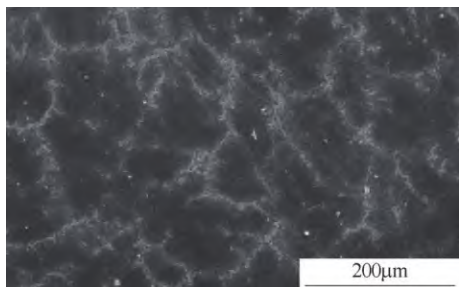


图3 首次锻造形貌（锻比为1.56，200×）

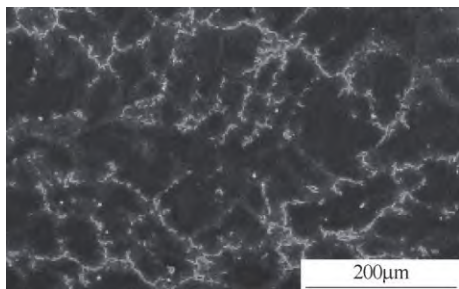


图4 多次锻造形貌（锻比为1.60，200×）

如图6、图7所示。从图6、图7可看出,晶粒的平均尺寸为50μm、46μm,晶粒变得越来越均匀,且有着明显的细化。

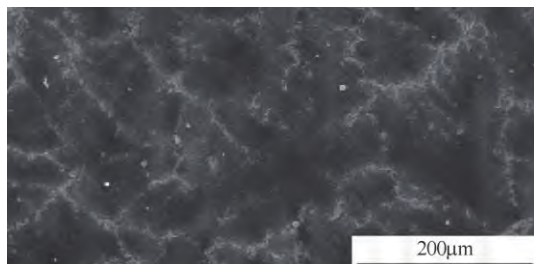


图5 首次锻造形貌（锻比为1.63，200×）

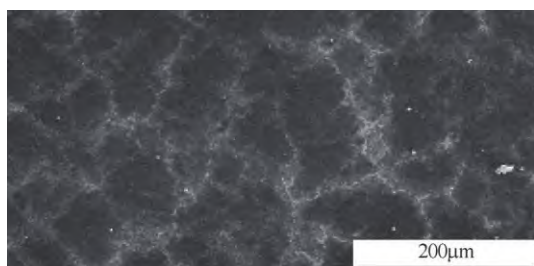


图6 多次锻造形貌（锻比为1.75，200×）

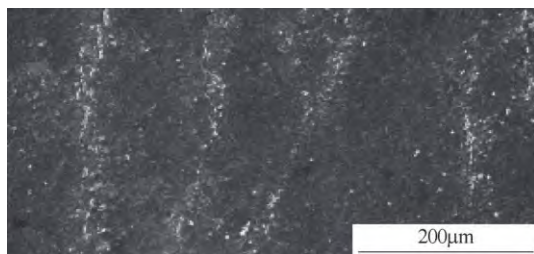


图7 多次锻造形貌（锻比为2.14，200×）

3.2 力学性能对比

采用切割机将坯样切割为标距15mm、厚度5mm的一批拉伸试样,在电子拉伸试验机上分别对5根试样进行拉伸试验,速度定为1mm/min,然后对拉伸结果取平均值,得出合金的力学性能。同时,用电子显微镜对拉伸后的断口进行分析,得出断裂机制主要为韧性断裂,在端面的断口处有韧窝的图形、均匀分布、尺寸偏小等特点,如图8~图10所示。

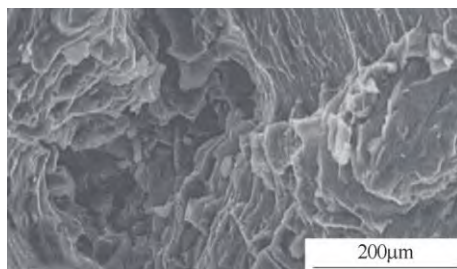


图8 铸态断口形貌

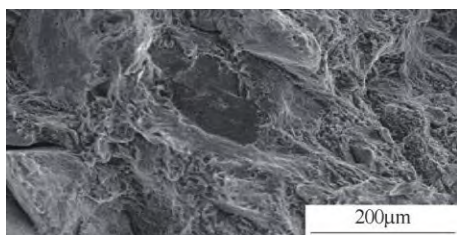


图9 首次锻造断口形貌

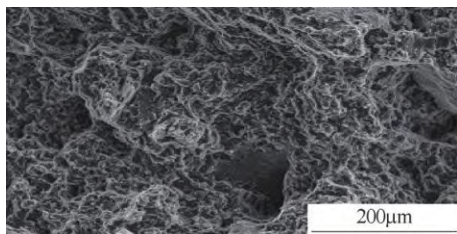


图10 多次锻造断口形貌

某镁合金在铸态的抗拉强度为153MPa, 经过首次锻造抗拉强度提高到312MPa, 伸长率为0.8%; 多次锻造后, 抗拉强度提高到376MPa, 伸长率达到1.8%。其室温下的应力-应变曲线如图11所示, 力学性能指标统计见表3。

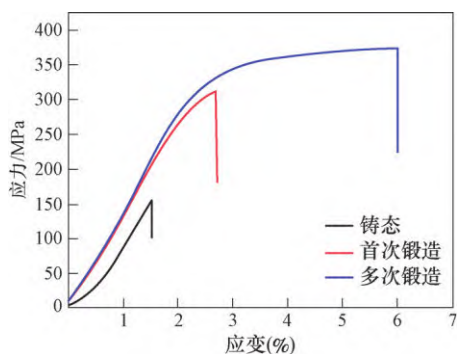


图11 室温下应力-应变曲线

表3 力学性能指标统计

产品状态	抗拉强度/MPa	断面收缩率 (%)	伸长率 (%)
铸态	153	—	—
首次锻造	312	1	0.8
多次锻造	376	3	1.8

综上所述, 晶界通过多次锻造得到了强化是抗拉强度及伸长率提升的主要原因, 根据Hall-Petch公式, 即

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中 σ ——屈服强度 (MPa);

σ_0 ——0.2%条件下屈服强度 (MPa);

k ——常数;

d ——平均晶粒的尺寸大小 (μm)。

根据式 (1) 及SEM形貌图中晶粒尺寸数据可知, 镁合金经过首次锻造及多次锻造处理后, 晶粒尺寸得到细化, 晶界的数量也得到增加, 韧性断裂改善主要依赖于晶粒的细化和织构调控, 在等温锻过程中, 通过精确的控制来实现这个工艺, 即等温锻、动态再结晶细晶, 以及弱化织构、裂纹钝化、韧性断裂抗力提升, 三者形成闭环。第二相强化主要是镁铝粒子的阻碍位错运动, 贡献为10~20MPa, 固溶强化主要是铝和锌的固溶效应, 贡献为90~100MPa, 以此提高了材料的强度和硬度。

4 结束语

镁合金铸态材料通过首次锻造后, 晶粒较铸态发生明显的细化, 但局部仍存在组织结构不均匀现象, 此时材料的抗拉强度仍不足, 通过多次锻造后, 晶粒得到进一步细化, 增加了晶界数量, 同时也减少了组织结构不均情况的发生, 抗拉强度由312MPa提升至376MPa, 抗拉强度提升了20%, 伸长率从0.8%提升至1.8%, 提升了113%。镁合金材料经过多次锻造后, 内部组织发生了细化, 强度及抗疲劳性都有了更高的提升, 产品可以满足更高要求的轻量化部件批量生产制造。

参考文献:

- [1] 聂广华. 机械盘件用新型镁合金的锻造工艺优化[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (21): 86-89, 95.
- [2] 杨洋, 王震. 锻造AZ80镁合金车轮热处理工艺优化[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45 (6): 63-67.
- [3] 聂焱, 王祝堂. 镁合金的锻造工艺[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (11): 1-8.
- [4] 兰新武, 岳大军. 锻造工艺对汽车减速器壳体用镁合金性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (3): 141-143.
- [5] 吴远志, 严红革, 朱素琴, 等. 多向锻造ZK60镁合金组织和性能的均匀性[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24 (2): 310-316.
- [6] 吴远志, 严红革, 陈吉华, 等. AZ31镁合金高应变速率多向锻造组织演变及力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22 (11): 3000-3005.
- [7] 钟丽萍, 路迢迢, 孙林超, 等. 镁合金多向锻造技术的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2024, 38 (23): 201-211.

(收稿日期: 20250306)