

• 实用成型技术 Practical Shaping Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.04.017

大应变轧制和均匀化处理对 Mg-4Sn-1Mn 合金力学性能和阻尼性能的影响

张 昊¹, 冯旭辉², 孙有平², 万斯雨², 冯旭煌³

(1.长沙学院 机电工程学院, 湖南 长沙 410022; 2.广西科技大学 机械与交通工程学院, 广西 柳州 545006; 3.浙江理工大学 纺织工程与科学学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要:采用光学显微镜(OM)、维氏硬度、XRD、多功能内耗仪等,研究了各状态下的 TM41 镁合金的显微组织、硬度和阻尼行为。结果表明,铸态、均匀化和轧制态 TM41 镁合金显微组织主要由 α -Mg 和 Mg_2Sn 相组成;铸态 TM41 合金经均匀化处理后硬度改变不明显,但是大应变轧制后合金的硬度显著上升。在温度-阻尼谱中,轧制态 TM41 合金具有较低的临界点,均匀化态 TM41 合金具有较高的临界点。铸态 TM41 合金的临界点不明显,轧制态的临界点是由于位错脱钉导致的,均匀化的临界点是由于晶界滑动导致的。由于铸态组织的第二相对晶界的钉扎作用,因此,临界点不明显。轧制态出现的阻尼峰为再结晶阻尼峰。

关键词:镁合金;显微组织;阻尼行为;硬度

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2021)04-0311-05

Effect of Heavy Strain Rolling and Homogenization on Mechanical and Damping Properties of Mg-4Sn-1Mn Alloy

ZHANG Hao¹, FENG Xuhui², SUN Youping², WAN Siyu², FENG Xuhuang³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China; 2. School of Mechanical and Traffic Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 3. School of Textile Engineering and Science, Zhejiang Science Technology University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The microstructure, hardness and damping behavior of TM41 magnesium alloy were studied by optical microscope (OM), Vickers hardness, XRD and multifunctional internal friction apparatus. The results show that the microstructure of as-cast, homogenized and rolled TM41 Mg alloys are mainly composed of α -Mg and Mg_2Sn phases. The hardness of as-cast TM41 alloy does not change obviously after homogenization, but the hardness increases significantly after large-strain rolling. In the temperature-damping spectrum, the rolled TM41 alloy has a lower critical point, and the homogenized TM41 alloy has a higher critical point. The critical point of as-cast TM41 alloy is not obvious, the critical point of rolled state is caused by dislocation and nail release, and the critical point of homogenization is caused by grain boundary sliding. The critical point is not obvious because of the second nailing action of the as-cast structure to the grain boundary. The damping peak of rolled state is recrystallization damping peak.

Key words: magnesium alloy; microstructure; damping behavior; hardness

镁合金具有比强度高、比刚度高、密度低、良好的阻尼和电磁屏蔽性能等特点,被广泛运用于航空航天和轨道交通行业,但是机械运作产生的振动和噪音会对机械和人体不利的影响^[1],因此研究热处

理和轧制对镁合金阻尼的影响规律也显得尤为重要。

均匀化热处理是在较高温度下使第二相溶解和扩散以消除低熔点共晶组织,改善枝晶偏析程度,降低合金的变形抗力,提高合金的塑性变形能力。轧制是制备镁合金板材的重要塑性变形之一,可以细化晶粒、改善组织结构、促进合金的动态再结晶,并显著提高镁合金的力学性能^[2-3]。周海和王敬丰等学者研究发现 Mg-Cu-Mn 和 Mg-Al-Ce 等镁合金经历塑性变形后在加热内耗时会产生不稳定峰谱^[4-5],这表明镁合金阻尼可能还有其他新的影响机制。高希鹏等人^[6]研究发现均匀化对 ZK 系镁合金阻尼性能也

收稿日期: 2021-02-06

基金项目: 柳州市科学研究与技术开发计划资助项目(2017BD20301); 广西高等学校学校水平创新团队资助项目(桂教师范[2019]52号)

作者简介: 张 昊(1981—), 湖南长沙人, 博士, 副教授。研究方向: 金属材料制备与成型研究。电话: 13873166142, Email: zhanghao@ccsu.edu.cn

通讯作者: 冯旭辉(1995—), 湖南长沙人, 硕士。研究方向: 镁合金成型和阻尼行为。E-mail: 448901472@qq.com

会产生较大的影响。但是关于 TM 镁合金阻尼性能的报道较少。

Mg-Sn-Mn 合金作为一种无毒性,同时具有可控降解和高强高韧的潜在医用镁合金被一些学者所关注[7]。在不含稀土元素的二元合金系中,Mg-Sn 系是高温镁合金备选合金系,虽然 Mg-Sn 合金拥有众多优点,但是 Mg-Sn 二元合金的力学性能不佳^[8]。当镁合金中加入 Mn 元素后,生成的 α -Mn 相可以在一定程度上有效的细化晶粒,并且在一定范围内,Mn 还可以提高镁合金的抗腐蚀性能^[9]。因此,近年来 Mg-Sn-Mn 合金的研究已成为热点之一。本文对 TM41 镁合金的力学性能和阻尼行为进行了深入研究,以期为其开发提供理论依据。

1 实验材料与方法

采用传统铸造法制备 Mg-4%Sn-1%Mn(TM41) 实验镁合金锭,熔炼所需材料为纯镁锭,Mg-3%Mn 合金以及纯锡锭。均匀化热处理制度工艺为 400 °C 保温 10 h 后空冷。轧制前用铣床把 TM41 镁合金铣至 10 mm,然后在 300 °C 下轧制至 2 mm,轧后立即水淬。使用 Leica DMI 3000 M 型显微镜观察合金显微组织,使用苦味酸溶液(1 mL 冰醋酸+2 mL 去离子水+20 mL 乙醇+1.2 g 苦味酸)进行浸蚀,使用 HVS-1000 Z 型硬度计测试其硬度值。加载载荷为 0.98 N,保荷时间为 10 s,重复 8 次取平均值。采用 SX-2700 型 X 射线衍射仪进行物相分析;采用 SIG-MA 场发射扫描电子显微镜观察其微观组织和进行

EDS 能谱分析;采用截线法测量晶粒尺寸,每个试样采取 200 个晶粒进行测量。温度阻尼谱采用多功能内耗仪(MFP-1000)进行测试,阻尼试样尺寸为 65.0 mm×1.0 mm×3.0 mm (长×厚×宽),测试维度 30~400 °C,频率为 1、5 和 9 HZ,应变 4×10^{-5} 。

2 实验结果与讨论

2.1 微观组织

图 1 是各状态下的显微组织图,铸态 TM41 合金枝晶分布明显,铸态组织显示了典型的铸态胞状(枝晶)组织,无明显晶界。经均匀化后,枝晶融入基体中,晶界变明显,并且均匀化后 TM41 合金的晶粒尺寸达到 341.1 μm ,当经过大应变轧制后,晶粒经动态再结晶后晶粒急剧细化,晶粒尺寸为 22.8 μm ,

图 2(a)为 TM41 镁合金第二相的 SEM 图,观察图 2(a)可以得到第二相的形态主要以鱼骨状形状存在。图 2(c)和图 2(d)为铸态 TM41 镁合金的 Mg 和 Sn 的元素分布图,可见 Sn 元素主要富集在第二相处,同时对其进行 EDS 能谱分析可见第二相主要由 Mg 元素和 Sn 元素构成。结合图 3 可知,各个状态下的 TM41 合金主要由 α -Mg 基体相和 Mg_2Sn 相组成。

由图 4 可知,随着均匀化的进行,TM41 镁合金的硬度由 46 HV 降低至 45 HV,硬度变化不大。随着大应变轧制的进行,硬度增加明显,TM41 合金的硬度由 45 HV 增加至 58 HV。

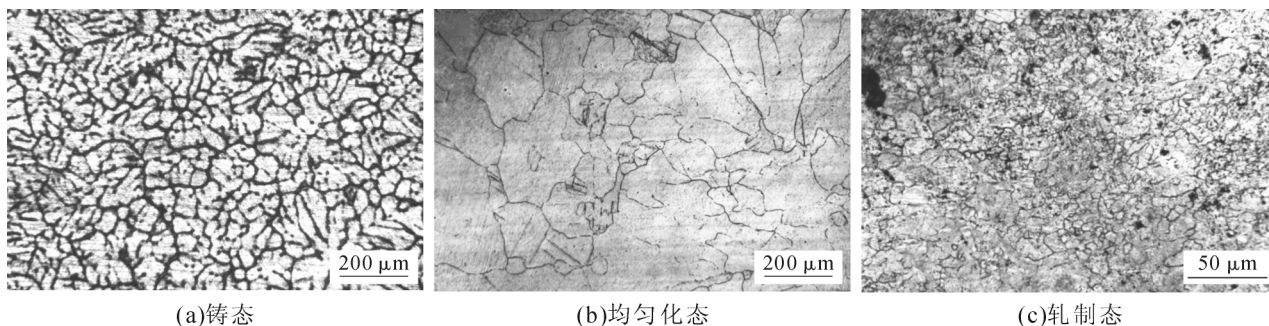


图 1 不同状态下 TM41 镁合金的微观组织
Fig.1 Microstructure of TM41 alloy in different states

结合图 1 我们可知,随着均匀化后的 TM41 镁合金的枝晶几乎全部熔于基体中,会对 TM41 合金产生固溶强化作用,但是随着均匀化的进行,镁合金的晶粒也会逐渐粗化^[10],导致硬度的减小。因此,导致均匀化后的硬度相近与铸态时的硬度,但是当 TM41 镁合金经过大应变轧制后,晶粒显著细化,同时产生的大量缺陷,阻碍了位错运动^[11],导致硬度上升。

2.2 阻尼性能

图 5 是在频率为 1 HZ 时各状态下的 TM41 镁合金的阻尼-温度变化曲线,由图可知在轧制态和均匀化态 TM41 镁合金阻尼主要分为两个部分:第一个部分是随着温度的增加,TM41 镁合金的阻尼性能几乎不改变,第二部分为随着温度的增加,TM41 镁合金的阻尼性能快速增加。但是,铸态 TM41 没有明显的临界点存在。对比可见,轧制态

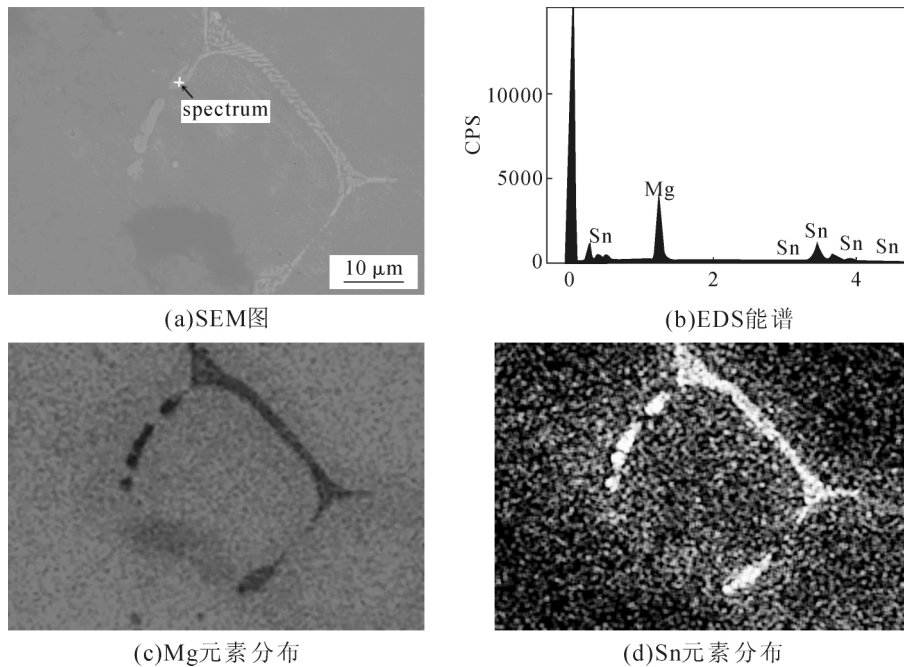


图 2 铸态 TM41 的 SEM 形貌及 EDS 分析结果
Fig.2 SEM image and EDS results of as-cast TM41 alloy

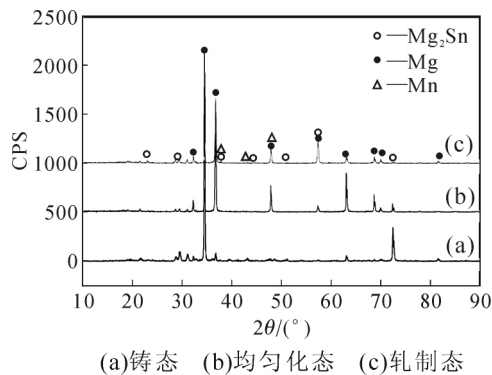


图 3 不同状态下的 TM41 镁合金 XRD 图
Fig.3 XRD patterns of TM41 alloy in different states

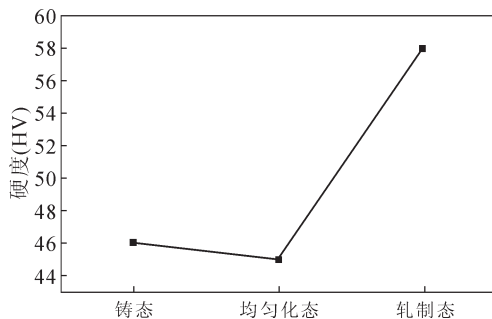


图 4 不同状态下 TM41 镁合金的硬度变化
Fig.4 Hardness changes of TM41 alloy in different states

TM41 镁合金的临界点温度为 100 °C, 远远低于均匀化的 TM41 合金出现临界点 275 °C。脱钉后轧制态 TM41 合金阻尼的上升速率大于均匀化态的 TM41 合金。

由图 5 可知轧制态 TM41 镁合金临界点出现的温度较低。Trojanova^[12]指出,在较高的温度下,位错

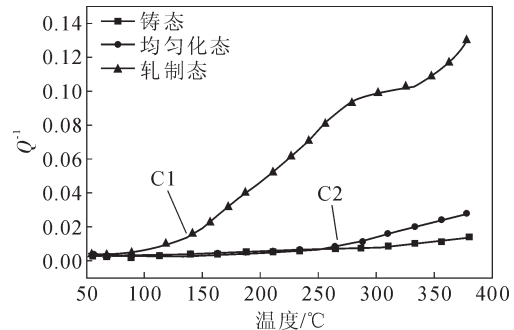


图 5 当频率为 1 HZ 时不同状态下的 TM41 镁合金的阻尼-温度变化曲线

Fig.5 Damping-temperature curve of TM41 alloy in different states when the frequency with 1 HZ

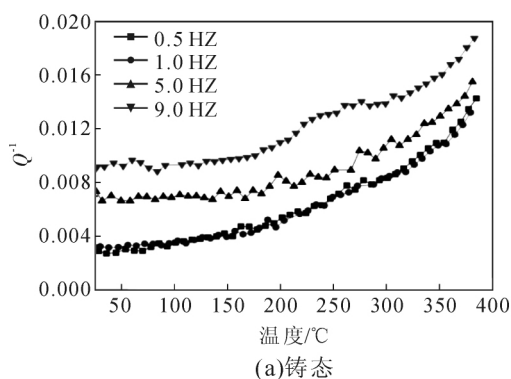
线脱钉需要的应力低于室温要求,而位错线的脱钉也不是室温的相互传递,类似雪崩似的脱钉,而是大量位错同时脱钉。由于 TM41 镁合金经变形后,会产生大量位错,认为第一个临界点是由于位错脱钉导致的,因此,阻尼性能随着温度的升高大幅度上升。

均匀化态的临界点出现的温度较高,对比图 1(a)和图 1(b)得到,均匀化后的主要区别是枝晶溶入基体,晶界更加清晰,枝晶对晶界的约束作用减弱,导致晶界更容易滑动。又因为随着温度升高,晶粒界面滑动成为主要机制,晶界在多晶金属中表现出粘滞性,晶界处的粘滞流动将导致热能^[13]产生,热能的耗散导致阻尼提高,因此断定均匀化态 TM41 镁合金临界点出现的原因主要是因为晶界的滑动而导致的。对比图 1(c)可知,在大应变轧制过后, TM41 镁合金的晶粒细化明显,并且晶粒细化会产生大量的晶界,轧制态 TM41 镁合金具有最高的阻尼能力。

同时,均匀化后第二相消失,晶界容易流动,因此在高温时均匀化态 TM41 镁合金的阻尼能力高于铸态时 TM41 镁合金的阻尼能力。

由图 5 可见,只有轧制态 TM41 在 300 °C 出现阻尼峰。结合^[14-15]研究,此阻尼峰为再结晶阻尼峰。这是由于在大应变轧制过程中,产生的大量位错和亚晶界,拥有大量的储存能,在再结晶温度以上时容易发生再结晶现象。因此,只有轧制态 TM41 镁合金出现了再结晶阻尼峰。

图 6 为不同频率下 TM41 镁合金铸态和均匀化



态的阻尼-温度变化曲线,可见频率对阻尼的影响较大。在低温下,低频阻尼小于高频阻尼,但是随着温度的不断升高,低频阻尼的上升速率比高频阻尼快。

根据 K-G-L 位错阻尼理论,在低频范围内,因为位错产生的位错阻尼有下式表示^[16]:

$$Q^{-1} = Q^{-1}_a + Q^{-1}_f \quad (1)$$

$$Q^{-1}_a = C_1 \frac{\rho b^2}{\varepsilon_0} \exp\left(-\frac{C_2}{\varepsilon_0}\right) \quad (2)$$

$$Q^{-1}_f = C_3 \rho f^2 / b^2 \quad (3)$$

式中, ρ 和 ε_0 分别为位错密度和应变振幅, b 和 f 分

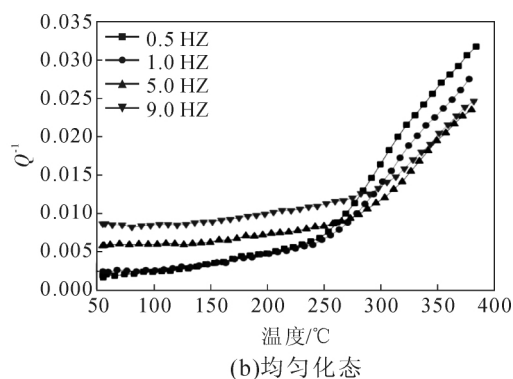


图 6 不同状态的 TM41 镁合金在不同频率阻尼温度变化曲线

Fig.6 Damping-temperature curve of TM41 alloy in different states at different frequencies

别为柏式矢量和振动频率, C_1 、 C_2 、 C_3 是物理常数;

由于实验振幅是固定的,同种状态下的 ZK60 镁合金材料的位错密度和柏式矢量一样,在同种状态下 TM41 镁合金的室温阻尼性能随着频率的升高,阻尼性能增大。随着温度升高,晶粒滑动成为主要滑动机制,并且只能在较低的频率下才能激活^[17],因此,在高温阶段低频阻尼的上升速率要大于高频阻尼的上升速率。

3 结论

(1)铸态 TM41 合金经均匀化后枝晶消失,均匀化态 TM41 合金经大应变轧制后晶粒急剧细化,其中各个状态下的微观组织由 α -Mg 相以及 Mg_2Sn 相组成。

(2)铸态 TM41 镁合金经均匀化处理后硬度变化不明显,但经过大应变轧制后硬度上升明显。

(3)在温度-阻尼谱中轧制态 TM41 镁合金具有较低的临界点,均匀化态 TM41 镁合金具有较高的临界点,但是铸态 TM41 镁合金的临界点不明显。轧制态 TM41 时出现了再结晶阻尼峰。由于其拥有最细小的晶粒,因此轧制态 TM41 阻尼性能最佳,而铸态 TM41 镁合金由于晶界被析出物所钉扎在高温处的阻尼性能最小。

参考文献:

- [1] 臧千昊,刘忠明,陈洪美,等. 热处理对双辊铸轧 ZK60 镁合金组织及阻尼性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(6): 1578-1582.
- [2] DOBATIN S, GALKIN S, ESTRIN Y, et al. Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019(774): 969-979.
- [3] JIANG J M, WU J, NI S, et al. Improving the mechanical properties of a ZM61 magnesium alloy by pre-rolling and high strain rate rolling [J]. Materials Science and Engineering A, 2018 (712): 478-484.
- [4] ZHOU H, WANG J F, PAN F S, et al. Influence of rolling on internal friction peak of Mg-3Cu-1Mn alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6): 1610-1616.
- [5] WANG J F, LI S, WU Z S, et al. Microstructure evolution, damping capacities and mechanical properties of novel Mg-xAl-0.5Ce (Wt%) damping alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2107(729): 545-555.
- [6] 高希朋,严红革,陈吉华,等. 固溶处理对 ZK 系镁合金力学及阻尼性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(1):81-85.
- [7] 杨小荣. 生物医用 Mg-Sn-Mn 合金的显微组织及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [8] 石章智, 张文征. 用相变晶体学指导 Mg-Sn-Mn 合金优化设计 [J]. 金属学报, 2011, 47(1):41-46.
- [9] 曹跃杰. 稀土元素 La 对 Mg-Sn-Mn 合金组织与性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2015.

(下转第 319 页)

晶器内壁接触,引发黏结,因此降速、涮杆、降中包车等引起结晶器液面上涨时不能捞渣;第三,捞渣不能过勤,通常渣条厚度在 20 mm 以下时,对液渣的流入不会造成影响,因此渣条厚度超过 20 mm 才能进行捞渣操作。

通过选择合适的保护渣、提高结晶器质量、优化结晶器流场、规范职工操作等措施,有效解决了唐钢 1 900 mm 板坯连铸机频繁黏结问题,黏结次数由投产初期的每月 20 次,降至每月 4 次以内,取得良好的控制效果。

4 结论

(1)造成唐钢 1 900 mm 板坯连铸机投产初期频繁黏结的原因主要是由于保护渣性能不合适、结晶器质量不达标、结晶器流场不合理、职工操作不规范等,使保护渣不能起到良好的润滑的传热效果。

(2)通过优化保护渣性能、改变结晶器镀层材质、防止结晶器压铁渗水、防止热电偶接触不良造成黏结误报、选择合适的水口浸入深度和水口底部倾角、选择合适三路氩气流量、规范钢液过热度控制、恒拉速浇注、规范捞渣操作等措施,使唐钢 1 900 mm 板坯连铸机黏结次数由投产初期的每月 20 次降至每月 4 次以内。

参考文献:

- [1] 李向奎,张丙龙,陈玉鑫.冷轧板表面夹渣缺陷成因及控制[J].中国冶金,2015,25(12):54-58.
- [2] 李建文,高福彬,刘红艳.低碳钢铸坯表面“夹渣”生产控制实践[J].连铸,2015,40(4):65-68.
- [3] 刘曙光,赵建平,王帅,等.中板坯连铸机黏结的原因分析及预防措施[J].连铸,2018,43(3):31-34.
- [4] 何飞.板坯连铸结晶器漏钢预报系统的开发与实践[J].连铸,2015,41(3):68-72.
- [5] 韩立海,姜英,唐作宇.薄板坯连铸的黏结机制分析及控制实践[J].连铸,2014,1(6):7-11.
- [6] 姚云苗,杨国涛,苏本红.板坯连铸机黏结漏钢的原因与预防措施[J].钢铁研究,2010,38(S2):269-272.
- [7] 于海涛.本钢薄板坯连铸 SK85 高碳钢的生产实践[J].连铸,2019,44(1):5-9.
- [8] 孙启浩,文光华,朱先飞,等.保护渣固态渣膜传导及辐射耦合传热特性研究[J].连铸,2017,42(1):35-39.
- [9] 王谦,何生平,任勤,等.连铸保护渣析晶温度的调查[J].钢铁,2004,39(S1):641-644.
- [10] 张菊根,夏文勇.新钢板坯连铸黏结漏钢原因分析[J].江西冶金,2005,25(5):12-14.
- [11] 崔拓.连铸板坯 SS400 钢黏结漏钢攻关实践[J].连铸,2016,41(6):67-71.
- [12] 王帅,赵建平,冯帅,等.热轧板边裂缺陷成因及控制[J].河北冶金,2019,286(10):34-37.
- [13] 赵建平,王帅,冯帅,等.减少唐钢中薄板坯连铸机黏结实践[J].连铸,2020,45(1):74-77.
- [10] 孙有平,周学浩,何江美,等. Mg-4Sn-1Zn 生物镁合金均匀化处理制度研究[J].特种铸造及有色合金,2016,36(11):1126-1128.
- [11] 朱素琴,严红革,刘志文,等.剪切应变对镁合金板材微观组织的影响[C]//第十二届全国青年材料科学技术研讨会论文集.2009:1096-1101.
- [12] Trojanová Z, Lukáč P, Chmelík F, et al. Microstructure changes in ZE41 composite estimated by acoustic measurements [J]. Journal of Alloys and Compound, 2003, 355(1-2): 113-119
- [13] DENG K K, LI J H, NIE K B, et al. High temperature damping behaviors of as-deformed mg matrix influenced by micron and sub-micron SiCp [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 624: 62-70.
- [14] 冯旭辉,孙有平,何江美,等.热处理对大应变轧制 ZK60 镁合金阻尼峰的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1287-1290.
- [15] Xuhui Feng, Youping Sun, Yuwei Lu, et al. Effect of the strain rate on the damping and mechanical properties of a ZK60 magnesium alloy[J]. Materials, 2020, 13(13), 2696.
- [16] 马春江,张荻,覃继宁,等. Mg-Li-Al 合金的力学性能和阻尼性能[J].中国有色金属学报,2000(S1):10-14.
- [17] 刘先兰. Mg-Zn-Nd-Cd-Zr 合金的力学性能和阻尼性能研究[D].长沙:中南大学,2012.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章:1 铸铁件均衡凝固与有限补缩;2 铸铁件冒口补缩设计及应用;3 压边浇冒口系统;4 浇注系统大孔出流理论与设计;5 铸件均衡凝固工艺;6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7 浇注系统当冒口补缩设计方法;8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页,特快专递邮购价 280 元。
邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628