

特约专栏

铸轧镁合金薄带组织演变实验研究与模拟

邱洪双, 黄 锋, 王广山

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 以镁合金薄带双辊铸轧新技术为背景, 开展了铸轧成形过程中组织性能的模拟研究。镁合金薄带双辊铸轧是以液态镁合金为原料, 用两个反向转动的水冷铸辊为结晶器, 直接制备 1.5 ~ 3.0 mm 镁合金薄带的短流程新工艺。对双辊铸轧轻合金薄带的凝固组织演化过程进行数值模拟, 用以优化和指导制备技术, 具有重要的理论意义和应用前景。项目研究组通过对双辊铸轧过程动态凝固成形的有限元数值模拟研究、镁合金薄带铸轧实验研究以及后续加工过程中的组织演变规律研究, 得到了主要工艺参数对铸轧工艺稳定性及组织性能的影响规律。

关键词: 镁合金; 双辊铸轧; 凝固微观组织; 数值模拟

中图分类号: TG249; TG146.2⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)11-0048-07

Experimental and Simulation Research on Microstructure Evolution of Magnesium Strip during Twin Roll Casting

DI Hongshuang, HUANG Feng, WANG Guangshan

(The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The simulation work of the microstructure evolution during the Twin roll casting (TRC) was taken out. Considered as one advanced manufacture process, the near net twin roll strip casting is a new technical process which use the two counter rotating rolls as the mould, and produce thin strip with the thickness of 1.5 ~ 3.0mm directly form molten magnesium alloy. Through this simulation work, the research of the experimental TRC test and the subsequent processing, effects of the main process parameters on the characteristic of solidification microstructure and the stability of the process was investigated, which can be used to optimize the process and has a significant prospect in application.

Keywords: magnesium alloy; twin roll casting; solidification microstructure; numerical simulation

1 前 言

镁合金薄带双辊铸轧技术是冶金及材料领域的前沿课题之一, 该工艺是金属凝固和轧制变形的有机统一, 即液态金属在结晶凝固的同时承受塑性变形, 在很短的时间内完成从液态金属到固态薄带的全过程, 该工艺极大地缩短了生产流程, 具有节约能源和降低生产成本的突出优点。另外, 由于该工艺具有亚快速凝固和在轧制压力作用下凝固成形的特点, 可生产难变形合金薄带。对铸带的组织观察结果表明, 铸轧镁合金薄带具有细小的等轴晶组织。由于铸带组织减少或消除了柱状晶, 因此极大地提高了镁合金薄带的变形能力, 单次次压下量达 40% 时未出现裂纹, 实现了铸轧薄带的直接冷轧^[1-6]。

影响双辊铸轧技术产业化应用的主要因素是其工艺过程的稳定性、铸轧产品的质量和后续可加工性。双辊铸轧过程中影响因素很多, 整个工艺过程的控制很复杂, 深入研究不同工艺条件下铸轧过程中金属熔液的凝固行为和规律, 对提高过程的稳定性, 改善铸带组织性能具有重要意义。

在国家“973 计划”项目课题“短流程成形加工过程组织性能演化模”(2006CB605208-1)的资助下, 以镁合金薄带双辊铸轧新技术为背景, 以 AZ31 镁合金为研究对象, 开展了镁合金薄带铸轧过程的组织性能演化模拟工作, 同时通过实验室铸轧实验, 研究了镁合金立式双辊铸轧过程相关技术问题, 以及铸轧过程微观组织演变。对相关的后续加工工艺及其过程中组织演变也进行了初步的研究。

2 国内外研究现状及发展趋势

2.1 国内外镁合金铸轧工艺研究现状

德国的蒂森集团弗莱堡镁板带公司在 2001 年提出

研究镁直接铸造镁板带材这个课题^[7]。该公司采用一套卧式的双辊铸轧设备,带有水冷却的钢辊,能生产出连续的镁合金带,其宽度达 700 mm。公司的试生产表明,最终厚度为 2 mm 的带材,成材率可达 80%~90%。与传统的铸锭热轧板材的显微组织相比,双辊铸轧镁合金薄板的显微组织均匀细小,极少偏析,镁固溶体内的第二相质点密而弥散分布。由于材料显微组织的改善,其力学性能有相当大的提高。

挪威的 Hydro 公司也已经成功地开发出一套镁合金铸轧实验设备,目前已经生产出厚度为 4.5 mm,宽为 410 mm,镁合金薄带,目前连续生产的最大产量为 1 t 左右。利用铸轧生产出来的镁合金薄板进行了热轧实验研究,热轧的温度在 400 ℃,每道次的压下率在 10% 左右,最大可达 40% 而没有产生明显的缺陷。其最终的组织性能也明显优于传统热轧方法生产的镁合金板带。

此外,日本的 Watari 等人开发了双辊铸轧半固态镁合金的生产工艺^[8-10]。该技术是在倾斜式双辊铸轧机的基础上,在熔炼炉与供料箱之间增加了一个冷却斜坡,作用是将熔融的镁合金熔体冷却为半固态浆料,随后进入供料箱,最终铸轧出镁合金薄板。采用此技术, Watari 等人已经成功地铸轧出了 AZ31B, AZ91D, AM50 和 AM60 的镁合金薄板。韩国 Park 等^[11]对 AZ31 和 AZ91 两种合金的双辊薄带铸造进行了研究,铸轧温度为 650~750 ℃,铸轧速度为 4.0~4.5 m/min 时,可得到 2 mm 厚的镁合金带坯。

在国内,东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室应用水平式双辊铸轧机已经成功轧制出了厚为 5.0 mm,宽为 450 mm 的镁合金薄板,其边部整齐,表面质量良好^[12]。重庆大学采用立式双辊铸轧机进行薄带连铸的实验研究,实验材料为 AZ31 镁合金,铸轧出的镁合金薄带的厚度为 1~2 mm,宽度为 150 mm^[13]。

另外,2005 年 5 月,洛铜集团成功开发出了变形镁合金连续铸轧技术,产品质量及其深加工产品的适用性等方面已经达到或超过热轧同类产品。福州华镁和山西闻喜银光镁业在双辊连续铸轧镁合金薄带材工艺技术的研究方面也取得了重大的进展,开发出宽 600 mm、厚 3~10 mm 的铸轧板材,建立了产业化生产线^[14]。以上都是采用水平式铸轧。

东北大学铸轧技术及连轧自动化国家重点实验室采用立式双辊铸轧机,进行了关于 AZ31 镁合金的铸轧实验,成功铸轧出宽 254 mm、厚 1~3 mm 的 AZ31 镁合金薄带。实验研究表明,铸轧态的镁合金具有良好的冷加工及热加工性能。同时对铸轧过程的微观组织演变进行了较为详细的研究。

2.2 镁合金薄带双辊铸轧过程凝固组织模拟研究现状

对双辊铸轧薄带凝固传热的数值模拟始于 20 世纪

80 年代,采用的方法主要是有限差分法(FDM)和有限元法(FEM),模拟材料为铸轧带钢。随着计算机应用技术的发展,双辊铸轧过程模拟研究也由初期的一维粗糙数学模型逐步向二维、三维模型发展,由单一的模型向着耦合模型的方向发展。

从现有的研究报导来看,已有的研究主要侧重于对铸轧熔池内部温度场以及流场的模拟分析以及对铸轧区的热力耦合计算。Tavares 等^[15]在考虑流动与凝固传热耦合现象的基础上,建立了三维紊流流动、传热数学模型,引入了综合传热系数的概念,对水口形状、浸入深度及湍流模型对凝固过程的流动与传热的影响进行了模拟分析。国内苗雨川等^[16-17]建立了熔池内钢液流动和传热耦合的数学模型,利用 ANSYS 有限元分析软件对双辊铸轧薄带钢过程进行了三维有限元模拟。Wang^[18]等人建立了一个传热-传质-流动的耦合模型,采用 FEM 方法研究了带钢铸轧过程中的 C 扩散现象。

在镁合金铸轧模拟方面, Baea 等^[19]运用二维的 FDM 和 FEM 研究了立式双辊铸轧过程中的流场和温度场分布。Zeng 等^[20]利用 CFD 对镁合金水平铸轧过程中的流动与传热现象进行了三维求解,并分析了铸轧速度和辊缝宽度对熔池内部温度场和流场的影响。

目前对薄带双辊铸轧过程中的组织性能演化模拟的研究还鲜有报道。杨明波^[21]采用确定性方法,建立了双辊薄带凝固过程的宏观传热传质和微观形核生长相统一的综合数学模型,并对柱状晶长度及熔池内部柱状晶一等轴晶的转变进行了模拟计算。季晨曦等^[22]采用 FE—CA 方法对薄带铸轧过程中,啮合点前的柱状晶区进行了模拟,并研究了铸轧速度、浇铸温度及液面高度对柱状晶区的影响,并实现了模拟结果的可视化。然而在镁合金薄带铸轧过程凝固组织模拟方面,至今还未见报道。

尽管国内外学者对双辊铸轧过程的流动、传热和凝固过程进行了许多模拟研究工作,但仍存在一些难点问题有待于进一步的研究,归纳起来大致如下:

①边界条件的处理。在双辊铸轧过程中,铸辊与熔池之间的边界几何形状是不规则的,因此,需要开发对不规则边界具有良好适应性的有限元分析软件。另外,铸辊与熔池接触的边界随着铸辊的转动而不断发生变化,即使在稳定铸轧状态下,铸辊的温度场仍然具有移动边界条件的不稳定温度场,这也是传热学中很难处理的边界问题之一。同时凝固壳与铸辊表面之间可能有气隙存在,而且其位置难以确定,这样势必导致边界热阻的变化,因而,给边界传热系数的确定带来难度。

②模型的简化及耦合模型的建立。双辊铸轧薄带钢过程是一个三维流热耦合问题,以往的模拟都对模型进行了相应的简化处理,而且不同的研究所采取的处理方

法也不同。在模型建立方面,有些研究采用了二维模型甚至一维模型,有些研究也没有考虑耦合问题,这样势必造成模拟结果与实际相差较大。同时,各种模拟方法之间的差异也较大,因此,如何建立真实反映该过程的精确模型及相应的处理方法仍然是一个需要进一步深入研究的问题。另外,双辊铸轧过程中,由于铸与轧同时存在,因此,铸轧力的存在势必引起铸轧过程中应力场的变化,而熔池区域是一个集液相区、糊状区和固相区于一体的区域,其内材料力学行为十分复杂,建立材料应力分析模型的难度很大,同时应力场也会对熔池中熔体的流动传热产生影响,因此,也有待于进行深入研究。

③物性参数的选择。在大部分的数值模拟中,材料物性参数都采用常数。而双辊铸轧过程中,熔池区域内的温度梯度很大,势必造成材料的力学行为及物性参数发生改变,如果在模拟过程中采用常物性参数,则会使模拟结果存在较大误差,甚至无法反映铸轧过程的真实情况。因此,有必要对物性参数随温度、变形速度等工艺条件的变化进行研究。

3 课题组取得的研究进展

在薄带铸轧过程数值模拟研究方面,揭示了薄带铸轧过程的一系列深层规律。建立了能够描述双辊铸轧过程中的湍流流动、传热和凝固过程的控制方程。建立了考虑各种复杂因素的双辊铸轧过程流动和传热耦合的三维有限元分析理论和铸辊三维热-力耦合有限元分析理论,提出了熔池与铸辊接触面分区和换热边界条件处理的反向方法,揭示了铸轧工艺条件和铸辊结构对铸辊温度、热应力和热变形的影响规律。以 AZ31 镁合金为研究对象,开展了镁合金薄带铸轧过程的组织性能演化模拟工作。结合实验室具体实验结果和理论分析,确定了铸辊与熔池的换热系数,以及熔池内部的形核参数等关键问题,实现了对镁合金薄带双辊铸轧过程的温度场及流场的三维耦合模拟,同时,通过 CA—FE 方法实现了镁合金薄带凝固组织形成过程的可视化模拟^[23]。

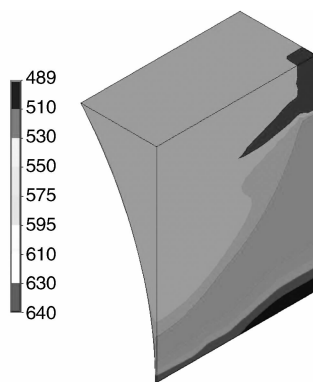
3.1 熔池内部温度场与流场的耦合模拟

在双辊铸轧模拟过程中,熔池与铸辊接触传热边界条件的确定相当困难,其原因在于,铸辊与熔池之间的传热方式会受到铸轧材料、铸辊的表面状态、铸轧过程中的气氛、铸轧速度、钢水过热度、铸轧力的大小等工艺参数的影响,而且该边界又是动边界,因此,该边界条件的确定一直是双辊铸轧过程模拟的难点和关键,它将直接影响到模拟结果的精度。本研究采用实验结果与模拟相结合的逆向方法来解决铸辊与熔池之间边界条件处理的难题,得到热流密度与接触时间的变化如图 1 所示,铸辊与凝壳之间的热传导系数与熔池的位置以及铸

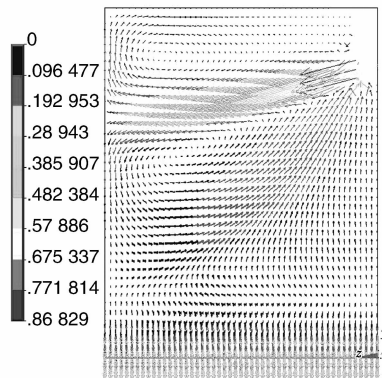
轧速度之间的关系式可表示为:

$$\begin{cases} h = 1523.5v^{0.42}(-4\text{atan}(240x-8)+8.2571) & \text{区域1} \\ h = 1523.5v^{0.42}(1.333\text{atan}(240x-26)+4.515) & \text{区域2} \end{cases} \quad (1)$$

采用 FEM 方法,对镁合金薄带铸轧过程中熔池内部的温度场及流场进行了三维模拟,并分析了不同工艺参数下对铸带出口温度以及凝固终了点的影响。由于铸轧熔池的对称性,取铸轧溶池的 1/4 作为模拟区域。典型工艺条件下的模拟结果如图 1 所示。



(a)



(b)

图 1 镁合金铸轧过程温度场及流场模拟结果:(a)温度场模拟结果,(b)中心对称面流场

Fig. 1 Simulated results of the temperature field (a) and fluid flow (b) in the molten pool

3.2 熔池内部流动对形核率的影响

在凝固微观组织模拟研究中,基于高斯分布的形核模型得到了广泛的应用。假定晶粒密度的分布满足 Gauss 分布,则 $dn_v/d(\Delta T)$ 可表示为:

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi\Delta T_\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T - \Delta \bar{T}}{\Delta T_\sigma}\right)^2\right] \quad (2)$$

其中 $\Delta \bar{T}$ 为平均形核过冷度, ΔT_σ 为标准偏差过冷度, n_{\max} 为最大形核密度。

由于双辊铸轧过程中随着铸辊的转动,熔池内部存在较强的对流,在辊面上已经形核长大的晶粒受到冲击,

会造成枝晶的破碎，这些碎片进入熔池内部，也可以作为新的形核核心，从而造成熔池内部形核核心增殖。因此，熔池内部的晶粒形核并不只和过冷度有关，铸辊的转速也即铸轧速度对其也有重要的影响，必须加以考虑。实际铸轧实验结果也证实了这一点，在同一温度下，随着铸轧速度的增加，铸带组织的晶粒有明显的细化。因此在原来形核模型的基础上，引入一个由对流引起的晶粒增殖项 n_f ，该项只与铸轧速度有关，则晶粒密度的分布函数可表示为：

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi\Delta T_{\sigma}}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T - \Delta \bar{T}}{\Delta T_{\sigma}}\right)^2\right] + n_f(v) \quad (3)$$

假定 n_f 与铸轧速度呈线性关系，则式 (3) 可以表示为：

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi\Delta T_{\sigma}}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T - \Delta \bar{T}}{\Delta T_{\sigma}}\right)^2\right] + kv \quad (4)$$

图 2 显示了不同铸轧速度下晶粒分布同过冷度的关系。

3.3 熔池内部流动对枝晶尖端生长动力学的影响

目前常见的枝晶尖端生长动力学模型是由 Kurz, Giovanola 和 Trivedi 等人提出的 KGT 模型，枝晶尖端的生长速度经推导最终可以表示为

$$v(\Delta T) = k_1 \Delta T^2 + k_2 \Delta T^3 \quad (5)$$

其中 k_1 和 k_2 为与合金本身属性相关的系数。此模型并没有考虑对流对枝晶生长动力学的影响，而铸轧过程中熔池内部由于浇口的注流冲击以及铸辊的转动，存在强烈的强制对流，并且对枝晶的生长有重要影响，因此需要对常规的生长动力学模型加以修正，使之能够体现对流的影响作用，因此提出了一个改进模型：

$$v(\Delta T, v_c) = f(a, v_c) v(\Delta T) \quad (6)$$

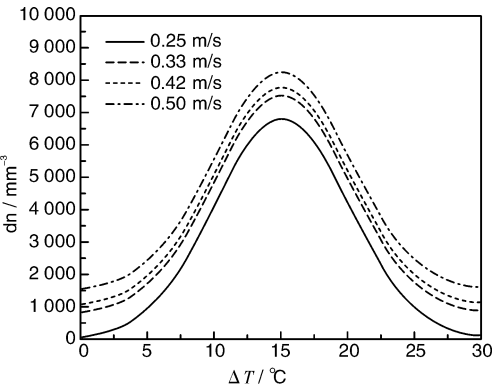


图 2 不同铸轧速度下的形核分布曲线，其中 $k=5000$
Fig. 2 Distribution curve of nucleation under varied casting speed

其中函数 $f[\alpha, v_c]$ 可以表示为：

$$f(\alpha, v_c) = 1 + k_a \tanh(k_b v_c) [\varepsilon - \cos(\alpha)] \quad (7)$$

其中 k_a 为饱和系数， k_b 为修正系数， v_c 为枝晶尖端

与流体间的相对速度， ε 为不对称因子， α 为枝晶优先生长方向与流体相对速度方向间的夹角，图 3 为不同速度下修正函数 $f(\alpha, v_c)$ 值随流动夹角增长而变化的情况。

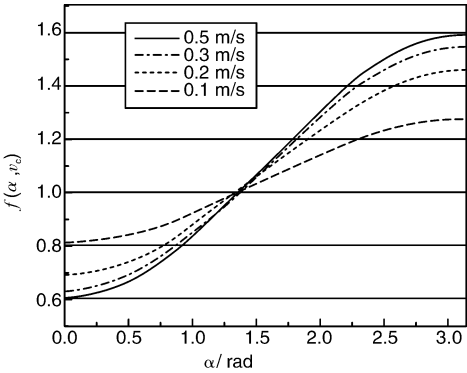


图 3 与流动夹角之间的变化关系
Fig. 3 Relationship between flow angle and

3.4 宏观—微观耦合方法

由于铸轧熔池入口和出口尺寸的差异很大，造成熔池上下部分的高度不对称，且实验结果表明镁合金铸轧薄带的晶粒相当细小，因此想要在整个熔池的范围内模拟并显示凝固组织不仅计算量大，实现也很困难，由于实际上人们关注的只是铸轧薄带组织情况，因此可以适当缩小模拟范围。

稳定铸轧过程可以视为一个稳态过程，而熔池与铸辊间存在着相对运动，为了描述这一情况下铸轧薄带凝固组织的形成与演化过程，也为了缩小计算范围，如图 4 所示，在熔池 z 方向选取不同的截面，在此截面上选取紧贴辊面的一个微区作为微观组织模拟的区域，边长为

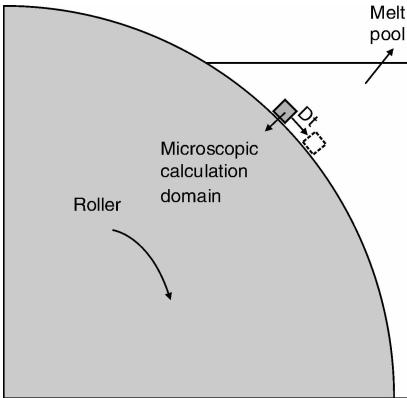


图 4 微观凝固组织模拟方法示意图
Fig. 4 Schematic description of the microscopic simulation method

薄带出口厚度的一半。模拟区域随着铸辊的转动一起向铸轧出口移动，通过插值计算微观模拟区域内的温度及速度分布，在此基础上运用元胞自动机方法 (CA) 分析模拟区

域内合金凝固组织的形核与生长,可实现对铸轧薄带整个凝固组织形成及演化过程的模拟。在此基础上分析了不同

工艺参数对镁合金铸轧凝固组织及其形成过程的影响。典型工艺条件下的镁合金凝固组织形成过程如图 5 所示。

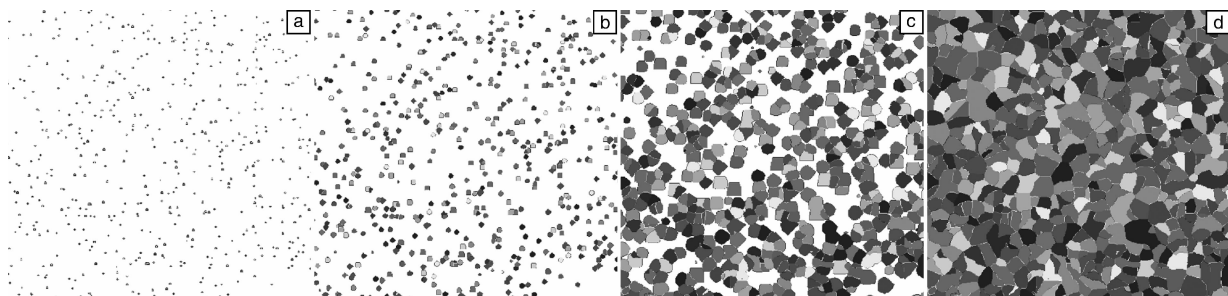


图 5 微观凝固组织形成过程模拟结果: (a) 0.002 1 s, (b) 0.025 3 s, (c) 0.301 6 s, and (d) 0.398 8 s

Fig. 5 Simulated results of microstructure evolution during TRC process: (a) 0.002 1 s, (b) 0.025 3 s, (c) 0.301 6 s, and (d) 0.398 8 s

通过对不同工艺下镁合金薄带铸轧凝固过程的模拟,研究了不同工艺参数对薄带最终凝固组织的影响规律。研究表明:铸轧速度对铸轧薄带的最终组织具有重大的影响,随着铸轧速度的增大,能够明显地细化晶粒。随着浇铸温度的降低,镁合金薄带凝固组织有一定程度的细化。通过以上分析,可以得出结论,要得到组织均匀细致的铸轧镁合金薄带,需要尽可能地提高铸轧速度,并降低浇注温度。然而由于铸轧工艺的特殊性,因此铸轧过程中各工艺参数相互影响,可调范围很窄,如铸速过高,则易发生泄露与断裂事故,如浇注过低,凝固壳过厚,容易发生轧卡事故。因此依据模拟分析结果,并参照实验经验,适合镁合金薄带双辊铸轧工艺的最优工艺条件范围为:铸轧速度应控制在 15 ~ 25 m/min,浇注

温度应控制在 640 ~ 660 °C 以内。

3.5 镁合金薄带铸轧实验研究及后续加工研究进展

课题组利用实验室立式双辊铸轧机,进行了 AZ31 镁合金的铸轧实验,在实验过程中摸索出了合适的浇注温度、铸辊转速、熔池高度等工艺参数,研究了镁合金立式双辊铸轧过程的相关技术问题,成功铸轧出了厚度为 1.0 ~ 3.0 mm, 254 mm 宽,板形良好,边部整齐的 AZ31 镁合金薄带,并进行了微观组织观测和后续热处理及力学性能测试^[26-30]。

从图 6 可以看到,铸轧薄带凝固组织为细小的等轴晶粒,而且经过热处理后,得到了均匀圆整的晶粒,从拉伸断口可以看到,经退火后铸轧薄带显示出了良好的韧性。

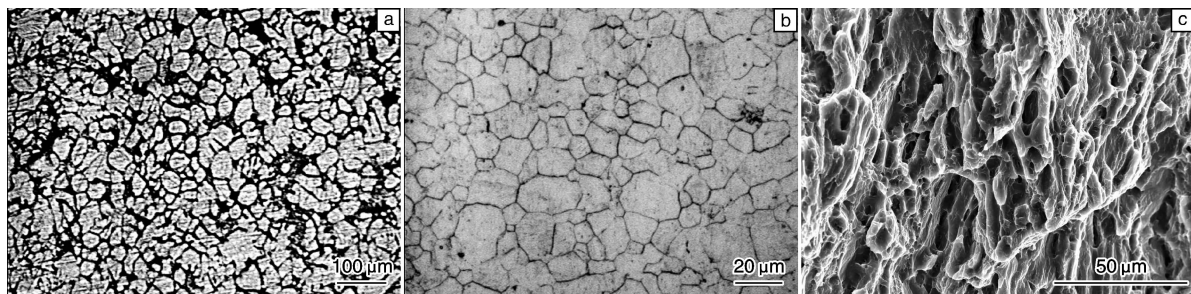


图 6 镁合金铸轧薄带及热处理后组织照片: (a) 铸轧态, (b) 退火后, (c) 拉伸断口

Fig. 6 Microstructure of the TRC magnesium alloy strip and tographs of the strip after annealing

为了研究铸轧 AZ31 镁合金板材的加工性能,并探讨相关的加工工艺,对铸轧镁合金薄板进行了热轧、冷轧及相应的轧后热处理工艺以及超塑性拉伸实验。

热轧及后续退火实验表明,铸轧 AZ31 镁合金在 300 °C 以上轧制具有良好的加工性能,热轧得到的组织为均匀分布的等轴晶粒,经过热处理之后其综合机械性能得到了显著提高。热轧及经热处理之后薄带的晶粒组织如

图 7 所示。

图 8 为冷轧及经过轧后退火之后薄带的晶粒组织,冷轧及后续退火实验研究结果表明:铸轧 AZ31 镁合金具有良好的冷变形性能,经冷轧后得到了较好的表面质量,铸轧 AZ31 的冷轧变形单道次变形量可达 10%,而累计变形量不大于 40%。铸轧 AZ31 镁合金冷轧板材的变形组织为大量位错与李晶共存的组织。而在 350 °C 下保温

到 60 min 后可以得到晶粒尺寸为 9 μm 左右的均匀组织。

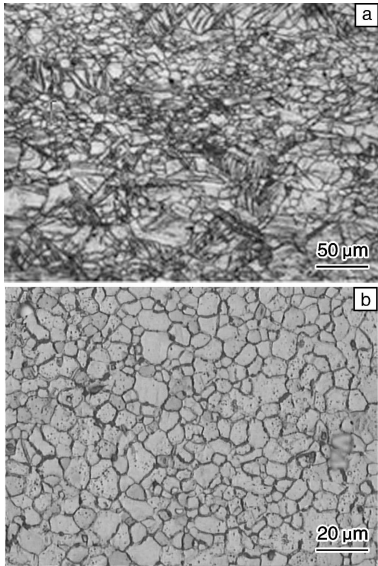


图 7 热轧与轧后退火组织：(a) 热轧态，(b) 退火后
Fig. 7 Microstructure of the hot rolled (a) and annealed (b) TRC magnesium alloy strip

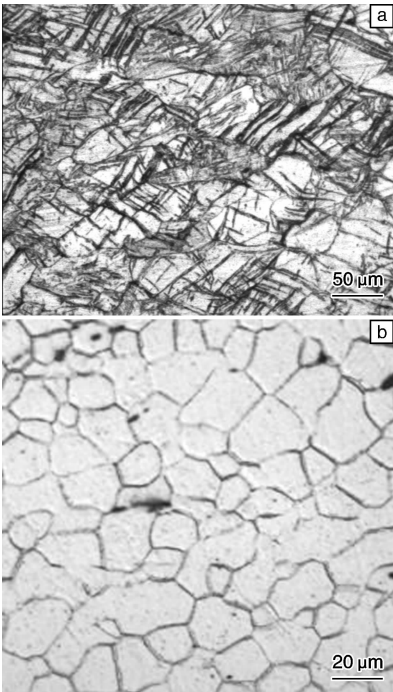


图 8 冷轧与轧后退火金相照片：(a) 冷轧态，(b) 退火后
Fig. 8 Microstructure of the cold rolled and annealed TRC magnesium alloy strip

对铸轧 AZ31 镁合金进行了超塑性拉伸实验，根据实验数据可得到如下结论：材料的原始组织为非等轴状态的非理想超塑性组织。变形过程中出现动态再结晶。

随着变形温度的升高晶粒长大，大小趋于均匀。变形速度越慢，晶粒大小越均匀。变形程度越大，动态再结晶进行得越充分。

双辊薄带铸轧的快速凝固过程，使显微组织均匀、晶粒细化、并提高了合金的固溶度。这种在基体中增强的析出沉淀形核作用，主要是由于在铸轧状态的材料中空位量增加及细小的析出物沿亚晶界分布的结果。所有上述特征，均有利于明显提高材料的力学性能。

4 总结和展望

镁合金薄带双辊铸轧作为一项前沿技术，近年来取得了长足的发展，国内外已经取得了一系列成果，并且已经部分应用于工业生产。本课题组利用自有铸轧实验设备，通过系统实验研究分析了各个工艺参数对立式铸轧镁合金薄带微观组织和工艺过程稳定性的影响，并掌握了一套合理的工艺参数。并对后续的热处理及各种加工工艺进行了研究，结果表明铸轧镁合金薄带具有良好的加工性能。

在薄带铸轧过程模拟研究方面，总体上主要侧重于铸轧过程中熔池内部的宏观传输行为的模拟研究，并且多数针对带钢的铸轧过程，已有的对镁合金铸轧过程的模拟研究也主要是针对水平铸轧过程。本课题组用有限元法与元胞自动机方法，不仅对铸轧熔池内部的流动与传热现象进行了模拟分析，更进一步实现了镁合金薄带双辊铸轧整个过程中凝固组织演变的模拟，模拟结果与实验结果符合较好，为薄带铸轧工艺的优化和薄带质量的控制提供了理论上的支持。

结合目前研究现状，镁合金薄带双辊铸轧技术实验研究及数值模拟方面还需要在以下方面进一步展开研究：

- ①实验条件需要进一步改善。由于实验条件的限制，现有铸轧实验在液面高度控制、熔炼过程和铸轧过程中气体保护等方面都不甚理想，而且基于铸轧工艺自身的特点，铸轧过程中熔池内部情况也难以直接检测。需要在实验设备的设计和改进方面进一步加大力度，才能为工业化应用积累更多的基础技术和经验。
- ②对薄带双辊铸轧过程的机理需要进一步深入研究。当前，对于铸轧过程中熔池内部在强对流作用下发生的复杂的各种变化缺乏深入的分析研究，现有模拟工作中采用的数学模型理论基本是从常规凝固工艺中改进而来，基础不够坚实，只有在铸轧凝固组织形成理论上有更大的进展，才能得到更为精确的数学模型，从而更准确地模拟铸轧过程中的组织演化情况。

参考文献 References

[1] Fujita Makoto, Yamamoto Yukio, Sakate Nobuo, *et al.* Develop-

- ment of Magnesium Forged Wheel[J]. *JSAE Review*, 1995, 16(1): 106–107.
- [2] Wang Qudong(王渠东), Ding Wenjiang(丁文江). 镁合金及其成形技术的国内外动态与发展[J]. *World Sci – Tech R&D*(世界科技研究与发展), 2004, 26(3): 39–46
- [3] Zhang Chunxiang(张春香), Chen Peilei(陈培磊), Chen Haijun(陈海军), *et al.* 镁合金在汽车工业中的应用及其研究进展[J]. *Foundry Technology*(铸造技术), 2008, 29(4): 531–535.
- [4] Yu Kun(余琨), Li Wenxian(黎文献). 变形镁合金的研究开发及应用[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*(中国有色金属学报), 2003(2): 277–288.
- [5] Ding Peidao(丁培道), Jiang Bin(蒋斌), Yang Chunmei(杨春媚). 薄带连铸技术的发展现状与思考[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*(中国有色金属学报), 2004, 14(1): 192–196.
- [6] Gao Shaoping(高少平), Tang Xiaoyan(唐晓燕), Du Feng(杜锋). 薄带钢连铸技术发展的现状及展望[J]. *Shanghai Metals*(上海金属), 1997, 19(2): 9–14.
- [7] Zhang Yin(张莹), Geng Maopeng(耿茂鹏), Wang Yanchun(王艳春), *et al.* 镁合金的双辊板带连续铸轧技术[J]. *Foundry Technology*(铸造技术), 2005, 26(1): 79–81
- [8] Watari H, Davey K, TRasgado M, *et al.* Semi-Solid Manufacturing Process of Magnesium Alloys by Twin-Roll Casting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155–156: 1 662–1 667.
- [9] Watari H, Koga N, Paisarn R, *et al.* Formability of Magnesium Alloy Sheets Manufactured by Semi-Solid Roll Strip Casting[J]. *Materials Science Forum*, 2004, 449–452: 181–184.
- [10] Watari H, Haga T, Davey K, *et al.* Mechanical Properties of Magnesium Alloy Sheets Produced by Semi-Solid Roll Strip Casting[J]. *Materials Science Forum*, 2003, 426–432: 617–622
- [11] Park S S, Lee J G, Park Y S, *et al.* Fabrication of mg Alloy Strips by Strip Casting[J]. *Materials Science Forum*, 2003, 419–422: 599–604.
- [12] Li Chenglai(李成来). *Study on Technics of Twin-Roll Casting of Magnesium Alloy Strip*(镁合金薄带双辊铸轧工艺研究)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.
- [13] Chen Xuhong(陈绪宏), Ding Peidao(丁培道), Yang Chunmei(杨春媚). 双辊快速凝固 AZ31 镁合金薄带试验研究[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术), 2003, 31(5): 19–22.
- [14] Ma Huili(麻慧丽), Wang ZhuTang(王祝堂). 世界镁及镁合金板带轧制回眸与展望[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术), 2007, 35(7): 1–8.
- [15] Tavares R P, Guthrie R L. Computational Fluid Dynamics Applied to Twin-Roll Casting[J], *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1998, 37(3–4): 241–250.
- [16] Miao Y C, Zhang X M, Wang G D, *et al.* Simulation of the Twin Roll Stainless Strip Casting Process[J], *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2001, 14(3): 199–204.
- [17] Miao Y C, Zhang X M, Wang G D, *et al.* Coupled Simulation of Flow and Thermal Field of the Twin-Roll Strip Casting Process[J], *Journal of Iron and Steel Research*, 2001, 8(2): 16–19.
- [18] Wang Yongsheng, Ji Chenxi. Investigation of the Solute Transportation Coupled with Heattransfer and Fluid Flow during Twin-Roll Strip Casting Process[J], *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2009, 22(5): 345–352.
- [19] Baea J W, Kangb C G. Mathematical Model for the Twin Roll Type Strip Continuous Casting of Magnesium Alloy Considering Thermal Flow Phenomena[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191: 251–255.
- [20] Zeng Jing, Koitzsch Roger, Numerical Simulation of the Twin-Roll Casting Process of Magnesium Alloy Strip[J]. *journal of materials processing technology*, 2009, 209: 2 321–2 328.
- [21] Yang Mingbo(杨明波). *Numerical Simulation and Parameter Description on Solidification Structure of Twin-roll Thin Strips*(双辊薄带凝固组织的数值模拟和参数表征)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [22] Ji Chengxi(季晨曦), Zhang Jiongming(张炯明), Ren Wei(任崑), *et al.* 双辊薄带连铸柱状晶组织模拟[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报), 2008, 30(10): 1107–1111
- [23] Huang Feng(黄锋), Di Hongshuang(邸洪双), Wang Guangshan(王广山). 用元胞自动机方法模拟镁合金薄带双辊铸轧过程凝固组织[J]. *Acta Physica Sinica*(物理学报), 2009, 58(6): S313–S318
- [24] Wang Guangshan(王广山), Di Hongshuang(邸洪双), Huang Feng(黄锋). 立式双辊铸轧 AZ31 镁合金薄带试验研究[J]. *Foundry*(铸造), 2009, 58(4): 322–325.
- [25] Wang Guangshan(王广山), Di Hongshuang(邸洪双), Huang Feng(黄锋). 立式双辊铸轧镁合金薄带微观组织分析[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金), 2009, 29(9): 792–794.
- [26] Wang Guangshan(王广山), Di Hongshuang(邸洪双), Huang Feng(黄锋). 双辊铸轧镁合金热塑性和热轧工艺研究[J]. *Hot Working Technology*(热加工工艺), 2009, 38(11): 1–4.
- [27] Wang Guangshan(王广山), Di Hongshuang(邸洪双), Huang Feng(黄锋). 双辊铸轧镁合金薄带冷轧实验研究[J]. *Journal of Northeastern University*(东北大学学报), 2009, 30(6): 825–828.
- [28] Wang Guangshan(王广山), Di Hongshuang(邸洪双), Huang Feng(黄锋). AZ31 镁合金薄带立式双辊铸轧试验研究[J]. *Forging & Stamping Technology*(锻压技术), 2009, 34(4): 52–55.