

AZ31B 镁合金的铸轧组织及其相关变形机制

娄花芬^{1,2}, 汪明朴¹, 唐宁¹, 李周¹, 郭明星¹, 雷前¹

- (1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
2. 中铝洛阳铜业有限公司, 洛阳 471039)

摘要: 利用金相显微镜、透射电子显微镜对 AZ31B 镁合金铸轧板坯的微观组织进行研究。结果表明: 铸轧 AZ31B 镁合金板坯主要由 α -Mg 基体、枝晶间 $Mg_{17}Al_{12}$ 共晶体和弥散分布的细小析出相组成, 铸轧对晶粒的细化效果不明显; 板坯在铸轧过程中经历一定的塑性变形, 且变形多分布于板材表层; 塑性变形在合金中产生大量的位错及位错胞的同时, 也产生一定数量的孪晶; 经孪生改变晶体取向后的晶粒会在适合条件下发生滑移变形, 孪生和滑移的协同作用使孪晶和位错共存、孪晶中位错的产生和孪晶的变形; 铸轧时的塑性变形和高温还导致回复和再结晶的发生。

关键词: AZ31B 合金; 双辊铸轧; 孪生; 位错滑移

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Microstructures of twin-roll cast AZ31B Mg alloy and its deformation mechanism

LOU Hua-fen^{1,2}, WANG Ming-pu¹, TANG Ning¹, LI Zhou¹, GUO Ming-xing¹, LEI Qian¹

- (1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Chinalco Luoyang Copper Co. Ltd, Luoyang 471039, China)

Abstract: The microstructures of AZ31B magnesium alloy twin-roll cast sheet were studied by metallographic microscope and TEM. The results show that the sheet is made up of α -Mg matrix, interdendritic $Mg_{17}Al_{12}$ eutectic and some dispersive fine precipitates. Sheet undergoes biggish plastic deformation, and the deformation distributes more near sheet surface than interior. A mass of dislocations and dislocation cells form during plastic deformation while some twins form simultaneously. After twining, the grain orientations change, and then they will slip on suitable condition. This process leads the formation of dislocations in twins and deformation of twins. The recovery and recrystallization reduce during twin-roll casting because of the plastic deformation and high temperature.

Key words: AZ31B alloy; twin-roll cast; twins; dislocations slipping

金属镁及其合金是目前最轻的金属材料之一, 它具有比强度和比刚度高、阻尼减震性好、电磁屏蔽效果好、机械加工性能优良、零件尺寸稳定和易于回收等优点, 在航空、航天、汽车和电子等领域具有广泛的应用前景^[1-3]。但由于镁的晶体结构属于密排六方结构, 滑移系少, 在低温时塑性比较差^[4], 目前所应用

的镁合金零件多为铸造镁合金。变形镁合金具有比铸造镁合金更好的性能, 但其传统板带材的生产工艺流程长、耗能高、成品率低、价格昂贵, 严重制约了变形镁合金的推广应用。

铸轧是一种新型的流程短、成本低和质量高的板带坯生产技术, 它是以旋转方向相向的两个铸辊为结

晶器, 以液态金属为原料, 直接生产成金属成品或半成品的一种新型加工工艺^[5-6]。利用双辊铸轧法生产的板坯, 均匀化退火后进行轧制, 可省去铸锭、铣面和热轧粗工序, 大幅度地缩短了金属材料的生产工艺流程, 减少了设备投资和能源消耗, 从而提高了生产效率和降低了生产成本。此外, 铸轧过程中由于冷却速度大, 铸轧板带的金属晶粒细, 并可改善凝固组织、减少宏观偏析, 提高铸轧板带材的力学性能。

目前, 铝合金和钢铁带坯的铸轧短流程生产技术已经相对比较成熟^[7-8], 但国内外镁合金铸轧技术的研究还处于初级阶段。文献^[9-17]报道了镁合金铸轧薄带或薄板的组织与性能, 但关于铸轧中厚板坯(大于 4.5 mm 而小于 10 mm^[18])的报道还比较少见。本文作者研究了铸轧 AZ31B 板坯的显微组织及其相关的变形机制, 对其进一步的研究和生产具有指导意义。

1 实验

实验所采用的原始态合金是由工业纯镁、纯铝和纯锌在电阻坩埚炉内熔炼而成。熔炼温度为 720~750, 熔炼时通入高纯 N₂ 和 SF₆ 气体保护以防止氧化, 熔体经静置处理后在气体保护下输送到双辊铸轧机进行连续铸轧成型, 铸轧板坯的规格为 6 mm × 620 mm。AZ31B 镁合金的合金成分如表 1 所列。

表 1 实验用镁合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental Mg alloys (mass fraction, %)

Mg	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Cu
Bal	2.80	0.88	0.20	0.0031	0.001	0.001

采用 Leica DM ILM HC 金相显微镜观察了 AZ31B 镁合金铸轧板坯的显微组织。试样经机械研磨和抛光后, 采用配方为 5 g 苦味酸+5 g 冰醋酸+10 mL 蒸馏水+80 mL 无水乙醇的侵蚀剂显示其组织。采用 H-800 透射电镜观察了其显微组织, 操作电压为 150 kV。样品采用双喷法制备, 电解液为 30%硝酸+70%无水乙醇, 电流为 130 mA, 工作温度为 -20~-30。

2 结果与分析

2.1 AZ31B 镁合金铸轧板坯的金相组织

在铸轧成型的过程中, 金属在流场、温度场和溶

质场的复杂作用下, 发生了结晶、晶体长大以及变形等行为。这样特殊的成型过程使得板材的不同部位具有不同的组织形貌。本文作者选取了其中最具代表性的板轧面、侧面和横断面(见图 1)的不同部位(板轧表面附近和芯部)进行了观察。轧面和侧面照片的水平方向与板材轧制延伸方向一致, 横断面照片的竖直方向与板材压缩方向一致。

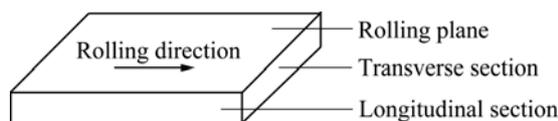


图 1 铸轧 AZ31B 镁合金板坯金相分析的取样部位

Fig.1 Sampling point of metallographic analysis of twin-roll cast AZ31B magnesium alloy sheet

图 2 所示为半连续铸造 AZ31B 镁合金的显微组织。图 3 所示为双辊铸轧所板坯的显微组织。由图 2 可看出, 铸轧 AZ31B 镁合金的组织主要由 α -Mg 基体、位于晶间与枝晶间的 Mg₁₇Al₁₂ 共晶体以及弥散分布于晶内的析出相组成, 这一特征与半连续铸造的 AZ31 镁合金铸锭的组织是相似的。

AZ31B 的合金元素含量较低, 在平衡凝固条件下所含的第二相较少。但在实际生产过程中, 凝固过程

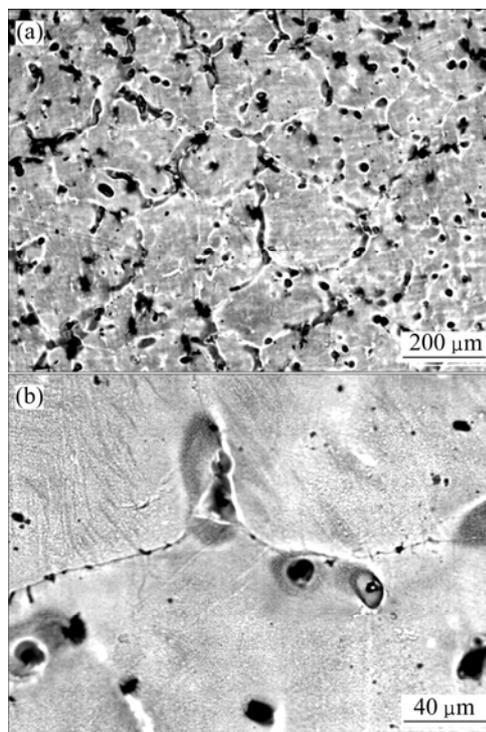


图 2 半连续铸造 AZ31B 镁合金的显微组织

Fig.2 Microstructures of semi-continuous cast AZ31B magnesium alloys

都是非平衡的,液相中析出的 $\alpha(\text{Mg})$ 中溶质Al来不及均匀扩散,富集在未凝固的液相中,逐渐超过了Al在Mg中的极限固溶度,使得凝固后呈现出两相共存的组织。共晶体由 $\alpha\text{-Mg}$ 与 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 组成,呈不连续网状分布在晶界上或枝晶间。元素Al主要富集在晶界上,与Mg形成 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 共晶组织,大部分元素Mn则与Al形成AlMn析出相弥散分布于晶内^[19]。

但两种不同工艺所制备出的合金组织具有明显不同的形貌。半连续铸造生产的铸锭中(见图2), $\alpha\text{-Mg}$ 晶粒为粗大的等轴晶,颗粒平均直径约为150 μm ;而双辊铸轧生产的板坯中(见图3)则为枝晶组织。

轧面组织呈典型枝晶形貌,但晶粒比较粗大,约为100~200 μm 。一般认为,铸轧过程中铸辊的激冷作用可以很好地细化镁合金薄带或薄板的晶粒^[9-12]。而

在本研究中,由于铸轧辊的冷却能力有限,当生产的板材较厚时,铸轧的冷却速率不够高,产品的晶粒细化效果也就不明显了。表面附近(图3(a))的枝晶存在明显沿轧制方向的拉长变形,而在板材的芯部(见图3(b))则变形不明显,枝晶多为等轴状。这样的枝晶形貌是晶体学择优方向和成分过冷共同作用的结果^[20]:镁合金为密排六方结构,其优先生长方向为 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$,在6个一次枝晶臂上,会生成4个二次枝晶臂,枝晶臂间的夹角为 60° ,枝晶生长的同时会向邻近液相排出溶质,导致溶质在固-液界面处富集,溶质浓度升高使得过冷度下降,枝晶生长速率降低。这样的溶质场抑制了伸向枝晶内侧的二次枝晶臂生长,从而促进了伸向枝晶外的二次枝晶臂的生长,最后形成了如图3(b)所示的枝晶形貌。

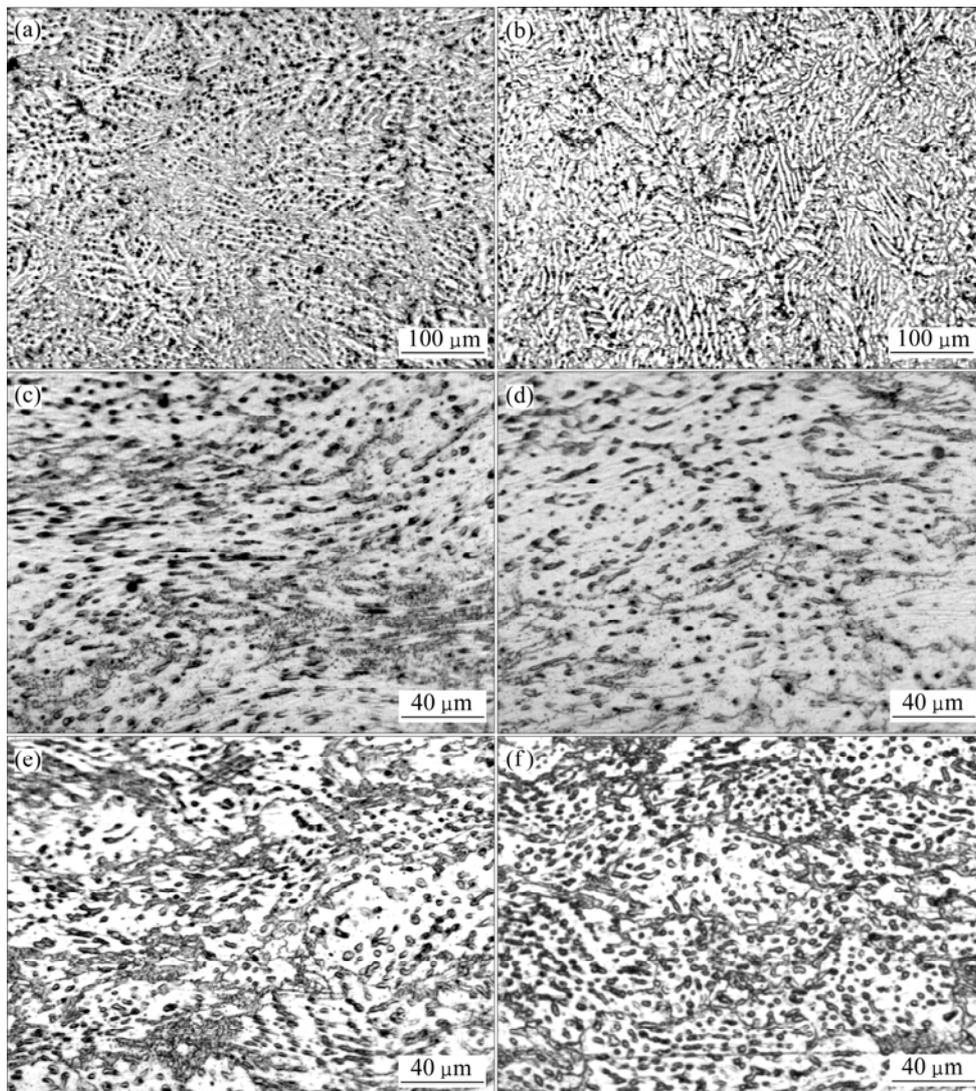


图3 双辊铸轧AZ31B镁合金板坯的显微组织

Fig.3 Microstructures of twin-roll cast AZ31B magnesium alloy sheets: (a) Surface of rolling plane; (b) Core of rolling plane; (c) Edge of flank; (d) Interior of flank; (e) Edge of cross section; (f) Interior of cross section

板材的侧面(见图 3(c)和(d))具有明显的变形特征, 基体与第二相沿轧制方向变形呈流线状, 且在这个观察面上也可以看出板材表面附近(见图 3(c))的变形程度比其芯部(见图 3(d))的要大, 这与轧面的金相观察结果是一致的。根据板材轧制时金属的应力与变形的特点, 这是由于产品的厚度较大以及铸辊的摩擦作用, 造成变形较多地分布在板材表面, 而难以深入到板材芯部^[21]。横断面(见图 3(e)和(f))的第二相较为密集, 但其分布的方向性不明显。对比图 2 与 3 可以看出, 铸轧 AZ31B 镁合金的第二相要细小得多, 其分布也更为弥散而均匀。在铸轧过程中, 由于熔池中的镁液在铸辊的带动下处于紊流状态, 会有利于溶质的

扩散均匀, 避免溶质高度大幅度地偏聚凝固。而铸辊对已凝固合金的轧制变形, 也进一步破碎和细化了第二相。这样的组织形态不但可以提高铸态材料的力学性能和加工性能, 而且也有利于缩短后续的均匀化退火时间, 从而进一步降低生产成本。

2.2 AZ31B 镁合金铸轧板坯的 TEM 像

为了更深入地研究 AZ31B 镁合金双辊铸轧板坯的微观组织, 本研究采用电子显微镜对其进行了观察, 结果如图 4 所示。由图 4 可看出, AZ31B 镁合金铸轧后, 产生了大量的位错(见图 4(a))。铸轧镁合金在凝固后即承受塑性变形, 其变形温度接近熔点。在这样高

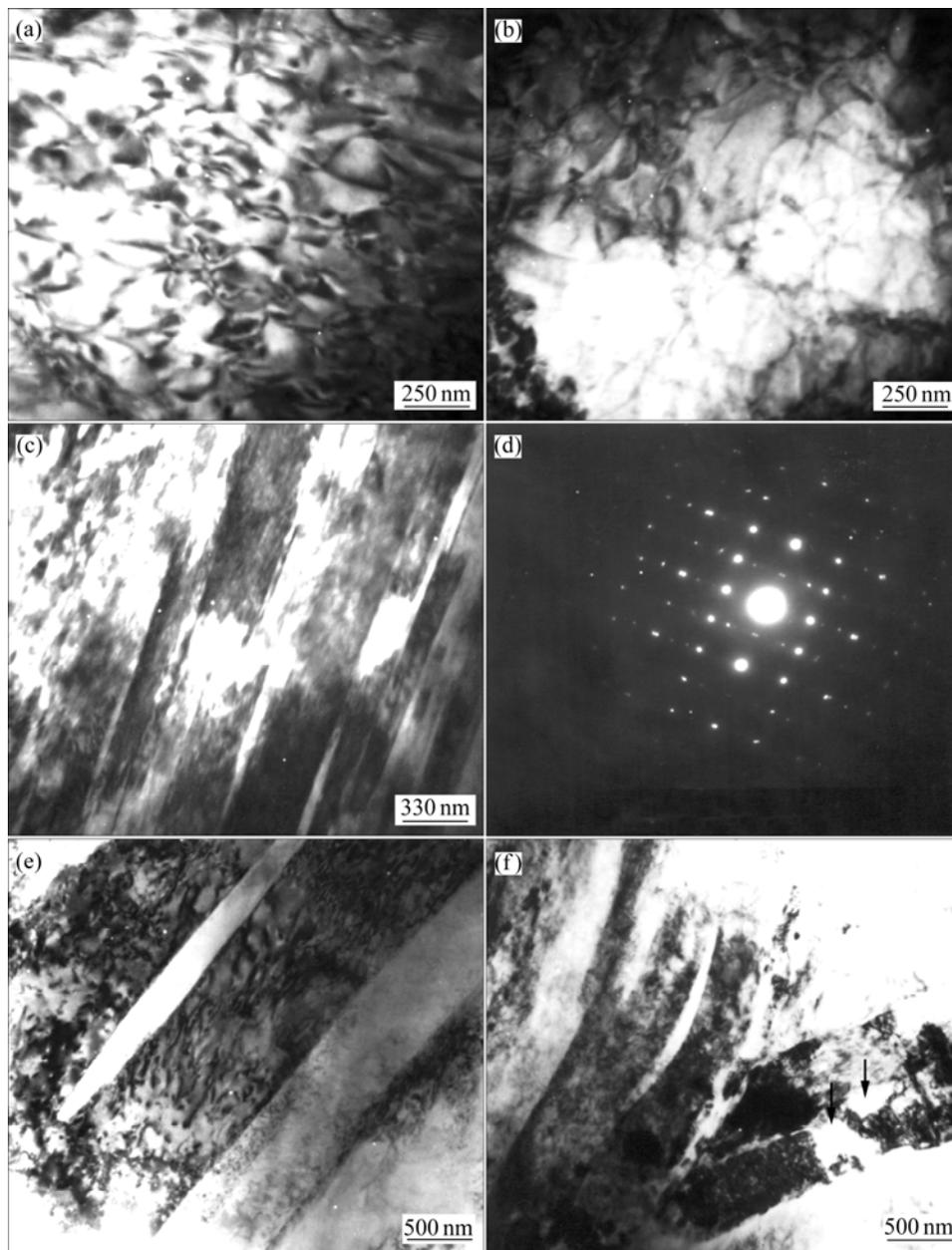


图 4 双辊铸轧 AZ31B 镁合金板坯的 TEM 像

Fig.4 TEM images of twin-roll cast AZ31B Mg alloy sheets

的温度下,镁合金的基面、棱柱面和锥面等滑移系均能开动起来,因此也就能承受较大程度的塑性变形。随着塑性变形的进行,位错不断的增殖和运动,不同滑移系产生的位错通过交互作用而彼此缠结形成密度较大的位错网络,进而出现位错胞状组织(见图4(b))。

由于镁合金的对称性比较低,滑移系比较少(相对于立方晶系),且其层错能比较低,因此在铸轧过程中还产生一定数量的孪晶(见图4(c)),其对应衍射斑如图4(d)所示。由图4(c)中可看出,所产生的孪晶厚度都较小(小于 $1\ \mu\text{m}$),因此难以在光学显微镜中将其观察出来。孪生所引起的晶体变形量并不大,它对镁晶体形变的影响与滑移相比占次要地位^[22]。晶粒在塑性流动变形过程中,其晶粒取向和受力状态都在不断的变化之中,在取向不利于滑移的晶粒中会发生孪生,而孪生后的晶粒由于取向的变化也会再次参与滑移,孪生与滑移协同作用的结果使合金中位错与孪晶共存,以及孪晶中位错的存在(见图4(e))。镁合金具有多个孪晶系,不同孪晶系的孪晶相截后会发生相互作用,位错通常会在交截线处堆积而引起应力集中。这些堆积的位错可以在一定的条件下分解为可滑动位错,使得交截的孪晶发生变形,而使应力集中得以松弛(见图4(f))。由此可见,孪生的协调作用有利于滑移的进一步发展。

在铸轧过程中,塑性变形时和变形后的温度都比较高,这也为回复和再结晶提供了条件。在高温与变形的共同作用下,位错通过滑移、交滑移与攀移排列成较为规则的位错壁,进而形成位向差较大的亚晶界。在这个过程作用下,孪晶界面变得模糊(见图4(f))^[23]。随着变形的进行,位错不断增殖,进而被亚晶界吸收,增大了亚晶界的取向差,最终形成了新的再结晶晶粒(见图4(f)中箭头所示)。

由此可见,铸轧所生产的AZ31B镁合金经历了一定程度的变形。在Mg合金铸轧过程中,获得良好成形镁板带的关键在于控制好合金全凝固点的位置。当全凝固点位于辊缝最小处以外时,板带脱辊时芯部仍有镁液存在,严重时将引起板带断裂而不能成形。反之,若镁合金熔体在辊缝最小处以内就已经完成全部凝固过程,凝固的板带将受到双辊的轧制(本文作者所研究的材料就属于这种情况)。当然,即使是在高温下,镁合金的变形能力还是有限的,因此全凝固点不能距离辊缝最小处太远,以免镁板由于承受了太大的变形而开裂。

3 结论

1) 铸轧AZ31镁合金的组织主要由 α -Mg基体、枝晶间 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 共晶体和弥散分布的细小析出相组成。由于生产的板坯较厚,铸轧辊的冷却能力有限,因此铸轧板坯的晶粒细化效果不明显。与传统的半连续铸造技术相比,铸轧技术所制备的AZ31B镁合金板坯的第二相细小而弥散得多,这是由于铸轧熔池中的紊流和凝固后的变形所造成的。

2) 铸轧板坯在铸轧过程中除了凝固结晶之外,还经历了一定程度的塑性变形,且变形多分布于板材表面。塑性变形在合金中产生了大量的位错及位错胞,孪生在取向不利于滑移的晶体中产生,经孪生改变晶体取向后,晶粒会在适合的条件发生滑移;孪生与滑移协同作用的结果导致孪晶和位错共存以及孪晶中位错的产生和孪晶的变形;铸轧时的高温条件和塑性变形还导致了回复和再结晶的发生。

REFERENCES

- [1] 黎文献. 镁及镁合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 1-10.
LI Wen-xian. Magnesium and magnesium alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 1-10.
- [2] 曾炳涛, 王 辉. 镁合金及其在工业中的应用[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 229-232.
ZI Bing-tao, WANG Hui. Magnesium alloys and its application in industry[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 229-232.
- [3] 张同俊, 李星国. 镁合金的应用和中国的镁工业[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 11-13.
ZHANG Tong-jun, LI Xing-guo. Applications of magnesium alloys and progress of metallic magnesium industry in China[J]. Materials Review, 2002, 16(7): 11-13.
- [4] 余 琨, 黎文献, 王日初, 马正青. 变形镁合金研究、进展及应用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 277-287.
YU Kun, LI Wen-xian, WANG Ri-chu, MA Zheng-qing. Research, development and application of wrought magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 277-287.
- [5] 娄花芬, 李 周, 李宏磊, 马可定, 李向宇, 汪明朴. 变形镁合金连续铸轧技术研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(4): 58-60.
LOU Hua-fen, LI Zhou, LI Hong-lei, MA Ke-ding, LI Xiang-yu, WANG Ming-pu. Deformation magnesium continue roll cast[J]. Materials Review, 2005, 19(4): 58-60.
- [6] 丁道培, 蒋 斌, 杨春楦, 方 亮. 薄带连铸技术的发展现状

- 与思考[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 192-196.
DING Pei-dao, JIANG Bin, YANG Chun-mei, FANG Liang. Development and thought of thin-strip continuous casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 192-196.
- [7] 苗雨川, 邱洪双, 张晓明, 王国栋, 刘相华. 不锈钢薄带铸轧过程中的流动特性[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(4): 14-18.
MIAO Yu-chuan, DI Hong-shuang, ZHANG Xiao-ming, WANG Guo-dong, LIU Xiang-hua. Flow field of stainless strip during roll-casting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12(4): 14-18.
- [8] 刘咏, 周科朝, 林映红, 王海兵. 铝合金铸轧组织的物理模拟[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 589-593.
LIU Yong, ZHOU Ke-chao, LIN Ying-hong, WANG Hai-bing. Physical simulation of roll-casting microstructure of Al alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(3): 589-593.
- [9] 李永林, 李铮, 邱洪双, 刘相华, 王国栋. AZ31镁合金薄带直接铸轧新工艺[J]. 轻合金加工技术, 2004, 32(7): 15-17.
LI Yong-lin, LI Zheng, DI Hong-shuang, LIU Xiang-hua, WANG Guo-dong. The study on new technology of AZ31 magnesium alloy by strip casting[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2004, 32(7): 15-17.
- [10] WATARI H, HAGA T, KOGA N, DAVEY K. Feasibility study of twin roll casting process for magnesium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192/193: 300-305.
- [11] JU Dong-ying, HU Xiao-dong. Effect of casting parameters and deformation on the microstructure evolution of twin-roll casting magnesium alloy AZ31[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(S1): s874-s877.
- [12] 陈绪宏, 丁道培, 杨春楣. 双辊快速凝固AZ31镁合金薄带试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2003, 31(5): 19-22.
CHEN Xu-hong, DING Pei-dao, YANG Chun-mei. Experimental study on twin-roll strip casting process for AZ31 magnesium alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2003, 31(5): 19-22.
- [13] PARK S S, OH Y S, KANG D H, KIM N J. Microstructural evolution in twin-roll strip cast Mg-Zn-Mn-Al alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 449/451: 352-355.
- [14] 李英虹, 许光明, 郑佳伟, 崔建忠. 双辊铸轧-热轧镁合金组织的试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(11): 28-31.
LI Ying-hong, XU Guang-ming, ZHENG Jia-wei, CUI Jian-zhong. Investigation on microstructure of magnesium alloy by twin-roll casting and hot rolling[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34(11): 28-31.
- [15] PARK S S, BAE G T, KANG D H, JUNG I H, SHIN K S, KIM N J. Microstructure and tensile properties of twin-roll cast Mg-Zn-Mn-Al alloys[J]. Scripta Materialia, 2007, 57: 793-796.
- [16] MINO T, ASAKAWA M, LEE D, FUJIWARA T, MATSUZAKI K, KOBAYASHI M. Twin-roll strip casting of AZ61 magnesium alloy and improvement of formability by structure-control rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 534-538.
- [17] SONG S X, HORTON J A, KIM N J, NIEH T G. Deformation behavior of a twin-roll-cast Mg-6Zn-0.5Mn-0.3Cu-0.02Zr alloy at intermediate temperatures[J]. Scripta Materialia, 2007, 56: 393-395.
- [18] 王祝堂. 铝合金中厚板的生产、市场与应用[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(1): 1-20.
WANG Zhu-tang. Production, market and application of aluminum alloy plate[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2005, 33(1): 1-20.
- [19] 屠怡范, 陈晶益, 张波萍, 李鹏喜, 铃木洋夫. AZ31铸造镁合金的物相和显微组织[J]. 铸造, 2006, 55(5): 509-512.
TU Yi-fan, CHEN Jing-yi, ZHANG Bo-ping, LI Peng-xi, SUZUKI H G. Phases and microstructure of as-cast AZ31 magnesium alloy[J]. Foundry, 2006, 55(5): 509-512.
- [20] 刘志勇, 许庆彦, 柳百成. 铸造镁合金的枝晶生长模拟[J]. 金属学报, 2007, 43(4): 367-373.
LIU Zhi-yong, XU Qing-yan, LIU Bai-cheng. Modeling of dendrite growth for the cast magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(4): 367-373.
- [21] 彭大暑. 金属塑性加工原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004.
PENG Da-shu. Theory of metal plastic working[M]. Changsha: Central South University Press, 2004.
- [22] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 88-89.
CHEN Zhen-hua. Wrought magnesium alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 88-89.
- [23] MYSHLYAEV M M, MCQUEEN H J, MWEMBELA A, KONOPLEVA E. Twinning, dynamic recovery and recrystallization in hot worked Mg-Al-Zn alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2002, 337: 121-133.

(编辑 李艳红)