

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0192-05

薄带连铸技术的发展现状与思考^①

丁培道, 蒋 斌, 杨春楣, 方 亮
(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 综述了钢的薄带连铸及铝合金的薄带铸轧发展现状, 简要介绍了在高速钢、硅钢和镁合金的薄带连铸实验研究方面取得的进展。认为钢的薄带连铸技术近年取得了重要突破, 未来 10 年薄带连铸技术可能快速发展; 发展特殊性能或难加工合金的薄带连铸可充分发挥快速凝固的优势; 采用立式双辊法可望进一步提高铝合金的浇铸速度, 特别是高牌号铝合金的浇铸速度; 应积极发展镁合金的薄带连铸技术, 以改善镁合金板材的塑性加工及耐腐蚀问题。

关键词: 薄带连铸; 发展现状; 浇铸速度; 镁合金

Development and thought of thin strip continuous casting

DING Pei-dao, JIANG Bin, YANG Chun-mei, FANG Liang
(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Developments of thin-strip casting of steels and thin-strip casting and rolling of aluminium alloys were summarized, and the experiment researches on thin-strip casting of high-speed-steel, silicon steel and magnesium alloys were briefly introduced. The results show that the thin-strip casting of steels has been advanced remarkably and will be fastly developed in the coming 10 years. The thin-strip casting can be combined with special alloys or alloys hard to process so as to make full use of advantages of rapid solidification. Casting speed of aluminium alloys can be probably increased by vertical twin-roll thin-strip casting, especially that with large solidification temperature range. And also the thin-strip casting of magnesium alloys should be thought much to improve the plastic processing and corrosion of magnesium alloys.

Key words: thin-strip casting; development status; casting speed; magnesium alloys

薄带连铸技术是冶金及材料领域的一项前沿技术, 它不同于传统冶金工业中薄带材的生产工艺, 而是将连续铸造、轧制、甚至热处理等串联为一体, 铸出毫米级的薄带坯, 经在线轧制后一次性形成工业产品。薄带连铸技术简化了生产工序, 缩短了生产周期, 设备投资也相应减少, 并且薄带品质不亚于传统工艺。此外, 利用薄带连铸技术的快速凝固特点, 还可以生产出传统工艺难以轧制的材料以及具有特殊性能的新材料。

各种先进凝固技术的研究, 其最终目的都是应用于材料的制备与生产, 从这一意义上讲在众多的

快速凝固技术中, 双辊薄带连铸是能够大规模、低成本、商业化生产的技术。

薄带连铸技术工艺方案因结晶器的不同而分为辊式、带式与辊带式等, 其中研究最多、进展最快、最具发展前途的当属双辊薄带连铸技术。

1 钢的薄带连铸发展现状

钢铁材料的双辊薄带连铸从亨利·贝塞麦提出专利, 经过 150 年的发展, 特别是近 20 多年的努力, 至今才取得突破性的进展, 其中备受世人关注

① 基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2001AA331050); 博士点基金资助项目(20010611005)

作者简介: 丁培道(1935-), 男, 教授

通讯作者: 丁培道, 教授; 电话: 023-6510281; E-mail: pdding@cfc.eq.cn

的是 Eurostrip 工程和 Castrip 公司。

1.1 Eurostrip 工程

由蒂森-克努伯、于齐诺尔和奥钢联 3 家组成的合资企业—Eurostrip, 目前有两台薄带连铸机在运行^[1]。

1.1.1 德国蒂森公司克雷菲尔德(Krefeld)厂

1999 年 12 月建成, 拥有世界上第一台工业规模的带钢铸机, 铸机年生产能力最终将达 40 万 t, 带坯宽度 1 430 mm, 铸辊直径 1 500 mm, 铸带速度 40~90 m/min(最大铸速 150 m/min); 浇铸 304 不锈钢时, 铸带坯厚度 1.8~4.5 mm, 经单机架四辊轧机在线轧制成 1.3~3.5 mm 的薄带。由于快速凝固抑制杂质元素的偏析, 大大改善了带钢的防腐性能。与传统连铸工艺相比, 吨钢节能 85%, CO₂ 排放量降低 85%, NO_x 降低 90%, SO₂ 降低 70%。

1.1.2 意大利特尔尼厂

铸带机组带坯宽 1 130 mm, 铸辊直径 1 500 mm, 带坯厚 2.0~4.5 mm, 经四辊轧机 30% 的变形轧制成 1.4~3.5 mm 的薄带, 主要生产碳钢, 直接在线轧制的带材比铸带-轧制分离的带材延伸率得到极大的改善。

1.2 Castrip 公司

由美国 Nucor、澳大利亚 BHP 和日本 IHI 合资组建, 于 2002 年 3 月建成, 2002 年 8 月中旬即可生产 5 000 t 带卷, 并已开始供应商品铸带材, 2003 年实现了每周 7 天 24 h 生产。年生产能力 50 万 t, 产品单卷重 25 t, 产品宽度 1 000~2 000 mm, 厚度 0.7~2.0 mm, 铸带速度典型的为 80 m/min(最大可达 150 m/min), 生产低碳钢和不锈钢^[2]。该铸机的最大特点是铸辊直径仅 500 mm, 小辊径易于控制铸带坯的板形, 同时将使投资和运行成本进一步降低, 达到更快、更巧、更薄、更好, 不但提高了生产率, 而且快速凝固还带来组织细化、偏析降低、合金固溶度增加及亚稳相形成等特点和好处。

除上述 Eurostrip 工程和 Castrip 公司外, 当今受人关注的尚有以新日铁、三菱重工和 POSCO 组成的铸带集团, 铸辊直径为 1 200 mm, 铸带宽度 1 330 mm, 可以工业性生产 304 不锈钢。韩国的浦项与英国的 Davy 公司合作也建有两套双辊连铸机组。我国上海钢铁研究所、东北大学、重庆大学在 20 世纪 90 年代前后开始进行薄带连铸研究, 目前宝钢已建立了 $d\ 800\text{ mm} \times 1\ 050\text{ mm}$ 的薄带连铸机组, 并开始热试, 南方某厂建立的 $d\ 1\ 200\text{ mm}$ 双

辊铸机也开始浇铸出成卷不锈钢薄带坯。

2 铝的薄带铸轧发展现状

20 世纪 50 年代早期, Hunter Engineering 开发了生产铝薄带坯的双辊铸轧机。40 多年以来, 铝合金的薄带铸轧机基本定型为水平方式, 根本的工艺技术几乎没有或只有很小的变化。当前使用的典型机型, 辊径为 1 000 mm, 辊宽为 2 000 mm, 两个铸辊通常以垂直方式或适当倾斜的方式组装在一起, 以便铸带能以水平的方式从双辊中拉出。虽然这种方式能铸造多种合金, 但大多数是具有窄的凝固区间的低牌号合金^[3]。

铝合金铸轧带已形成工业化规模, 全世界铸轧铝带坯已占带坯总量的 20% 以上, 我国达到 30%。全世界连续铸轧机超过 420 台, 总生产能力达 360 万 t/a, 我国有 110 台以上, 生产能力大于 90 万 t/a。铸轧铝带坯通常厚度在 6~10 mm 左右, 铸轧速度 0.8~1.5 m/min, 实际生产率并不高。20 世纪 80 年代中后期发现, 改善铸轧的传热条件, 减薄铸带厚度, 可使生产率提高 15 倍, 并使可生产的合金范围拓宽, 从 1、2、3、5、8 系少数几种铝合金拓展到几乎所有变形铝合金; 同时铸轧带坯的组织进一步细化, 性能大幅度改善。世界上各大铝业公司, 如美国 Hunter、英国 Davy、法国 Pechiney 等, 相继开展了被称为第 3 代铝加工技术的超薄、快速连续铸轧技术的研究。到 1999 年, 世界上已有 3 条高速薄带坯生产线投入商业生产, 最具代表性的新一代铝合金带坯的双辊超薄快速连续铸轧机组(Speed-caster^R)铸轧宽度 2 184 mm, 铸轧速度 38 m/min, 带坯最薄厚度 0.635 mm, 带坯最大卷重 19 t, 生产率 6.5 t/h^[4, 5]。我国也在“973”项目中开展了上述技术研究, 已实现了带坯厚度约 2mm 的连续铸轧, 铸轧速度达到 13m/min, 比现有铸轧速度提高 10 倍以上, 所获得材料晶粒细小、微流变取向高度分散、晶界析出物细小均匀分布, 材料强度比传统铸轧板提高 30%, 深冲制耳率降低 50%, 初步形成了高速铸轧工艺的技术原型。

3 高速钢、硅钢、镁合金的薄带连铸实验研究

如前所述, 薄带连铸的产品集中在不锈钢和碳钢; 但是该项技术具有生产周期极短的优势, 可以

快速、灵活地提供用户所需产品, 增强市场竞争力, 为此有扩大品种和发展新合金带材的潜力。我们于 20 世纪 80 年代末开始双辊薄带连铸技术的研究, 先后在实验室机组上对高速钢、硅钢及镁合金的薄带连铸进行了较系统的研究工作。

3.1 高速钢的薄带连铸

实验采用 W6Mo5Cr4V2 及 W3Mo2Cr4VSi 两个牌号的高速钢, 前者是国际上使用最广泛的通用高速钢, 后者是作者单位在国内第 1 个研究成功的含硅低合金高速钢。

从组织对比看, 连铸工艺的铸态晶粒显著细化(图 1), 比常规工艺低近两个数量级; 共晶碳化物网的统计平均尺寸: 连铸工艺 W6Mo5Cr4V2 为 $3.8 \mu\text{m}$, W3Mo2Cr4VSi 为 $3.2 \mu\text{m}$, 而常规工艺相应为 $23.2 \mu\text{m}$ 和 $13.6 \mu\text{m}$ ^[6, 7]。

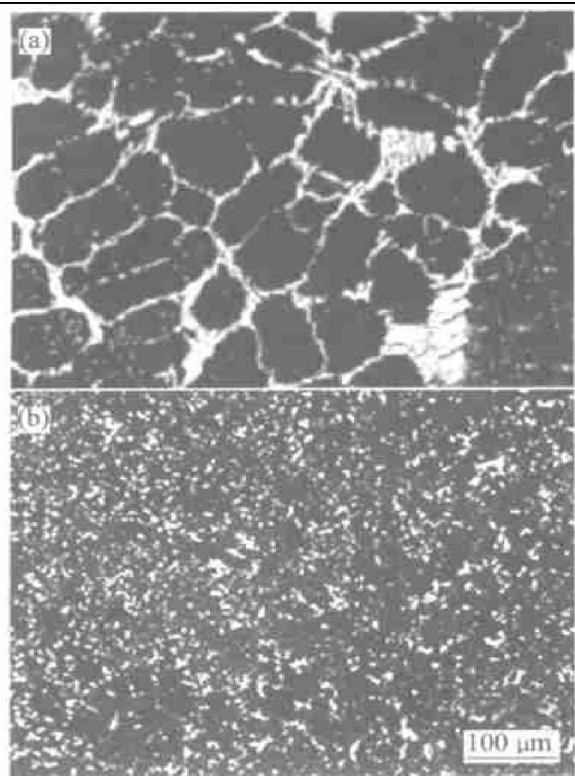


图 1 M2 高速钢凝固组织
(a) —铸锭; (b) —铸带坯

虽然高速钢铸带坯共晶碳化物网的尺寸较铸锭有了很大的细化, 但是由于铸带坯不能像普通工艺依靠大变形量的锻造和轧制击碎共晶碳化物, 而只能利用快速凝固在高速钢中形成亚稳相 M_2C , 高温下 M_2C 将分解成 M_6C 和 MC : $\text{M}_2\text{C} + \gamma\text{-Fe} \rightarrow \text{M}_6\text{C} + \text{MC}$, 从而使碳化物片分断和细化。

通过适当热处理, 利用亚稳相分解, 使铸带坯中碳化物网分断, 并结合少量轧制变形, 获得了性能良好的高速钢带材。其与大变形量多次锻造和轧

制的普通带材相比, 碳化物颗粒及其分布、淬火回火的二次硬度, 以及做成锯条后的切削效能, 均处于相当的水平。目前正在实施规模化生产。

3.2 硅钢的薄带连铸

冶炼和铸造了含硅量 0.5%, 1.0%, 3.0%, 5.0% 和 6.5% 的硅钢薄带坯, 其成分如表 1 所示。

实验研究结果表明^[8~10]:

1) 随着含硅量的增加, 硅钢的固液相区扩大, 有利于薄带连铸过程的进行; 同时含硅量增加使钢液表面张力增大, 使硅钢更易于获得边缘整齐的铸带。

2) 随着含硅量的增加, 铸带晶粒增大, 但硅含量 $> 5.0\%$, 晶粒有减小的趋势; 低硅钢铸带的基体组织为铁素体 $\alpha\text{-Fe}$, 含硅量增大时出现 Fe_3Si 相, 含 6.5% Si 时出现 Fe_3Si 有序相。

3) 从硅钢的电磁性能考虑希望晶粒粗大, 但从硅钢铸带的后续加工性能考虑希望晶粒细小。硅钢铸带出结晶辊后的高温段是晶粒迅速长大的时期, 此时加大二次冷却程度可以细化铸态晶粒。减薄铸带厚度, 提高铸带速度, 适当提高凝固点位置均有利于细化铸态晶粒, 改善后续加工性能。通过最终高温退火处理可以获得粗大的晶粒。

对 Fe_3Si 相的控制, 在传统硅钢生产中, 当硅含量 $> 4.5\%$ 时出现 DO_3 型有序相 Fe_3Si 。有序相的出现改变了硅钢的磁畴结构, 电磁性能得到明显提高, 但同时有序化时原子结合力、点阵畸变和反向畴界的存在等都会使合金的塑性变形阻力加大, 硬度提高, 使硅钢成形变得困难。因此, 传统工艺生产硅钢的硅含量不能突破 4.5%。在双辊快速凝固条件下, 可以抑制高硅钢中 Fe_3Si 有序相的形成, 改善其冷加工性能, 随后可采用适当的后处理工艺使 Fe_3Si 相有序化, 从而提高钢的电磁性能。

可以看出, 从晶粒控制和 Fe_3Si 有序相控制的角度出发, 快速凝固铸带均有利于突破常规工艺的局限, 生产高含硅量、高电磁性能电工钢。这是值得关注的发展方向。

3.3 镁合金的薄带连铸

镁及镁合金由于具有密排六方晶体结构, 塑性变形能力差, 因此传统轧制板材成材率低, 生产困难。快速凝固技术可显著细化铸坯显微组织, 提高镁合金的强度与塑性, 而且可以避免常规微合金化

表 1 实验用硅钢化学成分(质量分数, %)

序号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	V	Ti	Al
1	0.01	0.36	0.03	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.030	0.001	< 0.01	< 0.01
2	0.01	0.99	0.04	< 0.01	< 0.01	0.07	0.031	0.006	< 0.01	< 0.012
3	0.012	2.97	0.02	< 0.005	0.007	0.01	0.029	0.001	< 0.01	< 0.01
4	0.040	5.05	0.02	< 0.01	< 0.01	0.028	0.012	0.001	< 0.01	0.052
5	0.060	6.63	0.02	< 0.01	< 0.01	0.025	0.019	0.001	< 0.01	< 0.01

可能带来的有害的以及无法预测的微电池现象, 提高镁合金的耐蚀性。目前德国蒂森公司、澳大利亚 CSIRO 采用水平双辊铸轧工艺已试生产出了 2~ 6 mm 厚的镁合金薄带。

我们采用立式双辊铸机进行薄带连铸的实验研究工作, 实验材料为 AZ31 镁合金。研究表明, 当浇铸温度在 655~ 665 ℃(高于液相线 20~ 30 ℃), 辊速为 13~ 15 r/min, 预留辊缝为 0.9 mm 时, 可以得到边部整齐, 表面质量较好的镁合金薄带。此时, 镁合金在凝固过程中的冷却速度约为 200~ 300 ℃/s。

如图 2 所示, 铸带的组织细小, 为 5~ 10 μm, 而传统铸态组织较粗大, 为 30~ 100 μm。由于凝固过程中较大的冷却速度, 使由液相生成的初生晶中的溶质 Al 来不及扩散均匀, 而在 αMg 中高度富集。此时, 在极短的凝固时间里(约为

0.01 s), 只有很小一部分发生共晶转变, 使组织中均匀分布着大量的镁过饱和固溶体。因此, AZ31 镁合金双辊凝固组织由 αMg 及 Mg 的过饱和固溶体(包含少量共晶组织)组成^[11, 12]。

4 讨论与思考

从目前铝合金的薄带铸轧及钢铁材料的薄带连铸来看, 虽然二者均是从合金液直接获得薄带坯, 但二者在浇铸方式、工艺特性、铸带厚度等方面存在明显的差异, 如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 铝的薄带铸轧速度远低于钢, 而带坯厚度大于钢。固然在一定程度上这与铝的热物性和高温强度等有关, 但值得思索的是, 铝合金的薄带铸轧技术产业化比钢铁材料的薄带连铸技术早, 但其浇铸速度远低于后者, 可否借鉴钢铁材料的立式双辊薄带连铸技术, 大力提高其浇铸速度?

表 2 钢铁材料与铝合金薄带连铸工艺比较

工艺参数	钢铁薄带连铸	铝薄带铸轧
典型浇注方式	立式	水平
典型浇铸速度/(m·min ⁻¹)	60~ 90	0.8~ 1.5
最快浇铸速度/(m·min ⁻¹)	150	38
实验室最快速度/(m·min ⁻¹)	180	120
带坯的典型厚度/mm	1.5~ 4	6~ 10
实验室带坯最薄厚度/mm	0.3	0.5
典型的辊材料	铜	钢
是否连续	连续	半连续

水平双辊法通过铸嘴将合金液送入上下布置的旋转铸辊之间, 合金液与铸辊的接触区较短, 一般为 30~ 40 mm, 坯壳的形成需要较长的冷却时间; 同时, 水平双辊法强调铸轧, 要求有一定的轧制变形量。两者均限制了铸轧速度的提高。这种方式的有利方面是: 合金液的流动、液面波动易于控制, 铸带质量可以得到较好的保证。

立式双辊铸机熔池液面较高, 即使是铸辊仅为 d 500 mm 的机组, 其液面高度可达 170 mm, 金属液与铸辊的接触区也在 200 mm 左右, 因此合金液有效冷却距离较长, 有利于凝壳的形成, 可以采用较高的速度进行浇铸; 同时冷却均匀对称, 有利于

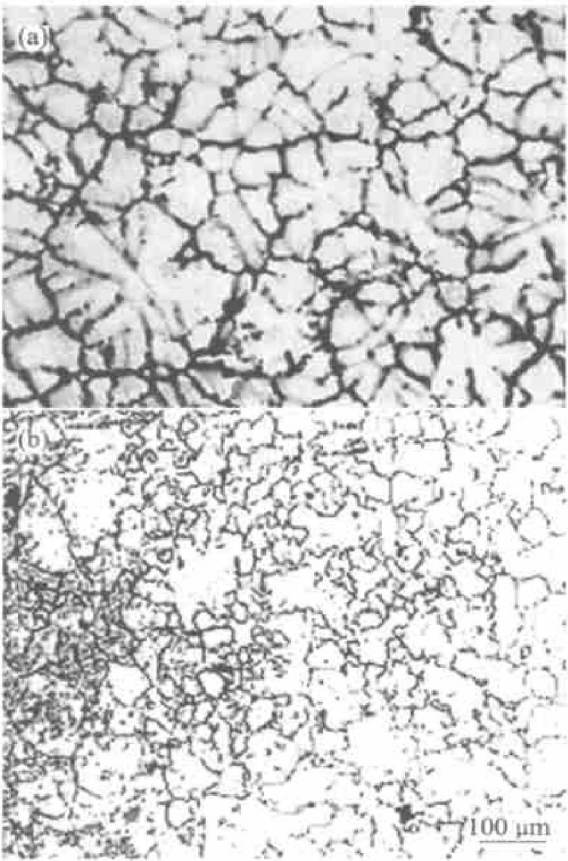


图 2 AE31 镁合金显微组织
(a) —铸锭; (b) —铸带坯

形成均匀的铸带坯组织,对后续加工有利;但熔池内金属液的流动、液面波动较难控制。立式双辊法不强调轧,其轧制力比水平式低1~2个数量级,其带坯轧制由后续的在线轧机完成。

铝合金的常规水平式铸轧适合于凝固温度区间较窄的软铝合金,相反,对凝固温度区间宽的高牌号合金无能为力。我们对多种合金实验的结果表明,立式薄带连铸对于凝固温度区间宽的合金更容易顺利浇铸。

一台现代化的水平式高速铸轧机年产铝带3~4.5万t^[13],而一台立式薄带连铸机年产钢带能力为40~50万t。因此,如果采用立式双辊法铸造铝合金,由于浇铸方式、传热和凝固条件的改变,应该可以获得更高的浇铸速度和生产率,并真正实现快速凝固。在这种情况下铸带质量可望进一步提高,并可浇铸凝固温度区间宽的高牌号铝合金。

值得高兴的是最近日本大阪工业大学Haga采用立式双辊连铸技术在实验室铸出了A5182铝合金,铸速可达120 m/min^[14]。

5 结束语

1) 钢的快速凝固薄带连铸技术以跨国公司知名企业的联合实现了产业化,并开始进行商业化运作。Castrip公司商业化推进速度令人瞩目,其小辊径(d 500 mm)机组在技术上有重大突破,具有很强的竞争力。未来10年薄带连铸技术将会快速发展,形成板坯连铸、薄板坯连铸、薄带连铸相互补充,各占一定比例的格局。

2) 薄带连铸除碳钢、不锈钢等成熟钢种以外,应积极发展特殊性能或难加工合金的研究,如高硅电工钢、高速钢等,以充分发挥快速凝固的优势。

3) 目前,采用卧式双辊法浇铸软铝已取得较大进展。要进一步提高铝合金的浇铸速度,特别是高牌号铝合金的浇铸速度,可借鉴立式钢带连铸技术,包括结晶辊材质、侧封技术、布流技术、液面控制技术等。

4) 采用双辊快速凝固技术,可得到超细晶组织,有利于镁合金的两大关键问题——塑性加工及耐腐蚀性能的解决,为此应积极发展镁合金的薄带连铸技术,尤其是立式双辊连铸技术。

5) 在快速凝固铸带技术推广、合金材料门类增加及后处理技术应用过程中,尚有许多凝固、固

态相变、形变及其耦合的深层次问题值得研究。

参考文献

- [1] Flick A, Legrand H, Albrecht-Friuh U. The Eurostrip technology—a powerful jump into the future of economic hot band production [A]. Proceeding of International Symposium on Thin Slab and Rolling [C]. Guangzhou, 2002. 95–105.
- [2] Wechster R L, Ferriola J J. The Castrip^R process for twin-roll casting of steel strip [J]. Steel Technology, 2002, 9: 69–74.
- [3] Yun M, Lokyer S, Hunt J D. Twin roll casting of aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280: 116–123.
- [4] 王祝堂. 迈向新世纪的世界铝带坯铸轧[J]. 轻合金加工技术, 2001, 29(4): 8–11.
- [5] 林徽熹. 双辊快速连续铸轧超薄带坯技术发展[J]. 轻合金加工技术, 2001, 29(7): 14–16.
- [6] Fan F, Zhou S, Liang X, et al. Thin strip casting of high speed steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1–3): 792–796.
- [7] Liang X, Fan F, Zhou S, et al. Edge containment of a twin-roll caster for near net shape strip casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63: 788–791.
- [8] 杨春楣. 硅钢双辊薄带连铸工艺及组织性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [9] 杨春楣, 丁培道, 周守则, 等. 双辊法生产3.0%无取向硅钢薄带组织与性能[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(2): 56–59.
- [10] 杨春楣, 甘青松, 丁培道, 等. 硅钢双辊连铸过程中铸带坯组织细化[J]. 连铸, 2000(增刊): 11–13.
- [11] 陈绪宏, 丁培道, 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): 19–21.
- [12] 杨春楣, 丁培道, 任正德, 等. 2002年材料科学与工程新进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 622–626.
- [13] 王祝堂. 薄铝带坯高速连续铸轧技术[J]. 轻金属, 1999, 2: 50–52.
- [14] Haga T, Nishiyama T, Suzuki S. Strip casting of A5182 alloy using a melt drag twin-roll caster [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133: 103–107.

(编辑 杨 兵)