

文章编号: 1004-0609(2004)11-1804-06

双带快冷法制备 1050 纯铝带材^①

杨劲松, 周 成, 谢建新

(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 介绍了双带快冷法制备金属带材新技术的基本原理和特点。针对 1050 纯铝带材的成形, 从理论和实验两个方面分析了采用孔径为 6 mm 的 5 孔喷嘴时, 熔体射流的稳定性和冷却带线速度对带材质量的影响; 考察了不同冷却带线速度条件下成形带材的组织 and 力学性能。发现冷却带线速度越高, 所成形带材的组织越细小、力学性能越好; 在本实验条件下, 稳定制备 1050 纯铝带材的合理工艺参数是: 浇注温度 710 ℃, 气体压力 0.007 5 MPa, 冷却带线速度 2 m/s。

关键词: 快速凝固; 双带快冷法; 金属带材; 铝

中图分类号: TG 146.2⁺ 1

文献标识码: A

Aluminum strip forming with double cooling-strip rapid solidification technique

YANG Jin-song, ZHOU Cheng, XIE Jian-xin

(School of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The principle and characteristics of double cooling-strip rapid solidification technique for strip forming are introduced. Aiming at the forming of aluminum strip with jet nozzle having 5 holes of 6 mm in diameter, the effects of two main factors on the strip quality, the jet stability of melt metal and cooling-strip speed were discussed through both theory and experiment. The microstructure and mechanical properties at different cooling-strip speeds were examined, and the results show that the microstructure is more fine and the mechanical properties are higher with increasing cooling-strip speed. The appropriate technology parameters for fabricating aluminum strip are: pouring temperature 710 ℃, gas pressure 0.007 5 MPa and cooling-strip speed 2 m/s.

Key words: rapid solidification; double cooling-strip rapid solidification technique; metal strip; aluminum

铝及铝合金薄带主要用于汽车、电力、机械、包装等工业, 其厚度范围大多在 0.1~0.5 mm 之间^[1]。这些薄带一般采用传统的熔铸、均匀化、轧制及退火工艺, 或采用双辊连续铸轧、冷轧及多种辅助工序生产^[2~4], 存在生产周期长、产品价格高、成品率低等缺点, 有的产品甚至存在组织不均匀性严重等现象^[5]。采用快速凝固技术可有效地改善金属的微观组织, 提高材料性能, 实现直接成形或近

终成形, 缩短生产周期、降低生产成本^[6,7]。此外, 采用快速凝固技术还可制备熔铸法难以制备的合金, 如组元互不固溶合金, 低塑性合金等^[8]。本文作者曾提出一种快速凝固成形的新方法, 称为双带快冷成形法^[9], 并在原型实验机上进行了纯铝带及 1050 纯铝带材的快速实验凝固成形^[10], 证实了新方法的可行性。本研究在对原型实验机进行改造后, 重点针对 1050 纯铝带材双带快冷成形工艺参

① 基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50125415); 国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助项目(50171007)

收稿日期: 2004-04-20; 修订日期: 2004-07-10

作者简介: 杨劲松(1968-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 杨劲松, 电话: 010-62333999; E-mail: yhy9197@sina.com

数对成形过程的影响进行研究。

1 金属带材双带快冷成形原理及特点

图 1 所示为金属带材双带快冷成形法的原理图。在内表面实施均匀层流水冷却的钢带(简称冷却带)由上调节辊、中辊(张紧辊)和下调节辊(驱动辊)支撑,上下调节辊之间的空间构成快速冷却区域。冷却区的长度由上下调节辊之间的距离确定,成形带材的厚度由两个下调节辊辊缝确定。熔体在加压作用下经喷嘴注入冷却区域,通过高速运动冷却带快速冷却并凝固成形,获得所需尺寸的带材。

与目前应用广泛的单辊法、双辊法快速凝固工艺相比,双带快冷成形法具有如下特点:

1) 能实现带材的双面冷却,因而带材的两表面质量相同。

2) 冷却区长度远大于单辊法和双辊法,液态金属与冷却界面有足够的冷却接触时间,有望实现毫米级金属厚带的快速凝固成形。

3) 冷却区的形状和尺寸可灵活调节,冷却速度和带材厚度易于控制。以上特点是单辊法或双辊法难以实现的(双辊法时第一个特点除外)^[11, 12]。

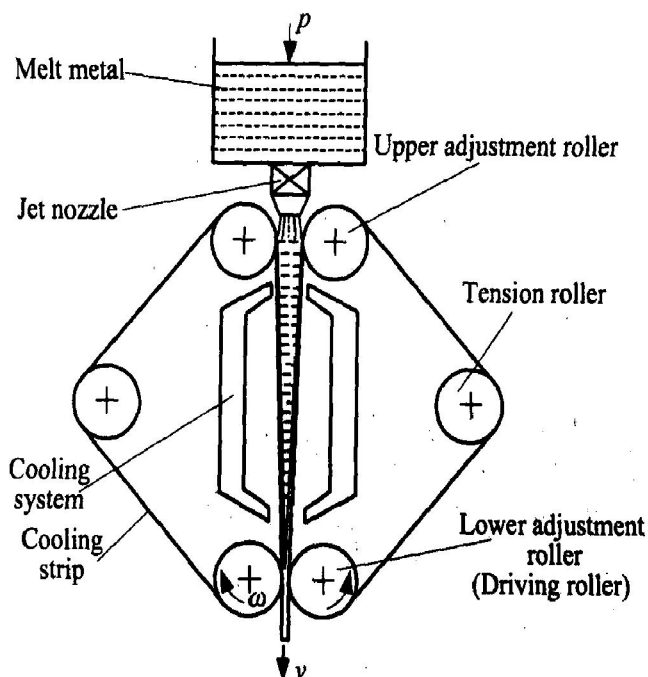


图 1 双带快冷法制备金属带材原理图

Fig. 1 Schematic drawing of double cooling-strip rapid solidification process

2 实验

将 1050 纯铝原料置于电阻炉内的石墨坩埚中,

加热熔化并使之过热到液相线以上 40~ 80 ℃。然后,通过氩气施加压力将熔融铝液注入由高速运转冷却带形成的冷却区域,快速凝固成带材。调节工艺参数,以控制所制备带材的厚度、形状尺寸精度和组织结构。

冷却带的材质为 65Mn,厚度为 0.7 mm,宽度 100 mm,被焊接成环形无头状;冷却带的线速度由驱动辊控制,驱动辊的转速在 0~ 800 r/min 之间,冷却带线速度最大可达 6 m/s;浇注喷嘴由直径为 6 mm 的 5 个圆形孔构成;喷射气压在 0.002~ 0.010 MPa 之间。

3 工艺因素对带材成形的影响

3.1 影响熔体射流稳定性的因素

熔融金属喷射射流(简称熔体射流)的稳定性是影响带材稳定成形的关键因素。影响熔体射流稳定性的参数有喷嘴的形状及尺寸、喷射气压及喷嘴与冷却区入口处之间的距离。

3.1.1 喷嘴形状与尺寸

所用喷嘴由耐热钢制成,高度 150 mm。为了保证熔体流动的稳定,喷嘴的内腔须光滑且呈流线型,而且要保证在一定压力下熔体以层流状态流出。同时,喷嘴的形状与尺寸还决定了所制备带材的宽度。

保证熔体以层流流出的喷嘴尺寸由下式给出^[13]:

$$\frac{L}{D} = 7 \left| We + \frac{3We}{Re} \right|^{0.92} \quad (1)$$

式中 L 为射流(层流)长度; D 为喷嘴直径(或水力直径); We 为韦伯数; Re 为雷诺数。

通过系列实验观察,确认采用单孔或多孔圆喷嘴可获得稳定的熔体射流。当喷嘴为单孔或多孔,孔径为 6 mm,喷射压力在 0.002~ 0.010 MPa,射流速度为 1~ 3 m/s 时,铝熔体稳定的射流长度在 26~ 71 mm 之间。

3.1.2 喷射气压

在气体压力作用下,熔体以一定速度从喷嘴射流进入快速冷却区。关于射流速度的影响因素,除压力外,以往的文献报道中,仅给出了熔体的表面张力和粘度的影响,而没有综合考虑喷嘴的局部阻力及摩擦阻力的影响^[14]。为了综合考虑表面张力、粘度、喷嘴局部阻力及摩擦阻力的影响,采用增加阻力系数 ξ 的方法,对文献[14]的公式进行修正,获得气体压力与射流速度的关系:

$$v_0 = \frac{1}{1 + \xi} \times \left[\sqrt{\frac{2}{\rho} (p + \rho g H - \sigma / R)} + \left[\frac{8 \eta L_0}{\rho R^2} \right] - \frac{8 \eta L_0}{\rho R^2} \right] \quad (2)$$

式中 v_0 为射流速度; ρ 为熔体密度; p 为气体压力; H 为坩埚内熔体高度; σ 为表面张力; η 为粘度; R 为喷嘴孔半径(或水力半径); L_0 为喷嘴长度; ξ 为阻力系数(本文提出的修正系数, 取 0.6)。

表 1 对计算值与实验值进行了比较, 其中喷嘴为单孔结构, 直径为 6 mm。从表 1 可看出, 计算值与实验值吻合得较好。正确确定熔体射流速度, 是保证与冷却带线速度合理匹配, 精确控制带材厚度, 保证带材连续稳定成形的前提条件。

表 1 气体压力与射流速度的关系

Table 1 Relationships between atmospheric pressure and jet speed of melt metal

Atmospheric pressure/ MPa	Jet speed of melt metal/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
	Calculated value	Experimental value
0.002 5	1.1	1.0
0.005 0	1.4	1.2
0.007 5	2.6	2.5

3.1.3 喷嘴与冷却区入口处之间的距离

从喷嘴射出的层流在经过一个特征长度 L 后会趋于发散, 形成紊流。因此, 按照式(1), 只有当喷嘴出口与冷却区入口处之间的距离 $h < L$ 时, 才能保证喷射到冷却带上的熔体是稳定的层流, 以利于获得边缘规整、表面光洁的连续带材。本实验中, 喷嘴出口与冷却区入口处的距离 h 值约为 20 mm。

3.2 冷却带线速度对带材质量的影响

3.2.1 冷却带线速度对带材成形的影响

冷却带线速度是影响成形带材厚度精度及冷却速率的重要因素。冷却带的线速度必须与自身的宽度、喷嘴的宽度(采用扁形喷嘴或多孔喷嘴时)、下调节辊处冷却带之间的间隙(决定成形带材的厚度)相匹配, 保证成形带材厚度尺寸精度和成形过程的稳定性。

冷却带的线速度越快, 虽然与其相接触的冷却区表层金属的冷却速度得到提高, 但由于金属在冷却区内停留时间变短, 总体的冷却效果反而下降。因此, 在确保快冷效果的前提下, 随着冷却带线速度的提高, 可制备带材的厚度变薄。

实验证明, 在本实验条件下, 改变冷却带线速度, 成形带材宽度的变化不大, 一般不超过 5 mm。带材的宽度主要与冷却区的形状尺寸、喷嘴形状与尺寸及熔体射流速度等密切相关。

3.2.2 冷却带线速度对带材微观组织的影响

不同冷却带线速度下所制备带材的纵向平面内组织及横向断面组织如图 2~4 所示, 图 5 所示为常规铸态 1050 纯铝的组织。由于熔体射流速度、流量控制条件的限制, 主要采用调节成形带材厚度的方法实现与冷却带线速度的匹配。为便于比较, 成形带材的取样均为沿带宽方向的中心部位。

由图 2~5 可得不同条件下的平均晶粒尺寸, 结果见表 2。为便于比较, 表中还列出了文献[15]给出的 1050 纯铝铸轧时的晶粒尺寸平均值。文献[15]的研究结果表明, 在铸轧速度为 14 m/min, 成形带材厚 1.2 mm 的条件下, 在带材的中心部位仍残留有铸态组织, 而带材的表面附近由于与轧辊间

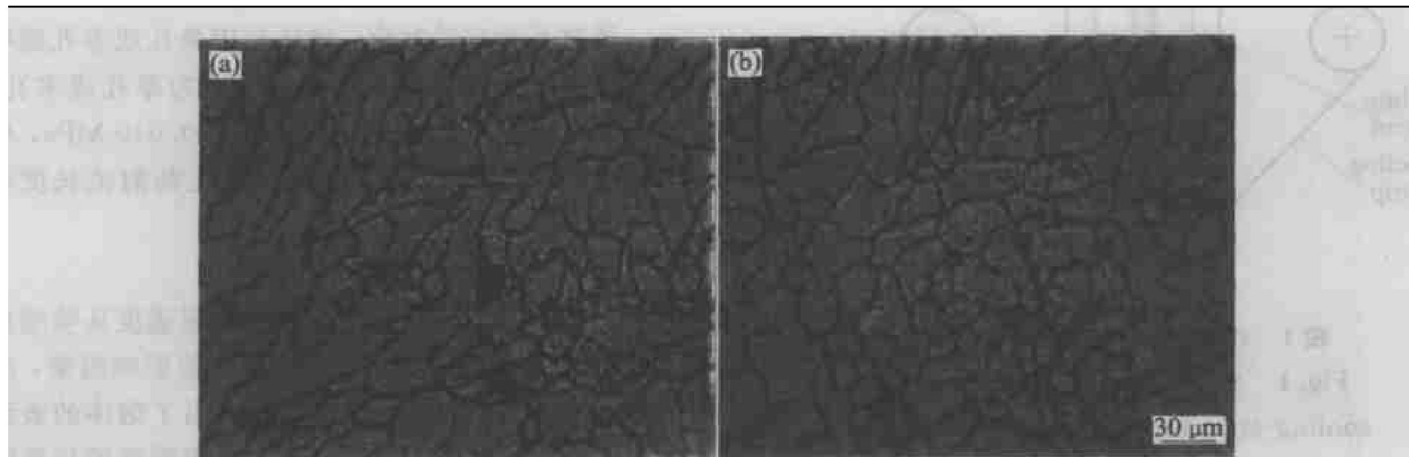


图 2 带材厚度 1.0 mm、冷却带线速度 1 m/s 时铝带材的显微组织

Fig. 2 Microstructures of aluminum strip of 1.0 mm in thickness fabricated cooling-strip speed of 1 m/s
(a) —Longitudinal section; (b) —Transverse section

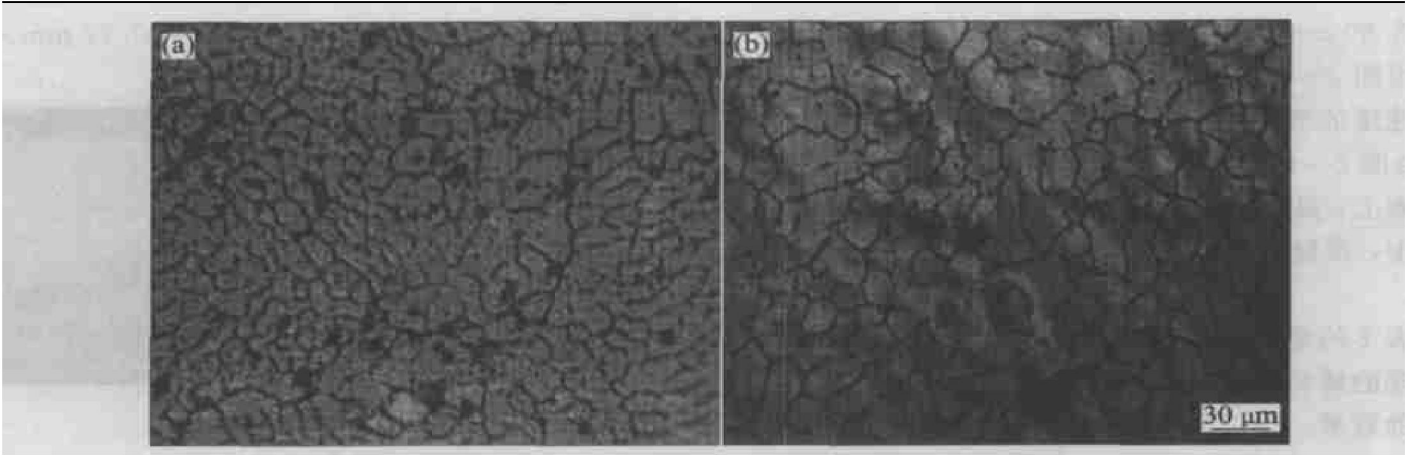


图 3 带材厚度 0.8 mm 冷却带线速度 2 m/s 时铝带材的显微组织

Fig. 3 Microstructures of aluminum strip of 0.8 mm in thickness fabricated at cooling-strip speed of 2 m/s
(a) —Longitudinal section; (b) —Transverse section

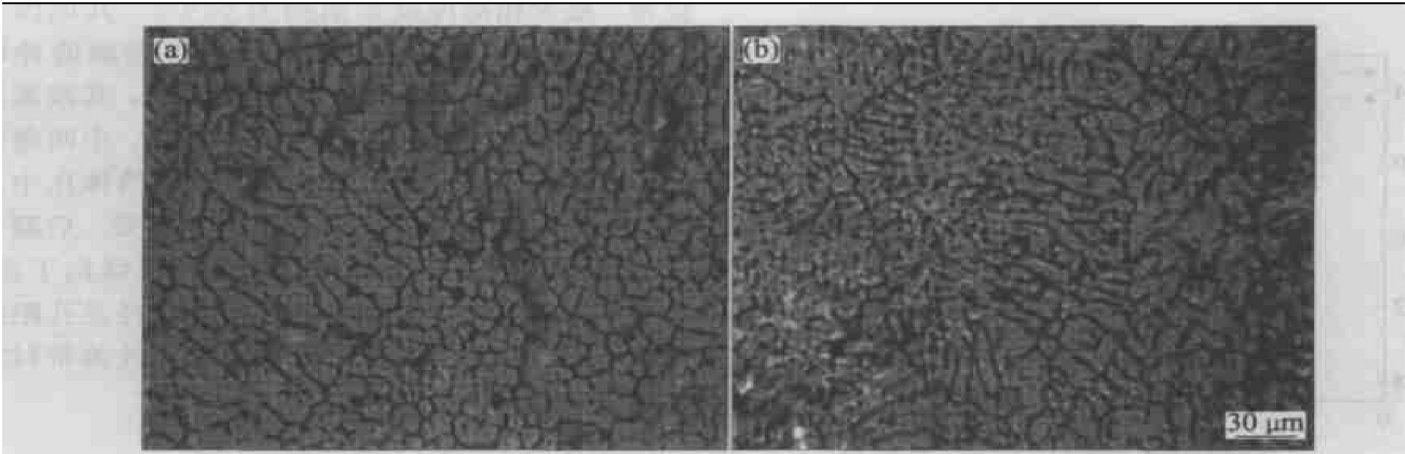


图 4 带材厚度 0.6 mm 冷却带线速度 2.5 m/s 时铝带材的显微组织

Fig. 4 Microstructures of aluminum strip of 0.6 mm in thickness fabricated at cooling-strip speed of 2.5 m/s
(a) —Longitudinal section; (b) —Transverse section

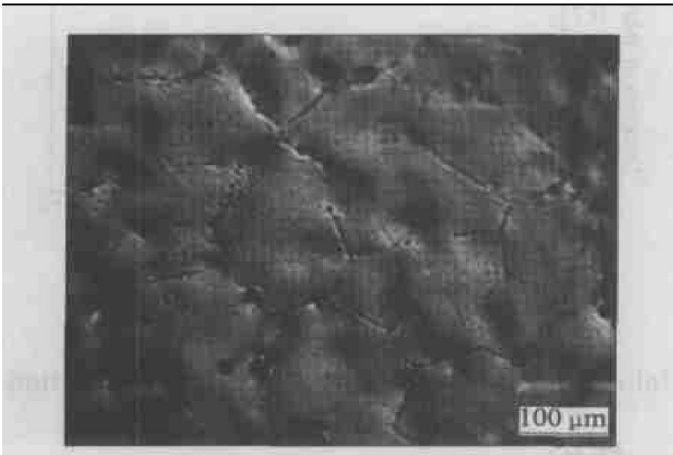


图 5 常规铸态 1050 纯铝的显微组织

Fig. 5 Microstructure of conventional cast aluminum

表 2 不同冷却带线速度、带材铸轧及普通铸造条件下的平均晶粒尺寸

Table 2 Average grain size of aluminum strips fabricated by double cooling-strip process, comparing with cast-rolling aluminum strip and conventional cast aluminum			
Cooling-strip speed/ (m•s ⁻¹)	Strip thickness/ mm	Average grain size/μm	
		Longitudinal section	Transverse section
1.0	1.0	32	28
2.0	0.8	12	18
2.5	0.6	10	12
Cast-rolling ^[15]	1.2	60	
Conventional cast		202	

的剪切变形较大,晶粒沿轧制方向伸长,晶粒平均尺寸在 60 μm 左右。

由图 2~5 和表 2 的结果可以看出,随着冷却带线速度的增大,成形带材组织的晶粒尺寸逐渐减小。由图 2~4 的显微组织还可看出,在带材的整个横断面上,晶粒尺寸的大小较为均匀,说明在凝固过程中,带材厚度方向上获得了较为均匀一致的冷却。

表 2 的结果表明,采用双带快凝固成形法,与常规的铸轧法和普通铸造法相比,具有显著细化晶粒的效果。

3.2.3 冷却带线速度对带材力学性能的影响

不同冷却带线速度下所制备带材的力学性能测试结果如图 6 所示。由图可知,随着冷却带线速度的增加,带材的强度和塑性指标显著提高,这一结果与微观组织变化规律的实验结果相一致。

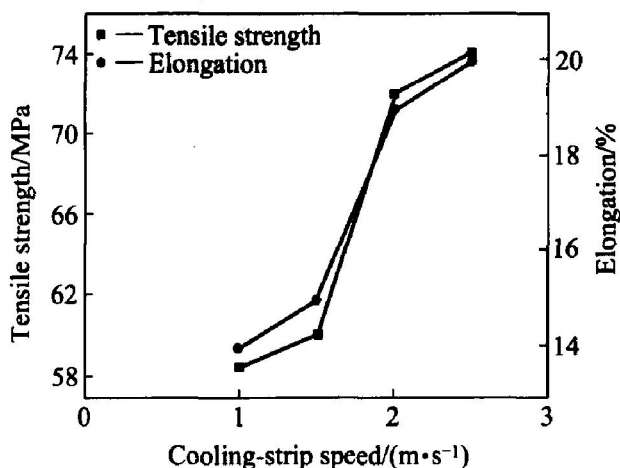


图 6 冷却带线速度与带材力学性能的关系

Fig. 6 Relationships between cooling-strip speed and mechanical properties of fabricated strip

3.3 熔体温度对带材质量的影响

熔体温度对射流及熔体在冷却带带面上的横向流动都有直接影响,因而也直接影响带材成形质量。

随着熔体温度的上升,表面张力降低。表面张力的下降将使熔体与冷却带的润湿性增强,有可能造成薄带不能及时脱离冷却带,影响成形稳定性。又由于温度升高,熔体的潜热增加,造成凝固速率下降,不利于带材性能的提高。另一方面,熔体温度过低,会造成熔体不能喷出和熔体流动不均等问题。实验结果表明,对于 1050 纯铝,熔体温度以高于其熔点 40~80 $^{\circ}\text{C}$ 为宜。

在熔体温度 710 $^{\circ}\text{C}$,冷却带线速度 2 m/s,浇注喷嘴圆孔直径 6 mm(5 孔),上带缝 4.0 mm,下

带缝设定值为 0.6 mm 时,所制备的 1050 纯铝带材的外观如图 7 所示。带材平均厚度为 0.77 mm。

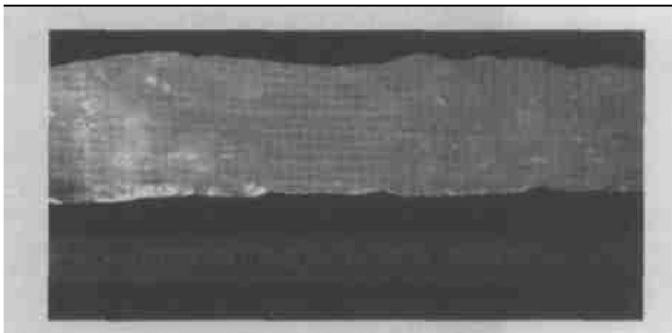


图 7 成形带材外观

Fig. 7 Appearance of fabricated aluminum strip

图 8 所示为纯铝带材厚度沿宽度方向的分布。由图可知,在成形带材的宽度方向上,存在厚度偏差,其波动的规律是沿带宽方向两边厚,而中心部位薄,最大相对厚度差值约为 5.6%。其原因可以认为是:1) 由于熔体射流对冷却带表面的冲刷作用,使得熔体从一接触冷却钢带开始,其液流厚度就呈现出不均匀的分布,出现两侧厚,中间薄的情况;2) 在熔体的凝固过程中,边部的熔体比中心传热快,因而首先凝固成一定厚度的薄带;后凝固的中心部位熔体随着冷却钢带的运转继续向下流动,厚度也随之减小。因此,对喷嘴的孔径及孔距进行调节,将有利于克服上述两种状况,改善带材厚度沿宽向的分布。

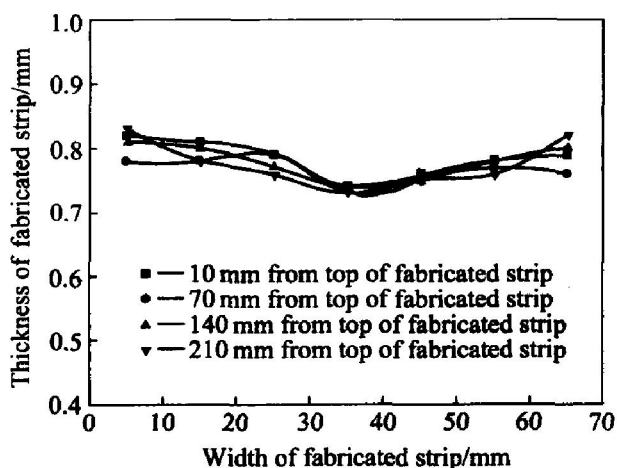


图 8 成形带材厚度沿宽度方向的分布

Fig. 8 Thickness distribution of fabricated aluminum strip along width direction

4 结论

1) 研究了双带快冷法工艺参数对成形带质量的影响,给出了加压气体压力与熔体射流速度的关

系式。采用该关系所得理论预测值与实验值符合较好。

2) 冷却带线速度越大, 所得薄带组织的晶粒度越小, 力学性能越高; 在冷却带线速度为 1.0~2.5 m/s 的条件下, 平均晶粒尺寸为 10~30 μm , 与传统的铸态或铸轧态相比, 组织显著细化。

3) 在本实验条件下, 双带快冷法制备 1050 纯铝带的合理工艺参数是: 浇注温度 710 $^{\circ}\text{C}$, 喷嘴结构为 5 孔, 圆孔直径 6 mm; 气体压力 0.0075 MPa; 冷却带线速度为 2 m/s。所制备的带材表面质量良好、边部规整。

REFERENCES

- [1] 陈明安, 卓利, 张新明. Al-12.6%Si 薄带双辊快速凝固成形试验研究[J]. 材料工程, 1999, 191(4): 32-35.
CHEN Ming-an, ZHOU Li, ZHANG Xin-ming. Preparation of rapid solidified Al-12.6%Si alloy strips by double-roller method[J]. Journal of Materials Engineering, 1999, 191(4): 32-35.
- [2] Senk D. In-line rolling and cooling of direct cast steel strip[J]. Stahl and Eisen, 2000, 120(6): 65-69.
- [3] Opalka W A. Direct strip caster for stainless steel starts up at nippon[J]. Iron and Steelmaker, 1998, 25(12): 13.
- [4] Mizoguchi T, Miyazawa K, Ueshima Y. Relation between surface quality of cast strips and meniscus profile of molten pool in the twin roll casting process[J]. ISIJ International, 1996, 36(4): 417-423.
- [5] 林浩. 用铸轧板轧制铝箔的特点及质量控制[J]. 轻合金加工技术, 1995, 23(12): 8-11.
LIN Hao. Characteristics and quality control for aluminum foil rolled by cast-rolling plate[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1995, 23(12): 8-11.
- [6] 刘咏, 周科朝, 林映红, 等. 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, et al. Physical simulation of roll-casting microstructure of Al-alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(3): 589-593.
- [7] 马锡良. 铝带坯连续铸轧生产[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992. 85-88.
MA Xi-liang. Production of Aluminum Ribbon by Continuous Roll-casting[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1992. 85-88.
- [8] Mehradian R. Rapid solidification[J]. International Metals Views, 1982, 27(4): 185-188.
- [9] 周成, 谢建新. 金属带材快速凝固成形方法[P]. 中国专利 ZL00106176.3, 2004-05-19.
ZHOU Cheng, XIE Jian-xin. Rapid Solidification Technique for Metal Strip[P]. CN ZL00106176.3, 2004-05-19.
- [10] 杨劲松, 周成, 谢建新. 双带法快速凝固 1050Al 薄带的成形试验研究[J]. 航空材料学报, 2002, 22(3): 9-12.
YANG Jin-song, ZHOU Cheng, XIE Jian-xin. Preparation of rapidly solidified 1050Al strip by double-belt method[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002, 22(3): 9-12.
- [11] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 264-273.
ZHOU Yao-he, HU Zhuang-qi, JIE Wan-qi. Solidification Technique[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. 264-273.
- [12] Shibuya K, Kogiku F, Yukimoto M. Development of rapid solidification process with a double-roller method[J]. Materials Science and Engineering, 1988, 98(2): 25-28.
- [13] Ashbrook R L. Rapid Solidification Technology Source Book[M]. Ohio: American Society for Metal, 1983. 98-102.
- [14] Liu J, Arnberg L, Backstrom N, et al. Fundamental experimental parameters in direct wire-casting process[J]. Materials Science and Engineering, 1988, 98(2): 21-24.
- [15] Yoshihiro S, Toshiya I. Production aluminum strip by means of melt direct rolling[J]. Journal of JSTP, 1995, 36(11): 1281-1287.

(编辑 陈爱华)