

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0147-07

铝合金的超常铸轧制备^①

钟 掘

(中南大学机电工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 铝合金连续铸轧以其短流程、高效、节能等突出的优势成为铝板带热轧坯的主要生产模式之一, 特别是在我国其产量已大于热轧板。因此, 提高其产品质量和生产效率成为十分突出的普遍问题。提出“超常铸轧”技术思路, 通过强化铸轧环境, 改变铸轧工艺, 使铝合金铸轧组织发生新的演变, 板材性能全面改善, 成型性有显著提高。“超常铸轧”的核心技术是: 1) 基于高能量密度输运的热传导技术; 2) 基于外加瞬态随机变化磁场的铸轧区熔体强微扰动技术。研究了两种新技术的科学原理和技术要素。

关键词: 超常铸轧; 组织; 热传导; 磁场

Transnormal roll casting processing of aluminum alloys

ZHONG Jue

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Continuous roll casting of aluminum alloys becomes one of the main producing modes, as its outstanding advantages of short flow, high efficiency and energy saving. Especially in China, the output of roll casting is greater than that of heat roll sheet. Accordingly, it becomes very prominent problem to improve the quality and efficiency of production. The technical idea of transnormal roll casting (TNRC) was proposed. Through strengthening the roll casting environment, changing the processing of roll casting, new evolution occurs in the structure of the sheet of roll casting aluminum alloys, so the shaping performance is improved. The properties of strip are roundly improved. The core technologies of transnormal roll casting are as the following: 1) the heat exchange technology based on high energy density transfer; 2) the technology of intensive tiny disturbance on melt at the roll casting zone based on outer adding instantaneous random varied magnetic field. The principle and technology elements of these two new technologies were researched.

Key words: transnormal roll casting; microstructure; heat transfer; magnetic field

现代经济对材料的高水平需求牵动双辊铸轧工艺技术向快速、超薄、高效发展^[1, 2]。与热轧相比, 铸轧节能 40%~50%, 投资减少 70%~95%, 建设周期缩短 2/3。目前世界上已有 430 余台(套)铸轧设备为铝带、箔提供坯料。我国热轧铝板长期依靠进口, 20 世纪 80 年代以来, 铸轧技术在我国迅速发展, 现已拥有 120 多台(套)铸轧设备, 其产量占国内铝带坯的 60% 以上。但常规铸轧板成分偏析、组织不均匀、各向异性严重、深加工性能差、可铸轧的合金品种少, 其产品品种和应用领域受到很大

限制, 目前主要用于铝箔毛料和对深加工性能要求不高的部分薄板^[3]。解决铸轧板的质量和生产效率问题, 是我国解决量大面广高成型性铝板需求的一个重要途径, 铝材加工领域的技术发展也促进铸轧工艺向强化与优化方向进行新的探索。

自 20 世纪 90 年代以来, 针对常规铸轧工艺存在的主要问题, 世界一些著名跨国铝业公司的研究中心和大学, 如美国 Hunter 公司、英国 Davy 公司、法国 Pechiny 公司与英国牛津(Oxford)大学、德国亚琛(Aachen)大学等先后进行了提高铸轧速度和

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999064906); 国家攻关“铝及铝合金连续铸轧新技术”资助项目(计高计[1998]1985号); 国家“八六三”计划资助项目(2001AA337070)

作者简介: 钟掘(1936-), 女, 教授, 中国工程院院士。

通讯作者: 钟掘, 院士; 电话: 0731-8879351; E-mail: JZhong@mail.csu.edu.cn

降低厚度的研究^[4, 5], 但尚未能在工业生产中达到提速和减薄的目标。分析已公布的技术组成, 发现其铸轧装备系统的热传导能力可能难以实现铸轧速度大幅提高的要求。实现大幅提高铸轧速度和改善铸坯性能的重要转变, 需要开展系统的基础技术研究, 以在铝熔体瞬态成形的核心技术上有所突破。

中南大学铸轧课题组提出“超常铸轧”的技术思路, 通过强化铸轧环境, 改变铸轧工艺, 形成两种制备技术: 快凝铸轧和电磁铸轧, 可使铝合金铸轧组织发生新的演变, 板材成型性有显著提高。

“超常铸轧”已在实验研究基础上形成整套技术, 并开始在工业上部分应用。快凝铸轧的生产速度可比常规铸轧提高 10 倍以上, 板坯厚度减小到 2 mm 左右, 板坯组织有显著变化; 电磁铸轧技术使铸坯的组织 and 性能得到明显改善。

“超常铸轧”的核心技术是: 1) 装备的高能量密度输运技术; 2) 铸轧区瞬变磁场的强微扰动技术。本文作者将分析两种新技术的科学原理和技术要素。

1 快凝铸轧核心技术

快凝铸轧期望在 0.1 s 内完成液固流变过程, 当铸轧速度达到 12 m/min 时, 流变界面热传导的能量密度已由常规铸轧的 $(1.8 \sim 1.9) \times 10^6$ kJ/(m²·s) 增加到 $(8 \sim 9) \times 10^6$ kJ/(m²·s)^[6], 同时完成 30% 以上变形率。铝熔体流变成形过程中高密度热能传导链由铸轧工作界面、辊套及冷却水组成, 本课题组已研制成的超强热传导能力的核心技术有: 1) 高导热性能的新型辊套材质与辊系结构; 2) 工作界面接触热阻极小化的界面技术; 3) 高导热流体流态的辊内冷结构优化。

1.1 界面传热机理与界面设计

铸轧过程中, 界面两相互接触材料表面粗糙不平, 热流通过接触界面在粗糙峰处发生收束集中, 凹处热流密度小, 形成接触热阻。铸轧界面由配副材料(含表面氧化膜)、润滑介质和气隙气体组成, 界面的热传导是通过两配副材料之间接触导热、润滑介质导热及气隙气体的对流导热实现的。

1.1.1 界面热流中的电子、声子行为

在配副材料直接接触处存在两种基本导热机制: 电子隧穿传输热能及晶格振动声子传热。

1) 电子传热: 具有波动性的电子携带能量以一定的几率穿过金属表面势垒带走热量。在铸轧的

具体条件下, 铸轧辊和铝坯表面氧化膜势垒高度、氧化膜厚度、费米能及界面温度等决定电子的隧穿效应^[7]。经推演, 在存在氧化膜条件下, 两接触材料间的电子传热热导可以表示为

$$h_e = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{E_F} E_x \frac{mk_B T_1}{2\pi^2 \hbar^3} \cdot \ln \left[\frac{1 + \exp \left[\frac{E_F - E_x}{k_B T_1 (1 + \Delta T / T_1)} \right]}{1 + \exp \left[\frac{E_F - E_x}{k_B T_1} \right]} \right]^{1 + \Delta T / T_1} \cdot \left[1 + \frac{\exp(k_2 L) - \exp(-k_2 L)}{16 \frac{E_x}{V_0} \left[1 - \frac{E_x}{V_0} \right]} \right] dE_x \quad (1)$$

式中 E_F 为费米能, eV; k_B 为 Boltzmann 常数; m 为电子质量, g; ΔT 为温差, K; $\hbar$ 为约化普朗克常数, J·s; T_1 为温度, K; E_x 为电子能量, eV; V_0 为氧化膜势垒高度, eV; L 为氧化膜厚度, μm 。

由式(1)可知, 铸轧区内, 在实际接触区域, 电子传热随氧化膜厚度增加呈指数衰减, 在氧化膜厚度大于电子的 de Broglie 波长时, 电子的隧穿效应基本消失, 以氧化膜自身的传导热阻为主; 界面温度对电子传热呈弱影响; 电子传热能力随势垒增加而急剧减小。

2) 声子传热: 界面相接触材料通过晶体振动的激励与响应传输热能, 传热强度取决于材料结构、振动的匹配性。声子传热热阻由氧化膜自身热阻与边界热阻两部分组成。

根据扩散失谐理论^[8], 边界热阻表示为

$$R_b = \Delta T / \left[\frac{\hbar}{8\pi^2} T_1^4 \sum_j C_{1,j}^{-2} \cdot \int_{z=0}^{\theta_D/T_1} \frac{z^3 \alpha_{1 \rightarrow 2}(z) dz}{\exp(z) - 1} - T_2^4 \sum_j C_{2,j}^{-2} \cdot \int_{z=0}^{\theta_D/T_2} \frac{z^3 \alpha_{2 \rightarrow 1}(z) dz}{\exp(z) - 1} \right] \quad (2)$$

式中 $C_{1,j}$, $C_{2,j}$ 为材料 1 和 2 中 j 模式下的声速, m/s; θ_D 为德拜温度, K; $\alpha_{1 \rightarrow 2}$, $\alpha_{2 \rightarrow 1}$ 为声子能量传输系数; z 为接触固体的声学阻抗。

显然, 影响声子传热的主要因素是配副材料的声学阻抗和界面性质。

图 1 和 2 所示为将快凝铸轧用的辊套、材料 X 合金和铸轧金属铝的具体条件应用于式(1)、(2)得到的结果。分析图 1 和 2 可以认为: 1) 当界面氧化膜厚度在 0.3 nm 以下或金属直接接触时, 电子传热起主导作用; 2) 当氧化膜厚度在 1 nm 以下时, 电子与声子传热同样重要; 3) 随氧化膜增厚, 势垒

增加, 电子传热作用衰减很快, 说明氧化膜是热传导链中的一个重要障碍。

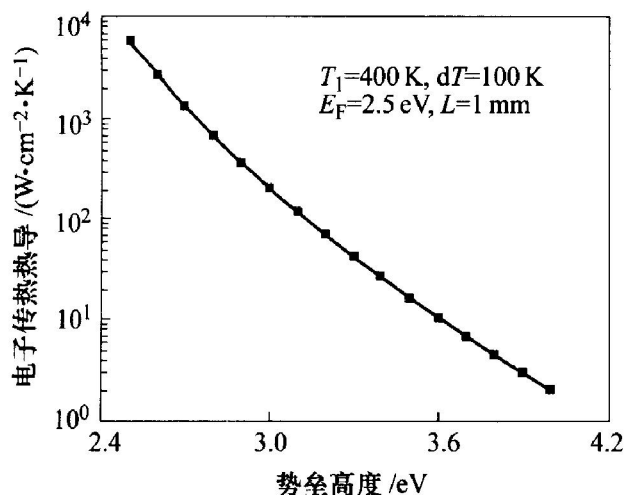


图 1 势垒高度对电子传热的影响

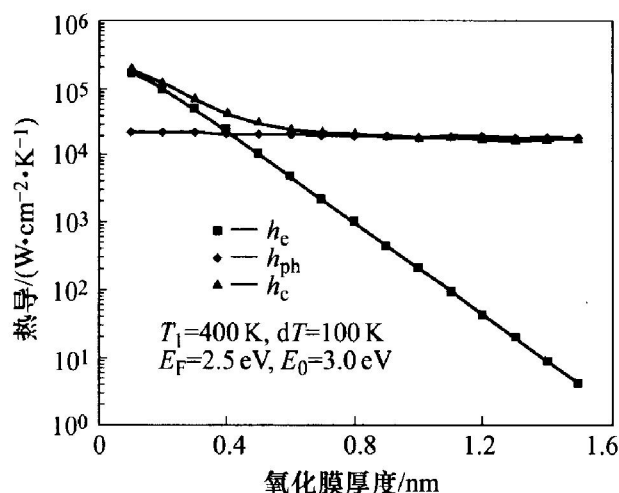


图 2 氧化膜厚度对传热的影响

(h_e , h_{pe} , h_c 分别表示电子、声子和总的热导)

1.1.2 铸轧区界面热传导影响因素与界面设计

铸轧区实际工作界面的情况十分复杂, 根据界面热流中电子、声子的基本行为规律, 对几个主要影响因素分别进行实验。结果表明: 1) 轧辊材料晶格常数与铸轧金属铝的更为相近时, 接触热阻明显减小, 如传统的辊套材料, 其晶格常数为 0.287 Å , 新辊套材料晶格常数为 0.382 Å , 后者与铸轧金属铝的晶格常数 (0.405 Å) 更加接近, 采用新辊套材料明显减小边界热阻。2) 在铸轧过程中, 随金属的凝固、成形, 铸轧界面存在两种不同的导热机制。在凝固区, 辊套表面存在一层极薄的氧化膜, 成为影响电子传热的重要因素, 此时以声子传导为主; 进入轧制区后, 由于前滑、后滑将辊套表面的氧化膜部分搓擦去除, 金属之间裸露接触, 电子传热增强, 并同时存在声子传热。3) 辊套表面的粗糙峰形状和粗糙度及表面显微硬度都影响界面气体储量, 也成为影响界面传热的重要因素。气体储量增加,

铝熔体释放热量的能力减弱。4) 铸轧区润滑介质的导热性能、吸附性、浸润铺展性和介质的尺度都对界面传热产生影响。吸附性和浸润铺展性好的润滑介质能明显减小界面热阻。

由上面的分析得到界面传热设计的基本原则:

1) 设计研制与铝合金声学阻抗相近的高导热系数辊套材料, 并最好同时具有好的表面抗氧化特性; 2) 控制辊套磨削工艺, 使加工表面形成合适的微粗糙峰形状及小的粗糙度; 3) 设计研制高导热系数的润滑隔离介质和相匹配的辊面介质均匀化技术。

1.2 非定常湍流传热及技术实现

1.2.1 常规铸轧辊内流体的对流换热

辊套辊芯间的流体内冷是将铸轧区热量输出铸轧机的主要热传递通道, 也是保证辊套表面具有与铝熔体稳定温度差的主要条件, 其核心问题是如何使流动的冷却介质最大可能地带走热量。计算常规铸轧辊内冷却介质流态, 可知其基本处于紊流或湍流状况, 由温度梯度的变化特征(图 3)可知, 这些流态在辊套与辊芯内壁面都存在理论上 $v=0$ 的边界层, 热量在边界层内停滞, 这是制约换热效率提高的主要原因。图 4 所示为根据不同冷却水流量计算的传热能力结果, 说明仅依靠内部水流量的增加对冷却能力的提高十分有限。

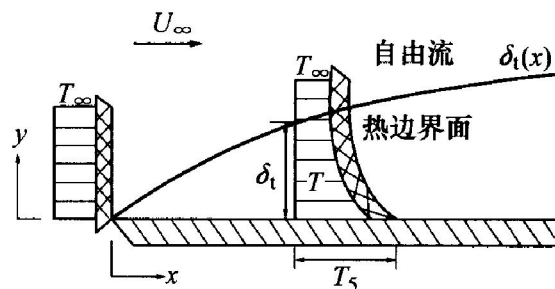


图 3 热边界层效应示意图

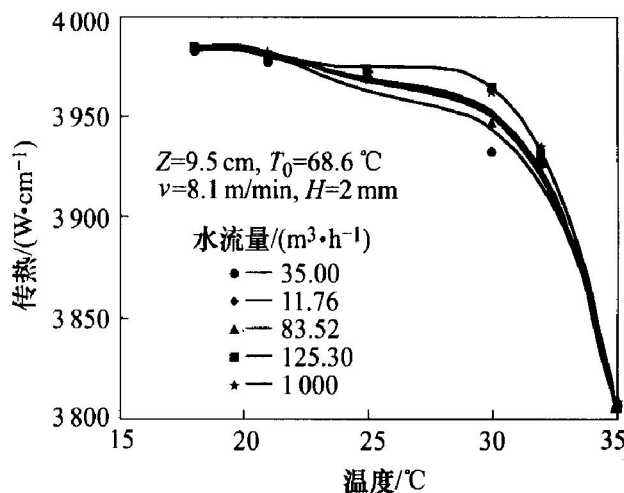


图 4 不同流量下传热能力的变化

1.2.2 非定常湍流场的实现

使辊内冷却流体处于非定常湍流状态, 去除 $v = 0$ 的边界层, 是实现超常铸轧的一个重要技术原理。为实现这一原理, 本研究的技术要点是: 1) 流场的阻尼器设计; 2) 铸轧辊辊芯槽型优化; 3) 流量 Q 的时变系统。

实验发现通过改变辊内水槽形状, 传热能力可提高 10% ~ 15%; 通过改变辊内流体运动方向, 射流状态等, 使流场瞬变, 流体趋于非定常湍流状态, 传热效果明显提高, 如图 5 所示。

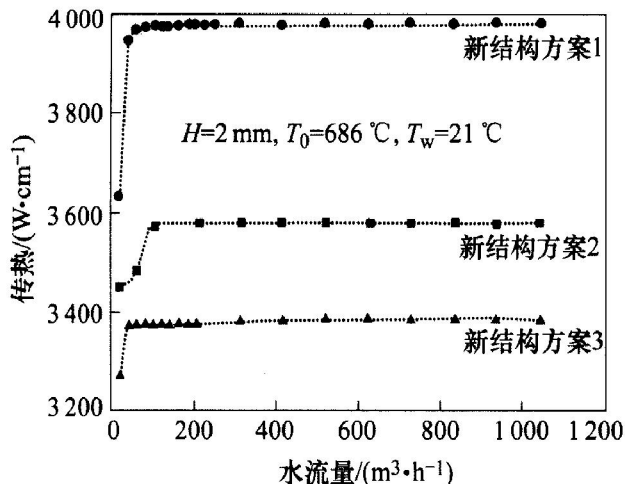


图 5 不同内辊芯结构传热能力的对比

研制的辊芯结构强化了运动微团介质流与壁面直接对流换热, 实现更高换热效率, 具有非定常湍流内冷系统的铸轧辊内部导热能力增加 30% ~ 40%。

通过高导热性能辊套材料的研究, 界面热阻的极小化和内冷系统结构的优化, 快速铸轧复合传热能力可提高 4 倍以上, 铸轧速度提高 10 倍以上。

1.3 快凝铸轧材料组织与性能

目前在 $\Phi 450/500$ 铸轧机上已实现铸轧速度 $v = 15.2 \text{ m/min}$ 、铸坯厚度 $h = 1.8 \sim 2 \text{ mm}$ 的快凝铸轧, 所得铸轧板的性能指标明显高于常规铸轧板材 (见表 1)。

表 1 铸轧铝板拉伸性能实验结果

工艺	试件编号	方向	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$
常规铸轧 ($v = 1 \text{ m/min}$)	L	0°	60.74	85.6	30.7
	W	90°	61.2	85.1	30.3
	P	45°	58.9	82.6	34.0
快凝铸轧 ($v = 12 \text{ m/min}$)	FL	0°	74.5	86.8	32.7
	FW	90°	84.7	92.7	31.3
	FP	45°	79.0	90.8	35.6

快凝铸轧组织形成及演变规律表现出如下几种特征: 1) 结晶细小均匀。比较快凝铸轧与常规铸轧在凝固前沿的组织 (如图 6 所示), 快凝铸轧的晶粒细小呈等轴状。2) 快凝铸轧板的深冲性能好, 明显优于常规铸轧板, 见表 2。

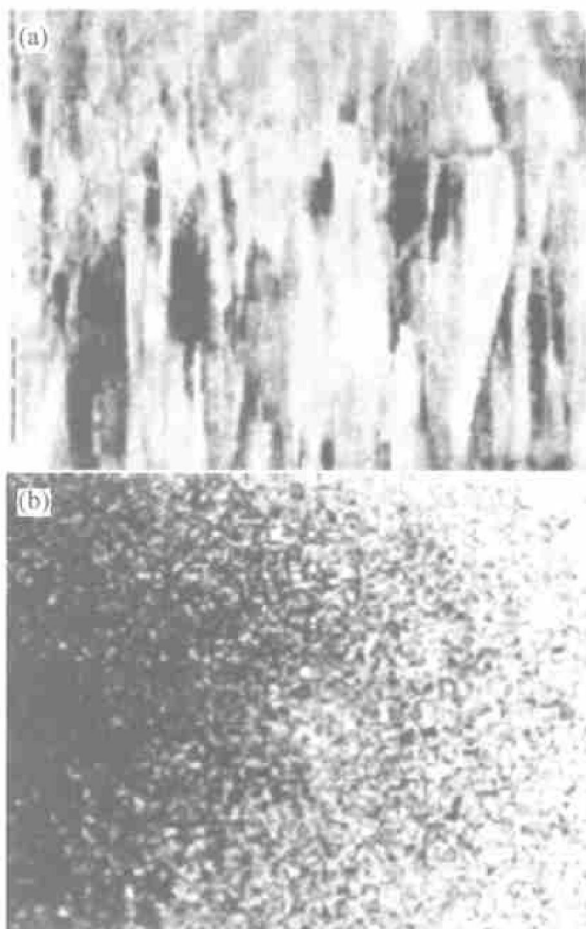


图 6 常规铸轧 (a) 及快凝铸轧 (b) 表面显微组织

表 2 铸轧铝板深冲力学性能实验结果

厚度/ mm	状态	生产方式	制耳率/%	制耳 方向	制耳 数量
1.0	320 °C, 1 h	快凝铸轧 ($v = 12 \text{ m/min}$)	5	0°, 90°	4
1.0	320 °C, 1 h	快凝铸轧 ($v = 10 \text{ m/min}$)	5.2	0°, 90°	4
1.0	320 °C, 1 h	传统铸轧 ($v = 0.9 \text{ m/min}$)	9	0°, 90°	4

2 电磁铸轧核心技术

电磁铸轧的基本思路是向铸轧区输入一个起伏变化的能场, 瞬变的能场梯度驱动铝合金微观无序流变, 改变常规铸轧铝熔体在定向热势下形成的粗大柱状晶, 产生新的优良组织结构。实现这个目的的关键在于构造一个特殊的能场, 使铸轧区每一点

的能量发生一定量级的瞬态变化。

2.1 电磁场作用机理

作用于铸轧区的瞬变电磁能加剧了熔体内部能量起伏, 瞬变电磁力推动熔体内的无序运动, 使熔体呈紊流状, 固态枝晶被紊流熔体冲刷切割形成的碎块扩散到凝固前沿的熔体中, 成为新的形核点, 生长产生大量的非均质晶粒。在熔体内形成形核→结晶→破碎→晶核增殖→结晶的非常规过程。而且由于电磁力搅动不断改变位向, 使结晶取向各向趋同, 破坏定向结晶, 强化动态结晶, 由于电磁场的作用完全改变了自然状态下的凝固结晶条件, 电磁场对熔体三维微区扰动, 使铸轧区温度场、流场趋于均匀, 可同时达到板坯组织细化和均质化^[9]。电磁力协同轧制塑变过程, 处于临界固态的晶体, 变形抗力十分小, 轧制初期在电磁力协同下, 可使晶粒实现多维破碎, 图 7 示出经铸轧后的带坯仍留下晶粒被切断的痕迹。

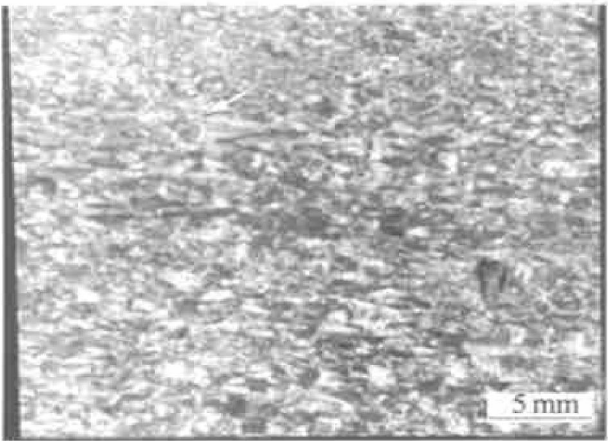


图 7 柱状晶破碎细化显微组织

2.2 电磁场形态与参数设计研究

上述过程是由不同形态磁场对铝流变体的多维复合扰动效应实现的, 实验中发现:

- 1) 电磁场对带坯晶粒的细化程度随励磁电流的增大而提高, 但电流强度增加到一定程度后, 晶粒细化程度逐渐趋于平缓(图 8)。
- 2) 带坯晶粒度随磁场频率的变化而不同。频率过低或过高时, 其晶粒细化作用均减弱, 在 10~20 Hz 范围内可获得非常显著的细化效果(图 9)。

在电磁场铸轧中, 当磁场的运动方向垂直铸轧辊轴线时, 若使用较大功率, 易产生表面氧化膜折叠。当磁场的运动方向平行于铸轧辊轴线时, 表面氧化膜折叠明显减少, 但晶粒细化效果相对减弱。综合二者作用, 采用复合磁场的作用效果优于单一磁场。

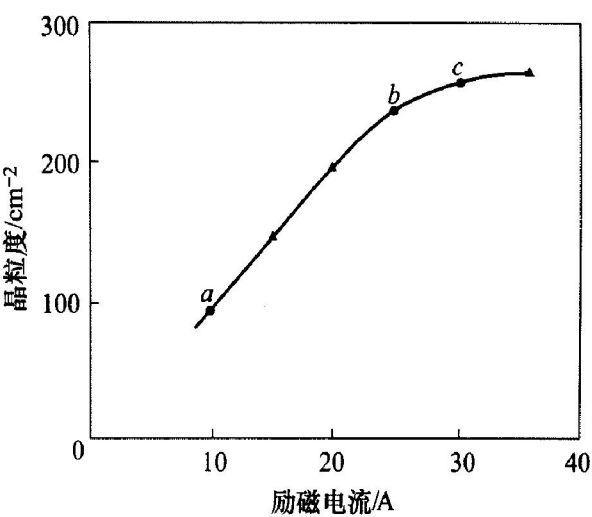


图 8 励磁电流与晶粒度的关系

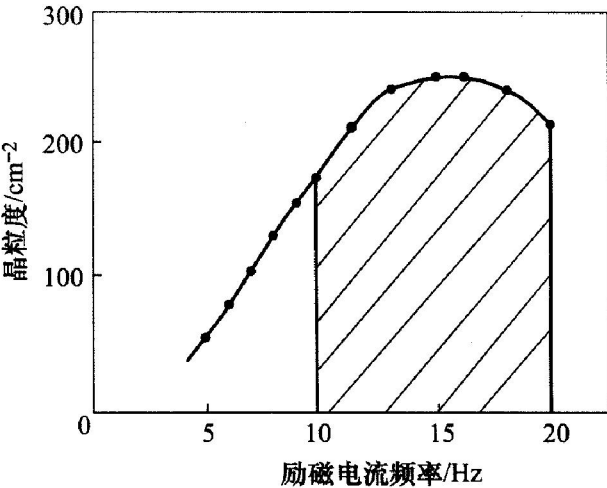


图 9 励磁电流频率与晶粒度的关系

2.3 电磁铸轧组织与性能分析

- 1) 电磁场铸轧铝带坯的材料组织状态发生重大变化, 晶粒微细、等轴、均匀分布, 如图 10 所示。
 - 2) 晶界上金属间化合物弥散分布(图 11)是电磁铸轧独有的优点, 优于热连轧产品, 是提高塑性与成型性的基础。
 - 3) 结晶取向高度分散。
- 一般地, 常规铸轧板带存在较强的结晶取向, 而电磁铸轧板带结晶取向高度分散(图 12 与表 3, 4)。施加复合电磁场试样取向密度最小, 材料各向同性明显最优。

表 3 三种铸轧试样的取向密度比较

试样名称	取向密度			
	{100}	[011]	{111}	[112]
空白样	4.0		0.9	
施加复合电磁场	0.8		0.8	
添加 Al-Ti-B	5.8		3.8	

4) 电磁铸轧板与常规铸轧、热轧板基本强度指标相当, 深加工性能优越(表 5)。

综上所述, 可以认为用超常铸轧技术可以获得高的生产率和优良品质的铸轧板。

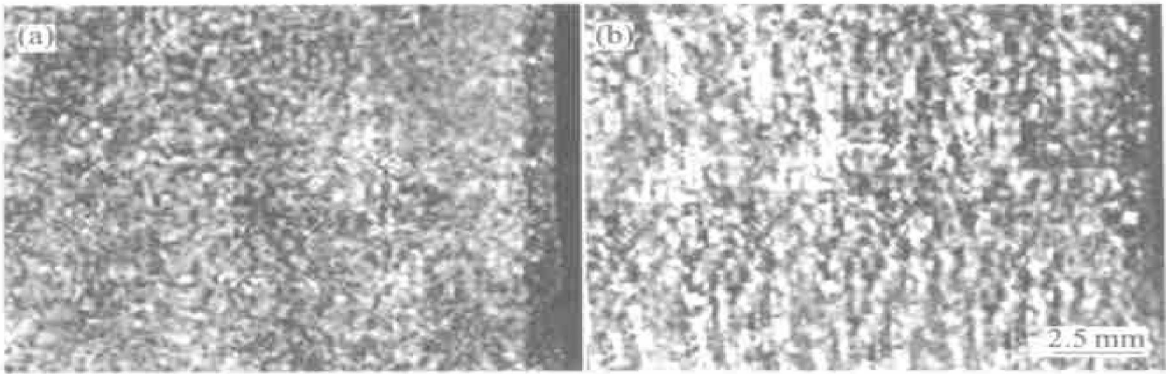


图 10 电磁铸轧与常规铸轧切换过程中 1235 铝合金铸轧板的组织转变
(a) 一施加电磁场; (b) 一未施加电磁场

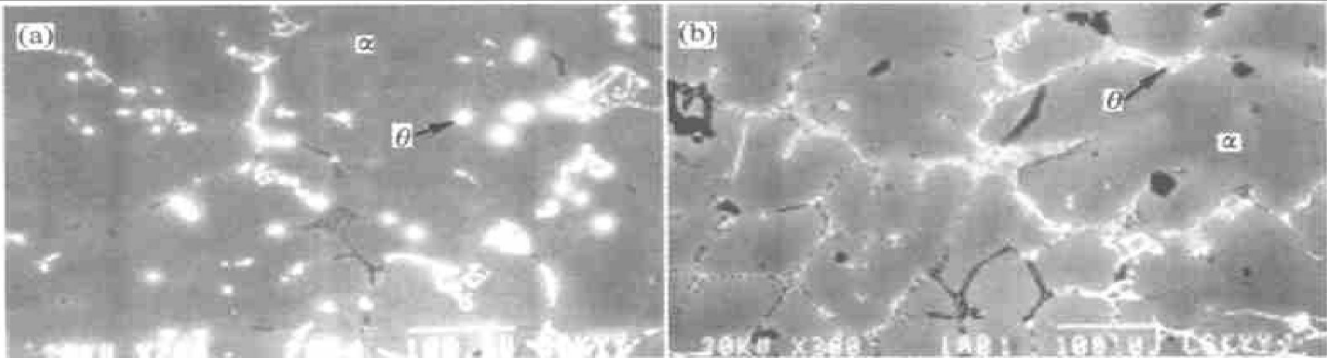


图 11 2024 铝合金的背散射电子像
(a) 一施加电磁场晶界上金属间化合物弥散分布; (b) 一未施加电磁场晶界上金属间化合物网状分布

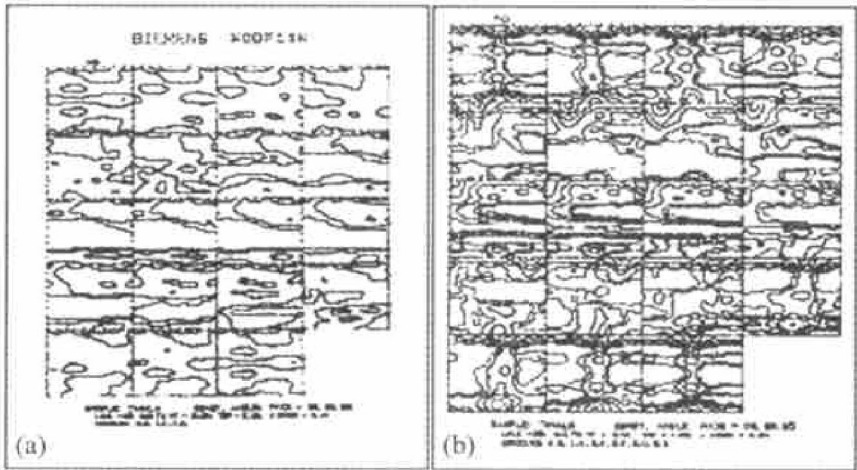


图 12 电磁铸轧带坯($\delta=7.1\text{ mm}$) (a) 与常规(添加 Al-Ti-B)铸轧带坯
($\delta=7.1\text{ mm}$) (b) 组织的 ODF 图比较

表 4 各种成品板的冲杯制耳率和杯突值

序号	合金	厚度/mm	状态	铸轧方式	平均制耳率/%	制耳方向	制耳数量
1	L2	1.0	m	常规(添加 Al-Ti-B)	10.0	0°, 90°	4
2	L2	1.0	m	复合电磁场	3.2	0°, 45°, 90°	8
3	L4	0.5	m	复合电磁场	1.95	0°, 45°, 90°	8
4	L4	0.5	m	常规(添加 Al-Ti-B)	4.6	0°, 90°	4

表 5 电磁铸轧、常规铸轧、热轧板性能比较

工艺名称	铝带坯($\delta= 7.1\text{ mm}$)						0.5 mm 成品板深 加工制耳率/ %	0.007 mm 铝箔针孔数
	σ_b/MPa			$\delta/\%$				
	0°	45°	90°	0°	45°	90°		
电磁铸轧	91	90	90	33.8	34.5	34.0	1.85~ 1.93	30~ 50
普通铸轧	88	89	87	36.1	34.3	32.2	4.0~ 4.5	200~ 300
热轧	88	89	88	35.7	34.4	33.4	1.86~ 2.1	300~ 400

3 超常铸轧的未来发展

超常铸轧是一种具有优质、高效、少投入、高节能综合优势的铝热板带生产技术，预计其技术可在如下方向继续发展：

- 1) 深入工艺规律研究，充分发挥强外场作用，产品整体性能可望与热轧相当。
- 2) 增加铸轧合金品种，如铝合金 1000 系、3000 系、5000 系、8000 系及镁合金和铜合金等，在更大范围内推动材料的节能高效制备。
- 3) 提高铸轧速度、提高单机产量、提高整体效益。
- 4) 超常铸轧技术向其他金属制备技术转移。

参考文献

[1] Frischknecht B. Gwatt/ thin, strip casting technologies — state of the art and trends[J]. Aluminum, 2001, 177 (10): 746 - 751.

[2] Merchant H D, Kattamis T Z, Morris J G. Continuous casting of aluminum alloys[A]. Merchant H D, Tyler D E, Chia E H. Proceedings of a symposium sponsored by

the non-ferrous metals committee of the minerals, metals, and materials society[C]. Chicago, Illinois, 1998.

[3] Gupta M, Cook D P, Sahai Y. Strip casting of aluminum using twin roll casters[J]. Light Metal, 1999: 925 - 930.

[4] 钟 掘. 提高铝材质量基础研究的进展[J]. 中国基础科学, 2002, 3: 15 - 21.

[5] 钟 掘. 超常物理场下材料制备机械的基础研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1): 54-58.

[6] 朱志华, 肖文锋, 李晓谦, 等. 铸轧过程热力耦合建模与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 153 - 158.

[7] HU Shi-cheng, HUANG Ming-hui, LI Xiao-qian, et al. Waveguide mechanism and design of thermal contact resistance at metal rheologic interface[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(3): 579 - 584.

[8] Swart E T, Pohl R O. Thermal boundary resistance[J]. Reviews of Modern Physics, 1989, 61: 605 - 668.

[9] MAO Da-heng, YAN Heng-zhi, ZHU Zhi-hua, et al. Crystallization in aluminum roll-casting processes under electromagnetic disturbance and texture evolution of roll-casting strips[J]. Int J Materials and Product Technology (Special Issue), 2001, 2: 482 - 487.

(编辑 杨 兵)