

[文章编号] 1004-0609(2002)06-1172-07

液-固相轧制复合法生产 $\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ /钢轴瓦带^①

李兴刚, 许光明, 李宝绵, 崔建忠

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

[摘 要] 采用液-固相轧制复合法生产 $\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ /钢复合板, 通过实验结合数学模型确定其工艺参数范围。光学金相观察表明其组织含有大量发达细小的枝晶, 电子探针观察发现 Si, Sn 元素在组织内分布均匀, 通过结合强度、表面硬度和复合带厚度检测, 发现在浇注温度 750 ℃, 轧制复合速度 3 m/min, 辊缝 1.2 mm 条件下, 能稳定生产厚度为 2 mm 左右的轴瓦复合带。

[关键词] 液-固相轧制复合法; 轴瓦带; 轧制复合速度; 浇注温度

[中图分类号] TG 249.9

[文献标识码] A

轴瓦材料的种类很多, 大致可分为巴氏合金、铜铅合金、铝锡合金和铝铅合金。随着汽车工业的发展, 对发动机轴瓦材料的要求也不断提高。为满足汽车尤其是轿车轴瓦材料高速化、长寿命的要求, 美、日两国相继开发出新型中锡低铅轴瓦合金—— $\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ ^[1], 由于 Sn, Pb 软相质点和 Si, Cu, Cr 硬相质点的细小均匀分布, 使其具有优良的减摩性、耐磨性、摩擦相容性、顺应性和较高的承载能力。使用时它通常与钢结合成双层复合板, 为保证合金的性能, 常常采用粉末冶金和快速凝固的方法生产, 由于工艺复杂、成本高、流程长, 限制了它的进一步推广和应用, 主要用于中高档汽车上, 其他车型上应用较少^[2]。

由于液-固相轧制复合是将熔融金属直接浇注到母材上, 通过水冷轧辊的冷却、凝固和轧制作用而生产复合板, 轧制复合时塑性变形量小、能耗低, 与需要较大临界变形率的钢/铝等固-固相轧制复合相比具有明显的优越性。液-固相轧制复合技术是将钢热浸镀铝和铝合金铸轧有机结合的一种近终形加工方法, 它具有生产成本低、设备投资少、生产效率高、能源消耗低、复合板结合强度高等特点。作者采用液-固相轧制复合法生产 $\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ /钢轴瓦带, 并对其工艺进行了研究, 开发了一种新型的低成本、高质量、高效率的复合轴瓦带的生产方法, 为含硅中锡低铅轴

瓦合金的进一步推广和应用打下良好的基础。

1 实验

1.1 实验方法和材料

图 1 为液-固相轧制复合生产工艺过程示意图。钢带经酸洗、碱洗、除锈、除油后, 经钢丝刷打磨以形成山丘状极易破碎的表面硬化层^[3], 涂覆助焊剂后, 干燥并经高频感应设备加热在浇嘴处与熔炼配合好的铝合金熔液接触, 通过水冷轧辊, 经冷却、凝固和轧制作用而生产复合带。

$\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ 合金采用 1 号工业纯铝、1 号纯锡、1 号纯铅、1 号电解铜和 AlSi_{24} , AlCr_4 中间合金为原料, 在中频炉的石墨坩埚中熔

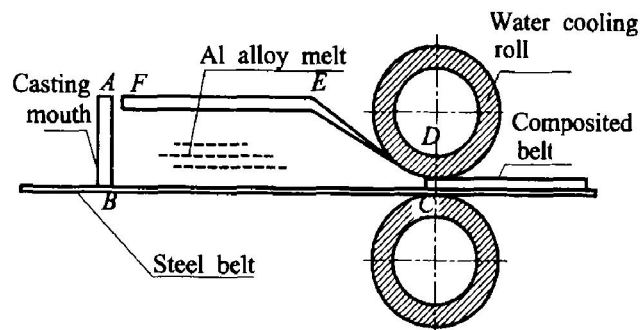


图 1 液固相轧制复合示意图

Fig. 1 Sketch of solid-liquid roll bonding process

① [基金项目] 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(715-009-0060)

[收稿日期] 2002-04-16; [修订日期] 2002-07-07

[作者简介] 李兴刚(1971-), 男, 博士研究生。

炼。将铝熔化后, 800 ℃左右时加入 AlSi_{24} , AlCr_4 =中间合金和 Cu, 保温 30 min 后加入 Pb, Sn, 然后对合金液进行精炼、除气, 倒入中间包中保温, 与此同时开动轧机, 调整好轧机速度、钢带加热温度、浇嘴温度、冷却水流量, 将铝合金熔液倒入浇嘴中, 开始铸轧过程直至结束。

实验是在改造后的 $d\ 300\ \text{mm}$ 轧机上进行, 自行设计的水冷轧辊由于采用新材料和重新设计的水冷通道, 轧制时表面温度分布均匀, 冷却能力强。浇嘴采用高铬耐热铸铁与非金属材料拼接而成, 强度高, 保温性好, 不易变形, 使用寿命长。实验时温度测量采用 K 热电偶和手持红外测温仪。

1.2 工艺参数的制定

液-固相轧制复合过程是在高温、快速下完成, 完全采用实验方法确定其工艺参数范围费时费力, 作者在前期实验工作基础上, 结合液-固相轧制复合过程的数学模型, 研究了生产 2 mm 厚复合带(其中钢厚 1.2 mm)的工艺参数对复合过程的影响规律, 并优化了工艺条件。

1.2.1 数学模型的建立

如图 1 所示, 在浇嘴边部 AB, BC, DE, EF 段装有加热补偿装置, 侧封板上采取绝热措施, 浇嘴宽度与轧辊一致, 将问题简化为二维处理, 忽略边缘效应, 计算在垂直于轧辊轴线的二维平面内进行。采用广义流体的方法^[4, 5], 熔池内的金属满足以下方程, 即连续性方程、动量方程和能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} &= 0 \\ \rho(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v_x}{\partial y}) \\ \rho(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v_y}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v_y}{\partial y}) - \rho g \\ \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x c T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y c T) &= \frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) \end{aligned}$$

式中 v_x, v_y 分别为速度在 x, y 方向上的分量, p 为压力, ρ 为密度, k 为导热系数, T 为温度, c 为比热容; g 为重力加速度。

1.2.2 参数及边界条件处理^[6~10]

1) 在现有文献中尚无 AlSn_{10} 合金热物性参数

的相关数据。由于 Sn 在 Al 中的溶解度极限极小(600 ℃时质量分数为 0.10%), 因此可以近似认为 Sn 以单质状态完全弥散分布于 Al 基体中, 凝固过程也完全分阶段进行, 为此, 采用两纯金属按质量分数加权平均值来得到结晶潜热、比热容、导热系数及密度, 粘度的主要影响因素是温度, 一般合金元素对合金熔体粘度的影响趋势与液相线走势类似, 而且从相图看, 10% Sn 对合金液相线温度的影响相当小, 这里近似采用纯 Al 的粘度。

2) 温度初始条件: 浇口 AF 处温度等于浇注温度, 钢带入口温度为 450 ℃, 轧辊温度为 25 ℃。

3) 速度初始条件: 浇口 AF 为自由表面, 轧辊与熔池接触段速度等于轧辊线速度, 钢带与熔池接触处速度等于钢带速度。

4) 轧辊与熔池接触界面为对流传热边界; 钢板与熔池界面也作对流传热处理; 钢板下表面作绝热面处理。

5) 潜热处理采用热焓法。

结合液-固相轧制复合过程的轧辊和浇嘴的实际尺寸, 通过 ANSYS 模拟计算, 得到浇注温度为 750 ℃、轧制复合速度为 2.8 m/min、入口钢带温度为 450 ℃时的温度场(见图 2)。

1.2.3 实验工艺制度确定

以铝锡合金二元共晶温度 230 ℃作为液-固相轧制复合凝固终了温度。 x 为凝固前沿距辊缝中心线的距离。 $x < 0$ 时, 即在辊缝中心线处, 复合板的铝合金层温度高于 230 ℃, 由于铝合金熔液没有完全凝固, 表面不仅有凝固疤痕的产生, 同时还有大量的“锡汗”, 容易造成复合带铝层的宏观成分偏析, 不能完成液-固相轧制复合过程, 因此将 $x = 0$, 即轧制中心线处铝合金层温度 230 ℃作为液-固相轧制复合工艺稳定的上限值。

图 3 所示为计算得到的轧制复合速度和浇注温度的上限值和实测值, 钢带入口温度是 450 ℃。可见, 计算值均小于实测值, 其误差可能是由于铝合

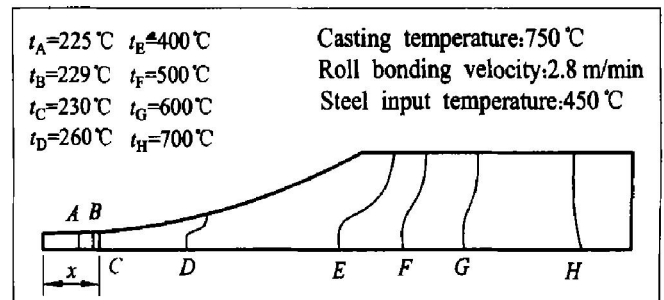


图 2 液-固相轧制复合工艺的温度场

Fig. 2 Temperature field of liquid-solid roll bonding processing

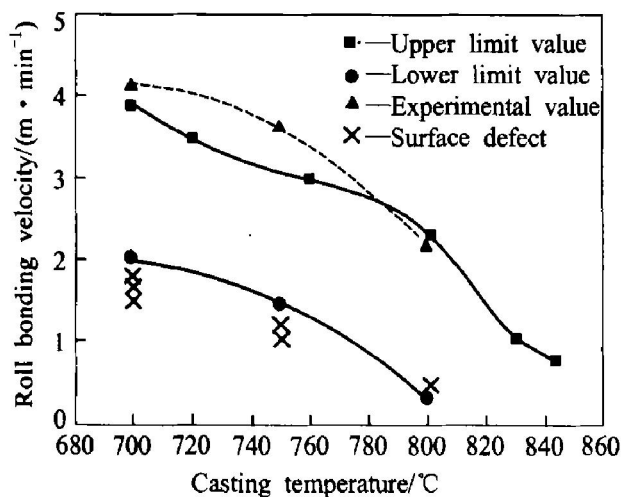


图3 不同速度与温度下液-固相轧制复合的极限值

Fig. 3 Limit value at different velocity and temperature

金热物性参数的处理造成的。而液-固相轧制复合的下限值则由实验确定,判定的标准是复合板质量缺陷的产生。当 x 值增大时,凝固前沿后移,由于受到轧制的作用力和铝液的静压力以及轧辊对铝液的作用力,铝液沿浇嘴和轧辊的缝隙流出,遇轧辊冷却凝固后,通过轧辊旋转带入熔池内,出轧辊后表面出现冷隔和裂纹;当 x 值继续增大时,铝合金在轧辊处承受较大塑性变形,当塑性变形剪应力大于钢铝界面的结合强度时,出辊后则会造成钢带与铝层的错开,导致实验的失败,此时的下限值均大于冷隔和裂纹产生时的下限值,因此将冷隔和裂纹产生时的速度、温度值作为液-固相轧制复合工艺稳定的下限值。

考虑助焊剂充分反应时间和实际生产效率,选择实验温度为700, 750和800℃,实验速度范围在1~3.5 m/min之间,考虑轧机弹跳和复合板成品厚度,轧制复合时的辊缝值为1.2 mm,即将轧辊压靠钢带。

2 工艺参数对复合过程的影响

2.1 熔池与轧辊的接触弧长

张奇等研究了铸轧金属时,全凝固点在轧辊出口处及不同接触弧长下,铸轧速度与带厚的关系^[11];潘军华也研究了液-固相轧制复合钢/铝时,不同接触弧长对板厚的影响^[12]。本实验为避免铝液氧化和流动对轧制复合过程的影响,每次浇注时铝液充满整个浇嘴,一旦浇嘴位置和形状固定,其接触弧长就固定不变。研究表明,铝合金熔液高度

对整个工艺过程影响不大,只要其高度大于辊缝高度,就能保证金属液体的通畅流动。如图4所示,除了在刚开始浇注时铝液没有充满型腔,静压力不足导致铝液流动不均,反映到复合带上就会表现为厚度不均外,随着过程的进行,带厚均稳定在1.95 mm附近,偏差值小于4%。

2.2 钢带预热温度

钢带预热温度对液-固相轧制复合过程有着直接影响,温度过低,对涂覆助焊剂的钢带表面起不到加热干燥的作用,同时由于钢带进入熔池温度较低,造成熔池内铝液温度的剧烈波动,影响工艺过程的顺利进行;温度过高,则会破坏助焊剂涂层致使其失效,同时会在钢带表面形成氧化膜,造成钢带与铝不能很好润湿,严重时钢带与铝层在出轧辊后起层开裂。多次实验发现,钢带预热至450℃左右,即能保证工艺过程和质量稳定,又能保证浇嘴内温度波动较小。

2.3 浇注温度

图5所示为复合速度2.09 m/min时,浇铸温度对带厚及合金层凝固前沿 x 值的影响。降低浇注温度, x 值增大,凝固前沿后移,导致复合板在辊缝处轧制区变长,由于受到轧辊弹跳的影响,辊缝加大,将实际辊缝值再代入前面建立的数学模型中,才能得到图5中所示的 x 值。可见,随浇注温度上升,复合板厚度减小,凝固前沿 x 值也相应增大。为保证铝合金内各元素的均匀分布,获得细小的晶粒组织,应尽量选择较低的浇注温度,但浇注温度也不宜太低,如浇注温度在700℃时,当轧制复合速度小于3.5 m/min时,表面易出现微裂纹,而浇注温度提高到750℃以上时,这一现象基本消除。

2.4 轧制复合速度

图6所示为轧制复合速度和浇注温度对复合板厚度的影响。可以看出,提高轧制复合速度,有利于复合板厚度的降低。800℃浇注时,由于轧制复合速度较低,凝固前沿后移,轧制区较长,由于轧机能力有限,在1.00和1.62 m/min时,复合板厚度均为2.30 mm。此外,在相同浇注温度下,轧制复合速度的上、下限差值均在2 m/min左右,这可能与铝液在轧辊和浇嘴接触处,铝液静压力与轧辊对铝液作用力的平衡有关。实际生产中,在保证充

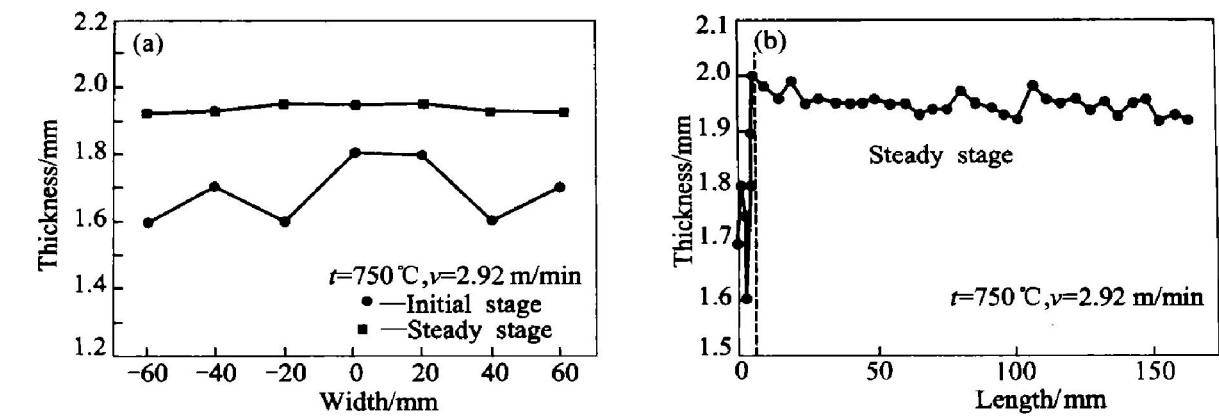


图 4 轧制初始阶段及稳定阶段的复合板厚度变化

Fig. 4 Thickness variation of bimetal strip at initial and steady stages
(a) —Cross direction; (b) —Lengthwise direction

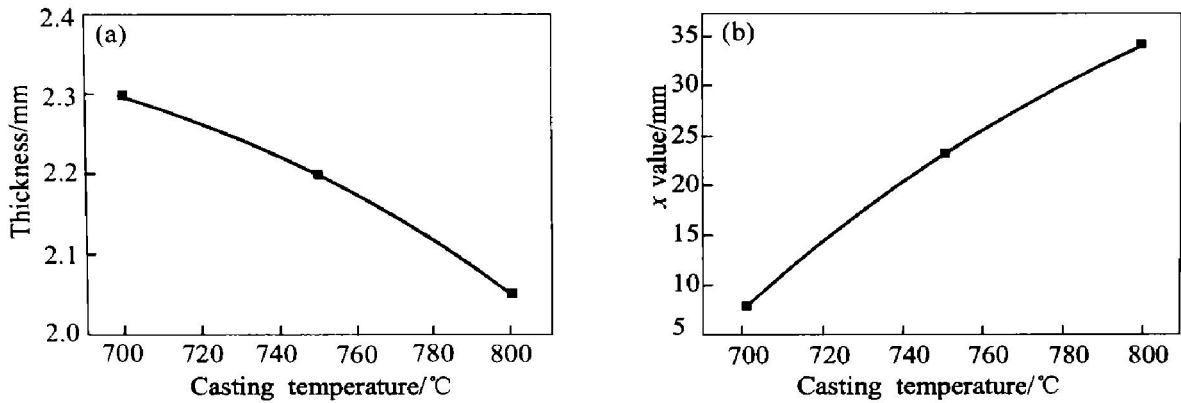


图 5 浇铸温度对带厚和凝固前沿的影响

Fig. 5 Relationship of different casting temperature and thickness(a) and x value(b) at 2.09 m/min of roll-bonding velocity

分润湿的前提下, 提高轧制复合速度不仅有利于降低合金层厚度, 同时也可大大提高生产效率。

3 最佳工艺参数的制定

3.1 结合强度

界面结合强度是检验复合板复合质量好坏的重要指标。采用液-固相轧制复合法生产的 $\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ 钢复合板, 由于厚度较小, 难以用 GB6396—86 中复合板剪切强度测量和朱泉^[13]等使用轮式剥离方法来测试结合强度, 而采用实际生产中的检验方法来检测结合强度, 检验方法如图 7 所示, 选取覆层金属铝宽度为 5 mm , 两侧开有沟槽, 为保证实验结果的可比性, 排除铝合金层厚度对测试结果的影响, 试样制备中保证铝合金层厚度均为 0.8 mm 左右, 同时为避免周围铝基

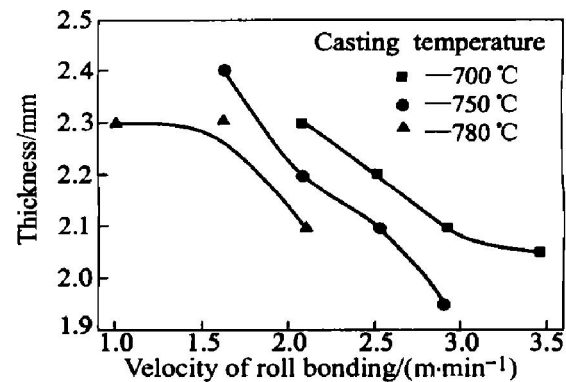


图 6 不同温度下轧制复合速度对复合板厚度的影响

Fig. 6 Effect of roll-bonding velocity on thickness of bimetal strip at different casting temperature

体影响, 沟槽深度大于铝层厚度, 垂直向上将铝层剥离, 测量铝拉断前所剥离的距离 L 。 L 小于 50 mm 时, 判定复合质量优良。为保证测试的准确性, 不同条件下进行多次测试, 取其平均值 L 。 L 值越

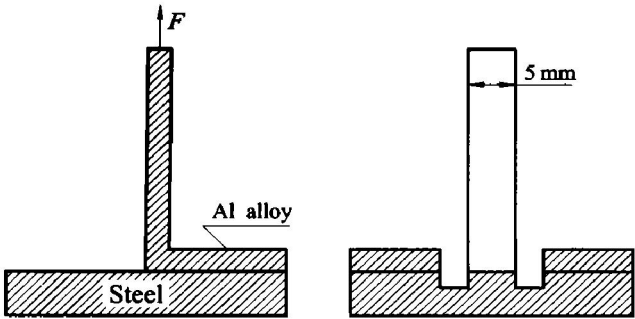


图 7 结合强度测试方法示意图

Fig. 7 Sketch map of bonding strength test method

表 1 不同轧制复合条件下铝层剥离距离和表面硬度值

Table 1 Tear-off length of Al alloy layer and surface HV at different conditions

Casting temperature	$v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	L / mm	HV
700 °C	2.09	2.5	60~ 76
	2.52	1.4	60~ 69
	2.92	0.8	58~ 67
	3.46	1.0	59~ 64
750 °C	1.63	2.8	64~ 78
	2.09	2.4	60~ 74
	2.52	1.1	62~ 66
	2.92	0.8	60~ 70
800 °C	1.03	2.1	57~ 68
	1.63	1.4	55~ 67
	2.05	1.3	56~ 64

小，界面结合强度越高。测试结果如表 1 所示。从表 1 可见，在工艺参数范围内，剥离距离均小于 3 mm。测试时，由于有时 L 值为 0，使其平均值较低。

3.2 组织及其元素分布

图 8 所示为液-固相轧制复合时轧制方向上铝合金层金相组织和电子探针(EPMA)照片。从图 8 (a)中可以看到，低倍照片其组织与铸造组织相似，晶粒粗大；图 8(b)所示为其高倍照片，可见，由于液-固相轧制复合时冷速极高，晶粒内为发达的柱状晶结构，指向均与冷却方向相同，即与轧制方向垂直。文献[14] 表明，Al 与 Si, Sn 均不形成化合物相。从图 8(c), 8(d)中可以看出，冷却时液相首先析出铝枝晶，由于冷速极高，枝晶内含有少量的 Sn 和 Si 元素，随温度降低，大量剩余的 Sn 和 Si 便在枝晶和晶界处富集，由于柱状晶细小密集，表现在铝合金组织上，Sn 和 Si 元素分布弥散均匀，有利于提高其性能。

3.3 最佳工艺制度的选取

以上实验结果表明，当轧制速度为 3 m/min 左右，浇注温度为 750 °C，辊缝为 1.2 mm，入口钢带温度为 450 °C 时，能够得到表面平整无裂纹，结合强度较高，板带厚度偏差较小，表面硬度较高，组织内元素分布均匀的复合轴瓦带，并且轧制复合过

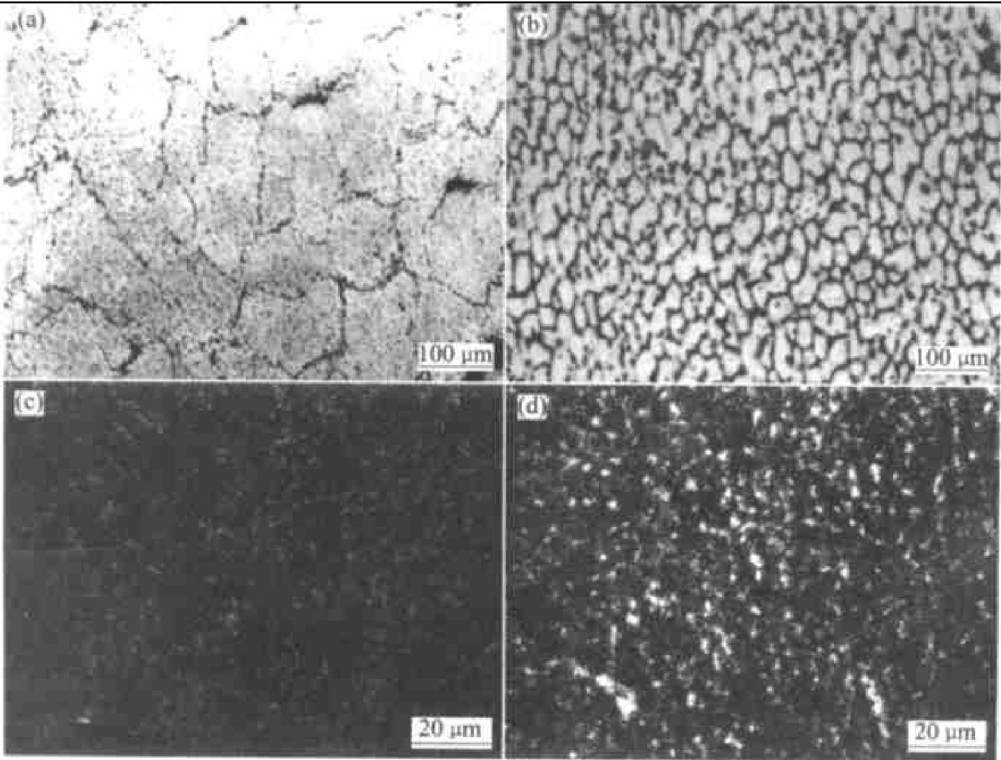


图 8 铝合金层的金相组织及其元素分布

Fig. 8 Microstructures of Al alloy layer and distribution of elements (a) —Low magnification times; (b) —High magnification times; (c) —Si; (d) —Sn

程能够连续稳定进行。因此把它作为液-固轧制复合生产 2 mm 厚 $\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ 铝合金/钢复合板的最佳工艺。

4 结论

1) 采用液-固相轧制复合法可以生产合格的 $\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ 铝合金/钢复合板,工艺稳定,复合板表面质量较好,复合强度高,元素分布均匀。

2) 实验时采用浇注温度 750 °C,铸轧速度 3.0 m/min,辊缝 1.2 mm,熔池高度 12 cm,液-固相轧制复合过程可连续稳定进行。

3) 液-固相轧制复合法生产复合板的成功,为 $\text{AlSn}_8\text{Si}_{2.5}\text{Pb}_2\text{Cu}_{0.8}\text{Cr}_{0.2}$ 含硅锡铝合金轴瓦材料的大范围推广应用打下基础,同时也找到一种新的短流程、高效率复合板生产新工艺。

[REFERENCES]

- [1] Whitney W J. An advanced aluminum-tin-silicon engineer bearing alloy and its performance characteristics [A]. SAE Tech [C]. Warrendale USA: 1995. 950 - 953.
- [2] 戴兰芳,张春华,代孔林,等. 含硅铝合金轴瓦的磨损特性研究 [J]. 矿冶工程, 2000, 20(1): 67 - 69.
DAI Lan-fang, ZHANG Chun-hua, DAI Kong-lin, et al. Wear characteristics of Sn bearing bush aluminium alloy-a study [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(1): 67 - 69.
- [3] Vaidyanath L R, Milner D R. Significance of surface preparation in cold pressure welding [J]. British Welding Journal, 1960(1): 513 - 516.
- [4] 金珠梅,赫冀成,邸宏双. 广义流体的概念在金属流动凝固传热分析模型中的应用 [J]. 计算物理, 1999, 16(4): 409 - 413.
JIN Zhumei, HE Jichen, DI Hongshuang. The application of generalized fluid concept in flow and heat transfer analysis model of continuous casting [J]. Chinese J computational Physics, 1999, 16(4): 409 - 413.
- [5] 许光明,李兴刚,崔健中. 液固相铝-不锈钢板复合轧制温度场的模拟计算 [J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(4): 19 - 22.
XU Guang-ming, LI Xing-gang, CUI Jianzhong. Simu-

lation of temperature field for liquid-solid composite rolling of stainless steel/aluminum [J]. J Iron and Steel Research, 2000, 12(4): 19 - 22.

- [6] 虞觉奇,易文质,陈邦迪,等. 二元合金状态图集 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1983. 153 - 221.
YU Jue-qi, YI Wen-zhi, CHENG Bang-di, et al. Handbook of Binary Alloy State Plots [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983. 153 - 221.
- [7] 吴树森. 材料加工冶金传输原理 [M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
WU Shu-shen. Metallurgy Transmission Theory in Material Process [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.
- [8] Hwang J D, Lin H J, Hu C T. Numerical simulation of metal flow and heat transfer during twin roll strip casting [J]. ISIJ International, 1995, 35(2): 170 - 177.
- [9] Kang C G, Kim Y D. Optimum shape design techniques of direct roller under thermal load and rolling force in the direct rolling process of molten materials considering solid fraction [J]. J Materials Processing Technology, 1997, 67: 71 - 77.
- [10] Yun M, Lokyer S, Hunt J D. Twin roll casting of aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2000, 280: 116 - 123.
- [11] 张奇,许嘉龙,孙祖庆,等. 双辊薄带连铸工艺热传输的计算机模拟 [J]. 钢铁, 1992, 27(12): 24 - 29.
ZHANG Qi, XU Jialong, SUN Zuping, et al. Computer simulation of strip casting heat transfer in twin roll machine [J]. Iron and Steel, 1992, 27(12): 24 - 29.
- [12] 潘军华. 钢/铝液-固相轧制复合过程温度场与金属流动的数值模拟 [D]. 沈阳:东北大学, 1999.
PAN Junhua. Numerical simulation temperature and flow field in Al/Steel liquid-solid cladding bonding [D]. Shenyang: Northeastern University, 1999.
- [13] 朱泉,潘大炜,张文奇. 金属界面间的相互滑动对双金属固相复合的影响 [J]. 轧钢, 1989(4): 19 - 23.
ZHU Quan, PAN Dawei, ZHANG Wenqi. Steel Rolling, 1989(4): 19 - 23.
- [14] 袁鸽成,黎祚坚,姜燕雄,等. 新型铝锡硅合金结晶行为及微观组织 [J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(4): 110 - 113.
YUAN Gecheng, LI Zuo-jian, LOU Yan-xiong, et al. The new aluminum-tin-silicon alloy crystal behavior and its microstructure [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(4): 110 - 113.

AlSn₈Si_{2.5}Pb₂Cu_{0.8}Cr_{0.2}/ steel bearing strip produced by liquid-solid roll bonding processing

LI Xing-gang, XU Guang-ming, LI Bao-mian, CUI Jian-zhong

(The Key Laboratory of Ministry of Education For Electromagnetic Processing of Materials,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

[Abstract] AlSn₈Si_{2.5}Pb₂Cu_{0.8}Cr_{0.2}/ steel bearing strip is produced by the method of liquid-solid roll bonding. Based on the experiments and mathematical model, the technical parameters are determined. By the aids of bonding strength and surface quality, the optimized parameters (roll speed: 2.964 m/min, casting temperature: 750 °C, roll gap: 1.2 mm) are found. The metallography and EPMA pictures show that the distributions of Sn and Si are uniform and dispersion.

[Key words] liquid-solid roll bonding; bearing strip; velocity of roll bonding; casting temperature

(编辑 陈爱华)