

高阻尼铝合金层压板热轧复合 结合强度和界面特性^①

刘维镐 周善初

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要 采用正交试验法研究了热轧复合工艺(包括加热温度、保温时间、热轧复合总加工率和道次加工率分配方式)对界面结合强度的影响,并应用金相显微镜及扫描电镜(SEM)分析了界面的结合特性,确定了高阻尼铝合金层压板热轧复合的较优工艺:热轧复合加热温度 350 ℃,保温时间 1 h,总轧制加工率 75%,第一、二道次加工率之和为 35% 左右。热轧复合板的界面结合为冶金结合。

关键词 阻尼材料 热轧复合 结合强度 界面特性

高阻尼铝合金层压板是近期研究开发的一种能够减振降噪的新型功能-结构材料。它由多层不同成分和特性的板材经预处理、热轧复合、中间热处理、完工轧制和最终热处理等工序加工而成。这种层压复合材料具有一定的机械强度,阻尼性能好,重量轻,耐蚀,可焊,易成型,受到科技界和工业部门的极大关注,具有广阔的应用前景。

热轧复合是高阻尼铝合金层压板生产过程中的一个关键工序。倘若热轧复合后各层间不能有效结合,即达不到一定的结合强度,在后续工序中就可能开裂、分层,无法得到合格产品。同时,生产成本提高,综合成品率下降。因此,研究热轧复合板各层间的结合强度和界面特性具有重要的实际意义。

在一定生产设备条件下,生产不同材质组成的层压板时,除了单层板复合表面的预处理外,影响热轧复合板层间结合强度的主要因素是:热轧复合前的加热温度,加热时间,热轧复合总加工率,热轧复合道次加工率分配方式等。本文利用正交试验法系统地研究了热轧复合工艺对界面结合强度的影响,并应用金相显

微镜及 SEM 分析了界面的结合特性。

1 试验方法与结果

1.1 样品制备与结合强度测试

热轧复合的高阻尼铝合金层压板由七层单层板组成,其结构如图1所示。在本试验中,

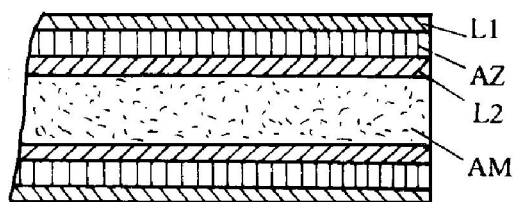


图1 高阻尼铝合金层压板厚度组成示意图

最外层为纯铝(L1);次外层为铝-锌合金即 Al-60%~80% Zn(AZ);中心层为 Al-Mg 合金(AM),AM 和 AZ 之间的过渡层为纯铝(L2)。各层材质及厚度比由层压板的性能所决定。若将 L1 和 L2 均视为同一牌号的纯铝(以 L2 表示),简单分析表明,热轧复合高阻尼铝合金层压板中只有两种界面:AM/L2 和 AZ/L2。为了提高测试精度、节省材料和减少试验工作

量,在同一热轧复合工艺条件下制备两类复合层压板,即加工成品板的七层热轧复合板和作为对比试样的 AM/L2/AZ 三层热轧复合板,加工成试样以测定两类热轧复合板中两种界面的结合强度,分析它们的可比性,为后面探索较优生产工艺的正交试验提供依据。

(1) 单层板准备 试验用 AM 和 L2 板为外购市售产品。AZ 和 L1 板系经熔铸和热轧而成。所有单层板均剪成 $\delta \times 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的坯料。

(2) 热轧前的预处理 包括蚀洗和叠合(两类板分别按下列顺序叠合,即: L1/AZ/L2/AM/L2/AZ/L1 和 AM/L2/AZ)。

(3) 热轧复合 在带热风循环的箱式电阻炉内加热,随炉升温,加热温度为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 1h。在两辊不可逆热轧上热轧复合,总加工率约为 75%,分六道次轧至样品所需厚度。

(4) 界面强度测试方法 高阻尼铝合金层压板系新开发材料,其层间界面结合强度的测定目前尚无标准。本试验参考文献[1]并参照 GB6396-86 复合钢板性能试验方法,以界面剪切强度 τ_b 来评价层间界面结合强度。剪切强度试验试样按 GB6396-86 规定的尺寸和表面粗糙度要求加工。试样放置在标准规定的夹具中,使热轧复合材料沿结合界面平行地剪切下来。采用国产 WD-10A 型电子万能试验机加载,加载速度为 4 mm/min 。

剪切强度 τ_b 按下式计算:

$$\tau_b = P/S$$

式中 P —载荷, N; S —剪切面积, mm^2 。

对两类层压板中的两种界面分别测试剪切强度。取 4 个试样的数据的平均值作为每一种界面的剪切强度值,试验结果如表 1 所示。试验结果表明,两类层压板中两种界面的剪切强度的相对差值在 $-2.1\% \sim 2.3\%$ 之间。可以认为,当热轧复合工艺相同时,两类层压板中的同一种界面的剪切强度是相同的。这说明正交试验中用三层板中的界面结合强度代替七层板是可行的。

表 1 剪切强度 τ_b 试验结果(MPa)

界面种别	七层复材	三层复材
AM/L2	122.5	125.1
AZ/L2	65.6	64.1

1.2 正交试验

影响热轧复合板界面结合强度的因素是多方面的^[2]。本试验的目的是当一定的设备条件和原始各单层板材质和预处理相同时通过正交试验^[3]来探索三层板合理的热轧复合工艺,以期增强层间界面结合强度,提高产品质量、加工成品率和热轧复合的生产效率。

(1) 试验方案

分析表明,在预处理良好的条件下,界面结合强度主要取决于轧前加热温度 (θ)、保温时间(t)、热轧复合总加工率(ε)和道次加工率分配方式(N)。本试验的考察指标为界面剪切强度即 τ_b (AM/L2) 和 τ_b (AZ/L2)。因素和水平的选择如表 2。采用 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验方案。单层板的预处理、三层板叠合顺序、剪切试样加工,剪切试验方法及剪切强度计算同 1.1。

表 2 正交试验因素和水平表

水平	因素			
	$\theta / ^{\circ}\text{C}$	t / min	$\varepsilon / \%$	N^*
1	$\theta_1(250)$	$t_1(30)$	$\varepsilon_1(65)$	N_1
2	$\theta_2(300)$	$t_2(60)$	$\varepsilon_2(75)$	N_2
3	$\theta_3(350)$	$t_3(90)$	$\varepsilon_3(85)$	N_3

* 道次加工率分配方式 N_1 、 N_2 、 N_3 表示第一、二道次加工率之和分别为 25%、30%、35%。相应的总道次数分别为 7、6.5 道次。

(2) 试验结果与极差分析

试样中两种界面的剪切强度试验结果与极差分析见表 3。对 AZ/L2 界面而言,极差分析表明,影响其结合强度的主要因素是加热温度,其次是道次加工率分配方式和总加工率。热轧前的加热时间影响较小。各因素较优的水平为 $\theta_3 t_2 \varepsilon_3 N_2$ 。

对 AM/L2 面而言,影响其结合强度的主要因素是道次加工率分配方式,其次是加热时间和加热温度,总加工率的影响最小。各因素

较优水平为 $\theta_3 t_3 \varepsilon_2 N_3$ 。

试验样品的制备及高阻尼铝合金层压板热轧复合时，两种界面的结合是在同一种工艺条件下实现的。为了使两种界面同时达到较高的结合强度，同时考虑实际生产条件下应满足高产、优质、低消耗的原则，较优的生产条件应为 $\theta_3 t_2 \varepsilon_2 N_3$ ，即加热温度为 350℃，保温 1 h，总加工率约为 75%，第一、二道次加工率之和为 35% 左右。

表 3 正交试验方案、试验结果与极差分析						
试验号	因素				τ_b	τ_b
	θ	t	ε	N	(AZ/L2)	(AM/L2)
1	θ_1	t_1	ε_1	N_1	61.8	105.2
2	θ_1	t_2	ε_2	N_2	71.0	125.8
3	θ_1	t_3	ε_3	N_3	68.4	132.0
4	θ_2	t_1	ε_2	N_3	64.0	132.3
5	θ_2	t_2	ε_3	N_1	68.4	120.4
6	θ_2	t_3	ε_1	N_2	64.2	136.5
7	θ_3	t_1	ε_3	N_2	76.4	125.8
8	θ_3	t_2	ε_1	N_3	71.3	140.1
9	θ_3	t_3	ε_2	N_1	65.9	130.6
τ_b (AZ/L2)	I				201.2	202.2
	II				193.0	207.1
	III				213.6	209.6
	R				20.6	8.6
	较优水平				θ_3	t_2
	因素主次				$\theta、N；\varepsilon、t$	
τ_b (AM/L2)	I				363.0	363.3
	II				389.2	386.3
	III				396.5	399.1
	R				33.5	35.8
	较优水平				θ_3	t_3
	因素主次				$N；t、\theta；\varepsilon$	

(3) 验证性试验

对试验数据进行极差分析得出的较优热轧复合工艺条件未包括在试验方案中，因此对所选取的较优生产工艺条件 $\theta_3 t_2 \varepsilon_2 N_3$ 进行验证性试验。验证性试验结果表明，两种界面的结合强度已达到较高的水平，即 $\tau_b(\text{AZ/L2}) \geq$

72.5 MPa， $\tau_b(\text{AM/L2}) \geq 145.2 \text{ MPa}$ 。

1.3 金相观察和 SEM 分析

层压板界面的金相观察是在 NEOPHOT-21 型金相显微镜上进行的。为了研究界面的结合特性，应用 X650 型扫描电镜对 8 号试样的 AZ/L2 和 AM/L2 界面附近的 Zn 含量和 Mg 含量进行点分析。分析结果如图 2 所示。

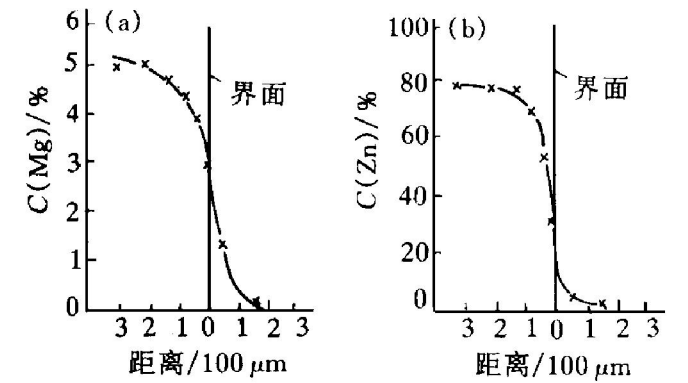


图 2 AM/L2 和 AZ/L2 界面附近 SEM 点分析结果
(a) —AM/L2; (b) —AZ/L2

2 结果讨论

热轧复合是生产大批量、多品种、多规格复合板的一种经济而有效的生产方法。热轧复合机制为扩散机制^[3]，即在轧机的强大压力和高温共同作用下，使待复合的两种金属表面破碎，并在整个金属截面内产生塑性变形。同时使复合界面附近的金属原子获得足够的能量，于是结合界面原子相互扩散，形成平面状冶金结合。由 SEM 点分析结果可见，在界面及其附近部位 Zn 和 Mg 的含量发生了显著变化。在 AZ/L2 界面，Zn 原子从浓度高的 AZ 一侧向 L2 一侧扩散，在 L2 中形成了含有 Zn 的 α -Al 固溶体，并且 L2 中 Zn 的浓度随其与界面的距离增大而逐渐降低。在 AM/L2 界面，Mg 原子从浓度高的 AM 一侧向 L2 一侧扩散，在 L2 中形成了含有 Mg 的 α -Al 固溶体，并且 L2 中 Mg 的浓度随其与界面的距离增大而逐渐降低。由此可见热轧复合的 AZ/L2 和 AM/L2 的

界面结合均属金属固溶体的冶金结合。同时,金相显微镜及 SEM 观察均未在 AZ/L2 和 AM/L2 两种界面发现有脆性化合物形成。所测定的界面剪切强度值均高于界面中强度较低一侧(即 L2, $\tau=60\text{ MPa}$) 的剪切强度,均低于界面中强度较高一侧(即 AM, AZ) 的剪切强度,说明界面结合牢固而可靠,这是由于界面形成了固溶体的缘故。

根据热轧复合的“扩散机制”和正交试验结果可见,热轧复合温度和热轧总加工率必须大于某一确定值才能使界面达到有效结合。在一定条件下,道次加工率分配方式对界面结合强度具有重要影响。实践表明,头几道次加工率过小时,叠合的各单层板虽也在减薄,但仍然处于分离状态,对最终复合强度实际上没有

贡献,使热轧复合强度下降。这时道次加工率分配方式就处于重要地位。

热轧复合后层压板还要进行中间热处理,成品轧制以及最终热处理等工序。这样会使界面扩散更为充分,界面结合更为牢固。高阻尼铝合金层压板冷变形试验弯曲半径处各层结合良好,从未发现开裂分层现象,足以说明成品板各层间的结合是牢固的、可靠的。

参考文献

- 1 James A F *et al.* JOM, 1993, 45(6): 35–38.
- 2 傅祖铸. 有色金属板带生产. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992: 178–180.
- 3 正交试验法编写组. 正交试验法. 北京: 国防工业出版社, 1976.

HOT-ROLL BONDING STRENGTH AND INTERFACIAL CHARACTERISTICS OF HIGH DAMPING LAMINATE ALUMINIUM ALLOY SHEET

Liu Weigao, Zhou Shanchu

*Department of Materials Science and Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT The hot-roll bonding is a key procedure to produce high damping laminate aluminium alloy sheets. The influences of hot-roll bonding technologies involving heating temperature, holding time, total reduction ratio and reduction ratio per operation on interfacial bonding strength of various layers in the composite were studied by means of orthogonal test method. The interfacial characteristics between various bonding layers were analysed with metalloscope and scanning electron microscope. The optimum technologies for manufacturing hot-roll bonding high damping laminate aluminium alloy sheets were determined, that is, heating temperature $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, holding time 1 h, total reduction ratio 75%, summary reduction ratio of the first and second operations 35%.

Key words damping materials hot-roll bonding bonding strength interfacial characteristics

(编辑 彭超群)