

轧制

点阵强变形轧制镁/铝层合板波纹结合界面的形成

冯 光^{1,2,3}, 郜豪杰¹, 张 恒¹, 申依伦¹, 满亚谦¹

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心, 山西 太原 030024; 3. 太原理工大学 先进成形与制造技术中澳联合研究中心, 山西 太原 030024)

摘要: 点阵强变形轧制 (LSDR) 原理为解决镁/铝层合板轧制过程中存在的结合强度低、翘曲和边裂严重等技术问题有明显优势, 然而关于波纹结合界面的形成机理及特征尚缺少研究。通过有限元数值模拟分析了 LSDR 原理轧制下波纹辊对层合板的强非均匀变形作用, 解释了波纹结合界面的形成特点和沿界面应变的分布规律, 并通过轧制实验进行了验证。结果表明: LSDR 原理轧制镁/铝层合板时, 组元板尤其是镁合金板沿轧向 (RD) 和横向 (TD) 均经历了两次周期性变形, 促使结合界面处沿两方向形成波纹状结构, 且沿 RD 的波纹周期略大, 沿 TD 的波纹周期略小。沿 RD 和 TD 的波纹结合界面形成特点和形态的不同, 导致两方向的金属间化合物层分布与力学性能存在差异。研究内容为深入探索 LSDR 原理及制备高性能的镁/铝层合板提供了实验参考。

关键词: 点阵强变形轧制; 镁/铝层合板; 波纹; 结合界面; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.016

中图分类号: TG335.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0110-08

Formation of corrugated bonding interface for Mg/Al laminate by lattice severe deformation rolling

Feng Guang^{1,2,3}, Gao Haojie¹, Zhang Heng¹, Shen Yilun¹, Man Yaqian¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. TYUT-UOW Joint Research Center of Advanced Forming and Manufacturing Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Lattice severe deformation rolling (LSDR) principle has obvious advantages in solving technical problems such as low bonding strength, warping and severe edge cracking in Mg/Al laminate rolling process, however, the formation mechanism and characteristics of corrugated bonding interface are still understudied. Therefore, the severe non-uniform deformation effect of corrugated roll on the laminate rolled under LSDR principle was analyzed by finite element numerical simulation, and the formation characteristics of corrugated bonding interface and the distribution laws of strain along the interface were explained, which were verified by rolling experiment. The results show that when the Mg/Al laminate is rolled by the LSDR principle, the component plate, especially the Mg alloy plate, undergoes two periodic deformations along the rolling direction (RD) and the transverse direction (TD), which promotes the formation of corrugated structure in the bonding interface along two directions, and the corrugated period is slightly larger along RD and is slightly smaller along TD. The difference in the formation characteristics and morphologies of corrugated bonding interface along RD and TD leads to the difference in the distributions and mechanical properties of intermetallic compound layer along two directions. Thus, the research content provides the experimental reference for the in-depth exploration of LSDR principle and the preparation of high-performance Mg/Al laminates.

Key words: lattice severe deformation rolling; Mg/Al laminate; corrugation; bonding interface; mechanical properties

当前, 随着新一代信息技术、新能源、智能制

造等为代表的新兴产业的快速发展, 对材料的综合性能提出了更高要求^[1]。镁/铝层合板兼具了镁合金比强度高、比刚度高、电磁防护性好及铝合金成形性好、耐腐蚀、价廉等优点, 充分发挥了组元材料各自的性能优势, 在航空航天、汽车交通、国防军工及电子产品等领域有广阔的应用前景^[2]。

轧制复合因具有工艺简单、成本低、易于实现规模工业化生产等优势, 是目前制备镁/铝层合板

收稿日期: 2022-11-16; 修订日期: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074190); 山西省留学回国人员科技活动择优资助重点项目 (20220007); 山西省科技重大专项资助项目 (20181101008); 山西省研究生教育创新项目 (2022Y202)

作者简介: 冯 光 (1983-), 男, 博士, 副教授

E-mail: feng_guang@yeah.net

最常用的方法之一^[3]。鉴于镁合金室温下难变形的特点,通常采用热轧复合制备镁/铝层合板。张建军^[4]研究热轧铝/镁/铝层合板时发现,轧制温度过低,镁合金容易发生断裂,而轧制温度过高,待结合表面易发生氧化,不利于界面结合,因此,轧制温度的选取对层合板的成形质量具有重要影响;同样,轧制压下率也是决定层合板性能的关键因素。Nie H H等^[5]采用热轧复合法,在单道次33%压下率和4道次共71%压下率的条件下制备了铝/镁/铝层合板,发现随着累积压下率的增大,界面结合强度增强,但当压下率提高至一定程度后,结合强度的增加幅度减小。Wang D Y等^[6]通过在不同压下率条件下轧制镁/铝层合板发现,随着压下率的增加,层合板翘曲呈先减小后增加的趋势,镁合金板边裂也越严重。所以,加大轧制压下率以提高层合板结合强度时,板材的翘曲及边裂问题也不能忽略,否则将大幅度降低成材率、严重影响层合板的成形质量。此外,Jamaati R等^[7]在研究轧制金属铝/铝层合板时发现,初始板材厚度和轧制速度同样也很大程度地影响着板材界面结合性能的优劣。Huo P D等^[8]轧制铝/镁/铝层合板时发现,结合界面结构及受力状态也会造成层合板力学性能的改变。轧制温度、压下率、初始板材厚度、轧制速度及轧制道次等参数均是影响板材质量的重要因素,且异种金属本身性能上存在一定的差异,这共同造成了实际生

产中往往很难通过协调众多轧制工艺参数对层合板的综合性能进行有效控制。

点阵强变形轧制(Lattice Severe Deformation Rolling, LSDR)原理为制备高质量镁/铝层合板提供了新的路径^[9]。LSDR原理轧制镁/铝层合板方案如图1所示,首道次轧制通过特别设计的波纹轧辊对金属板材施加点阵分布的强非均匀变形作用,且轧制过程中难变形镁合金与波纹轧辊接触,铝合金与平辊接触。波纹轧辊促使镁合金板材局部位置发生强烈的塑性变形,从而减小镁合金与铝合金板材的形变差异,改善了层合板轧制过程中翘曲变形;点阵状分布的强变形区,使金属板材变形过程中被分割为许多小变形区域,这有利于减少由于过大塑性变形而引起的难变形镁合金表面生成的大量裂纹,尤其边部金属材料也被限制在有限的变形区,有效抑制了板材边部裂纹的扩展。同时,一系列局部位置强变形,为待结合表面氧化层的破裂及新鲜金属的流出提供了有利条件,有助于层合板结合强度的提高^[10]。之后,进行上、下轧辊均为平辊的2道次轧制,由于首道次轧制层合板镁合金表面呈特殊波纹状结构,因此,2道次平轧过程中层合板镁合金表面再一次产生局部强非均匀变形作用,进一步促使层合板界面形成牢固结合,最终得到结合界面为波纹结构而上、下表面均为平面的镁/铝层合板。

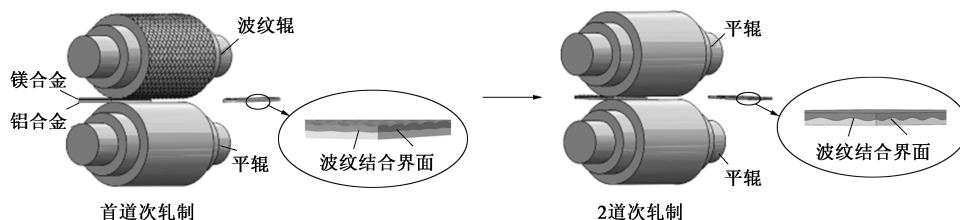


图1 LSDR原理轧制镁/铝层合板方案

Fig. 1 Scheme of Mg/Al laminate rolled by LSDR principle

前期对LSDR原理轧制镁/铝层合板的研究发现,层合板的结合强度、宏观质量和力学性能等均优于传统平轧^[9],而波纹辊及其作用下组元金属在复杂辊缝中的流动规律、以及复杂波纹界面的形成为决定性因素。因此,有必要研究2道次轧制过程中,三维波纹结合界面的形成与演变机理,借此实现对层合板综合性能的调控,制备出高质量的层合板。

本文基于LSDR原理,通过有限元数值计算研究了镁/铝层合板波纹结合界面的形成特点和应变分布规律;随后实施轧制实验,并对其制备的层合板

波纹结合界面进行了形貌观察及特征分析;测试了层合板拉伸力学性能并进行了相关讨论。

1 实验材料及方法

实验材料选用AZ31B镁合金和5052铝合金,其化学成分如表1所示。初始板材尺寸均为:120 mm(长度)×80 mm(宽度)×2 mm(厚度)。

基于LSDR原理实施了镁/铝层合板轧制实验,首先对镁合金和铝合金初始板材的待结合表面进行机械打磨以去除其表面氧化层和油污,并将处理好

表 1 AZ31B 镁合金与 5052 铝合金的化学成分
(%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloy and 5052 aluminum alloy (%, mass fraction)

材料	Mg	Cu	Ca	Mn	Si	Al	Zn	Cr	Fe
AZ31B 镁合金	余量	0.01	0.04	0.8	0.07	3.2	1.2	—	—
5052 铝合金	2.3	0.1	—	0.1	0.25	余量	0.1	0.25	0.4

的板材叠合、捆束制成原始坯料。首道次轧制前将坯料放入温度为 400 ℃ 的管式加热炉中真空保温 15 min, 保温结束后立即进行首道次轧制。首道次轧制在承载能力为 400 kN 的二辊可逆轧机上进行, 轧制速度为 $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 压下率为 35%, 实验设备如图 2 所示, 其中波纹辊的平均直径为 $\Phi 150 \text{ mm}$, 其表面波纹形采用正弦曲线规律变化且沿轧向 (Rolling Direction, RD) 和横向 (Transverse Direction, TD) 两方向上的参数相同, 波幅为 0.4 mm, 波长为 6.28 mm, 平辊直径为 $\Phi 150 \text{ mm}$ 。随后, 将首道次制备的镁/铝层合板置于温度为 300 ℃ 的加热炉中保温 30 min, 保温结束后立即进行 2 道次轧制。2 道次轧制时上、下轧辊均为平辊, 轧制压下率为 25%, 且轧制速度与首道次轧制相同; 最终制备的镁/铝层合板的厚度为 1.95 mm。

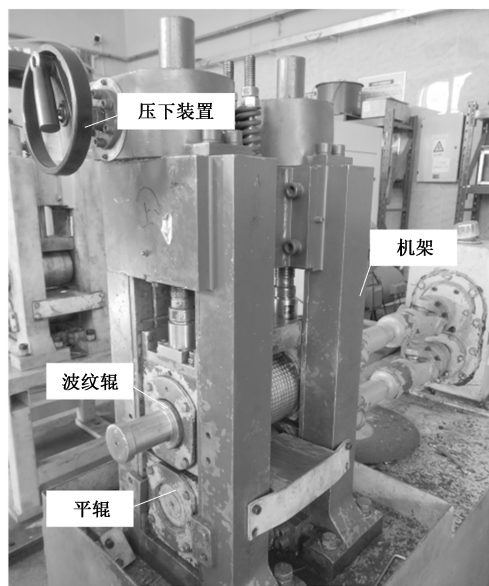


图 2 镁/铝层合板轧制实验设备

Fig. 2 Rolling experiment equipment of Mg/Al laminate

采用线切割沿镁/铝层合板 RD 和 TD 两方向进行金相取样, 且试样均取于板材中间部位, 并将各试样表面用粒度由粗至细的砂纸进行打磨处理, 用抛光液对测试表面进行抛光。然后通过三维轮廓形

貌仪对金相试样结合界面形貌进行观察, 并采用配有能谱仪 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) 的扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 对其界面微观结构特征进行测试分析。按照 ASTM E8/E8M—2013a^[11] 进行拉伸试样制样, 并对拉伸试样表面进行打磨, 尽可能地减小由于试样表面粗糙及氧化物对拉伸力学性能的影响, 随后在万能材料试验机上进行室温拉伸测试, 拉伸速率为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2 LSDR 原理轧制镁/铝层合板数值模拟

利用三维建模软件对 LSDR 原理轧制镁/铝层合板建模, 轧制模型如图 3 所示。首先, 将首道次轧制模型装配体导入 Deform-3D 有限元分析软件进行热力耦合计算; 然后, 将首道次轧制制备的层合板导入上、下轧辊均为平辊的轧制模型中进行 2 道次轧制数值模拟。为了保证有限元计算的精度与速度, 板材网格采用非线性带中间节点四面体单元, 且板材设置为弹塑性体而轧辊设置为刚体, 忽略其弹性变形。数值模拟过程中, 轧制压下率及温度的设置均与实验参数一致。

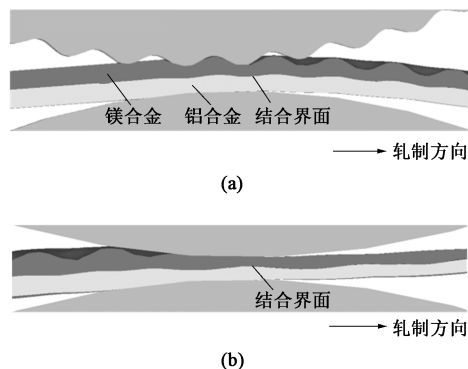


图 3 轧制模型

(a) 首道次 (b) 2 道次

Fig. 3 Rolling models

(a) The first pass (b) The second pass

图 4a 和图 4b 分别表示在结合界面上沿 RD 和 TD 提取每个轧制道次两个周期内的等效应变值。由图 4a 可知, 首道次轧制层合板沿 RD 结合界面的应变值呈波纹状变化, 波谷位置产生相对较大的应变, 最大等效应变值约为 0.40; 2 道次轧制沿 RD 结合界面的应变值也呈波纹状变化, 且板材的整体应变值较首道次应变值大, 界面波谷位置的最大等效应变值达 0.70。经 2 道次轧制, 层合板结合界面波纹两个周期的长度由首道次的 12.51 mm 增加至 19.80 mm, 其波纹周期

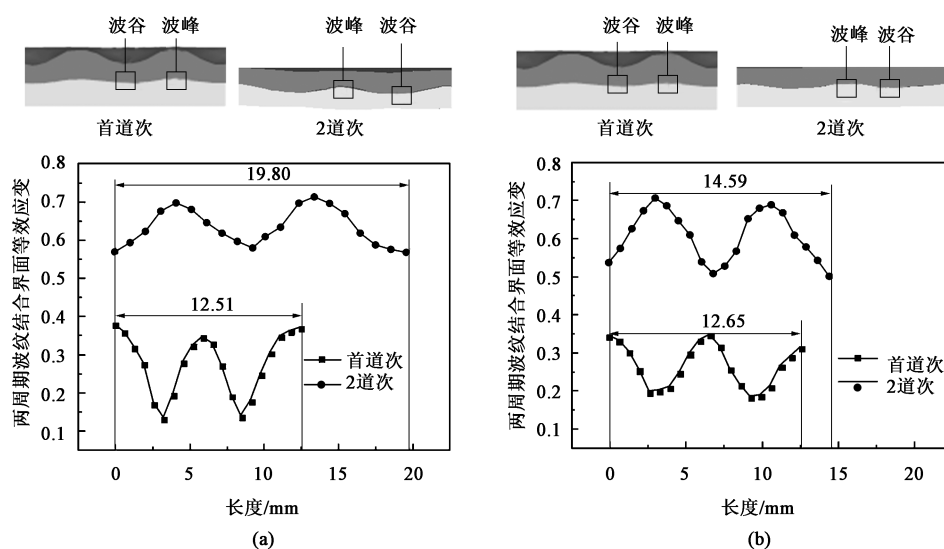


图 4 镁/铝层合板结合界面上沿 RD (a) 和 TD (b) 的等效应变值

Fig. 4 Equivalent strain values of bonding interface for Mg/Al laminate along RD (a) and TD (b)

长度显著增大。根据图 4b 可得, 首道次和 2 道次轧制形成的结合界面沿 TD 均呈周期性波纹状变化, 首道次轧制波谷位置产生的最大等效应变值约为 0.35; 2 道次界面波谷位置的最大等效应变约为 0.70。经 2 道次轧制, 沿 TD 的结合界面波纹两个周期的长度由首道次的 12.65 mm 仅增加至 14.59 mm, 相较沿 RD 的波纹周期长度的增加明显减小。首道次轧制过程中, 波纹辊对镁合金一侧沿 RD 和 TD 均施加周期性强非均匀变形作用, 促使层合板波谷处产生较大应变, 而波峰处应变较小, 导致镁合金表面及结合界面沿两方向形成波纹状结构; 2 道次平轧过程中, 层合板镁合金波纹状结构表面与平辊接触, 在轧制力作用下, 板材再一次受到周期性的强非均匀变形; 镁合金凸起的波峰位置将受到强烈挤压, 而凹陷的波谷位置受到的挤压较小, 因此, 对于首道次轧制应变小的波峰位置, 2 道次轧制该位置产生较大应变; 同样, 首道次轧制应变较大的波谷位置, 2 道次轧制时其应变相对较小。此外, 由于 2 道次轧制过程中层合板主要沿 RD 延伸, 导致结合界面波纹周期长度沿 RD 显著增大, 沿 TD 则变化较小。所以, LSDR 原理轧制镁/铝层合板时, 板材沿 RD 和 TD 均经历了两次周期性的变形作用, 最终结合界面沿两方向均形成波纹状结构, 且波纹周期长度沿 RD 相对较大, 沿 TD 较小。

3 结果与讨论

3.1 LSDR 原理轧制镁/铝层合板宏观特征

图 5 为镁/铝层合板实物图, 其中, 图 5a 为首

道次轧后的板材, 图 5b 为 2 道次轧后的板材。由图 5a 可见, 首道次轧后层合板镁合金表面沿 RD 与 TD 两方向形成周期性的波纹状结构, 且相互交叉的波纹状结构使表面呈现网格状形貌; 并通过对其表面波纹的两个周期长度进行测量, 沿 RD 的两个周期波纹长度为 12.85 mm, 沿 TD 的两个周期波纹长度为 12.55 mm, 两者与有限元模拟结果误差分别为 2.7% 和 0.2%, 这说明首道次轧制过程中, 波纹轧辊的特殊结构在镁合金表面得到良好复映, 同时证明了有限元模型的有效性。根据图 5b 可得, 2 道次轧后层合板的波纹状结构表面平整、光滑, 测量其镁合金表面残留的小波幅波纹的周期, 沿 RD 的两个周期波纹长度为 19.95 mm, 沿 TD 的两个周期波

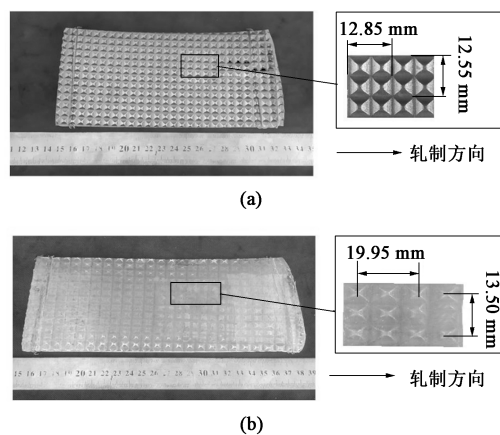


图 5 镁/铝层合板实物图

(a) 首道次 (b) 2 道次

Fig. 5 Physical drawings of Mg/Al laminate

(a) The first pass (b) The second pass

纹长度为 13.50 mm, 此结果与有限元模拟结合界面的波纹周期长度结果基本一致, 两者均表明 2 道次轧后层合板沿 *RD* 和 *TD* 两方向的两个周期波纹长度不同。

3.2 镁/铝层合板波纹结合界面形貌

图 6 为通过三维形貌仪拍摄的镁/铝层合板界面形貌, 其中图 6a 和图 6b 分别为首道次轧后层合板沿 *RD* 和 *TD* 的界面形貌图, 图 6c 和图 6d 为 2 道次轧后层合板沿 *RD* 和 *TD* 的界面形貌图。从图 6a 和图 6b 观察可得, 首道次轧制层合板镁合金表面沿 *RD* 和 *TD* 均形成周期性的波纹状结构, 同样结合界面沿两方向也呈现微小波纹状结构。根据图 6c 和图 6d 发现, 经过 2 道次轧制后镁合金表面的波纹状结构变为平面状, 而结合界面沿 *RD* 和 *TD* 两方向则形成明显的波纹状结构。图 6 中 I 代表首道次轧后板材界面波谷; II 代表首道次轧后界面波峰; III 代表 2 道次轧后界面波峰; IV 代表 2 道次轧后界面波谷, 结合首道次与 2 道次轧后层合板的界面形貌可得, 首道次轧后板材界面的波谷 (图 6a 和图 6b 的 I) 转变为 2 道次轧后板材结合界面的波峰 (图 6c 和图 6d 的 III); 同样首道次轧后板材界面的波峰 (图 6a 和图 6b 的 II) 转变为 2 道次轧后板材界面的波谷

(图 6c 和图 6d 的 IV)。这是因为: 层合板轧制过程中, 板材经历了两次强非均匀变形作用, 且两次局部强变形发生位置不同, 造成结合界面波纹状结构发生显著变化^[12]。这进一步证明了 LSDR 原理轧制有利于诱发结合界面暴露更多新鲜金属, 为实现结合界面高强度冶金结合提供了有利条件。此外, 结合界面的三维波纹状结构增加了层间接触面积, 这不仅有助于层合板界面结合强度的提高, 而且也有益于获得优异的拉伸与弯曲等性能^[13]。然而值得注意的是, 2 道次轧后镁/铝层合板沿 *RD* 和 *TD* 结合界面波纹状结构存在显著差异, 沿 *RD* 的结合界面间形成的波纹周期长度较大, 而沿 *TD* 的波纹周期长度相对较小。此结果与 2 道次平轧过程中层合板沿 *RD* 和 *TD* 的变形程度不同有关。2 道次平轧时层合板在变形区内沿厚度方向被压缩, 板材金属材料会沿 *RD* 和 *TD* 两方向发生流动, 但轧辊圆弧面的形状使得金属材料沿 *RD* 受到的流动阻力小, 因此, 板材更容易沿 *RD* 向前延伸, 而沿 *TD* 的延伸较小, 最终层合板形成的波纹结合界面沿 *RD* 的波纹周期长度较大, 而沿 *TD* 的波纹周期长度较小。

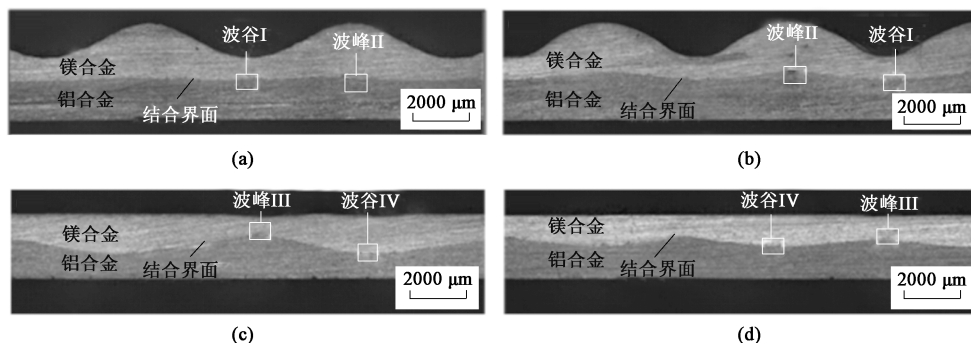


图 6 镁/铝层合板界面形貌

(a) 首道次, *RD* (b) 首道次, *TD* (c) 2 道次, *RD* (d) 2 道次, *TD*

Fig. 6 Interfacial morphologies of Mg/Al laminate

(a) The first pass, *RD* (b) The first pass, *TD* (c) The second pass, *RD* (d) The second pass, *TD*

3.3 镁/铝层合板波纹结合界面微观特征

图 7 为 2 道次轧制镁/铝层合板的波纹结合界面不同位置的 SEM 与 EDS 线扫描 (图 7a、图 7c、图 7e 和图 7g 中白线) 图像。根据图 7a~图 7d 所示, 镁/铝层合板沿 *RD* 结合界面的波峰和波谷位置均出现明显的金属间化合物层, 总体厚度约为 12 μm , 金属间化合物分为明显的两层, 且靠近镁合金一侧较薄, 靠近铝合金一侧相对较厚。热轧复合镁/铝层合板结合界面金属间化合物一般存在两种新相, 且靠近铝合金一侧相的激活能相对较小, 生长所需的

能量较少, 其生长得更快, 厚度也相对较大^[14]。沿 *RD* 结合界面的波峰及波谷位置的金属间化合物层均发生断裂, 断裂的金属间化合物层向基体两侧发生偏转, 分别嵌入镁合金和铝合金基体。金属间化合物是在 2 道次轧制前加热保温过程中生成的, 且生成的金属间化合物层沿结合界面呈均匀连续分布, 然而由于其固有脆硬性, 2 道次轧制过程中无法承受层合板整体的塑性延伸, 导致金属间化合物层发生了断裂^[15]。同时, 断裂的金属间化合物层之间形成新的结合区域, 结合界面间未发生明显的间隙,

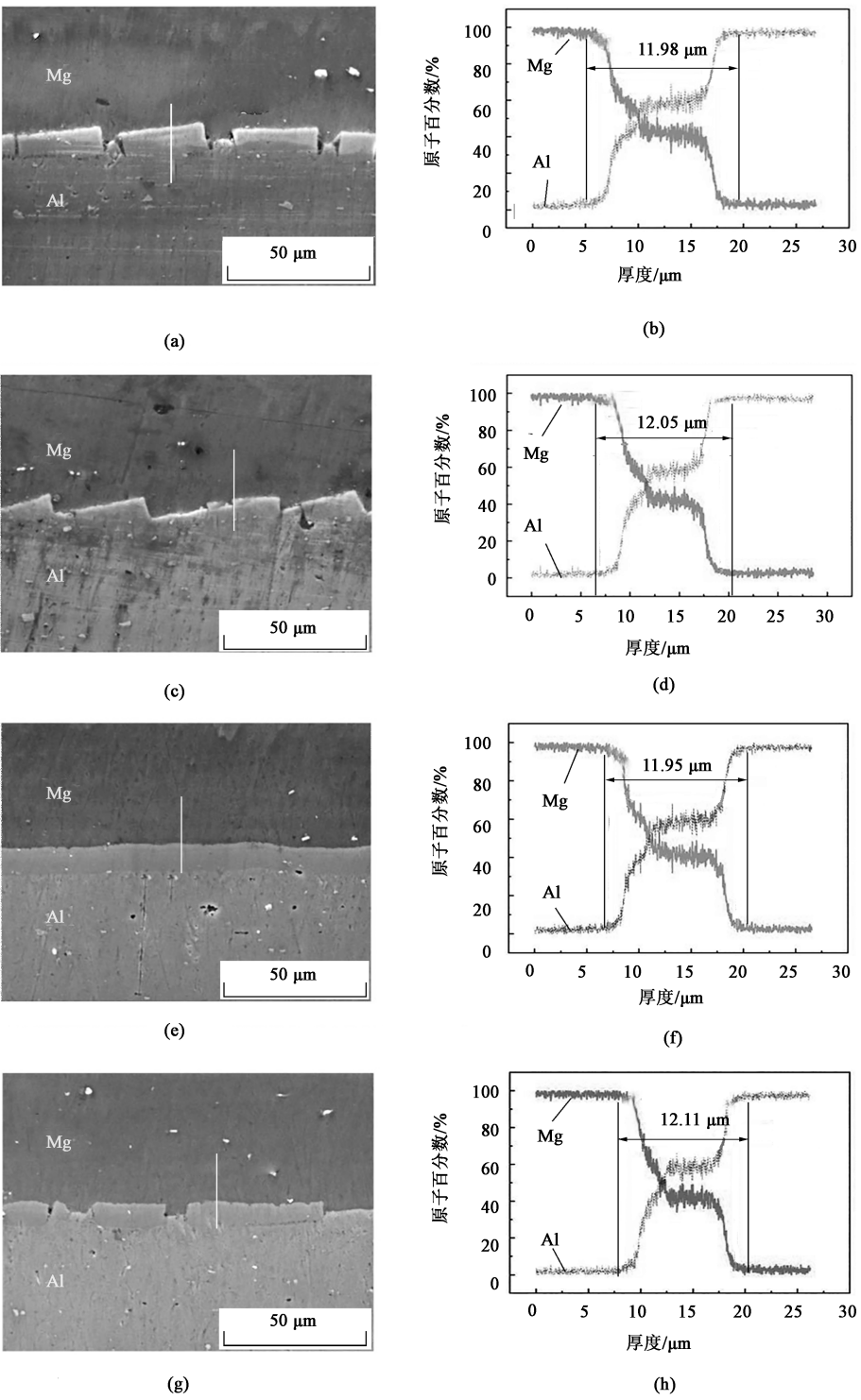


图 7 2 道次轧制镁/铝层合板的波纹结合界面不同位置微观扫描图像

(a) RD 波峰, SEM (b) RD 波峰, 线扫描 (c) RD 波谷, SEM (d) RD 波谷, 线扫描

(e) TD 波峰, SEM (f) TD 波峰, 线扫描 (g) TD 波谷, SEM (h) TD 波谷, 线扫描

Fig. 7 Microscopic scanning images at different positions of corrugated bonding interface for Mg/Al laminate rolled in two passes

(a) RD peak, SEM (b) RD peak, line scanning (c) RD trough, SEM (d) RD trough, line scanning

(e) TD peak, SEM (f) TD peak, line scanning (g) TD trough, SEM (h) TD trough, line scanning

仍保持良好结合状态。

通过图 7e~图 7h 可得, 镁/铝层合板沿 *TD* 结

合界面的波峰和波谷位置同样也存在厚度约为 12 μm 的金属间化合物层。但是, 沿 *TD* 的金属间

化合物的层分布形态与沿 RD 的存在显著差异,沿 TD 的结合界面的金属间化合物层仅在波谷位置发生断裂,且波峰位置的金属间化合物层呈连续状分布。根据图 4 可知,2 道次轧制层合板结合界面的波纹周期长度沿 RD 显著增大,而沿 TD 变化较小。因此,沿 RD 的波纹结合界面被大幅度拉长,造成脆硬的金属间化合物层在波峰和波谷位置均发生明显断裂现象;而沿 TD 的波纹结合界面较小的变形维持了界面波峰位置金属间化合物层的连续性,仅在波谷位置发生局部断裂。

3.4 镁/铝层合板拉伸性能

图 8 为基于 LSDR 原理经 2 道次轧制的镁/铝层合板拉伸试样的拉伸应力-拉伸应变曲线,结果表明,镁/铝层合板沿 RD 的极限抗拉强度为 265.1 MPa,而伸长率仅为 3.87%,表现出明显的加工硬化。一方面归因于轧制过程中层合板经历了两次强非均匀变形作用;另一方面是因为轧后层合板未进行去应力退火处理^[16]。层合板沿 TD 的极限抗拉强度达到 353.58 MPa,伸长率为 9.97%,两者均明显高于沿 RD 。此结果与结合界面波纹周期长度的不同有关,沿 RD 的较大周期长度的波纹状结构,造成界面金属间化合物层发生明显断裂,断裂的金属间化合物层限制了镁/铝层合板沿 RD 的极限抗拉强度和伸长率^[17];而沿 TD 的相对长度较小的波纹周期维持了界面中间化合物层的连续性,有利于层合板拉伸过程中协调变形。通过 LSDR 原理轧制镁/铝层合板,组元板尤其是镁合金板沿 RD 和 TD 经历了两次强非均匀变形作用,有利于层合板沿两方向均呈现较高的抗拉强度,且通过合理调整轧辊沿 RD 和 TD 的波纹周期,有助于主动控制板材沿两个方向上的性能^[18]。

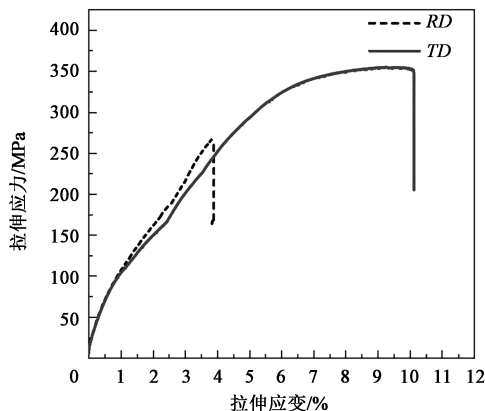


图 8 2 道次轧制镁/铝层合板的拉伸应力-拉伸应变曲线
Fig. 8 Tensile stress-tensile strain curves of Mg/Al laminate rolled in two passes

4 结论

(1) LSDR 原理轧制镁/铝层合板过程中,波纹轧辊首道次轧制时,对镁合金一侧施加强非均匀变形作用,促使镁合金板材表面和结合界面沿 RD 和 TD 产生周期性波纹状结构;2 道次轧制时,平辊对镁合金一侧波纹状结构施压,使板材再次受到强非均匀变形作用,最终形成层合板结合界面特殊的、复杂的波纹状结构。

(2) 轧制过程中,层合板主要沿 RD 延伸,导致结合界面沿 RD 的波纹周期长度较大,沿 TD 的波纹周期长度较小。沿 RD 的界面波峰和波谷处金属间化合物层均发生明显断裂;而沿 TD 的界面波峰处金属间化合物层呈连续分布,仅在波谷位置发生断裂。

(3) 镁/铝层合板拉伸力学性能测试结果表明,层合板沿 RD 的极限抗拉强度为 265.1 MPa,而沿 TD 的极限抗拉强度达到 353.58 MPa。可见,层合板沿 RD 和 TD 结合界面波纹状结构的差异也影响着两方向的力学性能。

参考文献:

- [1] 谢曼,干勇,王慧. 面向 2035 的新材料强国战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22 (5): 1-9.
Xie M, Gan Y, Wang H. Research on new material power strategy by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22 (5): 1-9.
- [2] Hu W, Ma Z W, Ji S D, et al. Improving the mechanical property of dissimilar Al/Mg hybrid friction stir welding joint by PIO-ANN [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 53 (18): 41-52.
- [3] 王涛,齐艳阳,刘江林,等. 金属层合板轧制复合工艺国内外研究进展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52 (6): 42-56.
Wang T, Qi Y Y, Liu J L, et al. Research progress of metal laminates roll bonding process at home and abroad [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52 (6): 42-56.
- [4] 张建军. Al/Mg/Al 热轧复合板的制备及其微观组织和力学性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
Zhang J J. Preparation of Al/Mg/Al Laminated Composite Fabricated by Hot Rolled and Investigation of Microstructure and Mechanical Properties [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [5] Nie H H, Liang W, Zheng L W, et al. The microstructure, texture and mechanical properties of the rolled Al/Mg/Al clad sheets [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25 (11): 4695-4705.
- [6] Wang D Y, Cao X Q, Wang L F, et al. Influence of hot rolling on the interface microstructure and mechanical properties of explosive welded Mg/Al composite plates [J]. Journal of Materials Re-

- search, 2017, 32: 863-873.
- [7] Jamaati R, Toroghinejad M R. Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527 (9): 2320-2326.
- [8] Huo P D, Li F, Wang Y, et al. Corrugated interface structure and formation mechanism of Al/Mg/Al laminate rolled by hard plate [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33 (4): 1038-1053.
- [9] Feng G, Wang L, Gao H J. Lattice severe deformation rolling (LSDR) for bimetal laminated composite preparation [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2023, 38 (4): 409-415.
- [10] Li X B, Zu G Y, Wang P. Microstructural development and its effects on mechanical properties of Al/Cu laminated composite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (1): 36-45.
- [11] ASTM E8/E8M—2013a, 金属材料拉伸试验方法 [S]. ASTM E8/E8M—2013a, Standard test methods for tension testing of metallic materials [S].
- [12] Wang T, Wang Y L, Bian L P, et al. Microstructural evolution and mechanical behavior of Mg/Al laminated composite sheet by novel corrugated rolling and flat rolling [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 765: 138318.
- [13] 万祥明, 刘剑雄, 魏燕, 等. 热处理温度对 Nb/Re 层状复合材料界面结构及力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (3): 324-330.
- Wan X M, Liu J X, Wei Y, et al. Interface structure and mechanical properties of Nb/Re layered composites with different heat treatment temperature [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (3): 324-330.
- [14] Wang P J, Chen Z J, Hu C, et al. Effects of annealing on the interfacial structures and mechanical properties of hot roll bonded Al/Mg clad sheets [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 792: 139673.
- [15] Li S, Luo C, Muhammad-Umar Bashir, et al. Interface structures and mechanical properties of corrugated+flat rolled and traditional rolled Mg/Al clad plates [J]. Rare Metals, 2021, 40: 2947-2955.
- [16] Zhang N, Wang W X, Cao X Q, et al. The effect of annealing on the interface microstructure and mechanical characteristics of AZ31B/AA6061 composite plates fabricated by explosive welding [J]. Materials & Design, 2015, 65: 1100-1109.
- [17] Xu Y, Ke L M, Ouyang S, et al. Precipitation behavior of intermetallic compounds and their effect on mechanical properties of thick plate friction stir welded Al/Mg joint [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64 (10): 1059-1069.
- [18] Mao L H, Liu C M, Gao Y H, et al. Microstructure and mechanical anisotropy of the hot rolled Mg-8.1Al-0.7Zn-0.15Ag alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 701: 7-15.

AFDEX

INTELLIGENT METAL FORMING SIMULATOR

智能化金属成形模拟软件

◆**易用**: 简单、友好, 且在不断优化的操作界面, 大量的学习向导以及应用实例, 使工程师不但上手轻松, 更不会在使用中气馁, AFDEX 可以帮助您轻松分析锻造工艺。

◆**准确**: 超过 500 个实际生产应用案例, 包含复杂的冷温热多工位锻造、闭塞锻造、径向锻造、辊锻、辗环等几乎所有锻造成形工艺的模拟。AFDEX 的准确性和能力, 已经在全球百余家制造企业的生产中得到了验证。

◆**各种结果同时展示**: AFDEX 的后处理平台, 可以在运算的同时, 实时显示各种结果: 变形形状、节点的速度、应变、应变率、应力、金属流线、某点流动、边界节点应力、界面应力、温度分布、损伤、磨损、体积变化、载荷等。

◆**自动分析多工步工艺, 轻松进行模具分析**: AFDEX 可以自动对多工位的锻造工艺进行模拟, 无需用户的干预。模具分析与优化是工程师的重要工作, 在 AFDEX 中, 您只需要点击两下鼠标, 即可以对模具进行模拟分析, 结果实时展示给用户。

◆**丰富的材料库与设备模型**: AFDEX 中提供了丰富的开放式材料数据库, 包括美日德标的各种黑色金属、轻合金以及模具钢等两百余种材料数据。用户也可根据自己的需要定制材料库。另外, AFDEX 集成了实际生产中常用的设备模型, 包括

液压机、机械压力机、螺旋压力机、锻锤等。可以满足用户各种成形条件下模拟的需要。

◆**适合多种人群使用**: AFDEX 不强迫锻造工程师了解软件执行的相关理论和有限元方法, 在 AFDEX 的开发理念中, 即使是新手也能轻松的学习和使用它。同时 AFDEX 提供了多国语言界面的支持。

◆**卓越的成本效益**: AFDEX 更了解中国, 专为中国用户而制定的低成本运作政策, 显著降低了用户的采购及使用成本, 具有卓越的成本效益。

◆**我们能够提供的不仅是软件**: AFDEX 一直坚持的开发商与服务商一体化, 可以提供更好的本土化服务与定制服务。中韩技术团队, 为您提供终身的维护服务。在软件之外, 我们更可以为您提供工艺技术开发与制造服务, 协助您进行工艺开发、优化设计、学术研究、装备与生产线建设。

BRIMET 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司

地址: 北京市海淀区学清路 18 号 2 层 邮编: 100083

电话: 010-82415037, 82415024

传真: 010-62943911

E-mail: info@afdex.com.cn, afdexcn@gmail.com

HTTP://WWW.AFDEX.COM.CN

(以上数据和资料由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司提供)