



Al/Mg 双层方管渐进扩径成形的 数值模拟及实验研究

赵健行¹, 胡红军¹, 张 威¹, 赵 辉¹, 田 野¹, 张丁非²

(1. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 为了研究渐进扩径成形(Progressive expanding forming, PEF)工艺对 Al/Mg 双金属复合方形管材成形过程多物理场及微观组织的影响, 根据 PEF 工艺的特点, 采用 DEFORM-3D 软件建立了三维热力耦合的有限元数值模型并进行模拟, 在 PEF 工艺实验中开展了微观组织表征及硬度测试, 研究了预热温度对成形载荷及坯料形变的影响、挤压速度对坯料温度场及等效应力的影响, 以及不同坯料预热温度对 Al/Mg 双金属微观组织的影响。结果表明: PEF 工艺可以产生大塑性变形(Severe plastic deformation), 有效地细化双层方管的微观组织, 并且能够直接一次形成壁厚为 3 mm 的 Al/Mg 双金属复合方管; 坯料预热温度从 340 °C 上升到 430 °C 时, 成形载荷呈下降趋势, 下降了约 28.6%; 挤压速度越快, 挤压剪切扩径区的等效应力越大; 在 Al/Mg 双金属复合界面过渡区会形成 $Mg_{17}Al_{12}$ 、 $MgAl$ 、 Mg_2Al_3 三种铝镁的化合物, 结合层硬度较高; 当挤压速度为 10 mm/s、挤压温度为 400 °C、扩径角为 150° 时, 方形管材 Al/Mg 结合层的缺陷较小, 结合层的冶金结合效果理想, 硬度约为 138.14 HV。

关键词: 双金属; 方形管材; 数值模拟; 渐进扩径成形; 微观组织

文章编号: 1004-0609(2022)-11-3268-12

中图分类号: TG146.22

文献标志码: A

引文格式: 赵健行, 胡红军, 张 威, 等. Al/Mg 双层方管渐进扩径成形的数值模拟及实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(11): 3268–3279. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42740

ZHAO Jian-xing, HU Hong-jun, ZHANG Wei, et al. Numerical simulation and experimental studies on progressive expanding forming of Al/Mg double-layer square tube[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(11): 3268–3279. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42740

镁合金是目前实际工程应用中最轻的金属结构材料, 在电子 3C、交通运输、航空航天和能源领域有着广阔的应用前景^[1-3]。镁合金的晶体结构是密排六方(Hexagonal close-packed, HCP)晶体结构, 因此镁合金在室温下塑性较差^[4-6]。另外, 镁合金的耐腐蚀性也较差, 因为其具有应力腐蚀开裂的倾向, 并且产生的氧化膜疏松多孔, 不能提供有效的防腐功能。铝合金同样是较轻的金属结构材料, 兼

有良好的塑性及力学性能; 在室温、酸碱中性的条件下, 铝合金表面会形成较为致密的氧化膜, 且具有自修复的优点, 可防止铝合金在空气中被腐蚀^[7]。

Al/Mg 双金属管材结合了铝合金和镁合金的优良性能, 具有镁合金的减震性能、较高的承受冲击载荷性能以及铝合金的耐腐蚀性、良好的导电性和导热性。因此, 近年来双金属管材在各类工程应用

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071042, 51771038); 重庆英才项目(CQYC202003047)

收稿日期: 2021-12-06; 修订日期: 2022-01-18

通信作者: 胡红军, 教授, 博士; 电话: 18996100916; E-mail: hhj@cqut.edu.cn

中越来越多。双金属管材的二次加工工艺方法有很多, 例如挤压^[8], 焊接^[9-10], 轧制^[11-12]等。SUN 等^[13]采用爆炸焊接法制备了双金属界面结合良好, 界面呈现波状或直线状且强度高的 Fe/Al 双金属复合管, 并且采用液压胀形工艺实现了三通复合管成形, 得到良好的界面结合。PARAMSOTHY 等^[14]采用热挤压加工 Al/Mg 双金属复合材料, 发现复合材料产品中 AZ31 镁合金的刚度和断裂应变均得到了改善, AA5052/AZ31 复合材料具有比 AZ31 镁合金更高的极限强度和韧性。YU 等^[15]通过数值模拟和实验研究了 5A02 铝合金管在电磁成形过程中的动态变形行为和变形控制, 提出了一种两步 EMF (Electro-magnetic forming) 方法实现了直边与转角之间的协调变形, 解决了圆管坯料制造方形管材过程中转角处难以填充的问题。战立强等^[16]采用有限元法研究了 AZ31 镁合金与 7475 铝合金热膨胀系数的差异, 开发了一种气压胀形-冷缩复合工艺, 制备出了双金属界面结合紧密的复合方管。将铝合金包覆在镁合金表面可以制备出兼具镁合金与铝合金性能优势的复合材料, 这层包覆材料阻碍了镁合金与环境介质相接触, 使镁合金不受环境介质腐蚀, 同时又可改善镁合金的加工成型性能。通过热挤压成形镁/铝合金双层管可以实现镁合金和铝合金的优势互补, 既满足了耐腐蚀及高强度的要求又实现了轻量化。

常见双金属加工工艺所制备的复合管材多为圆形复合管材, 不能满足方形双层复合管材日益增长的需求和应用。双层复合方形管材在成形过程中存在以下难点: 双层复合方形管材的转角难以充满, 坯料受到模具、芯轴和摩擦力的作用, 塑性变形主要发生在转角处, 易造成双层方管横截面上壁厚不均匀; 成形过程中双层方管的转角处受到的应力-应变较大, 易导致转角处的金属破裂; 双层方管的壁厚越薄, 其横截面的临界应力越小, 管壁就越容易出现向内凹陷。当前双层方形管材多采用挤压+铸造或挤压+焊接的方式进行加工, 对双金属坯料直接挤压成形双层复合方管的研究极少。针对上述情况, 本文作者提出了将双金属的圆管坯料直接挤压成形双层复合方管的研究。

本文采用包括正挤压和连续两次剪切的渐进扩径成形 (Progressive expanding forming, PEF) 工艺,

直接一步加工出 Al/Mg 双金属复合方管; 采用 DEFORM-3D 软件建立了基于三维有限元热力耦合的数值模型, 研究了 PEF 过程中坯料预热温度对成形载荷及坯料形变的影响, 以及挤压速度对坯料温度场及等效应力的影响; 研究了坯料预热温度对 Al/Mg 双金属及其结合层微观组织、以及结合层铝镁的化合产物的影响, 测试了结合层及基体的硬度分布; 通过数值模拟和实验获得了较优化的 PEF 工艺参数。

1 实验

1.1 实验材料

双金属复合挤压成形过程中, 两种金属材料的性能、导热率、熔点等因素都直接影响着双层方管的成形质量以及使用性能。因此, 选择不同金属材料进行复合成形时应该综合考虑其各自的性能。实验采用 AZ31 镁合金为内部被包覆管, AA6063 铝合金为外层包覆管。AZ31 镁合金和 AA6063 铝合金的化学成分如表 1 所示。将镁合金坯料制成长度为 80 mm、外径为 27.5 mm、内径为 16.5 mm 的圆管坯料。将铝合金坯料制成长度为 80 mm、外径为 39.5 mm、内径为 27.7 mm 的圆管坯料。对镁合金和铝合金样品的表面进行抛光, 将样品分别放入 65 ℃ 左右的碱性溶液中浸泡 3 min, 并进行超声清洗; 清水洗净后用 15%~20% 的 HCl 或 H₂SO₄ 溶液清洗表面 2 min, 再次用清水洗净并用酒精清洗吹干; 去除表面杂质和氧化物后, 将铝合金圆管坯料套在镁合金圆管坯料外面, 在 300 ℃ 下退火 12 h。利用热电偶对模具温度进行动态测量。图 1 所示为挤压设备和 Al/Mg 组成的复合管材坯料。

1.2 PEF 成形工艺模拟与实验

图 2(a) 所示为 Al/Mg 复合方管 PEF 的三维有限

表 1 AZ31 镁合金和 AA6063 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloy and AA6063 aluminium alloy

Material	Mass fraction/%						
	Mg	Si	Cu	Zn	Mn	Fe	Al
AZ31	Bal.	0.05	0.01	0.63	0.8	0.05	3.2
AA6063	0.58	0.43	<0.01	0.016	<0.01	0.06	Bal.

元热力耦合模型及模具结构。图2(b)所示为凹模的放大详图。凹模包括三个部分：第一部分为墩粗区；第二部分为挤压剪切扩径区，在该区域镁合金和铝合金通过方形凹模和方形芯轴相互配合，进行挤压和两次剪切扩径，即通过挤压和连续两次剪切的渐进扩径复合成形方法来进行Al/Mg复合方管的塑性成形加工；第三部分为尺寸精整区。扩径比定义为通过PEF工艺下形成的管的内径(D_3)与管坯的内径(D_1)的比值。扩径角 α 定义为挤压剪切扩径区和墩粗区之间所成的夹角。图2(c)和(d)所示为芯轴的放大图，墩粗区存在芯轴由横截面圆形向方形变

化的过渡区域(Transition region)。数值模拟中使用的参数包括AZ31镁合金和AA6063铝合金的材料特性、坯料温度参数、模具与工件的摩擦因数以及边界条件等，相关数值模拟及实验数据如表2所示^[17]。

1.3 双层方管微观组织结构表征及硬度测试

1) 光学显微组织观察，Al/Mg双金属挤压实验结束后，将Al/Mg双金属样品切割成高度为10 mm的样品，然后采用徕卡DMI5000M对结合层进行光学显微观察；样品用腐蚀液(5 g 苦味酸+5 g 冰

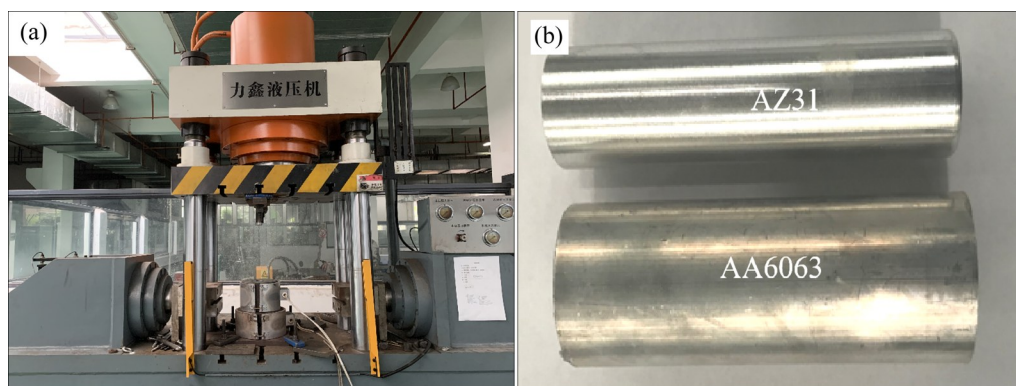


图1 双层方管PEF成形设备、AZ31镁合金和AA6063铝合金初始圆管形坯料照片

Fig. 1 Photos of double-layer square tube PEF forming equipment(a), initial round tube billets of AZ31 magnesium alloy and AA6063 alloy(b)

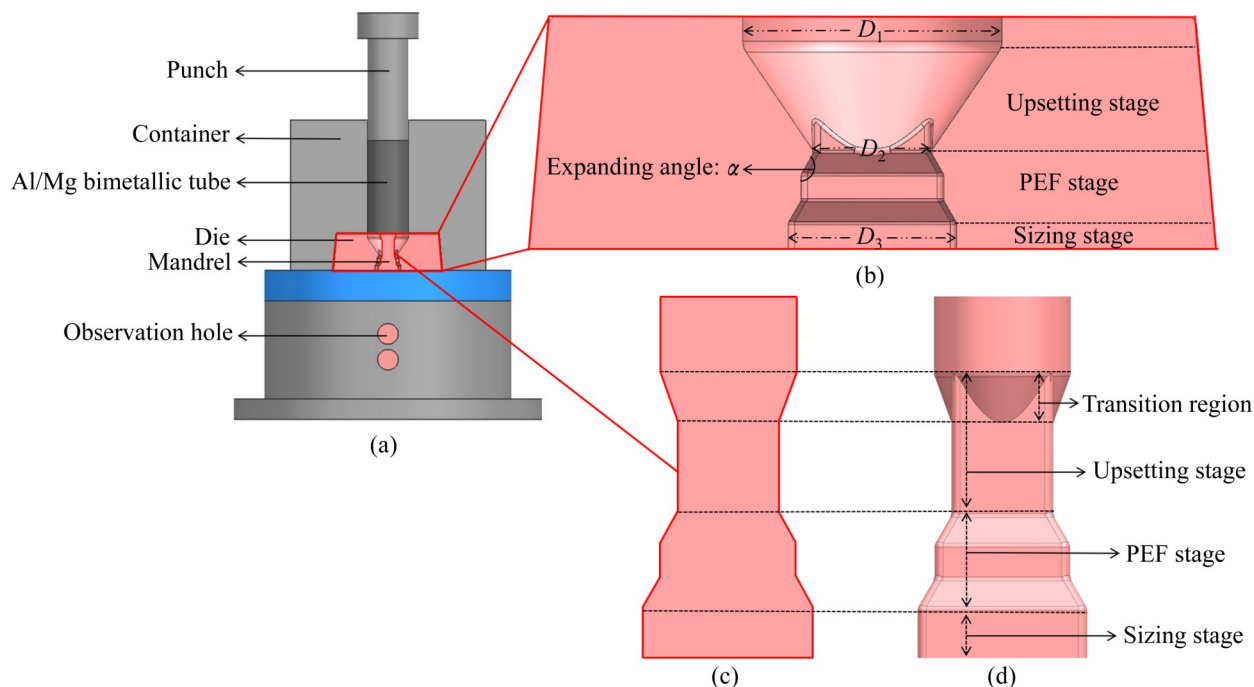


图2 PEF工艺模具

Fig. 2 Die of PEF process: (a) Integral die; (b) Enlarged views for die; (c), (d) Mandrel

表 2 双层方管 PEF 成形的数值模拟及实验参数

Table 2 Numerical simulation and experimental parameters of PEF process for manufacturing double-layer square tube

Parameter	Value
Inner diameter of AZ31/mm	16.5
Outer diameter of AZ31/mm	27.5
Length of AZ31/mm	80
Inner diameter of AA6063/mm	27.7
Outer diameter of AA6063/mm	39.5
Length of AA6063/mm	80
D_1 /mm	40
D_2 /mm	18
D_3 /mm	26
Extrusion velocity/(mm·s ⁻¹)	1, 5, 10, 15
Extrusion temperature/°C	340, 370, 400, 430
Extrusion-shearing-expanding angle, α (°)	150
Coefficient of linear expansion/°C	26.8×10^{-6}
Friction coefficient	0.12
Thermal conductivity between billet and die/(N·°C ⁻¹ ·S ⁻¹ ·mm ⁻²)	11
Simulation type	Lagrangian incremental

乙酸+10 mL 水+100 mL 乙醇)进行抛光和腐蚀, 然后对样品的表面进行微观组织结构观察。

2) 扫描电子显微镜观察及 EDS 线扫描, 对 SEM 样品和硬度测试样品进行研磨和抛光, 对成形区的结合层进行 SEM 观察及 EDS 分析; 首先利用线切割技术对 Al/Mg 双金属样品进行切割, 然后用砂纸对样品进行磨制; 制样完成后在 ZEISS SIGMAHD 场发射电镜上采用 X-MAX 50 大面积能谱(EDS)系统进行 EDS 线扫描, 分析双金属结合层元素浓度分布。

3) 显微硬度测试, 实验设备为 HVS-1000 型数显显微硬度计, 加载的载荷为 0.98 N, 保压时间为 10 s; 沿结合层方向取 11 组作为测试点, 每组测试点沿管材径向取 3 个点, 共计 33 个点对成形区的样品表面进行硬度测试。

2 结果与分析

2.1 预热温度对成形载荷及坯料形变的影响

图 3 所示为不同坯料预热温度(340 °C、370 °C、400 °C、430 °C)下 Al/Mg 双层复合方管在 PEF 过程中的成形载荷-行程曲线。墩粗阶段之前, 因为仅受到双金属坯料和挤压筒、芯轴之间的摩擦, 所以

载荷几乎为零。墩粗阶段, 由于圆管双金属坯料发生塑性形变, 载荷明显开始上升, 并且墩粗阶段受到向芯轴方向的挤压力, 且存在过渡区域; 此时靠近芯轴处的 AZ31 镁合金坯料受到较大的拉应力和摩擦力, 导致 AA6063 铝合金坯料会先被挤出。挤压剪切扩径阶段, 产生大塑性变形, 圆管状双金属坯料开始向转角处流动, 坯料开始转变为方形, 载荷上升趋势明显变大。在双层管材尺寸精整阶段, 载荷在一定范围内稳定的上下波动状。可见, 不同坯料预热温度下载荷的变化趋势基本一致。成形过程中的温度对于载荷的影响比较大。在一定范围内温度越高, 载荷越低。挤压剪切扩径阶段, 坯料预热温度为 340 °C 时的成形载荷相对于 430 °C 时的成形载荷增大了 28.6%。根据 PEF 的特点将其分为普通正挤压和多次等通道挤压。考虑摩擦的 PEF 挤压载荷计算公式见式(1)^[18], 一般情况下材料的屈服强度随温度的升高而降低, 因此挤压载荷随温度升高而降低, 这与图 3 的结果是一致的。由于挤压温度的升高, 材料内部更多的滑移系被激活, 导致材料的塑性提高, 从而减低了其变形抗力。在整个成形过程中, 载荷呈上升趋势。成形前期处于普通挤压阶段, 受到的外部因素相对较少, 未发生较大的形变, 因此材料所需要的载荷相对较小; 当进入到

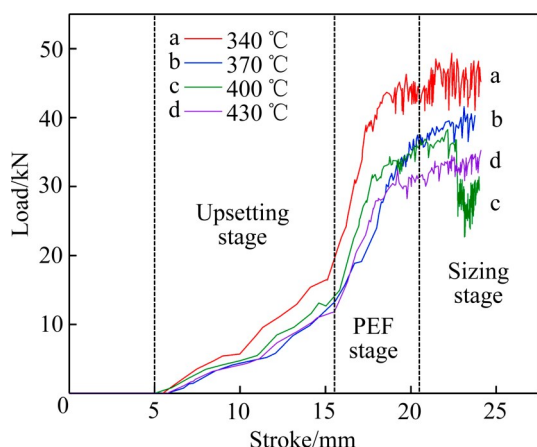


图3 不同坯料预热温度下 PEF 成形过程中的载荷-行程曲线

Fig. 3 Load-stroke curves during PEF process at different billet preheating temperatures

定径以及剪切变形阶段时,材料由于受到摩擦、模具结构的影响而产生大变形,载荷呈上升趋势;当成形制件完成定径后,载荷曲线趋于平稳。

$$p'_j = \sigma_s \left[\left(1 + \frac{\tan \alpha}{f} \right) (\lambda^{f \cot \alpha} - 1) + \frac{4n \cot(\beta/2 + \psi/2) + 2n\psi \csc(\beta/2 + \psi/2)}{\sqrt{3}} \right] \quad (1)$$

式中: p'_j 为 PEF 挤压载荷; σ_s 为在挤压温度下的抗拉强度(屈服强度); λ 为挤压比; a 和 b 为常数; α 为正挤压区的模角; f 为摩擦因数; β 为转角大小; ψ 为转角内部倒角; n 为转角数量。

选取挤压速度为 10 mm/s, 图 4(a)~(d) 所示分别为坯料预热温度为 340 °C、370 °C、400 °C、430 °C 时 Al/Mg 双层方管 PEF 过程坯料变形图。在坯料预热温度为 340 °C 时, 镁合金塑性较差, 挤压剪切扩径过程中镁合金坯料发生明显的破裂(见图 4(a) 圆圈内); 在坯料预热温度为 430 °C 时, Al/Mg 复合双金属方管能够形成较好的结合层, 但较高的温度会使外层铝合金厚度变薄, 导致在成形区产生缺陷(见图 4(d) 圆圈内)。因此, 根据数值模拟结果确定较优化的坯料预热温度为 370 °C 和 400 °C。

2.2 挤压速度对坯料温度场及等效应力的影响

在双金属复合成形过程中, 以相当大的速度进行挤压会导致挤压剪切处成形时间过短, 一方面直接影响两种材料的冶金结合; 另一方面会导致出现

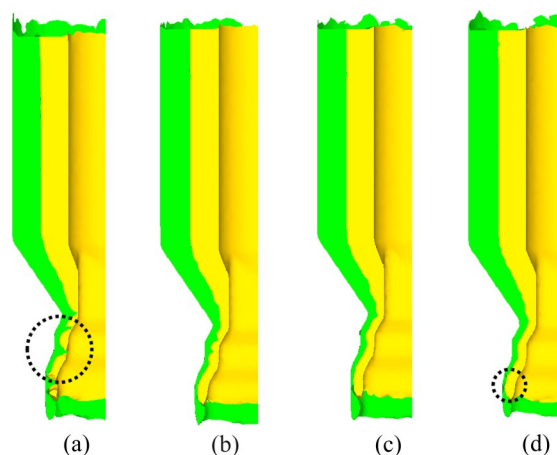


图4 坯料预热温度对坯料变形的影响

Fig. 4 Effects of billet preheating temperatures on billet deformation: (a) 340 °C; (b) 370 °C; (c) 400 °C; (d) 430 °C

局部温度升高使得成形制件的组织均匀性降低, 影响其性能。若以适当的低速进行挤压时, 一方面材料在挤压剪切带滞留时间相对较长, 有利于促进两种合金的冶金结合; 另一方面产生的热量也有足够的时间向外传递, 不易出现局部温度过高的现象, 有利于提高制件的组织均匀性从而提高其力学性能及使用性能。因此, 在实际生产或实验过程中应该特别注意挤压速度对温度场分布的影响, 温度场的变化既能直接影响两种材料能否正确完整地发生结合, 又会影响成形制件的组织以及成形质量。

图 5 所示为不同挤压速度下 PEF 过程中坯料的温度分布。挤压速度与出口流速、塑性变形的剧烈程度、热效应呈正比关系^[19-20]。外层铝合金的温度高于内层的镁合金, 高温下外层铝合金的流动性更好。随着挤压速度的增加, 外层铝合金在墩粗区域的升温变化比内层镁合金的升温变化更明显。外层铝合金的变形量增大使外层铝合金温度升高, 并向模具传递了一部分热量, 导致其温度分布不均匀。在其他模拟条件相同的情况下, 挤压速度对坯料中的等效应力有较大的影响。但过快的挤压速度会导致应力明显上升, 在 PEF 过程中方管转角处的应力应变明显大于直壁处的应力应变。这会导致在成形过程中, 转角处的结合层质量明显优于直壁处的结合层质量, 但是过快的挤压速度会造成管材内壁纤薄, 转角处出现破裂。图 6(a)~(d) 所示分别为挤压速度为 1 mm/s、5 mm/s、10 mm/s、15 mm/s 时坯料中的等效应力分布图。内层 AZ31 镁合金管坯受

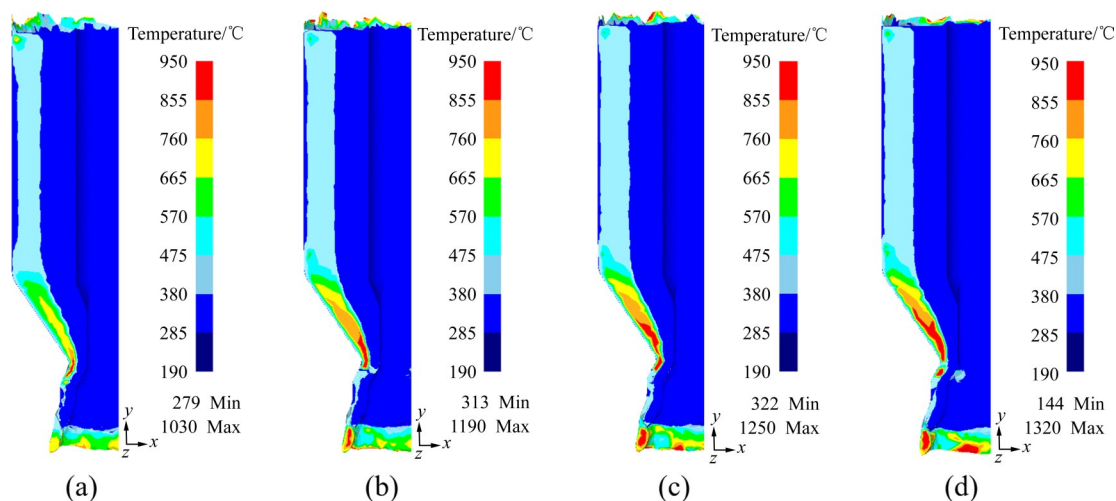


图5 挤压速度对坯料温度场的影响

Fig. 5 Effects of extrusion speeds on temperature fields of billets: (a) 1 mm/s; (b) 5 mm/s; (c) 10 mm/s; (d) 15 mm/s

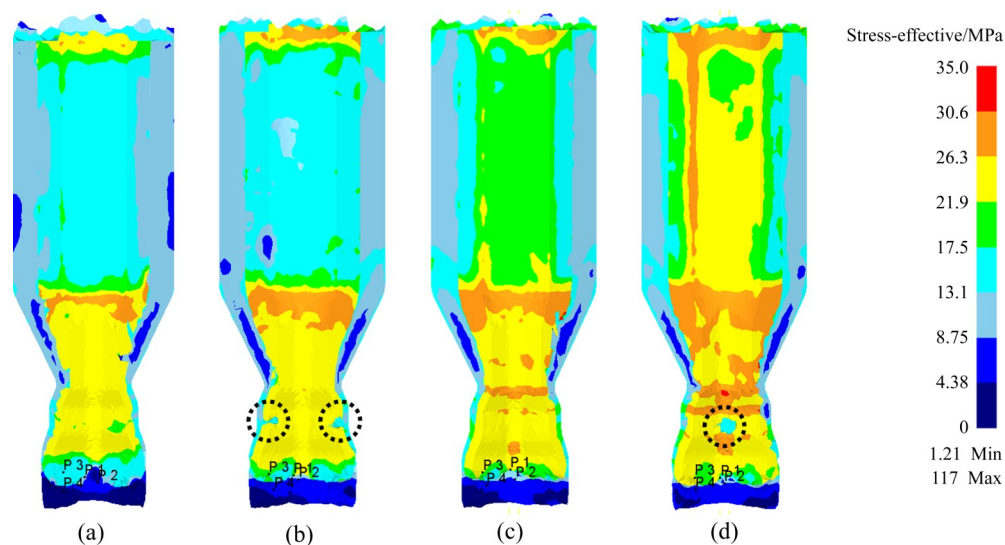


图6 挤压速度对坯料等效应力的影响

Fig. 6 Effects of extrusion speeds on equivalent stresses of billets: (a) 1 mm/s; (b) 5 mm/s; (c) 10 mm/s; (d) 15 mm/s

到的应力明显大于外层铝合金管坯所受到的应力。挤压速度为 5 mm/s 时, 内层镁合金坯料在挤压剪切扩径处产生裂痕。当挤压速度为 15 mm/s 时, 复合方管中内层镁合金坯料在转角处发生明显的破裂。当挤压速度为 10 mm/s 时, 复合方管无明显裂痕和缺陷, 同时挤压剪切扩径过程中坯料受到更大的应力作用, 复合方管结合层效果有显著提升。

2.3 预热温度对双层方管显微组织的影响

图 7(a)和(b)所示分别为坯料预热温度为 370 °C 和 400 °C 时 PEF 工艺成形的 Al/Mg 双层复合方管。由图 7 可见, 方管结合层都无明显缝隙, 坯料预热

温度为 370 °C 时方管外层铝合金略向内凹陷。

图 8(a)和(d)所示分别为坯料预热温度为 370 °C 和 400 °C 时 PEF 过程中墩粗区的微观组织, 墩粗区存在较多粗大组织, 但部分晶粒在应力作用下产生破碎, 细化成小尺寸晶粒。在再结晶温度之上, 小尺寸晶粒在晶界处发生再结晶。剪切扩径结构的存在导致原始晶粒不断发生畸变, 同时在再结晶温度之上经过两次剪切扩径, 发生大塑性变形以及反复再结晶, 畸变能不断提高, 再结晶晶粒数目增多, 占据大部分位置。图 8(b)和(e)所示分别为坯料预热温度为 370 °C 和 400 °C 时 PEF 工艺成形的复合方管直壁处的微观组织, 晶粒明显得到细化, 晶粒尺寸

较为均匀。图8(c)和(f)所示分别为坯料预热温度为370 ℃和400 ℃时PEF工艺成形的复合双层方管转角处的微观组织，转角处的动态再结晶晶粒数目大于直壁处，晶粒明显进一步得到细化。这是由于方管转角处应变速率大于直壁处的应变速率，导致位错塞积效率更高，畸变能更大，动态再结晶形核率更高^[20]。随着变形量的增加，在变形过程中新晶粒所占体积分数越来越大，使晶粒得到明显细化。当应变逐渐增大时，大的塑性变形造成金属晶体结构的严重畸变，为再结晶的发生提供了有利的条件，

加上PEF过程中产生的热量，使得镁合金很容易在该条件下发生动态再结晶；再结晶时在晶格严重畸变的高能区域产生大量晶核，新的晶粒又在再结晶晶粒边界形核长大，从而促使晶粒细化。

在PEF成形工艺下，双金属的合金元素在金属内部扩散形成了相应的扩散层，而在扩散的过程中由于受温度影响，两种材料间发生了冶金结合，形成了新的不同于基体材料的铝镁化合物产物。图9所示为坯料预热温度为370 ℃时双层方管结合层及基体的微观组织以及镁、铝元素分布。如图9(a)所

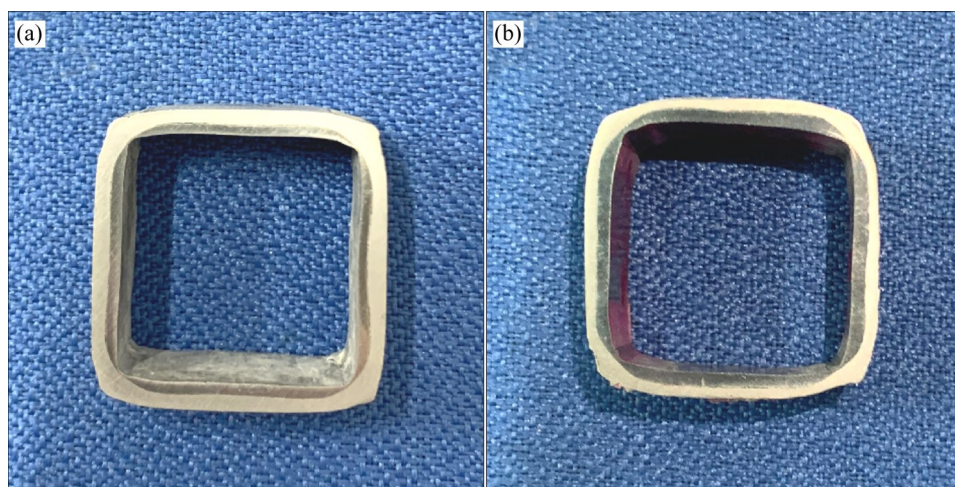


图7 坯料预热温度分别为370 ℃和400 ℃时Al/Mg双层复合方管横截面

Fig. 7 Cross section photos of Al/Mg composite square tube at billet preheating temperatures of 370 °C (a) and 400 °C (b), respectively

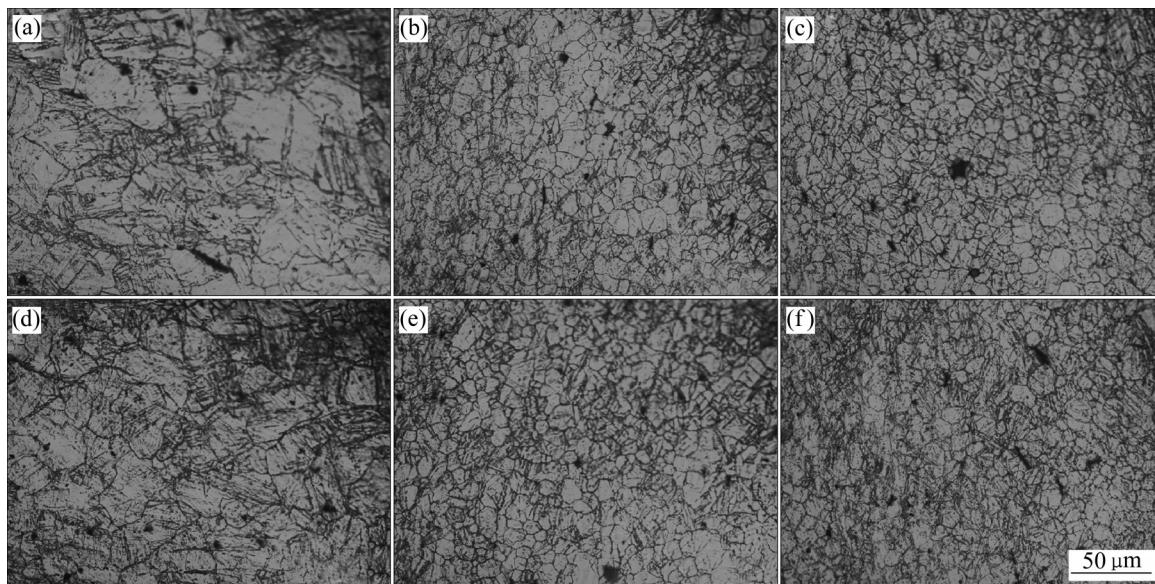


图8 不同坯料预热温度下PEF成形过程中双层方管镁合金的显微组织

Fig. 8 Microstructures of AZ31 magnesium alloy in inner layer during PEF process at different billet preheating temperatures: (a) Upsetting stage at 370 °C; (b) Straight wall of square tube at 370 °C; (c) Corners of square tube at 370 °C; (e) Upsetting stage at 400 °C; (e) Straight wall of square tube at 400 °C; (f) Corners of square tube at 400 °C

示, AZ31 镁合金和 AA6063 铝合金之间有明显的长带状结合层, 伴有平行于扫描路径方向的细小裂纹, 垂直于扫描路径方向的黑色裂缝为取样时人为造成的误差。PEF 工艺下所对应的方管转角处元素分布见图 9(b)和(c), 结合层微区基体材料扩散分布不均匀, 扩散区域较小, 过渡层厚度约为 $14\text{ }\mu\text{m}$ 。图 9(d)和(e)所示分别为双层方管直壁处结合层微观组织及元素分布, 结合层致密且无平行于扫描方向的裂纹, 过渡层厚度约为 $16\text{ }\mu\text{m}$, 垂直于扫描路径方向的裂纹明显细化。在镁和铝结合层中存在明显的扩散层; 镁铝结合层扩散层的形成主要分为两步, 首先是两种基体的原子在高温下发生宏观迁移, 然后是当界面处的原子达到一定浓度时则生成新相。由于元素互相扩散, 原先的金属界面被一层新的化合物层所代替, 结合层从左到右存在三个原子扩散结合产生的组织形态不同的区域, 分别为镁侧扩散层、扩散稳定层以及铝侧扩散层。

图 10 所示为坯料预热温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时双层方管结合层及基体的微观组织及镁、铝元素分布。由图

10 可见, 双层方管的微观组织中存在明显的镁铝结合层, 其厚度与预热温度为 $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的结合层的厚度相近。直壁处存在较宽的裂缝垂直于扫描路径方向, 同时转角处结合层存在垂直于扫描路径方向的长而细的裂缝。采用 EDS 对坯料预热温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时成形的双层方管样品的转角处和直壁处的微观组织进行分析, 如图 10(b)~(e)所示, 直壁处的元素分布优于转角处的元素分布, 这符合前文对结合层的分析。直壁处结合层厚度约为 $31\text{ }\mu\text{m}$, 转角处结合层厚度约为 $24\text{ }\mu\text{m}$ 。在高温下 PEF 工艺使双金属之间形成了较为平滑的过渡层界面, 且元素扩散比低温下更为充分、均匀, 结合层微区并未发现明显的裂纹出现, 但是仍出现部分坑室。根据点扫描结果与铝镁二元相图可知, 该条件下结合层主要的铝镁化合物成分为 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 。由于在成形温度过高的情况下两基体材料的流动性不同, 在该条件下的铝合金流动较快, 两基体材料未能及时发生反应, 因此该侧基体材料出现了坑室。

AZ31 镁合金与 AA6063 铝合金在高温下结合

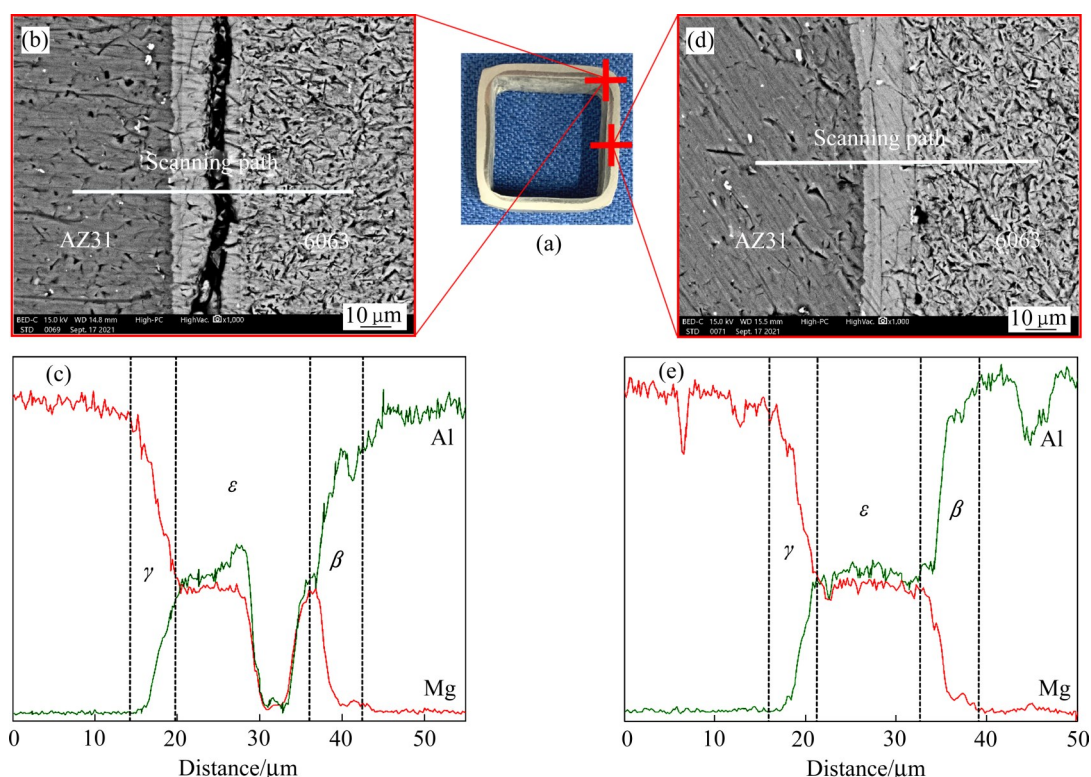


图9 坯料预热温度为 $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时双层方管结合层及基体的微观组织以及镁、铝元素分布

Fig. 9 Microstructures of bonding layer and matrix of double layer square tube at billet preheating temperature of $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ and distributions of magnesium and aluminum elements: (a) Photo of double-layer square tube; (b) Microstructure of bonding layer and matrix at corner; (c) EDS pattern at corner; (d) Microstructure of bonding layer and matrix at straight wall; (e) EDS pattern at straight wall

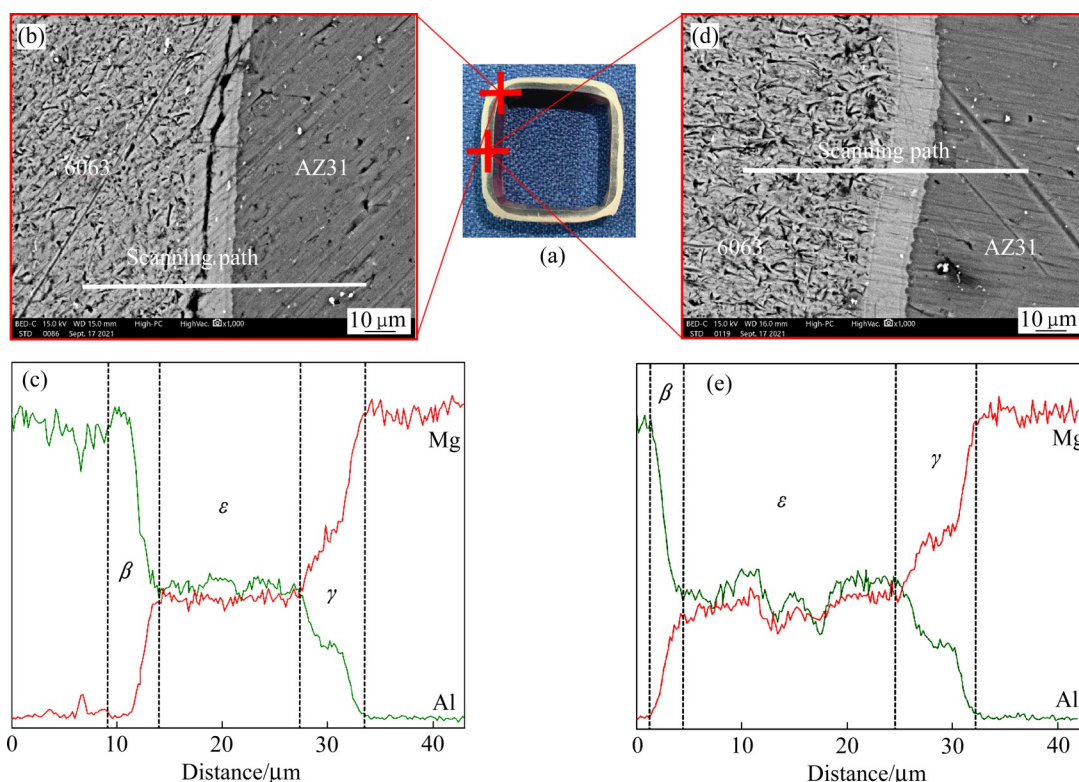


图10 坯料预热温度为400℃时双层方管结合层及基体的微观组织及镁、铝元素分布

Fig. 10 Microstructures of bonding layer and matrix of double layer square tube at billet preheating temperature of 400 °C and distributions of magnesium and aluminum elements: (a) Photo of double-layer square tube; (b) Microstructure of bonding layer and matrix at corner; (c) EDS pattern at corner; (d) Microstructure of bonding layer and matrix at straight wall; (e) EDS pattern at straight wall

时, Mg和Al元素的含量呈现梯度变化, 扩散层和稳定层呈现两种元素共存, 共产生三种铝镁的化合物: $Mg_{17}Al_{12}$ 、 Mg_2Al_3 和MgAl。因为不同元素具有不同的扩散系数, 同时伴有元素浓度的影响, 镁侧扩散层形成了 $Mg_{17}Al_{12}(\gamma)$, 铝侧扩散层生成了 $Mg_2Al_3(\beta)$, 在稳定层形成MgAl(ϵ)且两种元素含量相近^[22-24], 并伴有 $Mg_{17}Al_{12}$ -MgAl- Mg_2Al_3 的形成顺序。采用PEF成形工艺加工Al/Mg双层复合管材, 随着坯料预热温度升高, 界面结合层厚度增加, 说明提高预热温度对Al/Mg双层复合管材的冶金结合具有促进作用。

2.4 双层方管硬度分布

图11所示为坯料预热温度为400℃时双层方管结合层及基体的微观硬度分布图。由图11可见, 不同区域的硬度值不同, 镁基体平均硬度值约为82.36 HV, 铝基体平均硬度值约为46.91 HV, 结合层的最高硬度约为138.14 HV。结合层中的稳

定层硬度低于扩散层硬度, 这是由于MgAl相属于固态反应形成的中间相, 硬度比 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 Mg_2Al_3 低^[25-26]。双金属结合层的高硬度并不利于双金属的结合, 脆硬的结合层韧性低, 容易断裂^[27]。

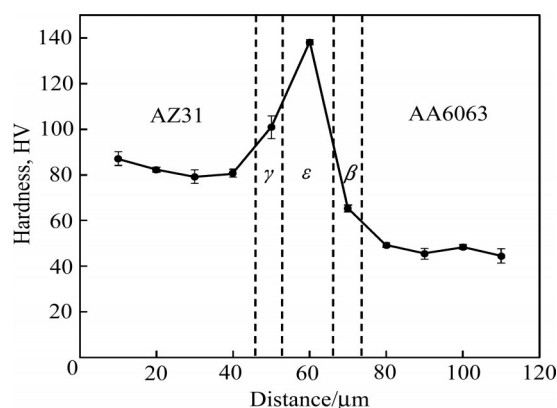


图11 坯料预热温度为400℃时双层方管结合层及基体的微观硬度分布图

Fig. 11 Microhardness distribution of bonding layer and matrix of double layer square tube at billet preheating temperature of 400 °C

3 结论

1) Al/Mg 双层方管 PEF 成形工艺可以有效细化微观组织,可以一次性将 Al/Mg 双金属圆形坯料直接加工出无表面缺陷、双层金属结合层冶金结合效果良好的双层复合方形管材。

2) 数值模拟研究发现:挤压温度越高,挤压载荷越小;挤压速度越快,坯料的温度和等效应力越大;通过数值模拟得到了优化的 TEF 工艺参数:挤压速度 10 mm/s,坯料预热温度 370 °C、400 °C。

3) 实验研究结果发现:预热温度 400 °C 下 PEF 成形的复合双层方管质量优于 370 °C 下成形的方管,结合层的冶金结合效果较好;方管结合层中产生三种脆性的铝镁的化合物,镁侧扩散层为 $Mg_{17}Al_{12}$ 、稳定层为 MgAl、铝侧扩散层为 Mg_2Al_3 ;稳定层的硬度略低于两侧扩散层,结合层硬度约为 138.14 HV。

REFERENCES

- [1] SONG Jiang-feng, SHE Jia, CHEN Dao-lun, et al. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 1-41.
- [2] TAYLOR S, WEST G D, MOGIRE E, et al. Superplastic forming characteristics of AZ41 magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(3): 648-654.
- [3] 胡刚,胡红军,李杨,等. 镁合金管材组织调控方法的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3044-3058.
HU Gang, HU Hong-jun, LI Yang, et al. Recent development and prospect of microstructure control for magnesium alloy tubes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3044-3058.
- [4] 王敬丰,彭星,王奎,等. 超大规格宽幅薄壁中空镁合金型材挤压成形的数值模拟及实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2809-2819.
WANG Jing-feng, PENG Xing, WANG Kui, et al. Numerical simulation and experimental study on extrusion forming of ultra-large size wide thin-walled hollow magnesium alloy profiles[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(12): 2809-2819.
- [5] 胡忠举,刘雁峰,卢立伟,等. 镁合金正挤压-弯曲剪切复合连续变形工艺及挤压力计算[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 923-930.
HU Zhong-ju, LIU Yan-feng, LU Li-wei, et al. Continuous deformation technology and extrusion load calculation of Mg alloys fabricated by direct extrusion and bending shear deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(5): 923-930.
- [6] AHMADI S, ALIMIRZALOO V, FARAJI G, et al. Properties inhomogeneity of AM60 magnesium alloy processed by cyclic extrusion compression angular pressing followed by extrusion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(3): 655-665.
- [7] MATYKINA E, ARRABAL R, MOHEDANO M, et al. Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(7): 1439-1454.
- [8] BABAEI M H, NIROUMAND B, MALEKI A, et al. Simulation and experimental verification of interfacial interactions in compound squeeze cast Al/Al-Cu macrocomposite bimetal[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(5): 950-963.
- [9] 李杰,周鹏,惠媛媛. 钛/铜异种金属电弧焊接接头界面组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(9): 2419-2426.
LI Jie, ZHOU Peng, HUI Yuan-yuan. Microstructure and properties of dissimilar materials Ti/Cu welding joint by arc welding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(9): 2419-2426.
- [10] CHEN Xiang, INAO D, TANAKA S, et al. Comparison of explosive welding of pure titanium/SUS 304 austenitic stainless steel and pure titanium/SUS 821L1 duplex stainless steel[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(9): 2687-2702.
- [11] 查敏,王思清,方圆,等. 高性能轧制镁合金研究进展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(5): 20-27.
ZHA Min, WANG Si-qing, FANG Yuan, et al. Advancement in research of rolled magnesium alloys with high performance[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(5): 20-27.
- [12] ZHANG Jun-peng, HUANG Hua-gui, ZHAO Ri-dong, et al. Cast-rolling force model in solid - liquid cast-liquid cast-rolling bonding(SLCRB) process for fabricating bimetal clad strips[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(3): 626-635.
- [13] SUN X J, TAO J, GUO X Z. Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding[J].

- Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(10): 2175–2180.
- [14] PARAMSOTHY M, SRIKANTH N, GUPTA M. Solidification processed Mg/Al bimetal macrocomposite: Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 461(1/2): 200–208.
- [15] YU H, CHEN J, LIU W, et al. Electromagnetic forming of aluminum circular tubes into square tubes: Experiment and numerical simulation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 613–623.
- [16] 战立强, 王刚, 杨建雷, 等. AZ31/7475 方形双金属复合管气压胀形-冷缩结合工艺[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(10): 69–76.
- ZHAN Li-qiang, WANG Gang, YANG Jian-lei, et al. Gas blow forming and contradictive cooling bonding technology of AZ31/7475 square bimetal composite tube[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(10): 69–76.
- [17] 田野. 基于 Al/Mg 圆管坯挤压-连续剪切的双(单)层方管成形工艺及组织性能研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- TIAN Ye. Study on forming process and microstructures and properties of double (single) layer square tube based on extrusion-continuous shearings of Al/Mg round tube billet[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [18] 胡红军. 变形镁合金挤压-剪切复合制备新技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- HU Hong-jun. Studies on a new composite preparation technology of wrought magnesium alloy by extrusion-shearings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [19] ZHANG Shao-ming, YANG Bi-cheng, XU Jun, et al. Effects of deformation parameters on microstructure and mechanical properties of magnesium alloy AZ31B[J]. Rare Metals, 2006, 25(6): 105–110.
- [20] BAGHERI B, ABBASI M. Development of AZ91/SiC surface composite by FSP: Effect of vibration and process parameters on microstructure and mechanical characteristics[J]. Advances in Manufacturing, 2020, 8(1): 82–96.
- [21] 汪建强, 郭丽丽, 王长峰. AZ31 镁合金位错密度模型及热压缩的微观组织预测[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 48–59.
- WANG Jian-qiang, GUO Li-li, WANG Chang-feng. Dislocation density model of AZ31 magnesium alloy and microstructure prediction of thermal compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(1): 48–59.
- [22] 徐仕豪, 温璐, 彭翔, 等. 镁锂合金熔体保护和净化的研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1774–1785.
- XU Shi-hao, WEN Lu, PENG Xiang, et al. Research status and prospect of Mg-Li alloys melt protection and purification[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1774–1785.
- [23] 张玉, 李明, 杨文龙, 等. T4 和 T6 热处理参数对 Mg-12Zn-2Al 镁合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2322–2330.
- ZHANG Yu, LI Ming, YANG Wen-long, et al. Effects of T4 and T6 heat treatment parameters on microstructure and mechanical properties of Mg-12Zn-2Al magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(10): 2322–2330.
- [24] 宋广胜, 牛嘉维, 张士宏, 等. 镁合金棒材扭转变形的孪晶机制[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1574–1583.
- SONG Guang-sheng, NIU Jia-wei, ZHANG Shi-hong, et al. Twinning mechanism of magnesium alloy rod torsion[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(7): 1574–1583.
- [25] 卢立伟, 赵俊, 陈胜泉, 等. 镁合金正挤压-扭转变形的数值模拟与实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9): 2350–2357.
- LU Li-wei, ZHAO Jun, CHEN Sheng-jun, et al. Numerical simulation and experimental research of AZ31 Mg alloys processed by direct extrusion and torsional deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2350–2357.
- [26] WANG B N, WANG F, WANG Z, et al. Fabrication of fine-grained, high strength and toughness Mg alloy by extrusion-shearing process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(3): 666–678.
- [27] MA Ying-zhong, WANG De-xin, LI Hong-xiang, et al. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of quaternary Mg–1Zn–0.2Ca–xAg alloy wires applied as degradable anastomotic nails[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(1): 111–124.

Numerical simulation and experimental studies on progressive expanding forming of Al/Mg double-layer square tube

ZHAO Jian-xing¹, HU Hong-jun¹, ZHANG Wei¹, ZHAO Hui¹, TIAN Ye¹, ZHANG Ding-fei²

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology,

Chongqing 400054, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the influence of progressive expanding forming (PEF) process on the multi physical field and microstructure of Al/Mg bimetallic composite square tube in the forming process, a three-dimensional thermal mechanical coupling finite element numerical model was created using DEFORM-3D, and the simulation based on the features of the PEF process was carried out. The microstructure characterization and hardness test during PEF process experiment were performed. The effects of billet preheating temperature on forming load and blank deformation, the effects of extrusion speed on billet temperature field and effective stress, the effects of different billet preheating temperatures on Al/Mg bimetallic microstructure, and the bonding layer hardness distribution were investigated. The results reveal that the PEF process can cause severe plastic deformation (SPD), efficiently improve the microstructure of a double-layer square tube, and make an Al/Mg bimetallic composite square tube with a wall thickness of 3mm in a single step. When the preheating temperature of the billet rises from 340 °C to 430 °C, the forming load decreases by 28.6%. The effective stress in the extrusion shear expanding zone increases as the extrusion speed increases. Three aluminum magnesium products of $Mg_{17}Al_{12}$, $MgAl$ and Mg_2Al_3 will be generated in the transition zone of the Al/Mg bimetallic composite interface, and the bonding layer will have a high hardness. When the extrusion speed is 10 mm/s, the extrusion temperature is 400 °C and the expansion angle is 150°, the flaws of the Al/Mg bonding layer of square tube are minor, the metallurgical bonding effect of the bonding layer is excellent, and the hardness is around 138.14 HV.

Key words: bimetallic; composite square tube; numerical simulation; progressive expanding forming; microstructure

Foundation item: Projects(52071042, 51771038) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(CQYC202003047) supported by the Chongqing Talent Plan, China

Received date: 2021-12-06; **Accepted date:** 2022-01-18

Corresponding author: HU Hong-jun; Tel: +86-18996100916; E-mail: hhj@cqut.edu.cn

(编辑 何学锋)