

钛铝复合板非等通道横向共挤压工艺优化

孙凯, 薛新

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

摘要: **目的** 优化钛铝复合板非等通道横向共挤压成形工艺, 以得到最优界面结合工艺参数。**方法** 采用 DEFORM-3D 软件对钛合金 Ti6Al4V 和铝合金 AA1050 双金属非等通道横向共挤压过程进行数值建模, 结合正交实验设计和信噪比法, 研究工艺参数对金属流动均匀性和最大挤出力影响。**结果** 通过信噪比得到平均速度相对偏差和最大挤出力最优工艺组合均为: 挤压速度 1 mm/s, 挤压温度 480 °C; 通过方差分析发现, 工艺参数对平均速度相对偏差的显著性影响明显低于最大挤出力; 采用最优工艺组合的挤压参数进行物理实验, 结果验证了钛铝复合板的翘曲变形程度与模拟结果较好吻合。**结论** 钛铝复合板共挤压过程中高温低速模式有助于增大挤压材料的流动均匀性, 减小其翘曲变形的程度, 同时有助于减小共挤压过程中的最大挤出力。通过对钛铝复合板共挤压工艺的优化, 为异种合金材料制备提供科学有效的指导。

关键词: 钛铝复合板; 共挤压; 数值模拟; 正交实验; 信噪比

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.004

中图分类号: TG376.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)02-0023-08

Process Optimization of Ti/Al Lamination by Non-equal Channel Lateral Co-extrusion

SUN Kai, XUE Xin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

ABSTRACT: This paper aims to obtain an optimum process parameter for Ti/Al lamination by non-equal channel lateral co-extrusion. The co-extrusion of bimetal Ti6Al4V and AA1050 was numerically modeled based on DEFORM-3D software. The effects of process parameters on the uniformity of metal flow and the maximum extrusion force were investigated through orthogonal experimental design and signal-to-noise-ratio method. Based on the simulation results, the optimal key process parameters associated with the relative average velocity deviation and the maximum extrusion force were obtained, i.e., the extrusion speed was 1 mm/s and the extrusion temperature was 480 °C. According to the variance analysis, the significant influence of process parameters on the maximum extrusion force was obviously greater than that on the relative average velocity deviation. The experimental validation with the optimal process parameters showed that the experimental bending distortion of the extruded bimetal lamination was in a good agreement with the simulation result. The process type of “high-temperature-low-speed” is helpful for the metal flow uniformity and the mitigation of extrusion-induced distortion. In addition, it is also helpful to decrease the maximum extrusion force during co-extrusion. The optimization of co-extrusion of Ti/Al lamination provides an scientific and effective guideline for preparation of dissimilar bimetal alloys.

KEY WORDS: Ti/Al lamination; co-extrusion; numerical modeling; orthogonal experiment; signal-to-noise-ratio

收稿日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51705080); 福建省自然科学基金 (2018J01764)

作者简介: 孙凯 (1993—), 男, 硕士生, 主要研究方向为异种金属连接成形技术。

通讯作者: 薛新 (1983—), 男, 副教授, 主要研究方向为轻金属精密成形工艺、变形机理与性能表征等。

随着现代科学技术的发展,特别是航天、航空、汽车等领域的发展,对材料的性能提出了更高的要求,其中轻量化、高强度设计在材料性能方面的要求越来越高^[1-2]。大多数单一的金属及合金材料不能同时满足轻量化和高强度的设计要求。利用不同的复合技术将轻质合金和高强度合金材料复合在一起,既能满足市场及客户的要求,又能达到降低成本、提高效率的目的。以铝基、镁基、钛基复合材料为代表的轻质高强度合金材料被广泛研究^[3-7]。钛铝复合材料以其优越的轻量化、高强度特性而受到国内外学者的广泛关注,但是两者较大的热物理差异性增加了复合的难度,因此,探索新型的钛铝复合材料制备工艺对轻量化设计具有重要的指导意义。

近年来,钛铝异种金属复合材料制备的方法成为国内外研究热点,其中有爆炸焊接^[8]、铸造^[9-10]、复合轧制^[11]、等离子体烧结^[12]、焊接^[13-14]、超声波固结^[15]等方法,但是这些方法都有一定的局限性。比如复合轧制存在界面氧化问题;爆炸焊接操作危险,焊接接头缺陷较大;超声波固结只能复合厚度较小、强度较低的材料,铸造精度难以控制等局限性。而钛铝异种合金复合挤压成形法是一种封闭式挤压,使成形的金属与空气隔离,可以防止金属坯料的氧化层挤入复合模,从而有效保证两种材料结合面清洁,保证其

焊接熔合质量;避开了钛和铝的热差异性带来的成形困扰,挤压力可直接转换为焊接压力;模具结构简单,成形板材精度高,可控性强。关于钛铝异种合金复合挤压成形法的研究报道较少。Grittner等^[16-17]在特定工艺条件下对纯钛和纯铝采用非等通道横向共挤压成形工艺成功制备了钛铝复合板,并分析了复合板界面微观组织的演变机制,但是关于钛铝复合板共挤压过程中材料的流变和型材挤压变形行为分析的研究较少。

文中选用 Ti6Al4V 和 AA1050 合金为基材,通过 DEFORM-3D 有限元软件建立非等通道横向共挤压成形数值模型。基于数值模拟结果,分析了挤压工艺参数对钛铝复合板共挤压过程中流变行为的影响,为异种合金共挤压制备工艺提供科学有效的实验指导。

1 有限元建模

1.1 有限元模型的建立

选用 DEFORM-3D 软件进行建模仿真研究,用 UG 三维造型软件分别建立挤压杆、上模、下模、镶块、铝合金棒、钛合金板的三维实体几何模型。钛铝复合板非等通道横向共挤压模具结构如图 1 所示。

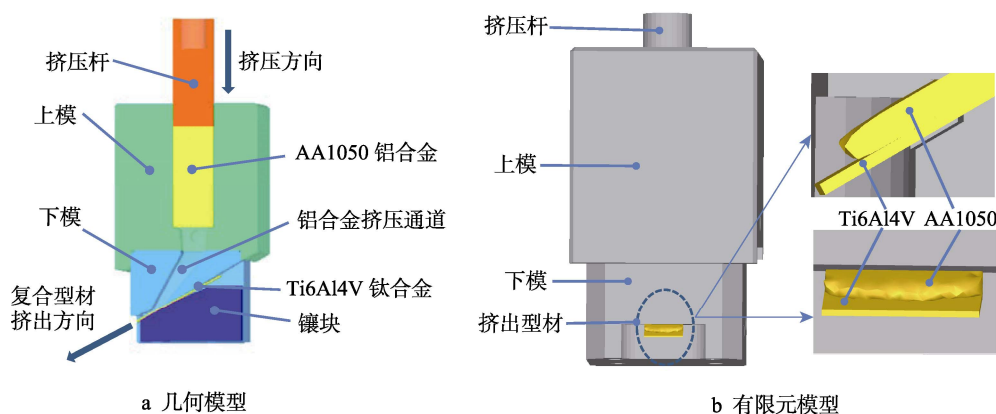


图 1 钛铝复合板非等通道横向共挤压模具结构示意图

Fig.1 Die structure of non-equal channel lateral co-extrusion for Ti/Al lamination

1.2 材料模型

采用的变形材料为 Ti6Al4V 钛合金和 AA1050 铝合金这一对物理、化学性能差异较大的轻金属材料,其热物理性能参数如表 1 所示,其中模具、镶块、挤压杆材料均为 H13 钢。由于 Ti6Al4V 钛合金和 AA1050 铝合金在共挤压成形中属于大剧烈塑性变形,在挤压成形过程中可采用刚塑性材料模型求解可以简化有限元列式和计算过程,提高计算效率。模具、镶块、挤压杆定义为刚体,铝棒和钛板定义为塑性体。

表 1 Ti6Al4V 和 AA1050 的热物理性能参数

Tab.1 Thermo-physical properties of AA1050 and Ti6Al4V

材料	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	熔点/°C	密度/ (g·cm ⁻³)	线膨胀 系数/°C ⁻¹
Ti6Al4V	7.955	1668	4.58	8.3×10 ⁻⁶
AA1050	209	660	2.7	23.8×10 ⁻⁶

1.3 模拟工艺参数的设定

在前处理设置中,为节约模拟时间、减少接触关系,将上模、下模、镶块合并成一个整体模具。为了

提高计算结果的精度以及保证模拟过程中的网格质量,采用自适应网格重划分技术。定义模具与铝棒、铝棒与挤压杆之间的摩擦类型均为剪切摩擦,摩擦系数均为 0.3。定义钛板与铝棒、钛板与模具的摩擦类型均为库伦摩擦,摩擦因数分别为 0.7 和 0.1。AA1050 铝合金棒材的直径是 $\phi 25\text{ mm}$,共挤出铝合金板材的厚度是 2.0 mm ,钛合金板材的厚度是 0.8 mm ,钛铝复合板的挤压比为 12,挤压杆的挤压速度梯度分别为 1,2,3,4,5 mm/s,金属坯料和模具的预热温度相同,即挤压温度梯度设定为 400,420,440,460,480 $^{\circ}\text{C}$,金属坯料与环境的对流系数是 $0.2\text{ N}/(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。金属坯料与模具接触传热系数是 $11\text{ N}/(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

2 实验

2.1 共挤压过程中流变行为评估

在实际生产过程中,挤出型材横截面在模具出口位置流动速率的均匀性直接影响到挤出型材的质量。挤出型材横截面流动速率分布越均匀,挤出型材的翘曲变形越小,质量越好。为了准确描述钛铝复合板横截面在模具挤压出口位置流动速率的均匀,采用钛铝复合板横截面的平均速度相对偏差来衡量钛铝复合板横截面流动速率的均匀性。其平均速度相对偏差的计算方法见式(1)。

$$v_{\text{ARD}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_j}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_j} \times 100\%$$

(1)

式中: v_{ARD} 表示平均速度相对偏差; n 表示在模具出口位置铝板横截面中层金属的节点数; v_i 表示节点*i*处铝板的流动速率; m 表示在模具出口位置钛板横截面中层金属的节点数; v_j 表示节点*j*处钛板的流动速率; m 与*n*的数量相等。 v_{ARD} 作为文中的一个优化目标。

最大挤出力能够直接衡量挤出型材所消耗的最大能量,挤出力越大意味着挤出型材时所消耗的能量越大,成本越高,同时模具损伤的几率越大,所以在挤压过程中最大挤出力(maximum extrusion force)是一个重要的因素。文中将最大挤出力作为另外一个独立的优化目标。

采用统计学优化方法信噪比来优化设定的两个目标,在实际生产过程中,挤出型材横截面的流动速率越均匀,型材的质量越好。同时,挤压效率最高时最大挤出力越小,消耗的能量越小,成本越低,模具的损伤几率越小,寿命越长。信噪比的静态特性有 3 种形式:望小特性、望大特性、望目特性。所以文中

采用信噪比中的望小特性,即优化目标值越小越好。信噪比的计算方法见式(2)。

$$\eta = S / N = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

(2)

式中: η 表示信噪比 S/N ; y_i 表示第*i*次实验中优化目标的响应值; n 表示总的实验次数。

2.2 实验设计

文中主要研究了挤压速度和挤压温度对平均速度相对偏差和最大挤出力影响。根据正交实验方法设计了挤压速度和挤压温度两因素五水平的正交实验表,见表 2。

表 2 正交实验设计的因素和水平

Tab.2 Factors and levels of orthogonal experimental design

工艺参数	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5
A 挤压温度/ $^{\circ}\text{C}$	400	420	440	460	480
B 挤压速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	1	2	3	4	5

3 结果与讨论

3.1 优化结果及分析

为了研究挤压速度和挤压温度对平均速度相对偏差和最大挤出力影响,采用平均信噪比的数值来表示平均速度相对偏差和最大挤出力随挤压温度和挤压速度的变化规律。平均速度相对偏差和最大挤出力平均信噪比数值见表 3 和表 4。

图 2a 表明挤压温度和挤压速度对平均速度相对

表 3 平均速度相对偏差的平均信噪比

Tab.3 Mean S/N for v_{ARD}

水平	A	B
1	-8.1355	-8.4059
2	-16.1708	-15.9313
3	-9.0673	-13.3712
4	-13.5965	-8.9670
5	-8.1127	-8.4075

表 4 最大挤出力平均信噪比

Tab.4 Mean S/N for maximum extrusion force

水平	A	B
1	-100.3659	-96.7320
2	-99.1736	-97.8006
3	-98.3033	-98.3880
4	-96.9701	-98.3804
5	-95.5727	-99.0847

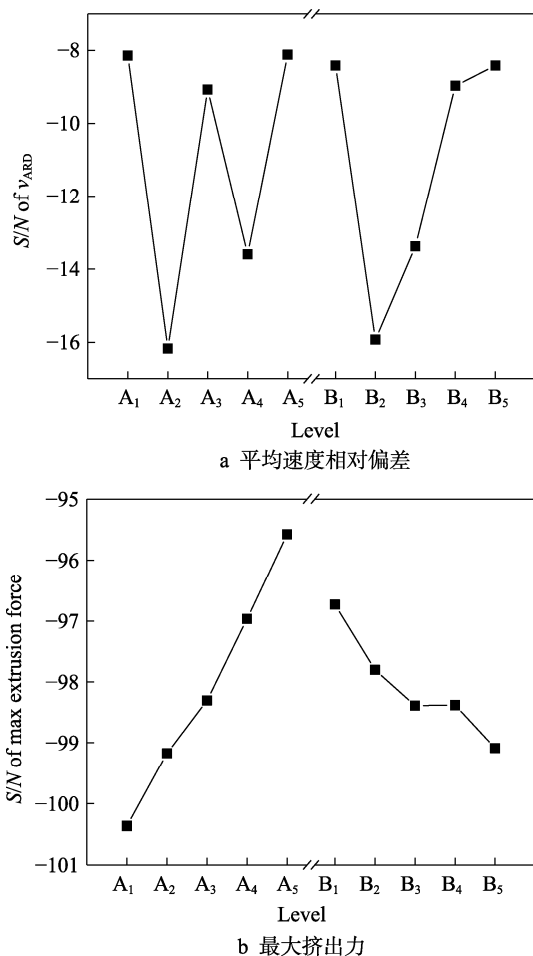


图2 平均信噪比
Fig.2 Mean S/N

偏差的影响较小。虽然平均速度相对偏差随着挤压工艺参数的变化波动性很大,但是整体上波动的幅值较小。图 2b 表明挤压温度和挤压速度对最大挤出力的影响呈线性变化趋势,整体幅值变化较大。图 2 表明平均速度相对偏差与最大挤出力的最优工艺组合均为 A5B1 (480 °C, 1 mm/s)。

这种高温低速模式 (480 °C, 1 mm/s) 有利于减小最大挤出力和共挤压过程中的翘曲变形。这是因为铝合金材料的导热率远大于钛合金材料的导热率,共挤压前期铝棒在接触钛板之前,铝棒各部分的温度分布均匀性随着挤压的进行而快速提高,同时,导热率较低的钛板在铝棒接触之前,各部分的温度分布均匀性也在提高,最终在共挤压过程中两种合金材料内部以及两者之间的温度分布均匀性偏差趋于最小。低速模式下材料的加工硬化速度与再结晶软化的速度偏差较小,但材料内部和边界处的受力情况不同,导致各部分的变形抗力不同。当低速模式与高温模式耦合后,材料各部分的变形抗力偏差将会趋于最小,同时材料各部分的流动速率均匀性提高,最终使共挤压过程中所需的最大挤出力减小,钛铝复合板的翘曲变形程度减小。

3.2 工艺参数的影响

3.2.1 工艺参数对平均速度相对偏差的影响

图 3c 表明挤压速度和挤压温度整体上对平均速度相对偏差的影响不显著。图 3a 表明,不同温度梯度下,随着挤压速度的递增,平均速度相对偏差在一个小的范围内波动,整体波动的幅值较小,局部某些工艺参数下出现较大的波动。平均速度相对偏差整体波动幅值较小是因为随着挤压速度的提高,钛板和铝

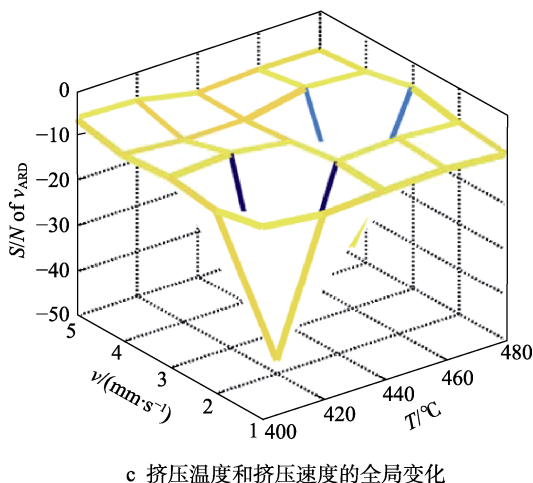
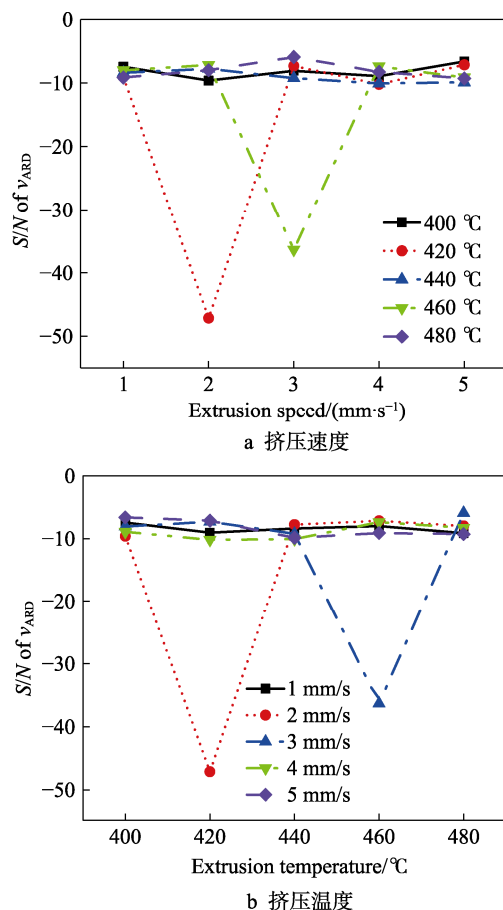


图3 工艺参数对平均速度相对偏差的影响
Fig.3 The effects of process parameters on the relative average velocity deviation

棒的流动速率均有不同程度的提高。而平均速度相对偏差指的是铝棒相对于钛板的流动速率偏差,故平均速度相对偏差的变化趋势没有明显的增减性。平均速度相对偏差整体出现频繁的波动是因为随着挤压速度的递增,铝棒和钛板的流动速率整体上递增的同时局部也存在一定的波动性,见图4。而局部某些工艺组合下平均速度相对偏差出现较大的突变,可能是由于共挤压过程中热场-速度场的非线性耦合引起的。

图3b表明,不同速度梯度下,随着挤压温度的增大,平均速度相对偏差整体变化幅度较小,局部存在少量的突变点。这是由于随着挤压温度的提高,钛板和铝棒的变形抗力减小,两者的流动速率整体呈上升的趋势。平均速度相对偏差表现出强烈的波动性是因为两者流动速率在整体提高的过程中局部存在较大的波动,见图4。而平均速度相对偏差出现两个较大的跳跃点可能的原因是热-速度场的耦合的非线性程度较高,所以会产生局部较大的波动。

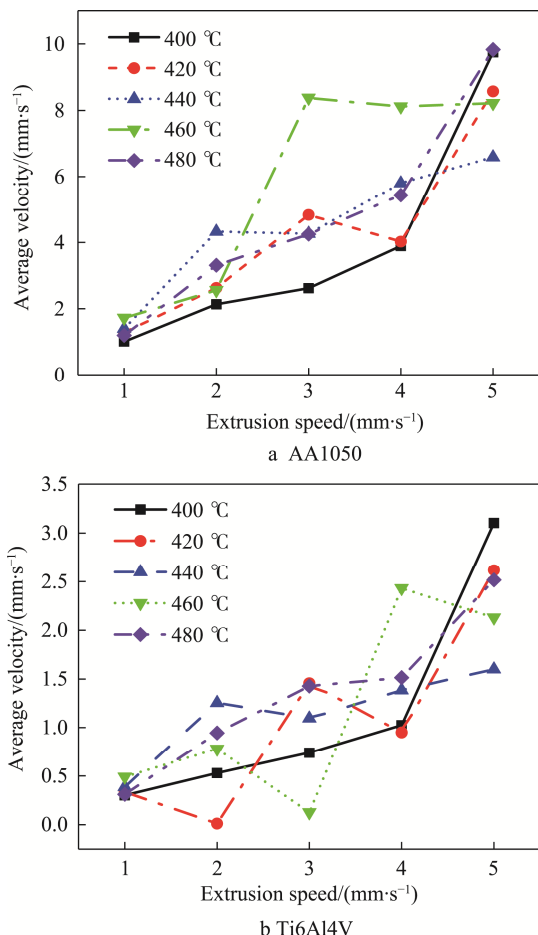


图4 挤压速度对平均流动速率的影响

Fig.4 The effects of the extrusion speed on the average velocity

3.2.2 工艺参数对最大挤出力影响

图5c表明,挤压速度和挤压温度整体上对最大挤出力呈现明显的变化趋势。图5a表明最大挤出力

随着挤压温度的递增呈现明显的减小趋势。不同速度梯度下,当温度从400 °C变化到480 °C时,最大挤出力逐渐减小,同时整体上减小的趋势较快。挤压温度与最大挤出力之间满足基本的线性负相关性。挤压速度为3 mm/s和4 mm/s时最大挤出力随挤压温度的变化幅值基本相同。不同速度梯度下,随着挤压温度的逐渐增大,铝合金的塑性逐渐增强,同时其变形抗力逐渐减小,最终使得最大挤出力减小。挤压速度为3 mm/s和4 mm/s时,最大挤出力数值基本接近,可能的原因是两种速度下铝合金的变形抗力和塑性

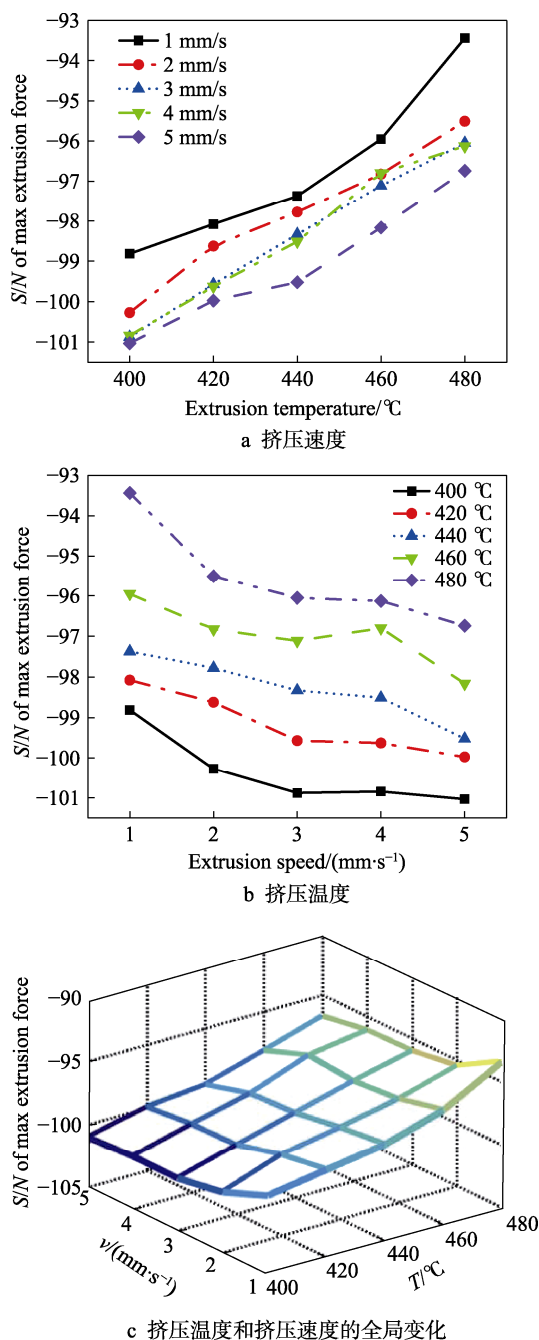


图5 工艺参数对最大挤出力影响

Fig.5 The effects of the process parameters on the maximum extrusion force

变形程度相近,所以导致两种工艺组合下最大挤出力
的数值十分接近。

图 5b 表明,最大挤出力随着挤压速度的递增存在
明显的增大趋势。最大挤出力随挤压速度的递增整
体上不断增大,但不同速度梯度范围内最大挤出力增
大的速率不同。不同温度梯度下,挤压速度从 1 mm/s
变化到 3 mm/s 时,最大挤出力增大的速度较快;挤
压速度从 3 mm/s 变化到 5 mm/s 时,最大挤出力增大的
速度明显变慢。但是整体上挤压速度与最大挤出力
之间满足基本的线性正相关。不同温度梯度下,随着
挤压速度的逐渐增大,铝合金材料加工硬化的速度逐
渐高于其再结晶软化的速度,铝合金材料的变形抗力
增大,最终使得最大挤出力变大。最大挤出力随挤压
速度的递增而增大时,其增速先增大再减小,可能是
因为铝合金材料加工硬化的速度与其再结晶软化速
度的差值出现先增大再减小的变化趋势。

3.3 方差分析

方差分析主要用于比较两个或多个样本的均值,
可以评估各种因素对优化目标的影响程度。各因素的
影响程度可用影响因子来描述。显然,影响因子越大,

该因素对优化目标的影响越大。

文中基于一般线性模型分析了工艺参数对平均
速度相对偏差和最大挤出力显著性影响。表 5 表
明挤压速度和挤压温度对平均速度相对偏差的影响
因子分别为 17.3%和 17.4%。这意味着挤压速度和挤
压温度对平均速度相对偏差的影响较小。由图 4 可
知,由于挤压温度和挤压速度的增大,铝棒和钛板
的流动速率整体上都有不同程度的增大,故平均速
度相对偏差的变化幅值较小,所以工艺参数对平均
速度相对偏差的影响较小。表 6 表明挤压速度和挤
压温度对最大挤出力影响因子分别为 89.4%和
97.6%。这意味着挤压速度和挤压温度对最大挤出力
的影响很大。挤压速度和挤压温度对平均速度相对
偏差和最大挤出力影响大小与平均速度相对偏差
和最大挤出力随挤压温度和挤压速度的变化规律相
似,即挤压速度和挤压温度对平均速度相对偏差的
影响较小时,平均速度相对偏差对挤压速度和挤压
温度的变化不敏感;挤压速度和挤压温度对最大挤
出力的影响较大时,最大挤出力对挤压速度和挤压
温度的变化敏感。

表 5 工艺参数对平均速度相对偏差的显著性影响
Tab.5 The significant influences of the process parameters on the v_{ARD}

来源	III类平方和	自由度	均方差	F 值	显著性	$\eta^2/\%$
模型	15 137.817a	8	1892.227	0.839	0.583	29.6
A	7590.890	4	1897.722	0.842	0.519	17.4
B	7546.927	4	1886.732	0.837	0.522	17.3
误差	36 077.520	16	2254.845			
总计	56 217.722	25				

表 6 工艺参数对最大挤出力显著性影响
Tab.6 The significance influences of the process parameters on the maximum extrusion force

来源	III类平方和	自由度	均方差	F 值	显著性	$\eta^2/\%$
模型	7 185 999 567.597b	8	898 249 945.950	97.627	<0.0001	98
A	5 940 776 167.387	4	1 485 194 041.847	161.420	<0.0001	97.6
B	1 245 223 400.211	4	311 305 850.053	33.835	<0.0001	89.4
误差	147 213 135.367	16	9 200 820.960			
总计	175 325 451 063.194	25				

4 实验验证

图 2 表明,平均速度相对偏差和最大挤出力的最
优工艺组合均为 A5B1 (480 °C , 1 mm/s)。采用两组
工艺参数进行实验。实验在 DWD-T200 与 GWX-1200
加热炉集成改装的热挤压实验平台上进行如图 6a 所
示。图 6b 为 480 °C , 1 mm/s 工艺参数下共挤出钛铝
复合板型材,该工艺下铝合金同一横截面流速差异性
没有完全消除,故铝合金挤出头部有少量的不平整现

象,但是铝板和钛板之间没有间隙,界面结合复合效
果较好。图 6c 为 480 °C , 2 mm/s 工艺参数下共挤出
钛铝复合板型材,该工艺下铝合金同一横截面流速差
异性也没有完全消除,而且铝板和钛板之间存在轻微
的翘曲变形。这是因为铝板和钛板在共挤出过程中相
对的流动速率偏差较大,使得铝板和钛板复合界面出
现一点细小的间隙,界面结合复合效果较差。图 6 表
明最优工艺参数下共挤出钛铝复合板的结合情况优
于其他工艺参数,与仿真结果能较好吻合。

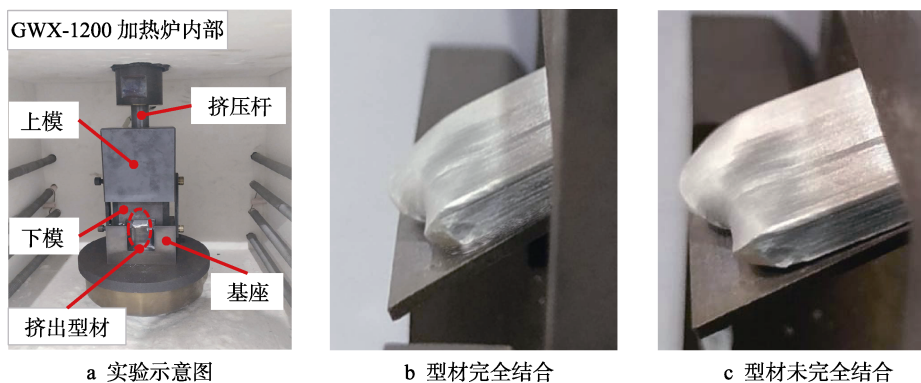


图6 非等通道横向共挤压钛铝复合板制备示意图

Fig.6 The preparation illustration of Ti/Al lamination by the non-equal channel lateral co-extrusion

5 结论

采用基于 DEFORM-3D 软件的刚塑性有限元法对钛铝异种合金非等通道横向共挤压成形进行数值建模,设计了挤压速度和挤压温度对平均速度相对偏差和最大挤出力影响的正交实验,结合统计学优化方法信噪比得到了影响平均速度相对偏差和最大挤出的最优组合,分析了挤压速度和挤压温度对优化目标的显著性影响,最后采用最优工艺组合的参数进行了实验验证,结论如下。

1) 特定成形工艺下,挤压速度和挤压温度对钛铝复合板在模具出口位置共挤出时横截面平均速度相对偏差的影响较小。挤压速度与最大挤出力呈现正相关,挤压温度与最大挤出力呈现负相关。

2) 采用信噪比优化后的平均速度相对偏差和最大挤出的最优工艺组合为 A5B1(480 °C, 1 mm/s)。这种高温低速的工艺模式有助于减小最大挤出力 and 共挤压过程中产生的翘曲变形程度。

3) 通过方差分析发现挤压速度和挤压温度对最大挤出的显著性影响明显高于平均速度相对偏差,同时挤压速度和挤压温度对平均速度相对偏差和最大挤出的影响大小与平均速度相对偏差和最大挤出随挤压温度和挤压速度的变化规律相似。

4) 采用优化后的最优工艺组合的参数进行实验,实验结果中钛铝复合板基本没有发生翘曲变形,界面结合复合效果较好,与仿真分析结果能较好吻合。

参考文献:

- [1] HAHN M, GIES S, TEKKAYA A E. Light Enough or Go Lighter[J]. Materials & Design, 2019, 163: 1—8.
- [2] TEKKAYA A E, KHALIFA N B, GRZANCIC G, et al. Forming of Lightweight Metal Components: Need for New Technologies[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 28—37.
- [3] ALFREIDER M, JEONG J, ESTERL R, et al. Synthesis and Mechanical Characterisation of an Ultra-Fine Grained Ti-Mg Lamination[J]. Materials, 2016, 9(8): 1—10.
- [4] KORZNIKOVA G F, NAZAROV K S, KHISAMOV R K, et al. Intermetallic Growth Kinetics and Microstructure Evolution in Al-Cu-Al Metal-Matrix Lamination Processed by High Pressure Torsion[J]. Materials Letters, 2019, 253: 412—415.
- [5] QI Z C, XIAO H, YU C, et al. Preparation, Microstructure and Mechanical Properties of CP-Ti/AA6061-Al Laminated Laminations by Differential Temperature Rolling with Induction Heating[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 133—144.
- [6] XU D X, YANG C L, ZHAO K N, et al. Interfacial Microstructure and Mechanical Behavior of Mg/Cu Bimetal Laminations Fabricated by Compound Casting Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(6): 1233—1241.
- [7] ZENG X Y, WANG Y X, LI X Q, et al. Effect of Inert Gas-shielding on the Interface and Mechanical Properties of Mg/Al Explosive Welding Lamination Plate[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 166—175.
- [8] CHULIST R, FRONCZEK D M, SZULC Z, et al. Texture Transformations Near the Bonding Zones of the Three-layer Al/Ti/Al Explosively Welded Clads[J]. Materials Characterization, 2017, 129: 242—246.
- [9] GECU R, KARAASLAN A. Sliding Wear of the Ti-Reinforced Al Matrix Bi-metal Lamination: A Potential Replacement to Conventional SiC-Reinforced Laminations for Automotive Application[J]. International Journal of Metalcasting, 2018, 13(3): 641—652.
- [10] 朱郎平, 李建崇, 张美娟, 等. 钛铝低压涡轮叶片熔模铸造精确成形及冶金缺陷分析[J]. 精密成形工程, 2018, 10(3): 87—92.
- [11] MA M, HUO P, LIU W C, et al. Microstructure and

- Mechanical Properties of Al/Ti/Al Laminated Laminations Prepared by Roll Bonding[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 636: 301—310.
- [12] PARK K, KIM D, KIM K, et al. Behavior of Intermetallic Compounds of Al-Ti Lamination Manufactured by Spark Plasma Sintering[J]. *Materials*, 2019, 12(2): 1—14.
- [13] YU M, ZHAO H, JIANG Z, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap AA6061-Ti6Al4V Welds[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 270: 274—284.
- [14] ZHONG X, FENG J, YAO S. Temperature Field Modeling and Experimental Study on Ultrasonic Consolidation for Al-Ti Foil[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(6): 2833—2840.
- [15] 卢海斌, 邓怀波, 钟文彬, 等. 钛铝异质材料插销增强搅拌摩擦点焊接头组织与力学性能[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(5): 86—90.
- LU Hai-bin, DENG Huai-bo, ZHONG Wen-bin, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Titanium-aluminum Joints via Friction Stir Spot Welded with Bolt-assisted[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(5): 86—90.
- [16] DIETRICH D, GRITTNER N, MEHNER T, et al. Microstructural Evolution in the Bonding Zones of Co-extruded Aluminium/titanium[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 49(6): 2442—2455.
- [17] GRITTNER N, STRIEWE B, VON H A, et al. Characterization of the Interface of Co-extruded Asymmetric Aluminum-titanium Lamination Profiles[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2014, 45(12): 1054—1060.