

异温轧制钛/铝复合板温度控制及性能研究

余超, 郭允畅, 肖子涵, 姜润五, 和志斌, 肖宏

(燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为实现钛铝异温轧制复合过程中钛板电磁感应加热时温度分布更均匀, 设计不同的感应加热线圈组对钛板进行加热, 使用有限元模拟了电磁感应加热中感应线圈的结构参数对温度场的影响, 通过调节感应加热参数将钛板宽度方向温差控制在 50 ℃以内, 形成较均匀的钛板温度。对钛板进行感应加热和测温试验, 在较短时间的加热下形成了平均温度 635 ℃, 温差 45 ℃以内的钛板温度, 验证了仿真结果的正确性。对均匀性较好的高温钛板与室温铝合金板进行异温轧制, 制备出界面剪切强度为 63.3 MPa 的钛/铝复合板, 并对制备出的钛/铝复合板结合性能的分布受温度均匀性的影响做了分析。

关键词: 钛/铝复合板; 异温轧制; 感应加热; 温度控制; 线圈设计

中图法分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)06-1693-08

钛/铝复合板具有覆层钛材良好的抗腐蚀性能和基层铝合金低密度的优良综合力学性能, 适用于大部分钛及钛合金的工作环境并且成本和轻量化方面要优于钛材。研究钛和铝的复合工艺, 制备出低成本、高性能、高品质的钛/铝复合板对解决我国航天工程、海洋工程、轨道交通、军事工业等领域的问题具有重要意义^[1-3]。钛/铝复合板的生产方式主要为爆炸焊接复合法、轧制复合法、固液铸轧法等^[4-6]。轧制复合法由于有工艺安全稳定的特点更适合作为工业生产的主要方式, 但由于钛和铝的力学性能差异大, 在不同的复合条件下, 板坯会出现变形不协调进而造成结合强度低、残余应力大和板形不佳等缺陷。

将钛板加热至高温, 与低温铝板进行轧制复合, 可使二者在变形抗力接近的条件下轧制复合, 以解决钛/铝轧制复合时变形不协调问题。例如, 祁梓宸等^[7]采用加热炉加热至 800 ℃的工业纯钛 TA1 与室温的 6061 铝合金进行轧制复合, 在压下率 50% 条件下制备出结合强度达到 108 MPa 钛/铝复合板。但这种工艺升温较慢, 容易在轧前产生厚的氧化层, 而且难以精确控制轧入时的温度。电磁感应加热具有加热速度快以及易于自动化控制等优点, 被广泛应用于冶金行业^[8-10], 采用感应加热快速加热的工艺有利于迅速升温和减少钛板氧化。Yu 等^[11]通过方形线圈横磁感应加热的方法, 将钛/铝组合板坯在轧机入口附近同时加热, 在 TA1 温度 850 ℃, 总体 48% 压下率下异温复合, 得到强度 78 MPa, 变形协调性较

好的复合板, 表明钛铝虽然变形能力相差较大, 但在温度的作用下可以将这种差异缩小, 实现高强度的结合, 但是由于钛的导热率低, 温度传导慢, 比铝板更难加热均匀^[12], 横磁感应加热下的温度均匀性不佳, 矩形板坯热区集中在 4 个边部, 因此对复合板结合强度、力学性能等方面不同部位都会造成较大差异。钛板加工前的温度不均会最终影响其本身性能, 因此对加工前钛板的温度均匀性进行控制, 从而减少产品的内应力和各种缺陷是十分必要的^[13-14]。

对于感应加热的温度均匀性问题, 研究人员对影响温度均匀性的因素做了大量研究。杨晓光等^[15]通过理论公式计算和数值计算, 认为板坯内激发的涡流形状与线圈形状相近, 可认为是线圈在薄板上的投影。闫朝辉等^[16]在研究中调整加热器和板带间气隙的大小, 减小空气的磁阻, 通过气隙补偿的方式提高了原本较低的边部温度, 改善了加热后出口处的板带温度均匀性。Liu 等^[17]通过感应加热板坯仿真分析认为加热频率增加时最大发热量会向板坯的拐角和边缘移动, 同时较高工作频率和板坯的低热导率会增加板坯感应加热过程的不均匀性。谭晶等^[18]分析了轮胎硫化感应加热设备中的磁通密度和温度场, 认为合理安排线圈分布能够改善涡流场的分布形式进而改进加热装置, 避免局部加热效果不佳的情况。并据此设计了多段小型圈组, 新型的排布方式提高了加热速率, 减轻了原本单线圈的温度场在鼓瓦的集中。王宏民等^[19]提出一种新型矩阵式线圈, 比较其与蜂窝状线圈温度

收稿日期: 2023-06-10

基金项目: 河北省自然科学基金 (E2020203001); 国家自然科学基金 (52075472, 52004242); 国家重点研发计划 (2018YFA0707300)

作者简介: 余超, 男, 1990 年生, 博士, 副教授, 燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004, 电话: 0335-8387652, E-mail: yuc@ysu.edu.cn

衰减的差异。矩阵式线圈的有效加热面积更大, 温度减低趋势更平缓, 对薄板均匀性的控制效果更好, 较热效能更高。周萍等^[20]通过在合金试棒的感应加热研究中减小加热速率提高了温度均匀性, 认为加热速率会影响热量在棒体内的传导从而对试件的温度均匀性有一定改善, 通过改变线圈结构参数有效控制了棒体两头温度分布。因此, 对于不同材料和形状, 想要获得均匀的加热效果, 就要设计合适的线圈并对其结构尺寸参数对温度场的影响进行研究。

本研究通过有限元模拟了钛板的感应加热过程, 并设计合适的感应加热线圈, 通过调整感应加热参数, 使钛板加热时温度更均匀, 制备出结合性能均匀且具有较高结合强度的钛/铝复合板, 对工业电磁感应加热异温轧制钛/铝复合板具有指导意义。

1 电磁感应加热有限元模拟

1.1 感应加热钛板的有限元模型

对有限元模型采用顺序耦合的方式对电磁感应加热过程进行建模, 利用APDL命令流建模分析。计算流程如图1所示。计算中涉及2种物理环境, 即电磁场和温度场。模型中对这2种环境分别定义物理环境文件, 在顺序耦合计算中相关数据在两物理场中传递与更新。在计算时, 两场共用网格模型, 物理环境中定义不同单元、材料属性、载荷等, 每次计算需读取环境文件并运行得出一个结果。

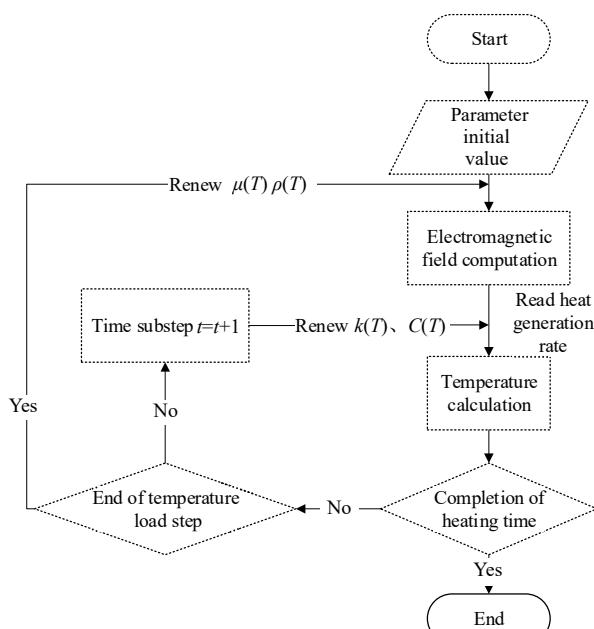


图 1 有限元模拟感应加热流程图

Fig.1 Finite element simulation flow chart of induction heating

建模采用横磁感应加热方式, 由于板坯为矩形故采用矩形线圈, 感应加热线圈由2个铜管线圈组成如图2a所示, 钛板的网格模型根据集肤效应的透入深度对表面进行细化, 如图2b所示。感应加热模型中电磁场分析类型为谐波分析, 温度场分析为瞬态分析。

实体模型包括: 感应线圈、钛板和气体空间, 三者的参数见表1。前处理中建立实体模型后, 对有限元模型的单元类型及材料参数进行定义。

不同参数将会出现基于温度升高的相应变化, 因此在为电磁感应加热钛板的有限元模型中, 温度与相关参数的非线性关系需要被考虑在内。TA1在模拟环境中的材料属性随温度变化情况如表2所示, 热场参数定义钛的热传导系数(K_{XX})、比热容(C)和对流系数(HF), 电磁参数定义电阻率, 且相对磁导率为1。

仿真模型在电磁环境中, 选中线圈的体号利用BFE命令施加电流密度 $2.4 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, 对气体空间的边界平面上使用DA命令施加约束, 即在面上施加磁力线平行边界条件, 选定平面编号并将与面垂直的相应的AX、AY、AZ设为0值。在热场环境中施加热对流载荷, 对流系数随温度变化改变。

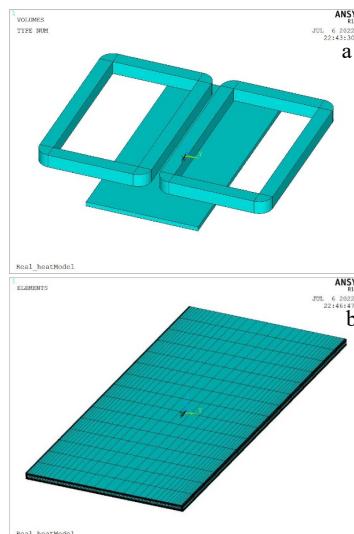


图 2 双线圈模型

Fig.2 Solid model of coil-titanium plate (a) and grid model of titanium plate (b)

表 1 实体模型主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of the solid model (mm)

Parameter	Value
TA1 titanium plate size	50×100×2
Induction coil size	50×80×6
Cross section size of coil	6×6
Gas space size	500×500×600
Air gap between titanium plate and coil	2

表 2 电磁热参数随温度的变化

Table 2 Variations of electromagnetic thermal parameters with temperature

Temper- ature/°C	Thermal conductivity coefficient/ W·(m·K) ⁻¹	Specific heat capacity/ W·(kg·K) ⁻¹	Convection coefficient/ W·(m·K) ⁻¹	Resistivity/ × 10 ⁻⁷ Ω·m
20	20.7	522	10	4.0
100	18.6	542	10	7.2
200	17.4	551	15	10.4
300	16.6	582	25	12.2
400	16.2	596	40	13.1
500	16.3	613	70	13.7
600	16.4	627	100	14.0
700	16.8	639	130	14.2
800	17.2	661	160	14.4
900	17.7	584	190	14.8
1000	17.6	595	220	15.1

1.2 感应加热钛板的模拟结果

对 2 个线圈中分别通同向和异向的电流进行仿真, 其结果如图 3a 所示。由于感应加热存在的端部效应, 钛板头尾温度低, 但在实际生产中, 而坯料一般较长, 头尾低温区长度占比小, 所以忽略头尾低温区, 只对钛板中部宽度方向的加热均匀性做分析。当两线圈电流同向时, 钛板温度边部高中部低。从电流异向时的仿真结果可以看出, 钛板中间部位出现了一个长条形热区, 该热区的温度略低于边部, 在一定程度上提高了钛板中部温度, 改善了温度的均匀性, 如图 3b 所示。根据邻近效应

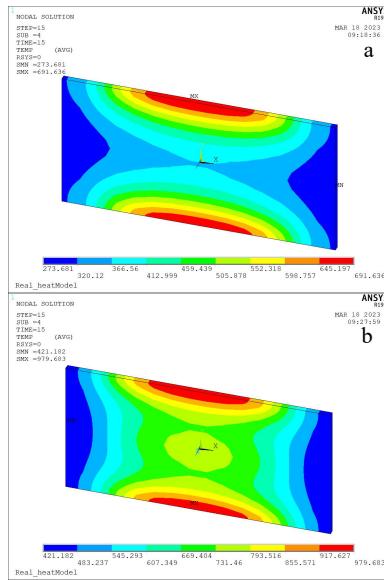


图 3 双线圈电流流向相同和不同的加热效果

Fig.3 Heating effect of the double coil with current in the same (a) and different (b) directions

的原理分析认为, 相互靠近的线圈中两导体的电流发生了偏侧性的重新分布, 电流朝着彼此远离的方向集中, 这种电流分布情况形成的交变磁场在板坯中部激发感应电流, 使板坯温度快速升高。

利用这一点可以认为, 假设线圈足够多, 并横向排列, 保持相邻两线圈电流方向相异, 则可以使板中部区域产生足够的热区, 从而使得板横向温度分布呈水平波动的趋势, 即横向温度基本保持在某一个值附近, 并在小范围内起伏, 这样就能够很好地控制板的温度均匀性。

为使矩形钛板加热均匀, 在板坯中部产生更多热区, 并使线圈结构相对紧凑, 设计出一种上下双层的三线圈组加热方式, 其结构二维简图和相关结构参数如图 4 所示。

装置由 3 个线圈组成, 线圈电流密度相同, 钛板一侧为双线圈 (称双线圈侧) 另一侧为单线圈 (称单线圈侧), 双线圈一侧通异向电流。

待加热的钛板大小不变, 此时决定加热状态的结构参数有: 双线圈长 (L_b)、宽 (B_b), 单线圈长 (L_a)、宽 (B_a) (三线圈的设计默认 3 个线圈长度尺寸相等)、双线圈侧气隙 (上气隙) H_b 、单线圈侧气隙 (下气隙) H_a 、双线圈间距 d_a 。研究主要参数对钛板温度场的影响, 得出能够使钛板温度分布均匀的参数组合。

模拟钛板在不同的单线圈宽度、双线圈侧线圈间距、上下侧气隙下, 将中部加热到 850 °C 左右时的温度分布, 取板坯中部宽度方向的温度分布曲线如图 5 所示。

由钛板温度曲线图分布分析可知, 如图 5a 所示, 随着单线圈宽度 B_a 的增大, 中部温度波峰有轻微向边部移动的趋势, 这是因为单线圈的两长边横向移动, 磁场分布因此发生变化, 激发的感应电流位置改变。虽然单线圈宽度的增加有利于温度更均匀, 但加热温度会降低, 即加热效率会下降。如图 5b 所示, 虽然上部双线圈间距

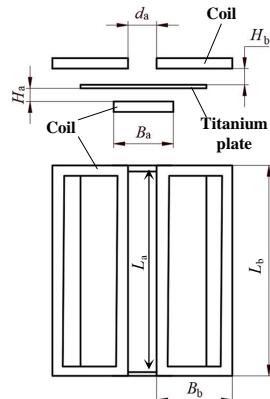


图 4 三线圈加热结构简图

Fig.4 Schematic diagram of three-coil heating structure

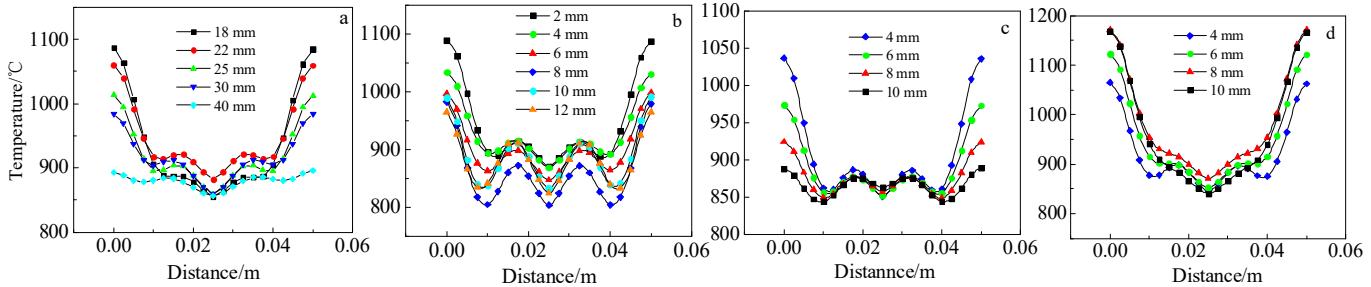


图 5 不同参数下的钛板温度曲线

Fig.5 Temperature curves of titanium plate with different parameters: (a) single coil width change, (b) coil spacing change on the double coil side, (c) air gap change on the double coil side, and (d) air gap change on the single coil side

改变, 但中部热区波峰位置并未改变, 说明间距的增大引起的磁场变化并未改变在板坯中的感应电流的产生位置。根据仿真结果分析得出, 适当增大 d_a 的值可以减小温差, 增大中部热区的波动幅值, 对温度均匀性有改善作用。如图 5c 所示, 随着双线圈侧空气间隙 H_b 增大, 将板加热至 850 °C 需要更长时间, 加热效率变低。气隙的变大使钛板边部温度明显降低, 边部温度降低至 880 °C 左右, 当 $H_b=10$ mm 时温差最小。因此, 双线圈侧的气隙对于控制板边部温度起到重要作用。如图 5d 所示, 当单线圈侧空气间隙 H_a 从 4 mm 增大到 10 mm 时, 板坯宽度方向上温度的均匀性逐渐变差, 边部到中部温度下降越明显, 钛板的宽度方向温差变大, H_a 应该控制在较小的范围内, 当取值过大, 单线圈侧线圈激发的电流较小, 不利于钛板温度均匀性的控制。

综合考虑感应加热均匀性和加热效率, 依据单一感应加热参数的温度影响效果规律, 对各参数进行一定的

调整, 在参数为 $H_b=7$ mm, $H_a=4$ mm, $d_a=6$ mm, 双线圈长宽 100 mm×25 mm, 单线圈长宽 100 mm×26 mm 时, 加热 21 s, 得到较为理想的温度场, 感应加热模拟和实验结果如图 6 所示。

此时钛板中部温度在 850 °C 左右, 边部温度最高 885 °C, 板坯温差 35 °C 左右。在这种参数组合下, 钛板横向温度基本为水平波动, 板整体温差控制在 50 °C 以内, 温度分布基本均匀。

2 感应加热与轧制复合实验

2.1 感应加热实验

实验材料: 感应加热测温实验使用工业纯钛 TA1 作为实验材料, 尺寸规格与有限元模型一致, 其化其学成分见表 3。

实验装置: 包括中高频感应加热电源、感应线圈、加热平台、测温仪器等。加热装置上胶装石英板作为绝缘耐高温平台, 用来放置将被加热至高温的钛板。红外

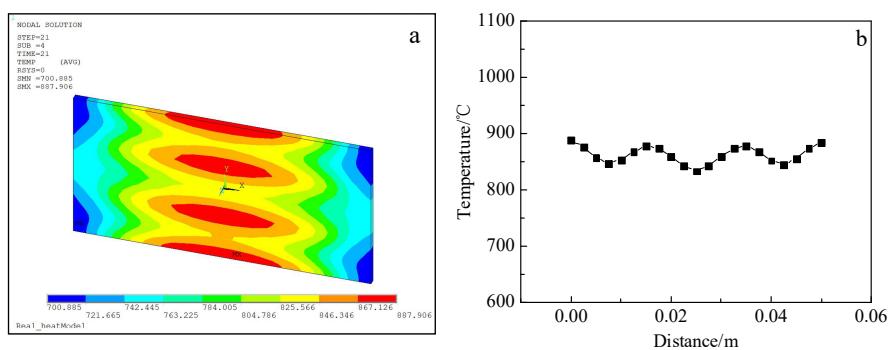


图 6 优化参数后的钛板加热效果

Fig.6 Temperature field of titanium plate after parameter optimization: (a) temperature distribution nephogram and (b) transverse temperature curve in the middle

表 3 钛板 TA1 主要化学成分

Table 3 Main chemical composition of TA1 plate (ω/%)

Fe	Si	C	N	H	O	Ti
0.15	0.1	0.05	0.03	0.015	0.15	Bal.

测温仪器由三脚架固定对钛板升温过程进行拍摄。电磁感应加热线圈由铜管线圈和黄铜定位零件装配组成。

通过测温实验验证电磁感应加热有限元模型的正确性, 并进一步探究在实际中将钛板加热均匀的工艺。

图7为红外热像仪记录的双线圈组在异向电流下加热出的板坯温度与模拟结果对比, 模拟与实验钛板表面温度分布一致, 板坯中部形成了热区, 钛板30 s左右被加热至高温。

感应加热测温实验使用软件工具提取板上中部路径上点的温度, 如图8a所示, 并将温度曲线与仿真结果中的温度曲线做对比。在气隙为3.6和9.1 mm, 线圈间距2 mm保持不变时, 加热时长12 s, 钛板感应加热后的温度曲线与仿真结果基本一致, 空气间隙较小时板坯中部温场比较明显, 边部温度接近800 °C, 中部位置板坯的温度平均约500 °C, 温差较大, 如图8b所示。相同时间内9.1 mm空气间隙加热出的板坯整体温度明显偏低, 如图8c所示。

对3线圈组进行的测温实验, 钛板温度分布如图9所示。感应加热钛板, 参数为上气隙4.7 mm, 线圈间距6 mm, 下气隙5.3 mm, 电源功率48 kW, 感应加热40 s。从图9中可以看出板坯中部形成了2个热区, 中部温度达到750 °C左右。中部热区的形成主要是单线圈侧的线圈对板坯中部的加热作用。

通过控制单一变量改变的感应加热钛板温度试验, 进一步验证了仿真中所得出的结论, 在对一系列参数组合进行调整并进行感应加热温度测试后, 得出了能够将2 mm钛薄板感应加热均匀的加热线圈结构参数组合。

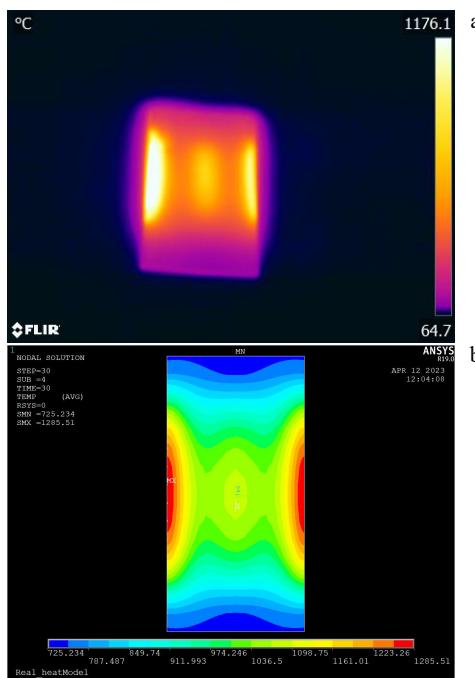


图7 实际温度和模拟温度分布对比

Fig.7 Comparisons of actual temperature distribution (a) and simulated temperature distribution (b)

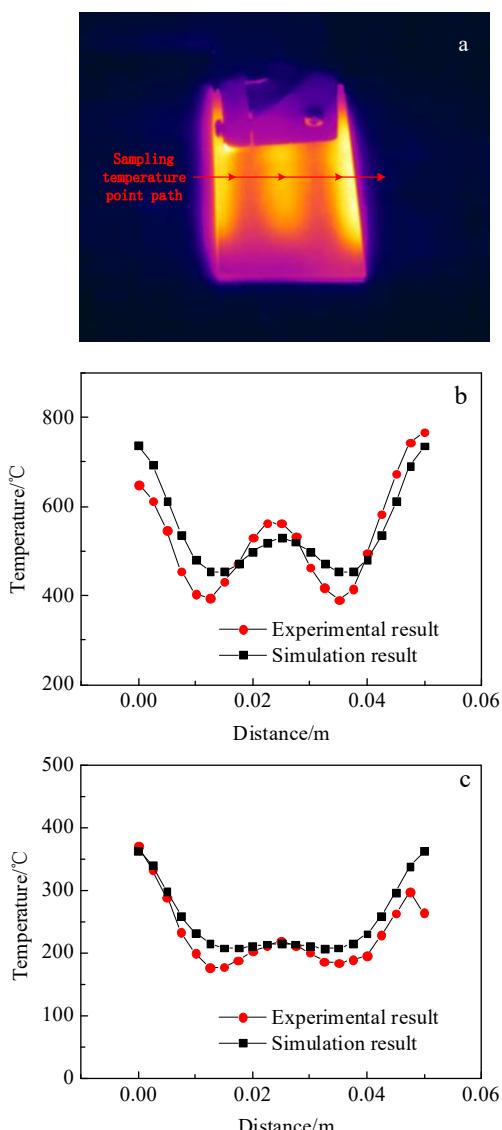


图8 采温路径与温度曲线

Fig.8 Temperature collection path (a) and temperature curves with the air gap of 3.6 mm (b) and 9.1 mm (c)

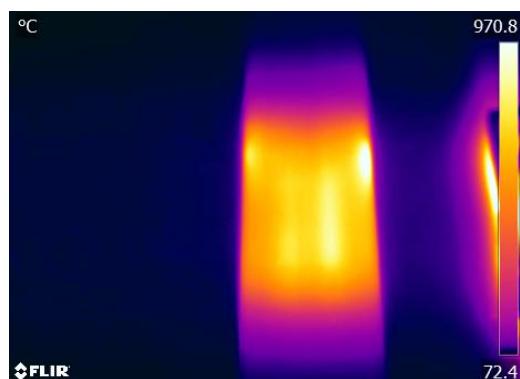


图9 三线圈组加热效果

Fig.9 Three-coil group heating effect

当 $H_b=4.1$ mm, $d_a=4.6$ mm, $H_a=5.3$ mm, 双线圈长宽尺寸为 $100\text{ mm}\times 25\text{ mm}$, 单线圈长宽为 $100\text{ mm}\times 26\text{ mm}$ 时, 加热 40 s, 得到钛板宽度方向上的温差比较小, 其温度分布表现为在宽度方向上基本呈现出起伏波动的走势, 且整体温差在 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 其加热效果如图 10a 所示, 提取板坯宽度方向温度曲线如图 10b 所示。

由此可知, 三线圈组采用适当的工艺参数能够使钛板在短时间内感应加热升至高温, 且温度的分布均匀性良好, 有利于提高后续相关加工工艺得出的产品的性能。

2.2 钛/铝复合板异温轧制实验

实验材料: 感应加热测温实验使用工业纯钛 TA1 和 AA6061 铝合金作为实验材料, 钛板厚度 2 mm, 铝板厚度 4 mm, AA6061 铝合金化学成分如表 4 所示。钛板规格为尺寸 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 2\text{ mm}$; 铝板尺寸 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。

轧制前准备工作首先需要将钛板和铝板的待复合表面采用 80 目砂纸打磨, 去除表面氧化层, 再进行倒角以方便组坯咬入轧机, 最后使用乙醇和丙酮溶液以乙醇-丙酮-乙醇的顺序多次清洁钛、铝已打磨的待结合面, 除去表面油脂油污。无气体保护的条件下, 加热后的钛板与常温铝板叠合推入轧机, 如图 11a 所示。

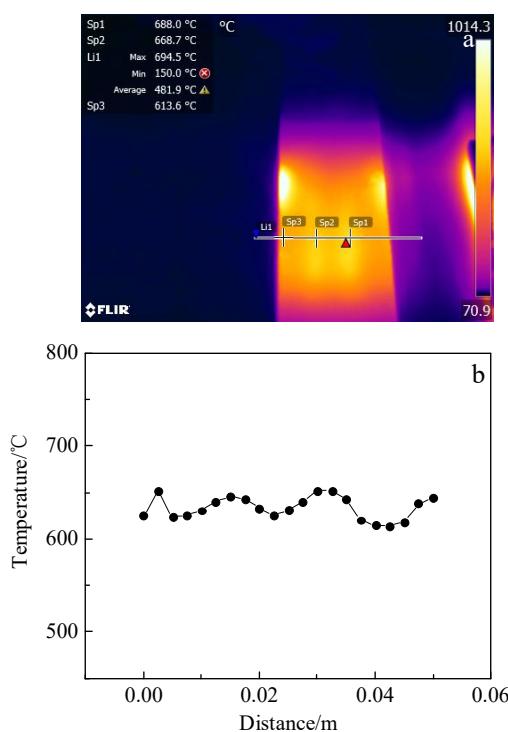


图 10 温度云图和宽度方向温度曲线

Fig.10 Temperature nephogram (a) and temperature curve in width direction (b)

表 4 AA6061 铝合金主要化学成分

Table 4 Main chemical composition of AA6061 alloy (wt%)

Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Ti	Al
0.15	0.6	1.2	0.25	0.15	0.2	0.7	0.15	Bal.

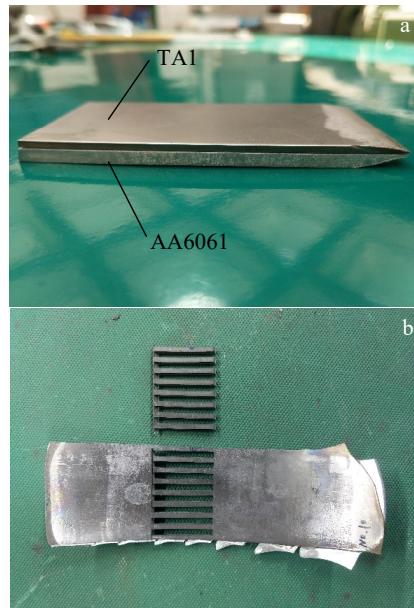


图 11 钛/铝复合板组坯与取样

Fig.11 Combination (a) and sampling (b) of Ti/Al composite plates

对轧制后的板坯进行线切割, 制做剪切试样件测量结合强度。在宽度方向路径上切割试件如图 11b 所示, 测试在宽度方向上板坯的结合强度分布。实验得出在感应加热 70 s, 轧入时平均温度 $771\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压下率 48% 时, 结合强度最高达到 76.4 MPa 且分布均匀性良好。

在该参数条件下感应加热后, 轧入前的横向温度曲线见图 12a。板坯的横向温度分布均匀性较好, 最高温度 $833\text{ }^{\circ}\text{C}$, 板坯中部温差在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 温度均匀性比边部更好。在图 12a 中的温度场下轧制出的钛/铝复合板结合强度分布如图 12b 所示。

两金属结合良好, 板坯的强度平均值 63.3 MPa , 轧前温度在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时结合强度较高, 最高达到 76.4 MPa , 整体来看强度分布比较均匀, 这主要是因为轧前温度温差较小, 温度分布均匀性良好, 且在轧制过程中金属的流动促使热量进一步传导, 进而改善了板坯的结合性能。

通过控制不同的加热时长使钛板轧前处在不同温度, 研究钛板温度高低对轧制复合的影响, 其实验参数见表 5。在不同加热时长下加热钛板, 并与铝板进行异温轧制, 观察钛板的温度均匀性和板坯宽度方向上结合强度的分布。

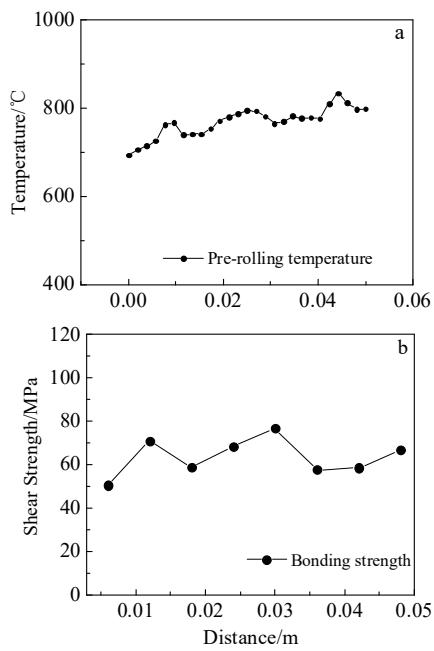


图 12 异温轧制前的温度与轧后结合强度

Fig.12 Temperature before rolling (a) and bonding strength after rolling (b)

表 5 不同加热时长轧制实验参数

Table 5 Experimental parameters of rolling with different heating duration

Induction heating time/s	Aluminum plate temperature/°C	Reduction rate/%
55, 60, 65	21	44

在 44% 压下率, 不同加热时长下轧制的实验中, 轧前温度分布曲线和与之对应的轧后复合板结合强度分布如图 13 所示, 根据图线来分析钛/铝复合板结合强度与轧前温度分布的关系。

加热时长 55 s 的条件下, 板坯轧入时平均温度 718 °C, 最高温度 807 °C, 结合强度最高 38.8 MPa, 板坯中存在结合强度很低的点, 对照两实验曲线可以看出在温度较高与温度降低的过渡部位, 两金属轧制后容易出现较低的结合强度, 这是由于在轧制过程中该部位会受到温度较高部位传导来的热量, 同时该部位原有的热会向低温部位传导, 继而出现较剧烈的温度交换, 导致金属的结合过程中受热应力影响较大, 强度变低。

当加热时长为 60 s 时, 轧入时的平均温度 739 °C, 温度最高 860 °C, 强度最高时达到 55 MPa, 板坯结合强度较低的部位也是轧入时温度较低的部位, 说明轧制复合时较高的温度更有利于结合强度的提高, 轧制温度在 800 °C 以上时, 钛铝的轧制复合效果最好。

当加热时长为 65 s 时, 轧机入口处的平均温度约 744 °C, 最高温度 840 °C, 中部温度分布均匀性良好。制备出的板坯在边缘处结合较差, 板坯结合强度分布有一定起伏, 平均值约 42.3 MPa, 强度最高达到 56 MPa, 如图 13f 所示。尽管在轧入时的温度均匀性较好, 在轧制过程中仍会在挤压作用下出现金属流动, 并伴随复杂的温度传导过程, 导致在同一板坯上的强度分布出现差异。此外, 板坯边部散热较快, 轧制复合时的强度较低。

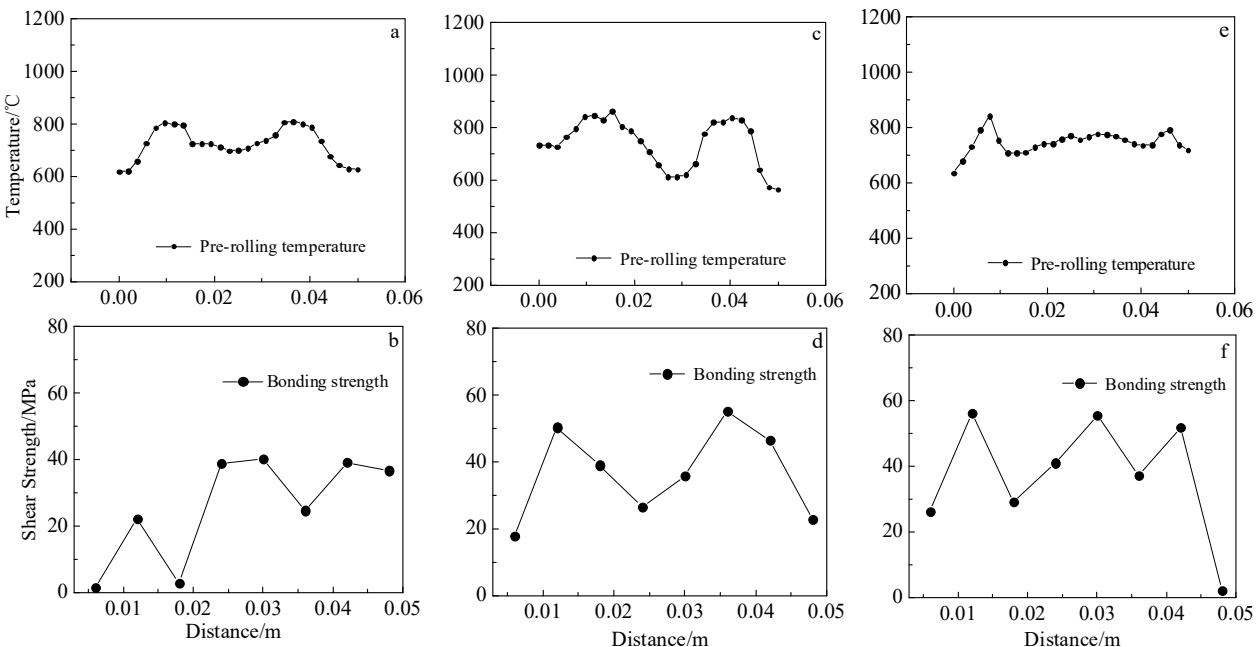


图 13 宽度方向温度与剪切强度分布情况

Fig.13 Temperature and shear strength distribution in the width direction under heating for 55 s (a-b), 60 s (c-d), and 65 s (e-f)

3 结 论

1) 电磁感应加热钛板, 当双线圈电流异向时能够使板坯中部产生热区, 相比于双线圈电流同向时, 能够形成宽度方向上较小的温度波动分布。

2) 在双线圈侧气隙为 7 mm, 单线圈侧气隙 4 mm, 双线圈侧线圈间距 6 mm, 双线圈长宽尺寸 100 mm×25 mm, 单线圈长宽 100 mm×26 mm 下可以将钛板温度加热均匀, 温度波动在 50 °C 以内, 实际加热中也能够实现钛板的温度均匀性控制。

3) 在 55~65 s 内, 随着加热时间的增加, 钛铝平均结合强度有所增加, 比较均匀的轧前温度有利于复合后的强度分布均匀性。通过控制感应线圈的参数使钛板加热温度在 750~800 °C 之间, 在压下率 48% 下, 异温轧制得到的复合板结合强度达到 63.3 MPa。

参考文献 References

- [1] Han Jianchao(韩建超), Liu Chang(刘 畅), Jia Yi(贾 纶) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(6): 1270
- [2] Liu Shifeng(刘世峰), Song Xi(宋 奎), Xue Tong(薛 彤). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2020, 40(3): 77
- [3] Wu Xiaoming(吴 晓 明), Shi Changgen(史 长 根), Fang Zhongxing(房中行) *et al.* *Rare Metal Material and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(1): 286
- [4] TianMaojiang(田茂江), CuiDefeng(崔得峰), ZhangXiaohui(张晓辉). *Electrical Materials* (电工材料)[J], 2021, 176(5): 3
- [5] Li Yajie(李亚杰), Ma Chengrui(马承睿), Liu Cuirong(刘翠荣) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(9): 3264
- [6] Wang C, Jiang Y, Xie J *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 708: 50
- [7] Xiao H, Qi Z C, Yu C *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 249: 285
- [8] Fashu S, Lototskyy M, Davids M W *et al.* *Materials & Design*[J], 2020, 186: 108295
- [9] Liu Z F, Xie Y H, Ye X L *et al.* *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*[J], 2021, 235(22): 6357
- [10] Wang Yuzhong(王玉忠), Hu Xue(胡 雪), Wei Min(魏 敏) *et al.* *Mechanical Research and Application*(机械研究与应用)[J], 2019, 32(5): 194
- [11] Yu C, He Z B, Lv Q *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2021, 117: 383
- [12] Wang Feilong(王飞龙), Zhang Yong(张 勇), Long Gang(龙 刚) *et al.* *Steel, Vanadium, Titanium*(钢铁钒钛)[J], 2021, 42(2): 48
- [13] Chen Wei(陈 伟). *Sichuan Metallurgical* (四川冶金)[J], 2011, 33(6): 55
- [14] ZhangJiulin(张久林). *Furnace*(工业炉)[J], 2021, 43(4): 17
- [15] Yang Xiaoguang(杨晓光), Wang Youhua(汪友华). *Metal Heat Treatment*(金属热处理)[J], 2003(7): 49
- [16] Yan Zhaohui(闫朝辉), Wang Youhua (汪友华), Liu Chengcheng (刘成成) *et al.* *Metal Heat Treatment*(金属热处理)[J], 2021, 46(5): 87
- [17] Liu H P, Wang X H, Si L Y *et al.* *Journal of Iron and Steel Research International*[J], 2020, 27(4): 420
- [18] Tan Jing(谭 璟), TanMin(谭 敏), Yang Weimin(杨卫民) *et al.* *Journal of Beijing University of Chemical Technology*(北京化工大学学报)[J], 2021, 48(3): 99
- [19] Wang Hongmin(王宏民), Liu Yanxin(刘燕鑫), Xu Jiazhong(许 家忠). *Journal of Northeast Forestry University*(东北林业大学学报)[J], 2020, 48(4): 120
- [20] Zhou Ping(周 萍), Xie Ziwei(谢紫微), Chen Jiguang(陈继光), *et al.* *Thermal Science and Technology*(热科学与技术)[J], 2017, 16(6): 464

Temperature Control and Properties of Titanium/Aluminum Composite Plate Prepared by Heterogeneous Temperature Rolling

Yu Chao, Guo Yunchang, Xiao Zihan, Jiang Runwu, He Zhibin, Xiao Hong

(National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to achieve a more uniform temperature distribution of titanium plate during electromagnetic induction heating of titanium/aluminum composite plate prepared by heterogeneous temperature rolling, different induction heating coil sets were designed to heat the titanium plate, and the influence of the structural parameters of the induction coil on the temperature field in electromagnetic induction heating was simulated by finite elements, and the temperature difference between the width of the titanium plate was controlled within 50 °C by adjusting the induction heating parameters to form a more uniform temperature of the titanium plate. The induction heating and temperature measurement experiments of the titanium plate were carried out, and the average temperature of the titanium plate was formed under a short heating time of 635 °C, and the temperature difference within 45 °C was formed, which verified the simulation results. A titanium/aluminum composite plate with an interface shear strength of 63.3 MPa is prepared by rolling the high-temperature titanium plate and the room-temperature aluminum alloy plate with good uniformity, and the distribution of the bonding performance of the prepared titanium/aluminum composite plate was analyzed by temperature uniformity.

Key words: titanium/aluminum composite plate; heterogeneous temperature rolling; induction heating; temperature control; coil design

Corresponding author: Xiao Hong, Ph. D., Professor, National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, P. R. China, Tel: 0086-335-8387652, E-mail: xhh@ysu.edu.cn