

DOI: 10.3901/JME.2019.10.062

不锈钢/碳钢热静压复合中表面形貌对界面变形及复合质量的影响*

张勃洋 李 硕 张清东 刘吉阳 张立元
(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

摘要: 双金属受压变形复合过程中表面形貌是影响其界面变形行为及结合质量的重要因素。针对 AISI 304 不锈钢与 Q235A 碳钢, 通过车削加工制备 3 种具有不同表面微观形貌的圆柱型试样组, 在真空条件下实现该两种金属的热静压复合后, 利用无损检测技术测定界面复合率、单轴拉伸破坏试验测定复合材料的强度, 并在其复合区域取样, 利用扫描电镜观察接触界面轮廓的几何特征, 分析复合过程中界面变形规律及对复合质量的影响; 基于商业有限元软件模拟分析复合过程接触表面粗糙峰变形, 研究表面微观形貌对复合过程的影响机制。结果表明, 表面微观形貌对热静压复合过程中界面的变形和复合质量影响显著; 在复合过程中, 较硬的不锈钢粗糙峰几乎无变形地嵌入进碳钢基体内, 而较软的碳钢粗糙峰则明显被压扁变平; 此外, 不锈钢和碳钢试样在复合前通过表面预处理获得的不同粗糙度对于复合质量具有相反的影响作用, 不锈钢表面越粗糙越有利于复合, 碳钢表面越光滑越有利于复合; 不锈钢侧界面粗糙度增大和碳钢侧界面粗糙度减小, 都可以使得界面两侧金属相对滑动减小、界面间接触应力增大, 从而提高了界面复合质量。

关键词: 表面微观形貌; AISI304 不锈钢/Q235A 碳钢; 热静压复合; 界面几何特征; 结合质量

中图分类号: TG404

Effect of Surface Micromorphology on the Deformation and Bonding Quality of Stainless Steel/Carbon Steel during Hot Isostatic Pressing

ZHANG Boyang LI Shuo ZHANG Qingdong LIU Jiyang ZHANG Liyuan
(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Surface morphology is an important factor affecting the interface deformation behavior and bonding quality of bimetals during deformation bonding process. In order to study the deformation laws of different surface micromorphology and its effect on the bonding quality during deformation bonding process, three kinds of AISI 304 stainless steel and Q235A carbon steel cylindrical specimen with different surface micromorphology are prepared by turning. After bonding the two kinds of metal in vacuum, the interfacial bonding quality of composites are characterized by tensile failure strength and interfacial bonding rate and the geometrical characteristics of the contact interface contour are analyzed by microscopic observation. Based on the commercial finite element software, the deformation process of the surface roughness peak during the deformation process is simulated and analyzed. The results show that the surface roughness has a significant effect on the deformation and bonding quality of the interface. The deformation forms of rough peaks of stainless steel and carbon steel are different during the static pressure composite process. The rough peaks of harder stainless steel are embedded in the carbon steel almost without deformation, while the rough peaks of softer carbon steel are obviously flattened. As the roughness of stainless steel increases and the roughness of carbon steel decreases, the relative sliding of the metal on both sides of the interface decreases and the contact pressure per unit area increases because of the pinning of the surface roughness of the stainless steel surface to the surface of the carbon steel, resulting in the improve of interfacial bonding quality.

Key words: surface micromorphology; AISI304 stainless steel/Q235A carbon steel; hot isostatic pressing; geometric characteristics of contact interface; bonding quality

* 国家自然科学基金资助项目(51575040)。20181024 收到初稿, 20190221 收到修改稿

0 前言

奥氏体不锈钢具有良好的耐腐蚀性, 在石油化工、船舶、航空等行业应用广泛^[1]。采用不锈钢与低碳钢的层合板替代单纯不锈钢厚板, 可以在既保证耐腐蚀性要求又满足力学强度要求的前提下^[2], 大大减少不锈钢用量, 有效降低材料成本并节约 Ni、Cr 等稀缺金属, 符合绿色可持续发展理念, 经济和社会效益将十分显著^[3-5]。

受压变形复合是金属层合板制造的主要工艺方法, 属于固相连接, 包括静压复合、轧制复合、爆炸复合和共挤压复合等^[6]。理论上, 两个相互接触并几乎不相对滑动的洁净且平坦的表面, 很容易通过接触界面间原子键合而形成界面之间的完美结合^[7]。但工程上, 由于无法制备出绝对洁净且平坦的表面^[8], 目前异种金属材料的受压变形复合过程, 总是需要相对较大的压力及形变使之表面氧化层破裂而裸露出洁净的次表层金属, 并实现相互近似无滑动的接触, 也总是以表面粗糙形貌尖峰的接触变形并首先实现界面间原子键合形成多点结合而开始。之后, 随着受压变形的继续, 界面间的结合点进一步增加, 初始接触时界面间形成的缝隙和空洞不断收缩变小, 从有限点结合发展到一定面积的面结合, 尚未复合的界面间缝隙和空洞随着受压变形的继续而逐渐收缩甚至愈合消失, 最终可能实现金属间的全部接触面完全复合。在复合过程中, 温度和形变能促使实现结合的金属区域进一步出现跨界面的原子扩散并形成一定厚度的复合界面层, 也会对界面间原子键合发挥促进作用。

一直以来, 许多学者对扩散焊接过程中表面形貌对界面结合行为及接头力学性能的影响展开了一系列研究。ZHANG 等^[9]提出在粗糙表面的 MA 956 合金扩散焊接过程中可能会留下空洞, 进而对接头质量造成影响; WANG 等^[10]研究了 4 种不同表面粗糙峰的高导无氧铜扩散焊接过程, 发现随着表面粗糙峰波长的减小可以加速原子沿空洞方向的扩散, 促使空洞收缩并提高了界面的结合强度; ISLAM 等^[11]对比经过 P60 砂纸处理和未经处理过的不锈钢表面扩散焊后的结合质量的差异, 发现经过 P60 砂纸处理需要更大的压力和更长的保温时间才能达到未经处理表面的结合质量; ZHANG 等^[12]发现不锈钢在相同的焊接条件下, 粗糙表面比光滑表面扩散焊接后的晶界迁移率及抗拉强度要小, 并分析了两种晶界迁移机制的差异; SHAO 等^[13]对不同表面粗糙度的钛和镍进行扩散焊接, 发现不同表面粗糙度

在焊接过程中所生成中间相是不同的, 中间相在变形过程中产生的微裂纹是影响界面结合质量的主要因素; LI 等^[14]认为幂律蠕变是扩散焊接过程中空洞收缩的主要机制, 并建立了空洞收缩的动力学模型。然而, 由于扩散焊接过程基材的变形很小, 原始表面粗糙度不宜过大, 否则可能会使后续保温过程中界面缝隙和空洞的愈合变得困难, 对接头的结合质量造成不利影响。

采用粗糙表面作为受压变形复合界面已经受到关注。在热轧复合方面, LIU 等^[15]对金属 Al 表面进行了宏观和微观的机械处理, 研究了表面形貌对铝片/铝板/铝片热轧复合板结合质量的影响, 发现芯层的粗糙度在 $0.03 \sim 0.58 \mu\text{m}$ 之间时界面结合面积和结合性能有明显改善; KIM 等^[16]研究发现 6XXX/5XXX/6XXX 铝合金温轧复合前表面经过钢丝刷处理后, 临界压下率得到降低, 结合强度得到提高; 王强^[17]试验研究了打毛处理和未打毛处理的铝表面经过热轧后不锈钢/铝/不锈钢复合板界面微观形貌的差异, 发现经过表面处理的复合板界面呈现相互嵌入的机械咬合现象, 这种机械咬合现象使复合界面层的力学性能有所提高。大多数金属轧制复合过程, 由于金属表面存在的氧化膜和吸附污染物会阻止待焊金属结合表面新鲜纯净金属的相互接触, 增大界面的结合难度^[18-20], 复合前对金属表面进行处理是非常必要的^[21], 多位学者研究了表面处理工艺^[21-22]、表面粗糙度^[23]、纹理方向^[24]对冷轧层合板界面结合强度的影响, 发现合适的表面预处理可以明显提高冷轧复合界面的结合强度。但以上研究忽视了各基材金属的待复合表面具有不同表面形貌时复合过程的差异, 缺乏不同基材间表面形貌影响的对比分析, 以及其对复合过程中接触区的变形规律和结合质量影响的比较研究。

从几何角度, 界面结合质量可以通过宏观尺度的复合率以及细观尺度上的复合区接触面(或线)几何结构来表征, 前者描述结合区和未结合区的面积比, 后者反映界面结合区接触线的几何构型。从力学角度, 界面结合质量可以通过复合后层合板的界面层力学性能来表征。Q235A 碳钢、AISI304 不锈钢作为基材, 在不锈钢复合板的生产领域具有较强的代表性和应用范围。本文针对这两种典型钢种, 通过试验和有限元仿真方法研究复合过程中基材不同表面形貌的界面接触区变形规律以及对界面结合质量的影响, 以期通过合理的表面预处理的方式提高界面结合质量、扩大 AISI304 不锈钢/Q235A 碳钢轧制复合可行工艺条件范围提供指导。

1 试验研究方法及方案

选用 AISI304 奥氏体不锈钢和 Q235A 低碳钢作为基材, 化学成分见表 1。两种材料试样规格均为直径 10 mm、长 45 mm 的棒材。

表 1 不锈钢和低碳钢的主要成分(质量分数) %

材料	Cr	Ni	C	Si	Mn	P	Fe
AISI304	18.97	8.86	0.04	1.00	2.00	0.035	余量
Q235A	—	—	0.22	0.30	0.43	0.04	余量

如图 1 所示, 通过车削加工制备了 3 种不同粗糙度的表面共组合 7 组试样, 每组试样的表面三维粗糙度值如表 2 所示。由于对静压复合试样拉伸及接触区变形观测均需要对试样进行破坏, 故增加同样表面形貌的 7 组备份试样在相同条件下进行复合试验。对第一批的 7 组复合试样进行复合率检测和界面接触区形貌观察, 对第二批的 7 组备份进行试样抗拉强度测定。

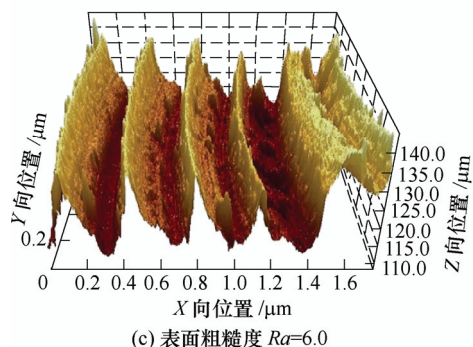
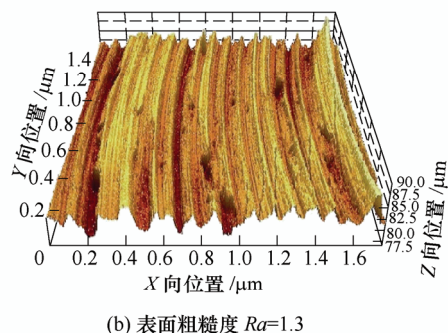
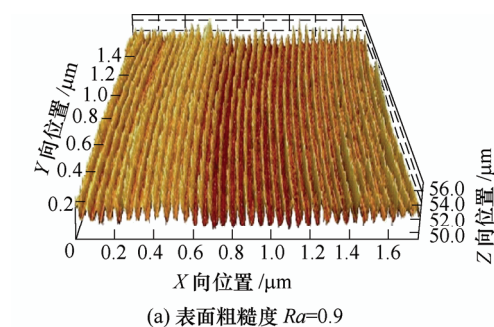


图 1 3 种不同表面的三维形貌

表 2 每组试样的表面三维粗糙度值 μm

材料	组别						
	1	2	3	4	5	6	7
不锈钢	0.9	1.3	6.0	0.9	0.9	1.3	6.0
碳钢	0.9	0.9	0.9	1.3	6.0	1.3	6.0

复合前将每组不锈钢、碳钢试样接触表面进行清洗和脱脂, 将两个试样端面叠合起来在 Gleeble 3500 试验机上进行复合, 为避免静压过程中试样失稳采用图 2 所示夹具进行约束, 实际参与变形的试样总长度为 12 mm。静压复合试验流程如图 3 所示, 首先以 $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的速率升温至指定 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 将试样在该温度下保温 5 min, 然后以 0.1 s^{-1} 的应变速率进行压下率 40% 的压力复合, 之后进行卸载, 按 $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 速率冷却至室温。



图 2 试样装夹示意图

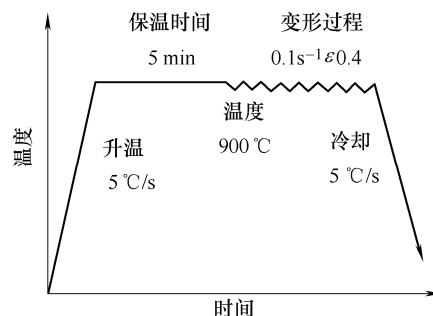


图 3 静压复合试验过程流程图

采用 UST 200 水浸超声波 C 扫检测系统对复合后试样的结合面复合率进行检测, 该系统主要由扫描装置、超声波信号发射与接收单元、信号分析和预处理单元组成。其中探头频率为 10 MHz, 焦点直径 0.37 mm, 波速为 5 800 m/s, 扫描步长为 0.1 mm, 水中焦距 30 mm。以第一次底面回波高度低于满屏刻度 5% 作为未结合区域统计界面复合率。之后对该 7 组试样沿轴向对称面使用线切割剖开成为两半, 对其中一半进行制样, 剖面磨制、抛光后采用 LEO1450 扫描电子显微镜(SEM)观察界面接触区域的形貌特征。

为研究表面粗糙度对复合后材料力学性能的影响, 将 7 组备份试样在相同条件下复合后在 CMT5105 拉力机上进行单轴拉伸试验, 测定其抗拉强度并观察其断裂情况。

2 试验结果及分析讨论

2.1 表面形貌对复合质量的影响

界面复合率从宏观尺度上反映了界面复合质量。对静压复合后的 7 组原试样进行复合率检测, 根据回波与原波高度比的不同, 不同的结合状态可以用不同的颜色来表示, 各组复合试样界面结合状态和复合率大小分别如图 4 和表 3 所示, 其中图 4 中回波高度比为 0 的区域代表完全结合区域, 回波高度比为 50% 的区域代表半结合区域, 回波高度比为 100% 以上的区域代表未结合区域。从复合率检测结果上来看, 表面形貌对静压复合后试样界面复合率有着很大的影响。不锈钢表面粗糙度最大为 $6.0\ \mu\text{m}$ 、碳钢表面粗糙度最小为 $0.9\ \mu\text{m}$ 时, 界面可以实现 100% 的结合, 而不锈钢表面粗糙度为最小 $0.9\ \mu\text{m}$ 、碳钢表面粗糙度最大 $6.0\ \mu\text{m}$ 时, 界面只有 48.8% 的复合率。总体来看, 相同的工况条件下, 整体呈现出不锈钢表面粗糙度越大、碳钢表面粗糙度越小, 界面复合率越高的趋势。

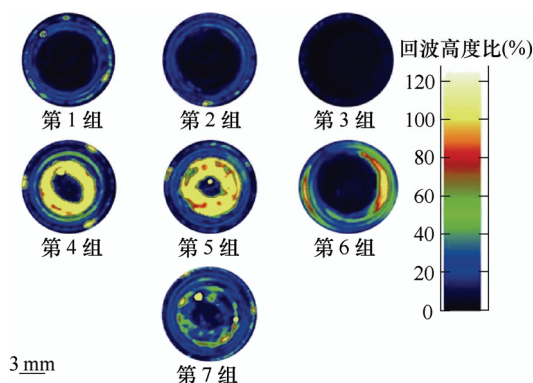


图 4 复合试样界面结合状态

表 3 每组试样的复合率

组别	1	2	3	4	5	6	7
复合率(%)	92.5	95.3	100	57.3	48.8	67.4	88.9

复合板的拉伸破坏行为可以反映界面的结合强度, 也可以反映界面复合质量。由于界面两侧不锈钢、碳钢两种材料力学性能与组织结构的差异, 复合材料在拉伸方向上具有不均匀性。拉伸后的 7 组备份试样如图 5 所示, 7 组试样在拉伸过程中均在界面位置发生断裂, 基材并没有发生明显的塑性变形, 这说明复合材料在拉伸断裂时应力的大小可以作为表征界面结合强度的指标。图 6 为各组试样单轴拉伸过程中的应力应变曲线, 可以看出, 这 7 组试样有着相似的力学响应规律, 但拉伸破坏强度却存在很大差异, 金属表面微观形貌对结合强度影响

显著。对于碳钢表面粗糙度最小 $0.9\ \mu\text{m}$ 、不锈钢表面粗糙度最大 $6.0\ \mu\text{m}$ 的第 3 组试样, 其抗拉强度为 330 MPa, 该结果比第 5 组试样(碳钢表面粗糙度最大 $6.0\ \mu\text{m}$ 、不锈钢表面粗糙度最小 $0.9\ \mu\text{m}$)的抗拉强度 145.3 MPa 高了一倍以上(表 4)。以上结果总体呈现碳钢的表面粗糙度越小、不锈钢的表面粗糙度越大, 结合质量就越高的规律, 这一现象和复合率的检测结果是一致的。



图 5 拉伸试样

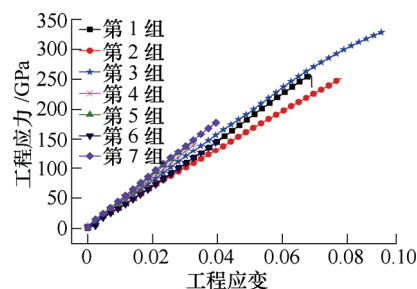


图 6 拉伸过程中应力应变曲线

表 4 热静压复合后试样的拉伸破坏强度

组别	1	2	3	4	5	6	7
拉伸强度/MPa	256.5	251.1	330.0	153.6	145.3	142.9	180.5

2.2 表面形貌对结合界面轮廓的影响

观察静压后试样剖面结合区变形情况, 图 7a、7b 分别为第 1、2 组试样静压后界面结合区形貌图, 图 7c、7d 为第 3 组试样不同放大倍数下界面结合区

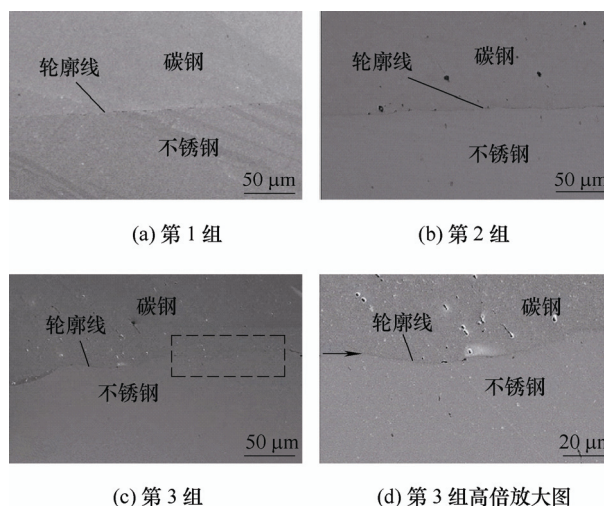
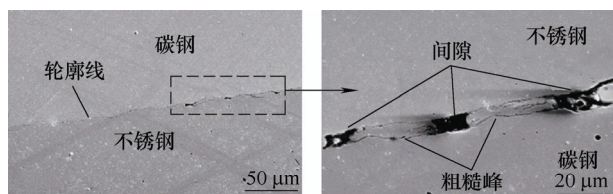


图 7 第 1、2、3 组试样静压复合后界面结合区形貌

形貌图。可以看出,随着不锈钢表面粗糙度由 $0.9\ \mu\text{m}$ 增大到 $1.3\ \mu\text{m}$ 、 $6.0\ \mu\text{m}$, 界面结合区形貌有着较大变化。图 7a 中轮廓线基本为一条直线, 图 7b 轮廓线略有波动, 图 7c 波动幅度更大, 由局部放大图可以看到轮廓线呈抛物线形状。以上现象表明, 在静压复合过程中, 较硬的不锈钢表面基体挤压并嵌入较软的碳钢基体内部, 从而对结合区变形产生影响, 界面结合区形貌仍一定程度上保留着不锈钢的初始形貌特征。

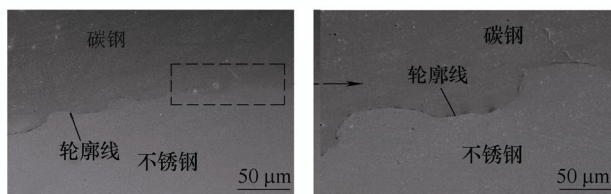
图 8a、8b 为第 5 组试样(不锈钢表面粗糙度为最小 $0.9\ \mu\text{m}$ 、碳钢表面粗糙度为最大 $6.0\ \mu\text{m}$)的界面结合区域的形貌图, 从图 8a 中可以看出, 界面轮廓线并没有大的波峰出现, 但在虚线框所示区域发现有空洞的存在, 从 8b 放大图中可以明显观察到碳钢粗糙峰被压扁的现象。以上现象表明, 由于碳钢相对不锈钢较软, 当碳钢的表面粗糙度增大, 碳钢表面粗糙峰并没有嵌入到不锈钢基体中, 而是被逐渐压扁, 随着压力的增大, 从而增大实际接触面积, 两粗糙峰之间的缝隙逐渐减小消失。

图 8c、8d 为不锈钢碳钢均为 $6.0\ \mu\text{m}$ 时静压复合后试样中部的结合区形貌, 通过前面的分析可知, 变形后的结合区形貌仍由不锈钢的形貌所决定, 但与图 7c、7d 相比, 轮廓线波形的幅度更大也更不规则, 这说明不锈钢粗糙峰的变形程度比图 7c、7d 中的要小, 对不锈钢原始形貌的保留更充分, 这是因为高粗糙度的碳钢在静压过程中更容易沿界面流动, 从而向界面间的缝隙填充。



(a) 第 5 组

(b) 第 5 组高倍放大图



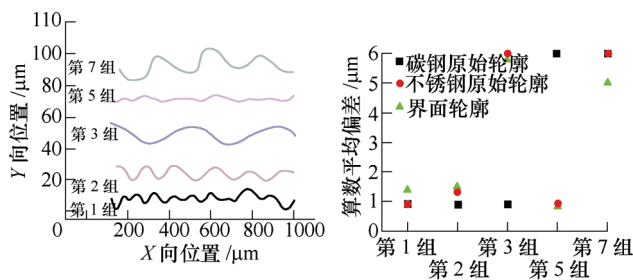
(c) 第 7 组

(d) 第 7 组高倍放大图

图 8 第 5、7 组试样静压复合后界面结合区的形貌图

通过图像处理软件 Image-Pro plus 对每组试样界面中部结合区轮廓线进行提取, 可以更直观地观察表面形貌的变形规律, 如图 9a 所示, 对比第 1、2、3 组轮廓线形状发现, 随着不锈钢表面粗糙度的增大, 界面轮廓线幅值逐渐增大而波动频率逐渐减

小, 这和复合前不锈钢的形貌特征是一致的, 对于碳钢表面粗糙度最大的第 5 组试样, 复合后碳钢粗糙峰被压扁变平, 因而界面轮廓线波动最小。采用界面轮廓算术平均偏差定量表征界面轮廓形状, 如图 9b 所示, 静压复合前碳钢、不锈钢的轮廓算术平均偏差以及静压后界面轮廓算术平均偏差分别用图中 3 种符号表示, 对比各组中三者大小可以看出, 界面轮廓算术平均偏差与不锈钢基本一致, 这同样表明, 复合后的界面形貌主要是由不锈钢的形貌所决定。



(a) 静压复合后界面轮廓线

(b) 静压前后轮廓算术平均偏差

图 9 5 组试样界面轮廓特征提取结果

综上所述, 不锈钢、碳钢在静压复合过程中粗糙峰的变形形式是不同的, 两基体变形过程中的机理图如图 10 所示, 较硬的不锈钢粗糙峰随着压下量的增大逐渐嵌入进碳钢基体内, 而较软碳钢粗糙峰随着压下量的增大逐渐被压扁。

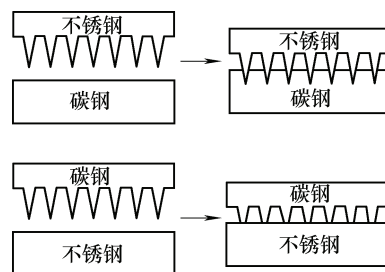


图 10 不锈钢、碳钢静压复合过程粗糙峰变形示意图

3 表面形貌对界面复合过程影响的有限元模拟

3.1 有限元建模过程

为进一步研究表面形貌对不锈钢碳钢复合质量的影响机制, 将图 1 中的三种实测二维形貌作为模型初始形貌, 建立了考虑实际真实形貌的二维有限元仿真模型, 模拟 $900\ ^\circ\text{C}$ 条件下不锈钢碳钢的复合过程, 在此温度下材料力学性能如表 5 所示, 模拟长度和厚度分别为 $1.76\ \text{mm}$ 和 $0.05\ \text{mm}$ 。采用二维四节点的平面单元 2。界面长度方向共 640 个网格,

在保证计算精度的情况下提高计算效率, 建模过程中将基体表面网格进行加密, 而基体内部网格相对稀疏。在求解过程中固定不锈钢上表面, 在碳钢下表面全部节点位移耦合, 然后在各个节点上施加 Y 方向的均布载荷, 直到总变形率达到 40% 为止。静压前后的有限元模型示意图分别如图 11a、11b 所示。

表 5 Q235A 碳钢/AISI304 不锈钢的力学性能

力学性能	材料	
	Q235A	AISI304
屈服极限 σ_s /MPa	67	98
弹性模量 E /MPa	2.1×10^5	2.02×10^5
密度 ρ /(kg/m ³)	7.8×10^3	7.9×10^3
泊松比 ν	0.3	0.3

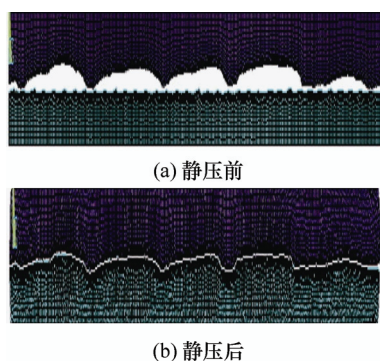


图 11 二维有限元模型

3.2 静压后界面变形情况

为验证模型的可靠性, 将有限元模拟静压后界面处节点位移进行提取并作图描述界面轮廓线, 如图 12 所示, 5 组仿真模拟的不同表面初始形貌静压复合后的界面轮廓线, 与图 9a 所示的试验结果相比, 针对复合前后的表面粗糙度以及对界面轮廓线的变化规律, 模拟结果与试验结果取得定性一致。

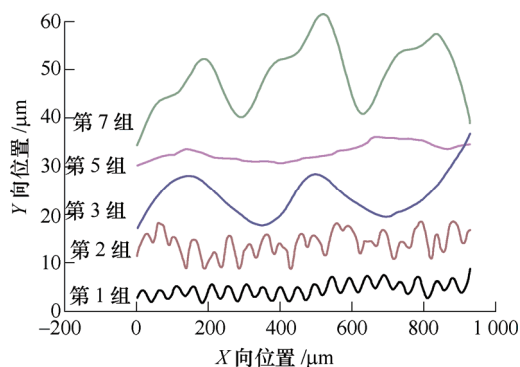


图 12 有限元模拟不锈钢碳钢静压后界面轮廓线

静压后各组试样在界面中部区域 Y 方向的应力云图如图 13a~13e 所示。由于不锈钢粗糙峰对碳钢的钉扎作用, 应力集中的区域主要出现在不锈钢粗

糙峰所在位置并沿界面断续分布, 如图 13a~13c 所示, 随着不锈钢表面粗糙度的增大, 粗糙峰所在区域的应力也逐渐增大, 应力集中区域逐渐扩展。此外, 对比图 13a~13c、13d 可以看出, 碳钢表面粗糙峰被压扁后并没有明显的应力集中区域。

X 方向的应变云图如图 13f~13j 所示, 其中应变值负值代表压应变, 正值代表拉应变, 从图中可以看出, 各组碳钢的变形比不锈钢更显著, 应变最大的位置为粗糙峰接触区域。图 13h 和图 13f、13g 相比, 不锈钢表面粗糙度的增大一方面增大了粗糙峰接触位置的应力, 使该位置碳钢更容易向两侧延伸, 表现为拉应变的增加(图 13h 中的应变大于 0.23 的区域), 另一方面, 两粗糙峰之间碳钢部分出现了较大的压应变(图 13h 中的应变在 0.21 左右的区域),

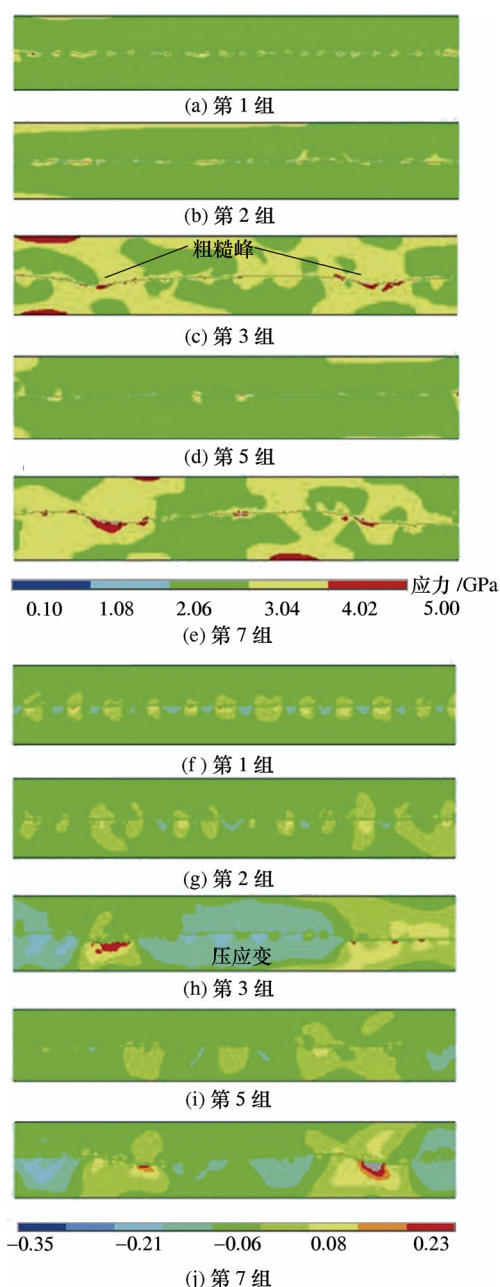


图 13 有限元模拟 5 组典型试样静压后

这说明变形过程中不锈钢粗糙峰的钉扎作用限制了碳钢的水平延伸。对于碳钢表面粗糙度最大的图13i来说,碳钢在变形过程中更容易向两侧延伸,界面两侧应变差异最明显。

3.3 表面形貌对复合质量的影响机理分析

静压复合过程中,在一定压力下不锈钢和碳钢原子距离缩小到一定范围时即可实现原子键合,因此,界面间足够的法向接触应力是实现金属复合的必要条件。静压后材料界面位置Y方向平均接触压力及延伸差如图14所示,对比图14a中7组仿真结果的界面应力可以发现,不锈钢表面粗糙度的变化对Y方向平均接触应力的影响更加明显。不锈钢表面粗糙度大的第3、7组界面附近平均应力最大,这为异种金属复合提供了更多的能量,对结合质量的提高起到了促进作用。同时从静压复合过程中双金属真实接触面积的角度上来说,相同压下率条件下双金属的真实接触线长度越长,意味着接触面积越大,界面结合质量越好。

在法向压力产生的挤压作用的同时,由于静压复合过程中碳钢、不锈钢的延展性有明显差异,两基体延伸不均会造成界面不同基体之间的相互滑动。如图14b中所示,碳钢表面粗糙度较大的后四组比前三组延伸差更大,碳钢表面粗糙度的变化对延伸差的影响更加明显。其中碳钢表面粗糙度最高的第五组延伸差最大,这是由于碳钢粗糙峰被压平从而更容易沿界面流动造成的,而界面间产生的相对滑动对于复合是不利的。此外,第5组与第7组试样相比,尽管碳钢表面粗糙度相同,但第7组中不锈钢形貌对碳钢基体的钉扎作用使碳钢沿界面水平流动变得困难,因而具有更小的相对延伸。

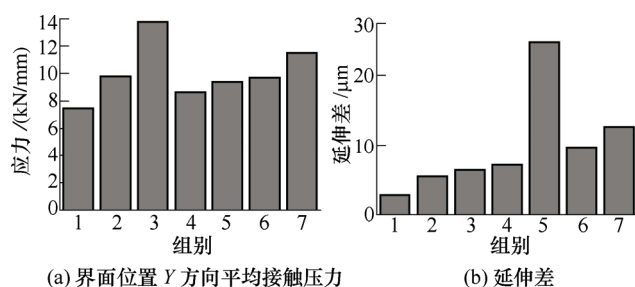


图14 有限元模拟7组试样静压后

以上研究表明,不锈钢、碳钢的表面形貌通过影响复合过程中结合区的变形从而影响双金属的结合行为,进而影响复合界面的结合质量。金属本身的塑性变形能力是影响复合质量的关键,通过一定的表面处理工艺,可以起到增大界面间接触压力及减小相对滑动从而提高结合质量的效果。

4 结论

(1) 双金属受压变形复合过程是从两基体界面粗糙峰发生接触变形开始的。随着受压变形的继续,界面间的结合点进一步增加,初始接触形成的空洞不断收缩变小,从有限点的复合扩展到一定面积的复合,形成具有一定复合率和结合强度的复合材料。表面形貌对于轧制复合质量具有重要影响,预先制备表面形貌是控制提高轧制复合质量的可行技术手段。

(2) 表面形貌影响轧制复合质量的力学机理在于两基体的变形能力与粗糙峰变形行为的差异。在复合过程中,随着变形程度的增加,较硬材料的粗糙峰逐渐嵌入进较软材料基体内,而较软材料的粗糙峰则被压扁变平,这使得复合界面轮廓线在细观尺度上呈现具有一定规律的几何构型。对于不锈钢/碳钢静压复合过程而言,该构型主要由较硬的不锈钢形貌所决定。根据复合过程有限元模拟结果,不锈钢表面粗糙度越大,变形过程中界面间接触应力越大,这有利于提高该局部位置结合质量;反之,碳钢的表面粗糙度越大,变形过程中被压扁的碳钢粗糙峰更容易沿界面流动,使得界面间相对滑动增加,对界面结合是不利的。

(3) 通过预先制备基体表面形貌可以有效提高界面复合质量,对于不锈钢与碳钢受压形变复合而言,不锈钢表面粗糙度越大、碳钢表面粗糙度越小,界面复合质量越好。当然,针对不同的金属基体配对,应根据两个配对基体的相对软硬,其中硬者表面采取高粗糙度,软者表面采取低粗糙度,将有助于提高复合质量。

参 考 文 献

- [1] 王大伟, 修世超. 焊接温度对碳钢/奥氏体不锈钢扩散焊接头界面组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(5): 567-574.
WANG Dawei, XIU Shichao. Effect of bonding temperature on the interfacial microstructure and performance of mild steel/Austenite stainless steel diffusion-bonded joint[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(5): 567-574.
- [2] KNEZEVIC M, JAHEDI M, KORKOLIS Y P, et al. Material-based design of the extrusion of bimetallic tubes[J]. Computational Materials Science, 2014, 95: 63-73.
- [3] LUO Z A, WANG G L, XIE G M, et al. Interfacial microstructure and properties of a vacuum hot roll-bonded

- titanium-stainless steel clad plate with a niobium interlayer[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 26(6): 754-760.
- [4] 祖国胤, 李红斌, 李兵, 等. 高频电流在线加热对不锈钢/碳钢复合带组织与性能的影响[J]. *金属学报*, 2007, 43(10): 1048-1052.
- ZU Guoyin, LI Hongbin, LI Bing, et al. Effect of high-frequency current heating online process on microstructures and mechanical property of stainless steel/carbon steel cladding strip[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, 43(10): 1048-1052.
- [5] CHEN L, YANG Z, JHA B, et al. Clad metals, roll bonding and their applications for SOFC interconnects[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 152(1): 40-45.
- [6] RONG J H, HONG X, XIANG G Y, et al. Research on finishing rolling force model for hot rolling wide and heavy stainless steel clad sheets[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 488: 213-216.
- [7] KAS Y O, KAYNAK C. Ultrasonic (C-scan) and microscopic evaluation of resin transfer molded epoxy composite plates[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24(1): 114-120.
- [8] WANG A, OHASHI O, UENO K. Effect of surface asperity on diffusion bonding[J]. *Materials Transactions*, 2006, 47: 179-184.
- [9] ZHANG G, CHANDEL R S. Effect of surface roughness on the diffusion bonding of Incoloy MA 956[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(7): 1793-1796.
- [10] WANG Z C, RIDLEY N, LORIMER G W, et al. Evaluation of diffusion bonds formed between superplastic sheet materials[J]. *Journal of Materials Science*, 1996, 31(19): 5199-5206.
- [11] ISLAM M F, RIDLEY N. Isostatic diffusion bonding of a microduplex stainless steel[J]. *Scripta Materialia*, 1998, 38(8): 1187-1193.
- [12] ZHANG C, LI H, LI M. Role of surface finish on interface grain boundary migration in vacuum diffusion bonding[J]. *Vacuum*, 2017, 137: 49-55.
- [13] SHAO X, GUO X, HAN Y, et al. Characterization of the diffusion bonding behavior of pure Ti and Ni with different surface roughness during hot pressing[J]. *Materials & Design*, 2015, 65: 1001-1010.
- [14] LI H, LI M Q, KANG P J. Void shrinking process and mechanisms of the diffusion bonded Ti-6Al-4V alloy with different surface roughness[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(1): 1-8.
- [15] LIU J, LI M, SHEU S, et al. Macro- and micro-surface engineering to improve hot roll bonding of aluminum plate and sheet[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 479(1): 45-57.
- [16] KIM S H, KIM H W, EUH K, et al. Effect of wire brushing on warm roll bonding of 6XXX/5XXX/6XXX aluminum alloy clad sheets[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 290-295.
- [17] 王强. 不锈钢/铝/不锈钢复合板的性能研究与轧制工艺优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- WANG Qiang. Studies on properties and process optimization of stainless steel/aluminum/stainless steel laminated sheet[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [18] MEHR V Y, TOROGHINEJAD M R, REZAEIAN A. The effects of oxide film and annealing treatment on the bond strength of Al-Cu strips in cold roll bonding process[J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 174-181.
- [19] EBBERT C, SCHMIDT H C, RODMAN D, et al. Joining with electrochemical support (ECUF): Cold pressure welding of copper[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(10): 2179-2187.
- [20] 王艳松, 李文亚, 杨夏炜, 等. 冷压焊界面结合机理与结合强度研究现状[J]. *材料工程*, 2016, 44(4): 119-130.
- WANG Yansong, LI Wenya, YANG Xiayi, et al. Research status on interface bonding mechanisms and strength of cold pressure welding[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(4): 119-130.
- [21] AKRAMIFARD H R, MIRZADEH H, PARSA M H. Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 613: 232-239.
- [22] TANG C, LIU Z, ZHOU D, et al. Surface treatment with the cold roll bonding process for an aluminum alloy and mild steel[J]. *Strength of Materials*, 2015, 47(1): 150-155.
- [23] GAO C, LI L, CHEN X, et al. The effect of surface preparation on the bond strength of Al-St strips in CRB process[J]. *Materials & Design*, 2016, 107: 205-211.
- [24] JAMAATI R, TOROGHINEJAD M R. The role of surface preparation parameters on cold roll bonding of aluminum strips[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2011, 20(2): 191-197.
-
- 作者简介: 张勃洋(通信作者), 男, 1989年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为钢板表面微观形貌轧制转印、板带钢板形、表面微观形貌的光波散射效应。
E-mail: zhangby@ustb.edu.cn
- 张清东, 男, 1965年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为板带轧制与板形厚度表面控制, 塑性成形装备与工艺界面力学行为, 薄带屈曲与皱曲。
E-mail: zhang_qd@me.ustb.edu.cn