

2219/AZ31B 双金属热压缩界面结合行为模拟与试验

唐浩然¹ 邓先镜¹ 秦芳诚¹ 何亚琛¹ 张连明²

(1. 桂林理工大学材料科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学化学与生物工程学院, 桂林 541004)

摘要 采用ABAQUS有限元软件对2219/AZ31B双金属在不同温度、压下量和摩擦因数下进行热压缩数值模拟研究, 分析双金属结合界面等效应变、温度场、等效应力和残余应力的分布规律, 探讨压缩参数对界面结合效果的影响。结果表明, 热压缩温度较高时, 双金属界面两侧的等效应变差值减小, 有利于界面结合。增大压下量可以提高界面结合程度, 增大摩擦因数可以提高界面结合效果。给出2219/AZ31B双金属热压缩的最优选试验参数: 温度为450℃, 压下量为50%, 此条件下双金属界面区晶粒细小、分布均匀, 结合界面处硬度平均值处于较高水平, 结合效果相对较好。

关键词 2219/AZ31B双金属; 数值模拟; 热压缩; 等效应变; 结合界面

中图分类号 TB331; TG146.21; TG146.22

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240176

Simulation and Experiment on Bonding Behavior of Hot Compression Interface in 2219/AZ31B Bimetallic Alloy

TANG Haoran¹, DENG Xianjing¹, QIN Fangcheng¹, HE Yachen¹, ZHANG Lianming²

(1. College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004; 2. College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004)

Abstract: 2219/AZ31B bimetal was compressed under different thermal compression temperatures, strain and friction coefficients by ABAQUS simulation software. The distribution law of equivalent strain, temperature, residual stress and stress in bonding interface was analyzed, and influence of compression parameters on interface bonding effect was explored. The results reveal that the difference of equivalent strain at both sides of bonding interface is decreased at higher compression temperatures, which is beneficial to interface bonding. The enhancement of reduction is conducive to improving interface bonding degree, while increase of friction coefficient is contributed to interface bonding effect. The optimal parameters for 2219/AZ31B bimetal subjected to hot compression is determined as temperature of 450℃ and reduction of 50%, where the grain in the bonding interface is fine with uniform distribution, and the average hardness at the bonding interface reaches a high level, indicating desirable bonding effects.

Key Words: 2219/AZ31B Bimetal, Numerical Simulation, Hot Compression, Equivalent Strain, Bonding Interface

随着风力发电、远洋海运和核电火电等领域的高速发展, 金属构件的服役环境越来越严苛, 对构件的性能提出了更高的要求。普通的单金属构件在性能上越来越难以满足服役要求, 逐渐被综合力学性能更为优异的双金属材料构件所代替。由两种不同的金属实现冶金结合而制备的双金属复合材料及其生产技术迅速发展, 具有广阔的应用前景^[1-3], 如耐磨钢复合板和不锈钢复合板^[4-5]、双金属复合环件^[6]和双金属复合轧辊^[7]等。双金属构件的制备方法主要分为: ①固-固复合法, 如挤压复合^[8-9]、轧制复合^[10-11]、爆炸复合^[12-13]和搅

拌摩擦焊^[14-15]; ②固-液复合法, 如铸轧复合^[16-17]; ③液-液复合法, 如消失模铸造^[18-19]、离心铸造^[20]。

铝/镁双金属复合材料兼具耐磨性和耐蚀性、密度小、加工性能好等特点^[21], 但易出现镁合金氧化等问题, 需要对铸型进行抽真空处理^[22]。此外, 施加压力或塑性加工可以消除界面处的缺陷, 进一步提升界面结合质量^[23-24]。邢程^[25]通过试验与模拟结合研究了温度、变形量和层厚比对7050/2A14复合锻造界面结合性能的影响, 并确定了界面结合判据。YANG B W等^[26]研究了热压缩条件对2024/6061铸坯界面结合及元素扩

收稿日期: 2024-04-26; 修订日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52265045); 广西科技重大专项资助项目(AA22067081-2)

第一作者简介: 唐浩然, 男, 2000年出生, 本科, E-mail: 2042703001@qq.com

通信作者: 秦芳诚, 男, 1988年出生, 副教授, E-mail: qinfangcheng@glut.edu.cn

引用格式: 唐浩然, 邓先镜, 秦芳诚, 等. 2219/AZ31B双金属热压缩界面结合行为模拟与试验[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 1 002-1 009.

TANG H R, DENG X J, QIN F C, et al. Simulation and experiment on bonding behavior of hot compression interface in 2219/AZ31B bimetallic alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 1 002-1 009.

散行为的影响。LIU W S等^[27]利用真空扩散结合成功连接了铝/镁双金属板。SARVARI M等^[28]采用离心铸造法制备了铝/镁双金属管,得出改变浇注顺序都能获得冶金结合界面。WANG P J等^[29]研究了退火温度对热轧铝/镁双金属板组织和力学性能的影响。KUMAR S等^[30]研究了Ni夹层对6061/AZ31B搅拌摩擦焊接过程中界面处金属间化合物形成的影响。热压缩对设备的要求简单,能使双金属产生大变形,有利于双金属界面原子在高温高压下互相扩散达到冶金结合。因此,通过热压缩制备双金属构件具备一定的优势,但目前热压缩制备铝/镁双金属复合材料的研究报道很少。

本研究采用ABAQUS软件对2219/AZ31B双金属进行热压缩数值模拟研究,分析压缩温度、摩擦因数、压下量对双金属结合界面等效应变场、温度场、等效应力和残余应力分布的影响,结合试验研究变形参数对双金属界面组织演变的影响,获得最佳的热压缩参数,旨在为相关生产提供参考。

1 数值模拟与试验方法

1.1 模拟方法

2219铝合金/AZ31B镁合金双金属几何模型高度为66 mm,在33 mm处创建基准平面并进行切割,将圆柱定义为上、下双金属材料。导入AZ31B镁合金和2219铝合金的真应力-真应变数据和密度弹塑性等参数,将AZ31B镁合金和2219铝合金分别指派给模型的上、下部分,再将上、下模具定义为刚体,在压缩过程中不发生弹性变形,将定义的双金属材料 and 上下模具装配成形。对装配好的部件进行分析步、相互作用、载荷等定义后,再对其进行网格划分,指派单元类型时采用温度-位移耦合线性缩减积分固体单元C3D8RT,其适应能力和稳定性较好,部件的网格质量通过mesh-verify检验,最后进行有限元模拟分析。热压缩模拟方案见表1。

表1 热压缩模拟方案

试样编号	压缩温度/℃	压下量/%	摩擦因数
1	350	30	0.5
2	350	40	0.5
3	350	50	0.5
4	350	30	0.7
5	350	40	0.7
6	350	50	0.7
7	400	30	0.5
8	400	40	0.5
9	400	50	0.5
10	400	30	0.7
11	400	40	0.7
12	400	50	0.7
13	450	30	0.5
14	450	40	0.5
15	450	50	0.5
16	450	30	0.7
17	450	40	0.7
18	450	50	0.7

1.2 试验方法

试验材料及尺寸与数值模拟一致,将2219和AZ31B的待结合界面分别精磨、清理后,利用石棉网包裹好在热处理炉内加热至试验温度并保温2 h,迅速放置在200 kN油压机上进行热压缩,压缩结束后进行空冷处理,沿轴向对半剖开,经400~2000目金相砂纸研磨,再使用粒径为2.5 μm和1.5 μm的抛光膏对试样进行机械抛光,最后对界面两侧依次进行腐蚀并观察结合界面组织。AZ31B镁合金腐蚀液为1 g草酸+1 g硝酸+98 mL水,2219铝合金腐蚀液为1 mL氢氟酸+2.5 mL硝酸+1.5 mL盐酸+95 mL水。使用LECO-AMH43型显微硬度计在结合界面附近打19个点,并取平均值进行分析,加载载荷为3 N,加载时间为10 s。

2 模拟与试验结果分析

2.1 界面等效应变分布

图1是2219/AZ31B双金属在摩擦因数为0.5、压下量为30%和不同压缩温度下的等效应变分布云图。可

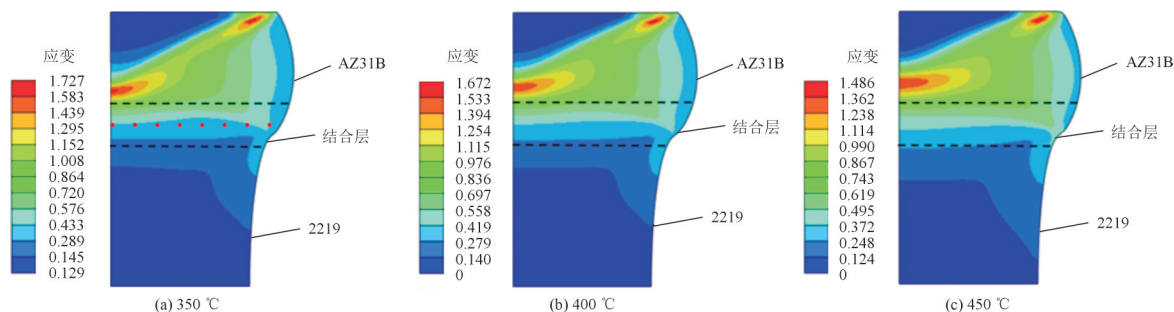


图1 压下量为30%、摩擦因数为0.5时不同温度下的等效应变分布

Fig.1 Equivalent strain distribution under different temperatures at reduction of 30% and friction coefficient of 0.5

以看出,AZ31B侧的塑性变形区域远大于2219侧,这是由于AZ31B相对于2219更软,塑性变形能力更好,因此应变量相对更大。AZ31B层等效塑性应变值由结合层向与模具接触的上表面逐渐增大,而2219层的等效塑性应变变化趋势与之相反。随着压缩温度增加,最大应变值减小,低应变区域也逐渐变窄,AZ31B镁合金和2219铝合金的低应变区主要分布于上、下表面中心区域。

图2为不同变形参数下的等效应变曲线,各节点对应取值见图1a中结合层区域的标记点。可以看出,结合界面等效应变和压缩温度成反比,随着压缩温度升高,等效应变随之减小,并且AZ31B镁合金和2219铝合金等效应变差值也随之减小,见图

2a。摩擦因数对于双金属结合界面等效应变的影响不大,结合界面等效应变随着摩擦因数的增大略微增大,AZ31B和2219等效应变差值几乎不变,见图2b。随着压下量增加,双金属结合界面等效应变明显增大,AZ31B镁合金和2219铝合金等效应变差值略微减小,见图2c。根据双金属结合界面附近等效应变分布情况,随着压缩温度升高,结合界面两侧金属等效应变差值越小,说明结合界面两侧金属变形程度相当,界面复合效果越好。当压下量增加,双金属结合界面等效应变值越大,在更大挤压力的作用下,双金属元素扩散程度会越大,结合也更紧密。

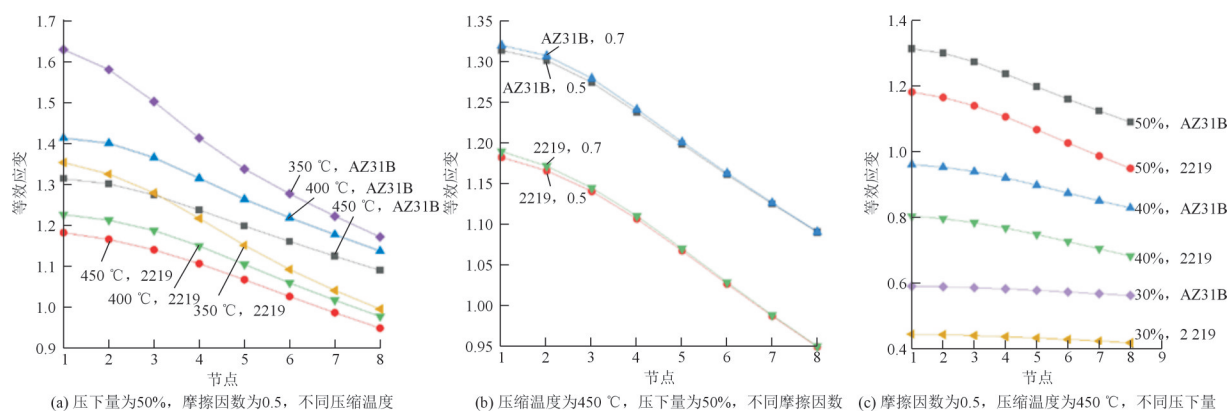


图2 不同压缩参数下双金属结合界面等效应变

Fig.2 Equivalent strain at bonding interface under different compression parameters

2.2 界面温度分布

图3是2219/AZ31B双金属在压下量为30%、摩擦因数为0.5时不同压缩温度下的温度场分布云图。可以看出,低温区域主要集中在上、下表面,通过接触散

失热量,AZ31B侧热量丧失速度更快。温度在热变形过程中起着重要作用,温度过低则材料变形能力差,接触界面不能实现良好结合;温度过高则材料变形能力强,但是材料更容易氧化。

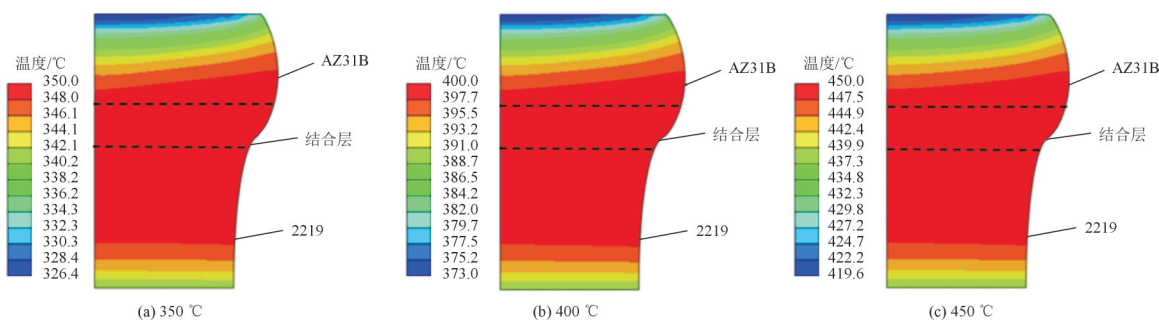


图3 压下量为30%、摩擦因数为0.5时不同温度下的结合层温度分布

Fig.3 Temperature distribution of bonding layer under different temperatures at reduction of 30% and friction coefficient of 0.5

图4为不同变形参数下的温度变化曲线。可以看出,不同温度下的界面温度场变化趋势基本一致,在同一温度下,因为AZ31B镁合金比较软,相比于2219铝合金变形量更大,与挤压模具之间的接触面积也更大,导致温度传递速度越快,致使温度下降也更快,见图4a。随着压下量的变化,结合界面温度变化不大,AZ31B镁合金的节点温度随着压下量的变化明显,压

下量越大,节点温度越低。这是由于随着压下量增大,AZ31B镁合金所产生的变形量也明显增大,与上模的接触面积增加,加快温度下降,而2219铝合金随着压下量增加,所产生的变形量无明显的差异,见图4b。摩擦因数变化对温度的影响不显著。同时,在双金属热压缩结合的过程中,温度升高可以增大金属塑性变形能力,加速表层氧化膜的破裂,见图4c。新鲜的金属在复合时

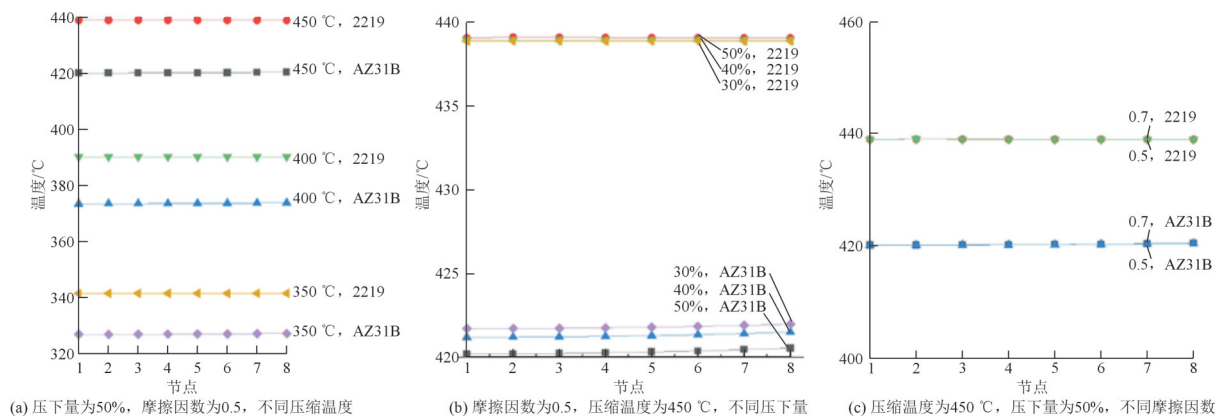


图4 不同压缩参数下结合界面温度

Fig.4 Temperature of bonding interface at different compression parameters

挤入并嵌入到破碎的氧化物裂缝中,增大了金属间的接触面积,促进原子间的相互渗透,加快元素扩散,有利于界面结合。

2.3 界面等效应力分布

图5是2219/AZ31B双金属在摩擦因数为0.5、压下量为30%时不同压缩温度下的等效应力分布云图。可以看出,双金属结合界面两侧等效应力差值较大,2219铝合金侧应力大于AZ31B镁合金侧。铝合金的变形程度比镁合金小,单位面积受力更大,但AZ31B镁合金与2219铝合金的等效应力分布趋势相似,两者的低等效应力区均主要分布于与上下模具接触的界面中

心处,等效应力沿着结合界面的方向逐渐增大。随着压缩温度升高,最大等效应力值也随之减小,2219铝合金的低等效应力区域也随之变窄,但AZ31B镁合金侧的低等效应力区域则随压缩温度升高而变宽。

图6为不同变形参数下的等效应力变化曲线。可以看出,相同条件下,2219铝合金侧等效应力值大于AZ31B镁合金侧。随着压缩温度升高,AZ31B和2219界面等效应力值均大幅下降,说明压缩温度升高,促进了双金属塑性变形结合,见图6a。双金属结合界面等效应力随压下量增大而减小,见图6b。从图6c不能明显看出摩擦因数对于等效应力的影响。通过对模拟数据的分析,发现改变摩擦因数,模拟得出的等效

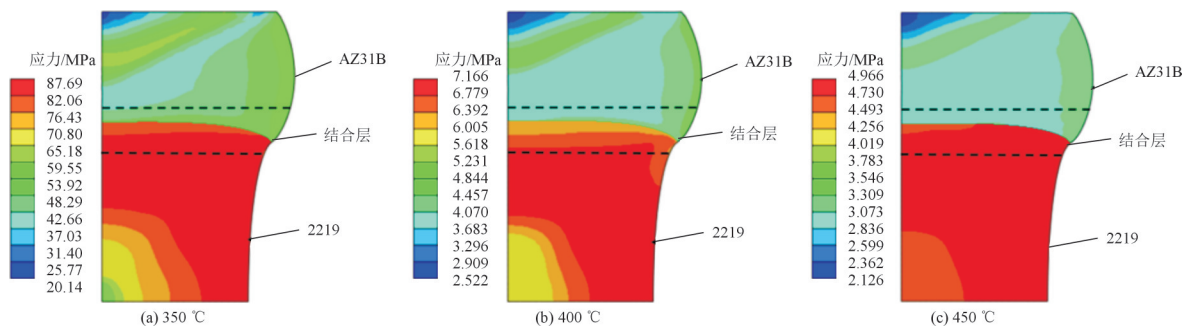


图5 压下量为30%、摩擦因数为0.5时不同温度下的等效应力分布

Fig.5 Equivalent stress distribution under different temperatures at reduction of 30% and friction coefficient of 0.5

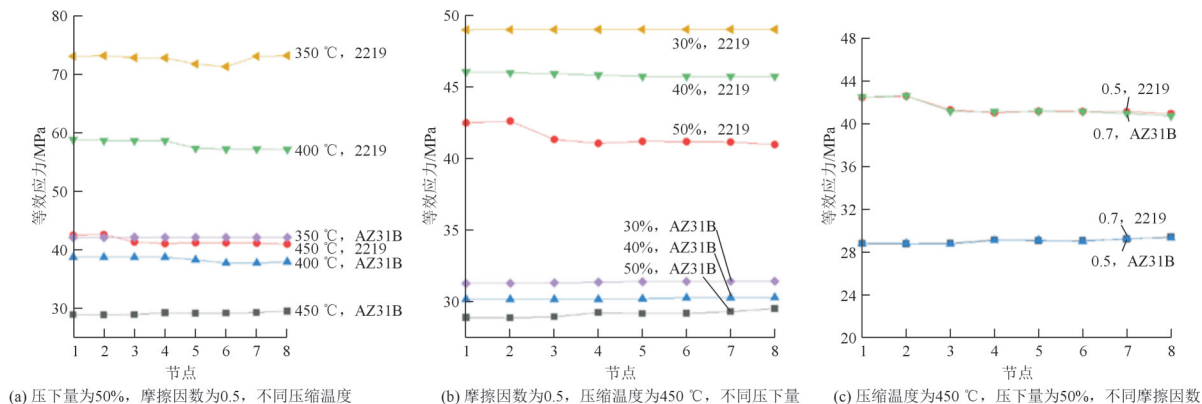


图6 不同压缩参数下双金属结合界面附近应力

Fig.6 Equivalent stress around bonding interface under different compression parameters

应力结果较小,前后差值范围为0.033~0.097 MPa,增大摩擦因数可略微增大结合界面等效应力。因此,在双金属热压缩结合中,可以通过升高温度和提高压下量来降低双金属结合界面等效应力,实际上是增大了界面的塑性变形量,增大了金属间的接触面积,使结合界面能够更好地接触,从而获得性能更好的结合界面。

2.4 界面残余应力

图7是2219/AZ31B双金属在摩擦因数为0.5,

压下量为30%时,不同压缩温度下的残余应力分布图。可以看出,在相同参数下,AZ31B侧残余应力大于2219侧,随着压缩温度升高,残余应力随之减小,AZ31B侧的残余应力主要分布在结合界面处和变形边缘区域,因为该区域发生了不均匀的塑性变形,产生了残余应力,其分布区域随压缩温度升高而变窄,2219侧的残余应力集中区域与AZ31B相似。

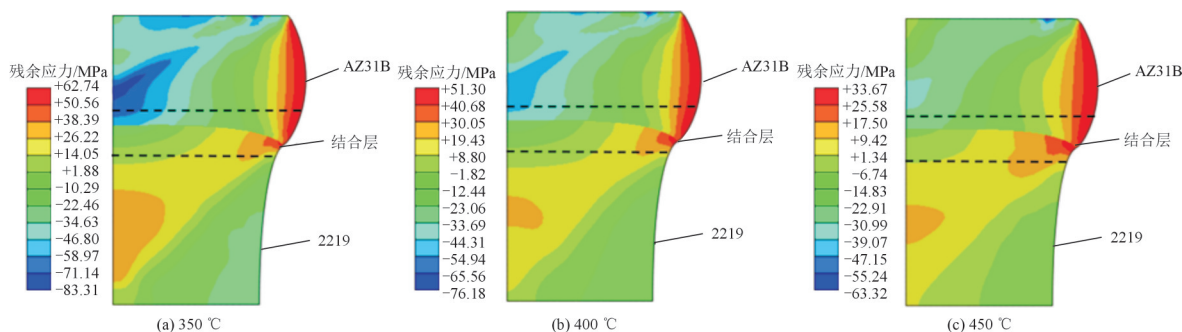


图7 压下量为30%、摩擦因数为0.5时不同温度下的残余应力分布

Fig.7 Residual stress distribution under different temperatures at reduction of 30% and friction coefficient of 0.5

图8为不同变形参数下的残余应力变化曲线。可以看出,不同温度下2219侧残余应力比AZ31B大。随着温度升高,两侧残余应力整体呈现增大的趋势,界面两侧残余应力差值减小,AZ31B侧残余应力在界面呈由中心向边缘方向增大的趋势,温度越高,增幅越小,2219侧残余应力变化趋势则与之相反,见图8a。随着

压下量增大,残余应力减小,其中压下量为50%与40%的残余应力差值较小,压下量为40%与30%的残余应力差值较大,见图8b。当摩擦因数由0.5增大到0.7时,残余应力也随之增大,增大量范围为0.035 2~0.072 12 MPa,可见摩擦因数对残余应力的影响并不明显,见图8c。

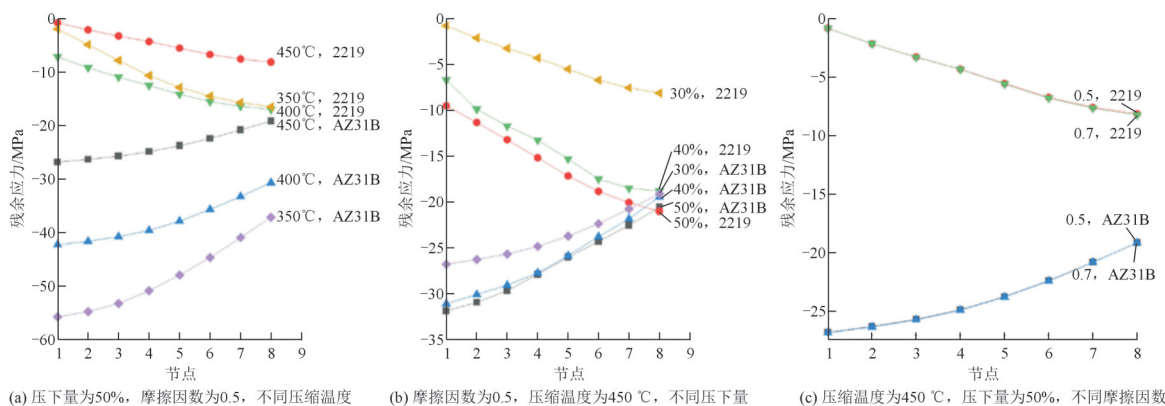


图8 不同压缩参数下双金属结合界面残余应力

Fig.8 Residual stress of bonding interface in bimetal under different compression parameters

2.5 结合界面组织

图9是压下量为30%时,不同压缩温度下2219/AZ31B双金属热压缩结合界面区的显微组织。可以看出,压缩温度对于AZ31B晶粒尺寸影响较大,界面区的镁合金晶粒尺寸在350 °C时较为粗大且晶粒大小分布不均匀。随着压缩温度升高,晶粒整体被细化,这是因为热压缩工艺对于细化晶粒具有一定的促进作用,温度升高促使材料发生更剧烈的塑性变形,较大的应变会为动态再结晶提供形变激活能,促使再结晶的发生,最终起

到细化晶粒、晶粒分布更加均匀的效果。在热压缩过程中,铝镁合金晶粒在外力作用下开始变形破裂,晶粒垂直于压缩方向呈现长条状,在变形晶粒附近则分布着细小均匀的再结晶晶粒。同时,AZ31B/2219双金属结合界面连续,未观察到开裂现象,结合界面两侧组织一致性增大,结合界面性能较好。

图10是2219/AZ31B双金属在压缩温度为450 °C,压下量为30%、40%和50%条件下的结合界面显微组织。可以看到清晰的结合界面,结合界面两侧无明显

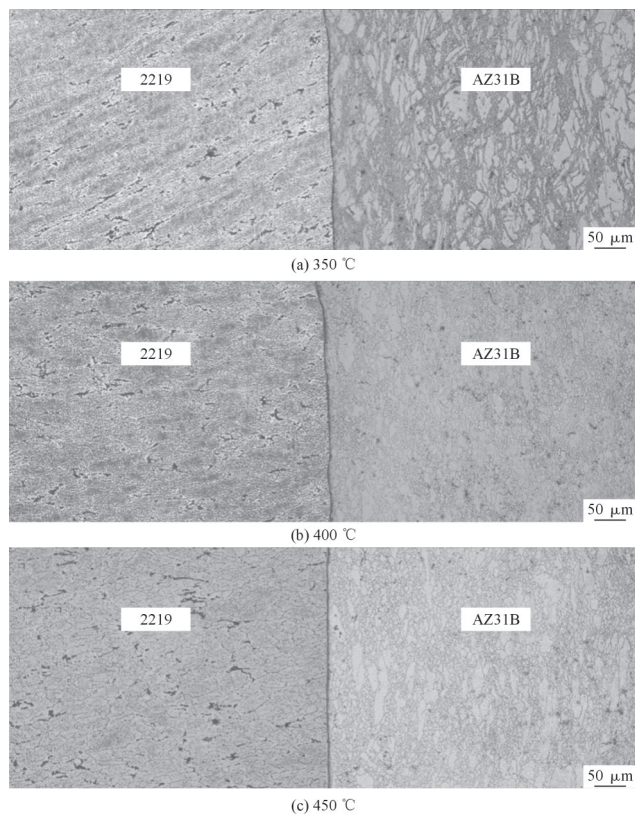


图9 不同压缩温度下2219/AZ31B双金属结合界面显微组织
Fig.9 Microstructures of bonding interface of 2219/AZ31B bimetal under different temperatures

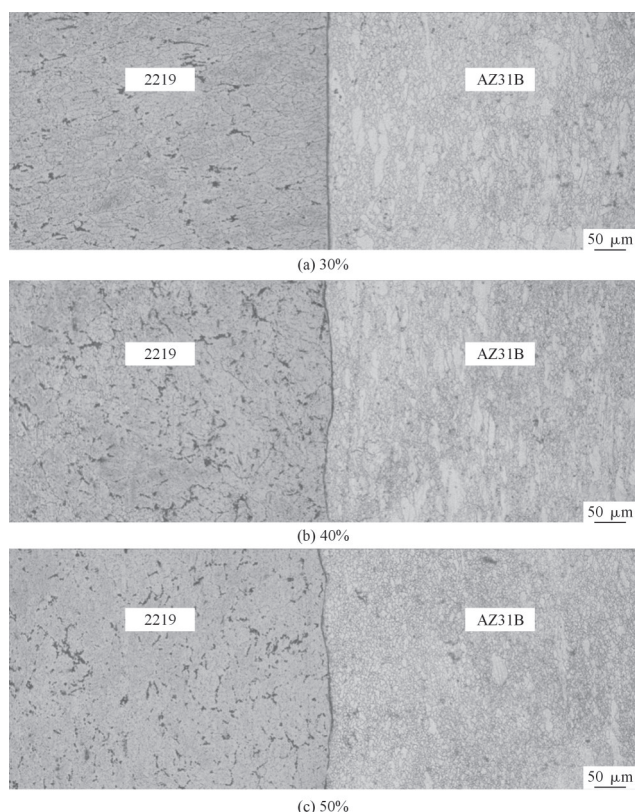


图10 不同压下量下2219/AZ31B双金属结合界面显微组织
Fig.10 Microstructure of bonding interface of 2219/AZ31B bimetal under different reductions

缺陷,界面晶粒随着压下量的增大,在高温和塑性变形的影响下发生再结晶,晶粒细化,有助于改善双金属的界面结合性能。

2.6 结合界面硬度分布

图11是压下量为30%、不同压缩温度下2219/AZ31B双金属结合界面处的显微硬度分布。可以看出,变形温度为450℃时,硬度值整体更高且更加均匀;结合界面处显微硬度值随着压缩温度的升高而升高,尤其在2219铝合金侧较为明显。结合界面两侧过渡区显微硬度值变化较大,且均低于基体的显微硬度。

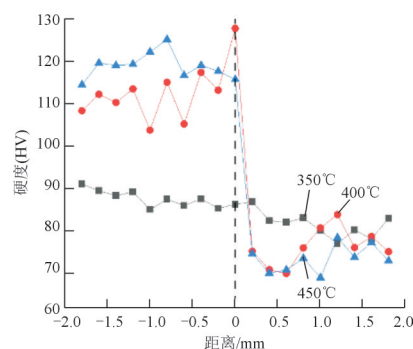


图11 不同压缩温度下结合界面硬度分布
Fig.11 Hardness distribution at bonding interface under different compression temperatures

图12是压缩温度为450℃、不同压下量下2219/AZ31B双金属结合界面处的显微硬度。可以看出,压下量为40%时的双金属结合界面两侧硬度平均值更高,且同样出现结合界面两侧过渡区显微硬度值低于基体显微硬度值的情况。

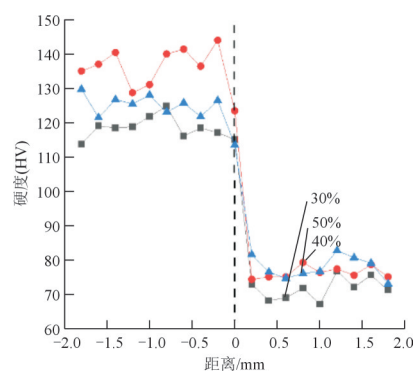


图12 不同压下量下结合界面硬度分布
Fig.12 Hardness distribution at bonding interface under different reductions

3 结 论

(1)结合界面等效应变和压缩温度成反比,随着压下量增加,双金属结合界面等效应变有明显的增大。提高温度及压下量可以减少2219/AZ31B两侧的等效

应变及等效应力的差异,更有利于结合。过高的温度会导致残余应力增大,增加压下量可以减小残余应力。

(2)压缩温度对AZ31B的晶粒尺寸有显著影响,350℃时AZ31B的晶粒粗大且不均匀,增加压下量和压缩温度可以促使动态再结晶细化晶粒。

(3)压缩温度为450℃、压下量为50%时,双金属结合界面区域的晶粒细小、分布均匀,结合界面处硬度平均值处于较高水平,结合效果相对较好。

参 考 文 献

- [1] LIU N, JIE J C, LU Y P, et al. Characteristics of clad aluminum hollow billet prepared by horizontal continuous casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(1): 60-66.
- [2] ALCARAZ J L, GIL-SEVILLANO J, MARTÍNEZ-ESNAOLA J M. A fracture condition based on the upper bound method for the extrusion of bimetallic tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 61(3): 265-274.
- [3] WRIGHT H D, ODUYEMI T O S, EVANS H R. The experimental behaviour of double skin composite elements[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1991, 19(2): 97-110.
- [4] LIU Y M, LI Y X, WANG Z H, et al. Deformation mechanism and microstructure evolution in stainless steel clad plate of longitudinal corrugated hot rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 316: 117 957.
- [5] ZHI C C, MA L F, HUANG Q X, et al. Effect of reduction on bonding interface of hot-rolled wear-resistant steel BTW1/Q345R cladding plate [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 33(4): 952-958.
- [6] JIA Y L, QI H P, LIANG Y W, et al. Microstructure evolution and coordinated deformation of the 40Cr/Q345B bimetallic ring blank at high temperature [J]. Metals and Materials International, 2024, 30: 1 997-2 011
- [7] 牛辰睿, 李光强, 曹玉龙, 等. 高速钢/42CrMo复合铸锭界面结构与性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2021, 44(4): 241-247.
- [8] LIU X B, CHEN R S, HAN E H. Preliminary investigations on the Mg-Al-Zn/Al laminated composite fabricated by equal channel angular extrusion [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4 675-4 681.
- [9] THIRUMURUGAN M, RAO S A, KUMARAN S, et al. Improved ductility in ZM21 magnesium - aluminium macrocomposite produced by co-extrusion [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(10): 1 637-1 642.
- [10] SUN R, LI G, XU G, et al. Evolution and formation mechanism of interface structure in rolled Mg-Al clad sheet [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(16): 7 248-7 259.
- [11] KIM J, LEE K S, KWON Y N, et al. Improvement of interfacial bonding strength in roll-bonded Mg/Al clad sheets through annealing and secondary rolling process [J]. Materials Science and Engineering, 2015, A628: 1-10.
- [12] YAN Y B, ZHANG Z W, SHEN W, et al. Microstructure and properties of magnesium AZ31B-aluminum 7075 explosively welded composite plate [J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527(9): 2 241-2 245.
- [13] 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: 1 100-1 109.
- [14] MOFID M A, LORYAEI E. Investigating microstructural evolution at the interface of friction stir weld and diffusion bond of Al and Mg alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5): 3 872-3 877.
- [15] ZHAO J J, WU C S, SHI L, et al. Evolution of microstructures and intermetallic compounds at bonding interface in friction stir welding of dissimilar Al/Mg alloys with/without ultrasonic assistance [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 139: 31-46.
- [16] YANG H K, QIU J, CAO C, et al. Theoretical design and experimental study of the interlayer of Al/Mg bimetallic composite plate by solid-liquid cast rolling [J]. Materials Science and Engineering, 2022, A835: 142 677.
- [17] YANG S J, LI Y D, DONG P Y, et al. Effect of annealing process on the microstructures and mechanical properties of AZ31B/A356 composite plate fabricated by cast rolling [J]. Materials Research, 2019, 22: e20 190 001.
- [18] JIANG W M, LI G Y, FAN Z T, et al. Investigation on the interface characteristics of Al/Mg bimetallic castings processed by lost foam casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, A47(5): 2 462-2 470.
- [19] JIANG Z L, FAN Z T, JIANG W M, et al. Interfacial microstructures and mechanical properties of Mg/Al bimetal produced by a novel liquid-liquid compound casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 261: 149-158.
- [20] DENG X J, HE Y C, QIN F C, et al. Interface bonding behavior of 2219Al/AZ31B alloy bimetallic ring blank subjected to vertical centrifugal casting [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 33: 8 497-8 510.
- [21] 李杨, 胡红军, 钟韬, 等. 铝/镁双金属复合成形技术的研究现状及发展趋势[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(12): 1-9.
- [22] LI G Y, YANG W C, JIANG W M, et al. The role of vacuum degree in the bonding of Al/Mg bimetal prepared by a compound casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 112-121.
- [23] 陈刚, 贾澎, 陈强. 固液复合成形铝镁双金属件平直界面的精确控制[J]. 锻压技术, 2021, 46(9): 245-253.
- [24] JI C, HUANG H. A review of the twin-roll casting process for complex section products [J]. ISIJ International, 2020, 60(10): 2 165-2 175.(作者姓名补全)
- [25] 邢程. 7050/2A14铝合金双金属复合临界判据确定及其成形研究[D]. 河北秦皇岛:燕山大学, 2024.
- [26] WANG Y B, QIN F C, QI H P, et al. Interface bonding mechanism of 2024/6061 aluminum alloy bimetallic casting blank subjected to isothermal compression [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32: 9 460-9 471.
- [27] LIU W S, LONG L P, MA Y Z, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg/Al diffusion bonded joints [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 643: 34-39.