

固溶处理对机车车辆抱轴箱内壁堆焊层组织和力学性能的影响

李喆¹, 李睿¹, 蔡磊¹, 靳军军²

(1. 中车大连机车车辆有限公司, 辽宁 大连 116000;

2. 西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:通过对固溶处理前后修复堆焊层试样进行显微组织观察、力学性能测试以及残余应力测试,分析固溶处理对修复堆焊层强度、韧性和残余应力的影响。结果表明,固溶处理前熔覆区晶粒较大且不均匀,热影响区晶粒粗大,而基材区呈现铁素体与珠光体相间分布。经900℃×3.5h固溶处理后,基材区的铁素体占比增大且分布更均匀,热影响区和熔覆区的粗大晶粒消失,晶粒细化,显著改善了晶界特性和晶粒结构。固溶处理显著提高了堆焊层的抗拉强度,从810MPa提升至925MPa,增幅约为14%。此外,固溶处理导致硬度普遍降低,基材硬度从154HV降至143HV,热影响区从238HV降至228HV,熔覆区从243HV降至226HV,同时残余压应力峰值从232MPa降低至182MPa,降低幅度达到21.6%。固溶处理通过减少缺陷、改善晶粒均匀性和消除残余应力,提升了材料的塑性变形能力和整体性能。

关键词:抱轴箱内壁;修复堆焊层;固溶处理;力学性能;残余应力

中图分类号: TG156.1 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2024)09-0226-06

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2024.09.036

Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of surfacing layer on inner wall of rolling stock axle box

Li Zhe¹, Li Rui¹, Cai Lei¹, Jin Junjun²

(1. CRRC Dalian Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Dalian Liaoning 116000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: Effects of solution treatment on the strength, toughness and residual stress of the repaired surfacing layer were analyzed by observing the microstructure, testing the mechanical properties and testing the residual stress of the specimens before and after solution treatment. The results show that before the solution treatment, the grains in the clad zone are large and uneven, the grains in the heat affected zone are thick, and the substrate zone consists of ferrite and pearlite. After solution treatment at 900℃ for 3.5 h, the proportion of ferrite in the substrate zone increases and the distribution is more uniform, the coarse grains in the heat affected zone and the clad zone disappear, the grains are refined, and the grain boundary characteristics and grain structure are significantly improved. Solution treatment significantly makes the tensile strength of the surfacing layer increase from 810 MPa to 925 MPa, with an increase of about 14%. In addition, the solution treatment results in a general decrease in hardness, from 154 HV to 143 HV for the substrate, from 238 HV to 228 HV for the heat affected zone, from 243 HV to 226 HV for the clad layer, and at the same time, the peak residual compressive stress is reduced from 232 MPa to 182 MPa, with a reduction of 21.6%. These changes indicate that solution treatment improves the plastic deformation ability and overall performance of the material by reducing defects, improving grain uniformity and eliminating residual stress.

Keywords: inner wall of axle box; repaired surfacing layer; solution treatment; mechanical properties; residual stress

在铁路运输行业中,机车车辆是关键的重要组成部分,其安全和可靠性对整个运输系统至关重要。机车车辆的抱轴箱内壁承受着重要的结构作用,由于长期使用、振动和外界环境因素等原因,抱轴箱内壁往往会出现损伤,如腐蚀、磨损或裂纹等。这些损伤可能导致机车

车辆的运行不稳定,增加故障风险,并严重影响列车的安全性和运行效率。为了修复抱轴箱内壁的损伤并提高其耐久性和寿命,堆焊修复技术得到广泛应用。堆焊修复通过在损伤表面添加合适的焊材,使其与基材形成一层修复堆焊层,从而恢复其完整性和强度。然

收稿日期:2024-03-11 修订日期:2024-07-08

作者简介:李喆(1985—),男,高级工程师,主要研究方向为机车车辆关键部件服役性能,E-mail:013500013448@crrecg.cc。通信作者:靳军军,工程师,博士,E-mail:jinjun2358@163.com

引文格式:李喆,李睿,蔡磊,等. 固溶处理对机车车辆抱轴箱内壁堆焊层组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(9): 226-231.
Li Zhe, Li Rui, Cai Lei, et al. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of surfacing layer on inner wall of rolling stock axle box[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(9): 226-231.

而,修复堆焊层的力学性能直接影响着整个抱轴箱结构的可靠性^[14]。因此,对修复堆焊层的力学性能进行深入研究,以确定其强度、韧性和可靠性是非常重要的。固溶处理作为一种常用的表面处理手段,在改善金属材料性能方面应用广泛^[5-6]。在修复堆焊层中,经过适当的固溶处理可以改变焊接组织,并对其力学性能产生显著影响^[7-9]。然而,目前关于固溶处理对修复堆焊层力学性能影响的研究还相对较少,尤其是针对机车车辆抱轴箱内壁的研究更为稀缺^[10-12]。

因此,本研究通过对修复堆焊层进行不同固溶处理,然后对其微观组织和力学性能进行试验对比,可为评估固溶处理对修复堆焊层强度、韧性和可靠性的影响提供理论依据,同时,优良的堆焊工艺对减少设备维修频率和故障率,降低运营成本,并提高运输系统的安全性和效率具有重要的意义^[13-15]。

1 试验材料及方法

ZG230-450 钢是一种常用的工程结构钢,具有良好的力学性能和耐腐蚀性,是机车车辆抱轴箱常用的材料,其化学成分和力学性能见表 1 和表 2。

表 1 ZG230-450 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the ZG230-450 steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	残余元素
≤ 0.30	≤ 0.50	≤ 0.90	≤ 0.04	≤ 0.04	Cr≤0.35、Ni≤0.30、 Mo≤0.20、Cu≤0.03、V≤0.05

表 2 ZG230-450 钢的热处理工艺及力学性能

Table 2 Heat treatment process and mechanical properties of the ZG230-450 steel

正火或退火 温度/℃	回火温度/ ℃	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %
890 ~ 910	620 ~ 680	≥450	≥230	≥22

焊丝 ER50-6 是一种常用的低合金钢焊接材料,适用于焊接普通碳素钢和低合金钢。它具有优异的焊接性能和力学性能,特别是对焊缝的强度和韧性均具有提高作用。选择 ER50-6 钢焊丝作为修复堆焊层的焊接材料,可以保证修复层与基材之间的良好连接,并提供所需的力学性能,其化学成分和力学性能见表 3 和表 4。

本试验中,使用 ZG230-450 钢板作为试样基材,固溶处理前为铸造态,通过堆焊技术在损伤区域进行修复。ER50-6 钢焊丝为堆焊层的填充材料,焊接工艺参数如表 5 所示。图 1(a) 为抱轴箱堆焊试件的堆焊位

置以及堆焊宏观形貌,堆焊层厚度为 3.5 mm。堆焊层修复完成后,为均匀组织及去应力,对其进行固溶处理,工艺参数为:以 ≥7.5 °C/min 速率升温至 900 °C,保温 3.5 h,出炉空冷。

表 3 ER50-6 钢焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of the ER50-6 steel welding wire (mass fraction, %)

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
最小值	0.06	0.80	1.40	—	—	—	—	—	—	—
最大值	0.15	1.15	1.85	0.025	0.025	0.15	0.15	0.5	0.15	0.03

表 4 ER50-6 钢焊丝的力学性能

Table 4 Mechanical properties of the ER50-6 steel welding wire

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
≥500	≥420	≥22

表 5 堆焊工艺参数

Table 5 Surfacing welding parameters

母材	焊丝	保护气体	焊接电流/A	焊接电压/V
ZG230-450	ER50-6	80% Ar + 20% CO ₂	100 ~ 120	119 ~ 200

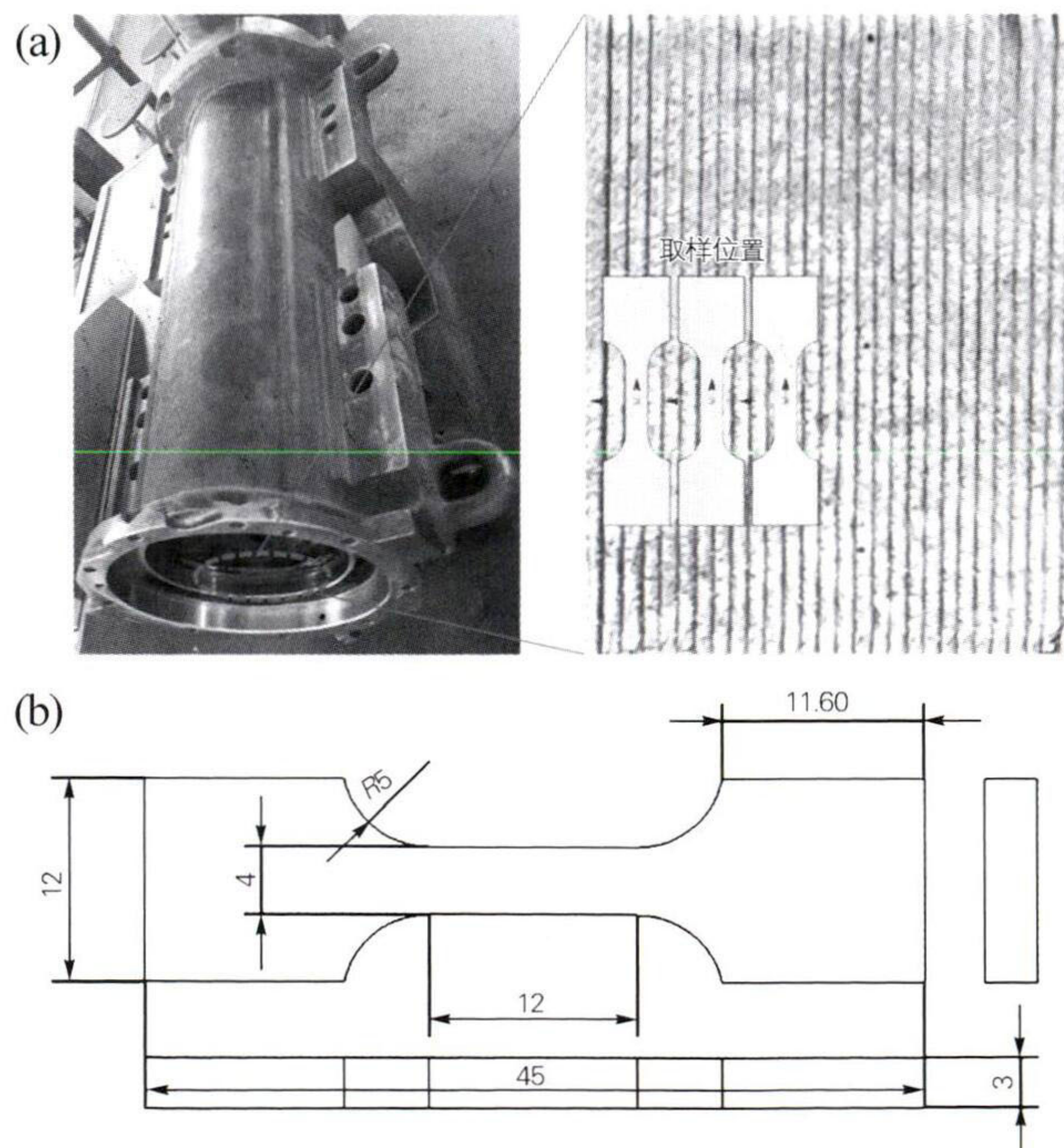


图 1 抱轴箱堆焊位置、宏观形貌(a)及拉伸试样尺寸(b)
Fig. 1 Surfacing position and macroscopic appearance(a) and tensile specimen size(b) of the axle box

通过对固溶处理前后的堆焊层力学性能进行对比分析,可以评估固溶处理对其强度、韧性的影响。采用 RGM-4005 型拉伸试验机对修复堆焊层进行拉伸试

验,拉伸试样尺寸如图1(b)所示,取样位置为熔覆区,并沿着熔覆扫描方向进行取样,固溶处理前、后各取3个平行试样(固溶处理前:1-1号、1-2号、1-3号;固溶处理后:2-1号、2-2号、2-3号)。

采用 μ -X360n型X射线残余应力分析仪对修复堆焊层进行残余应力测试,获得固溶处理前后的焊接残余应力的变化规律。在Origin软件中,通过对堆焊层截面硬度结果进行多项式拟合,生成了应力云图,并通过颜色梯度直观地展示了堆焊试件从熔敷区到基材的硬度分布。同时获得了堆焊层残余应力分布曲线。

从截面制备金相试样,试样包含堆焊层、结合面以及母材,金相试样尺寸为20 mm×10 mm×5 mm(长×宽×高)。使用不同粒度的砂纸(400、600、800、1000、1200和1500号)对试样表面进行打磨处理。完成打磨后,应用W2.5金刚石研磨膏对试样表面进行抛光,直至表面无划痕、呈现出镜面效果。随后,采用4%硝酸酒精腐蚀液对试样进行腐蚀处理。最后,使用Zeiss-A1M显微镜观察母材和焊缝的显微组织,从而获得固溶处理对修复堆焊层组织结构的影响规律。硬度试样的尺寸与金相试样一致,待表面处理至没有划痕,将试样置于D HV-1000ZTEST型数显显微硬度计上进行硬度测试。硬度测试方向与焊缝垂直,覆盖基材、热影响区、熔覆区。各点之间的测试步长为0.5 mm,

载荷砝码1 kg,保荷时间为15 s。

2 试验结果与讨论

2.1 固溶处理前后堆焊层的显微组织

图2为固溶处理前的堆焊层试样各区域的显微组织,从形貌上看,各区域的组织差异较大。图2(a)为堆焊层宏观形貌,可以看出,整体堆焊层成形较好,可分为熔覆区、热影响区(HAZ)和基材区。图2(b)为堆焊基材的显微组织,其中白色的为铁素体,黑色的为珠光体,两者相间分布。图2(c)为热影响区的显微组织,可以看到,热影响区的晶粒较基材有所增大,组织形态变化不大。图2(d)为熔覆区的显微组织,沿着基材结合面向上呈柱状晶长大,组织为针状铁素体和珠光体。由于焊接过程是一个快速冷却的过程,其动态再结晶形成的新晶粒会在未完全冷却前的温度条件下生长,导致熔覆区晶粒尺寸较大且不均匀,晶粒取向也不一致。

图3为固溶处理后堆焊层试样各区域的显微组织,固溶处理后,抱轴箱堆焊层的显微组织发生了显著的变化。图3(a)为堆焊层固溶处理后的宏观形貌,与固溶处理前相比,整体结构区域变化不大。图3(b)为固溶处理后堆焊基材的显微组织,白色铁素体和黑色珠光体依然呈相间分布,铁素体的占比较固溶处理前

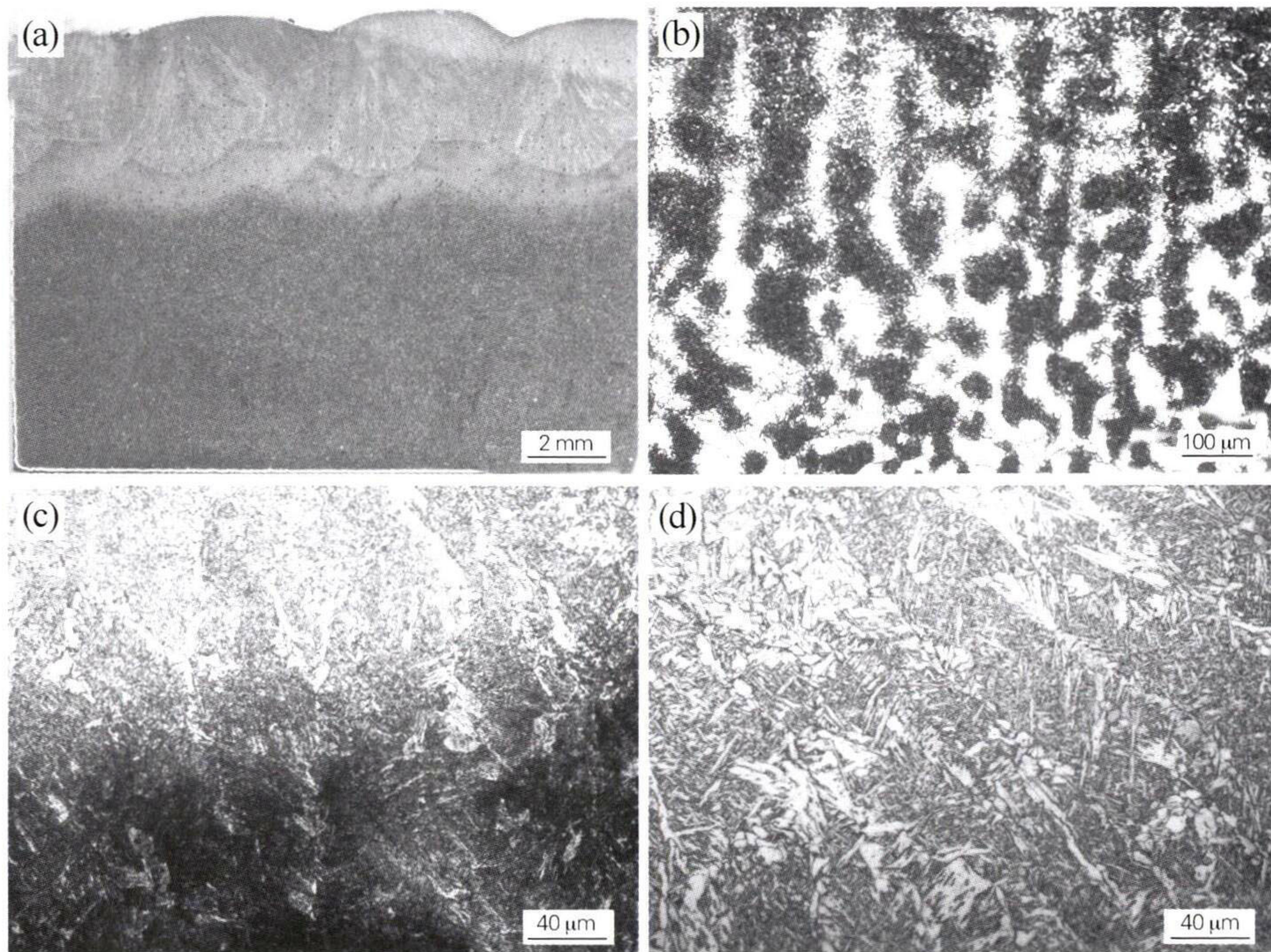


图2 固溶处理前堆焊层试样的显微组织
(a)宏观形貌;(b)基材;(c)热影响区;(d)熔覆区

Fig. 2 Microstructure of the surfacing layer specimen before solution treatment
(a) macroscopic morphology; (b) substrate; (c) heat affected zone; (d) clad zone

更大,分布更均匀。图3(c,d)为固溶处理后热影响区和熔覆区的微观组织,可以发现,粗大晶粒消失不见,晶粒得到一定程度的细化。固溶处理过程中的再结晶

作用显著改善晶界特性和晶粒结构。因此,通过固溶处理能够提高材料的力学性能、减小焊接残余应力,避免应力集中产生裂纹。

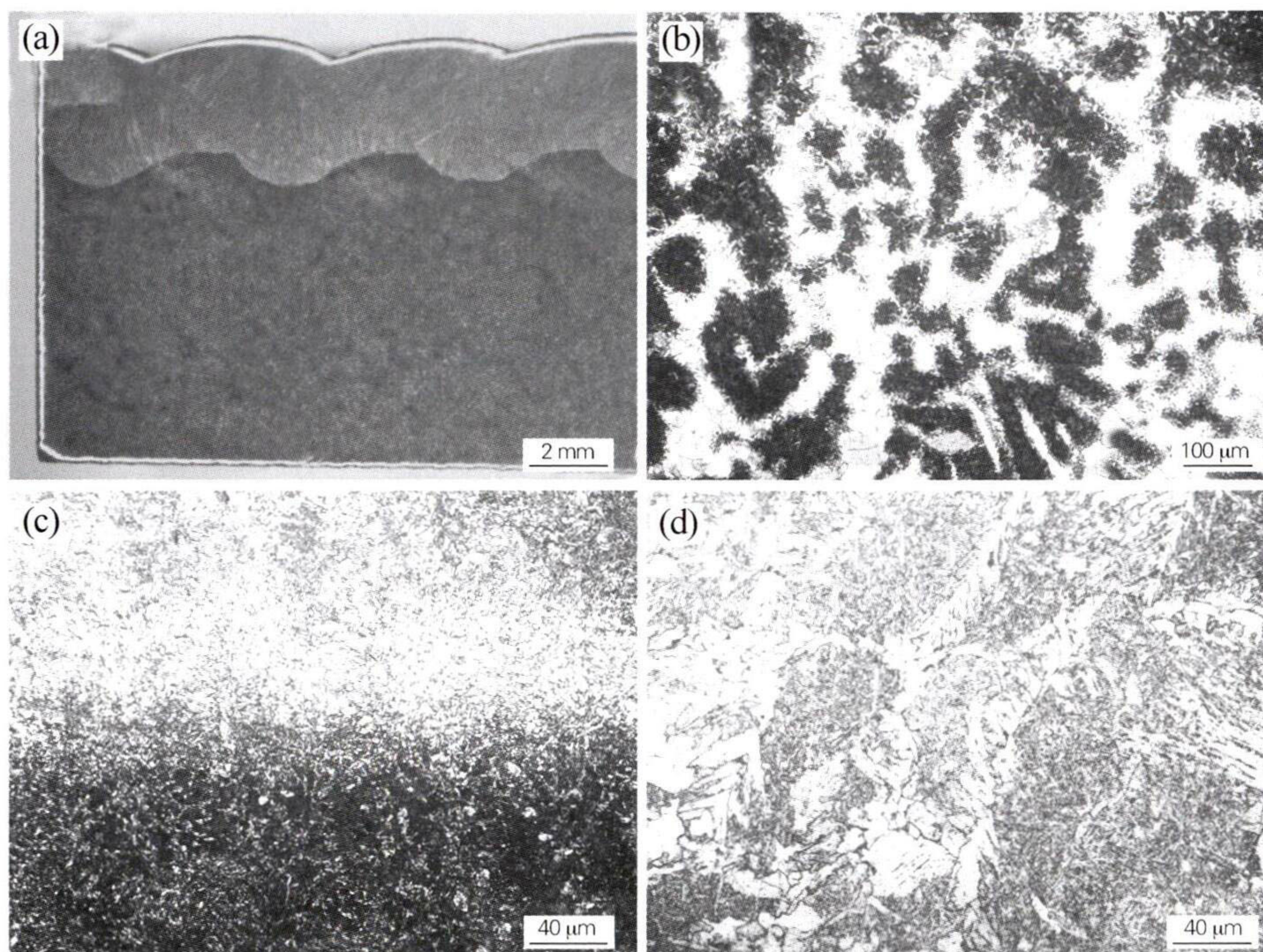


图3 固溶处理后堆焊层试样的显微组织
(a)宏观形貌;(b)基材;(c)热影响区;(d)熔覆区

Fig. 3 Microstructure of the surfacing layer specimen after solution treatment
(a) macroscopic morphology; (b) substrate; (c) heat affected zone; (d) clad zone

2.2 固溶处理前后堆焊层的拉伸性能

图4为抱轴箱堆焊层试样固溶处理前后的拉伸曲线及抗拉强度。从图4可以看出,固溶处理前的平均抗拉强度为810 MPa,固溶处理后的平均抗拉强度为925 MPa,固溶处理后的抗拉强度提升了14%左右。造成这种差异的原因是由焊接过程中引入的缺陷、晶粒尺寸不均匀以及残余应力等因素所导致的。固溶处理前,抱轴箱堆焊层试样的熔覆区存在缺陷如气孔和夹杂物,并且晶粒尺寸较大且不均匀。这些缺陷和不均匀的晶粒结构会在应力加载下成为裂纹的起始点,导致抗拉强度的降低。此外,焊接过程中的快速冷却还会引入残余应力,进一步削弱堆焊层的力学性能。而适当的固溶处理能够减少或消除缺陷,并改善晶粒尺寸和结构的均匀性。缺陷的消除有助于提高材料的完整性和韧性,而晶粒的均匀性对于抵抗裂纹扩展至关重要。

图5为固溶处理前后基材晶界和晶粒形貌,可以看出,固溶处理过程中的再结晶作用可以改善晶界特性和晶粒结构,提高材料的塑性变形行为和抗断裂性能。究其原因主要是由于固溶处理可以均匀

并细化晶粒,导致抗拉强度的提升。另外,固溶处理还可以通过控制相变和析出反应来调整材料的力学性能。因此,通过适当的固溶处理能够减少缺陷、改善晶粒尺寸和结构的均匀性,提高材料的塑性变形能力和强度。

2.3 固溶处理前后堆焊层的硬度

图6为抱轴箱堆焊层试样固溶处理前后的硬度。从图6可以看出,固溶处理前后的硬度变化规律相似,均呈现基材硬度最低,热影响区硬度最高,熔覆区硬度居中。固溶处理前堆焊基材的平均硬度为154 HV,固溶处理后的平均硬度为143 HV。热影响区的平均硬度从固溶处理前的238 HV降低到固溶处理后的228 HV。熔覆区的平均硬度在固溶处理前为243 HV,固溶处理后降低到226 HV。导致以上差异的原因是由于适当的固溶处理能够减少或消除缺陷,并改善晶粒尺寸和结构的均匀性。固溶处理过程中的再结晶作用可以导致晶粒尺寸变小且更均匀,从而提高材料的塑性变形能力和强度。此外,固溶处理还能够消除残余应力,进一步降低堆焊层的硬度。

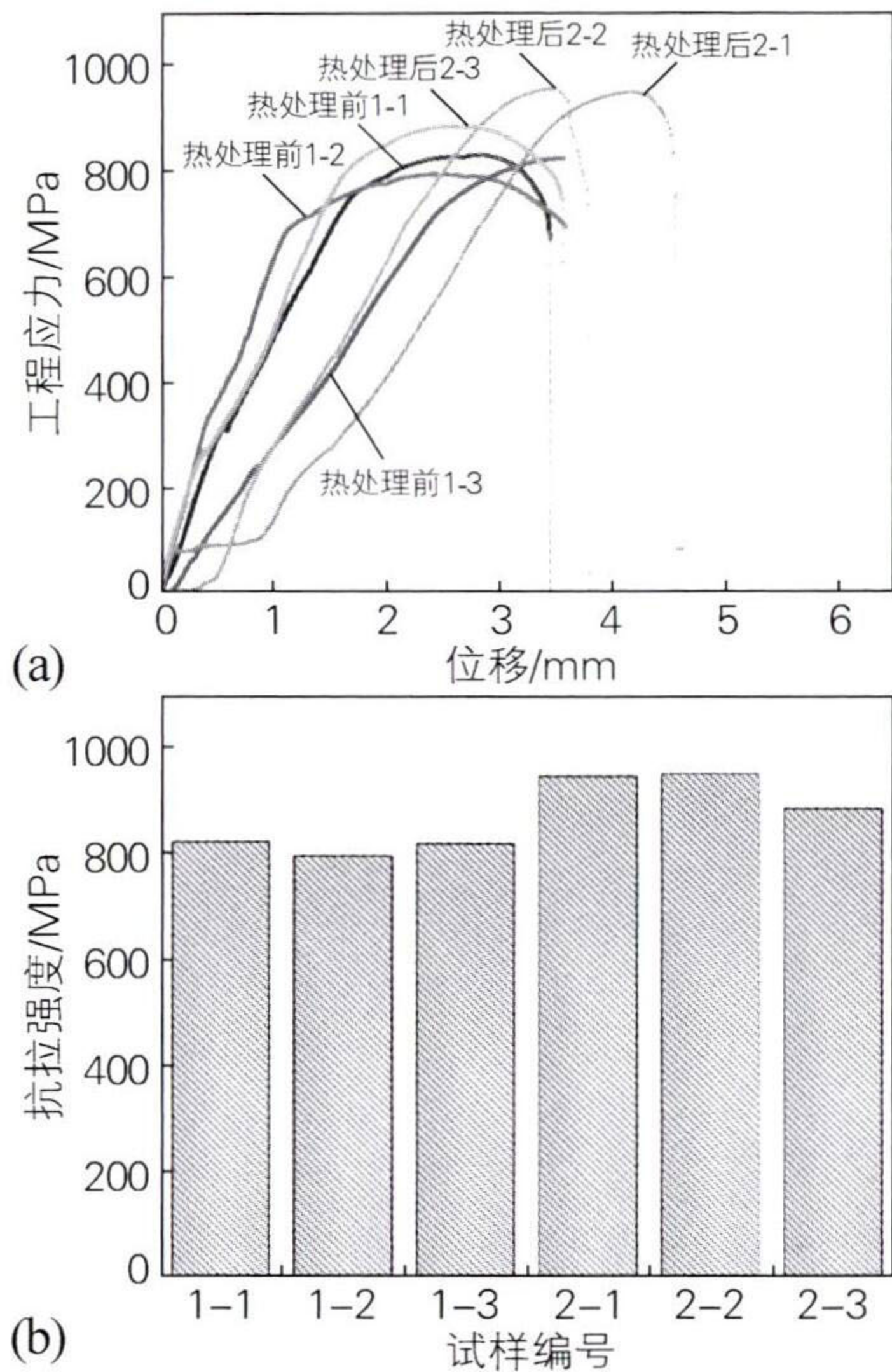


图4 固溶处理前后堆焊层试样的拉伸曲线(a)和抗拉强度(b)

Fig.4 Tensile curves(a) and tensile strength(b) of the surfacing layer specimen before and after solution treatment

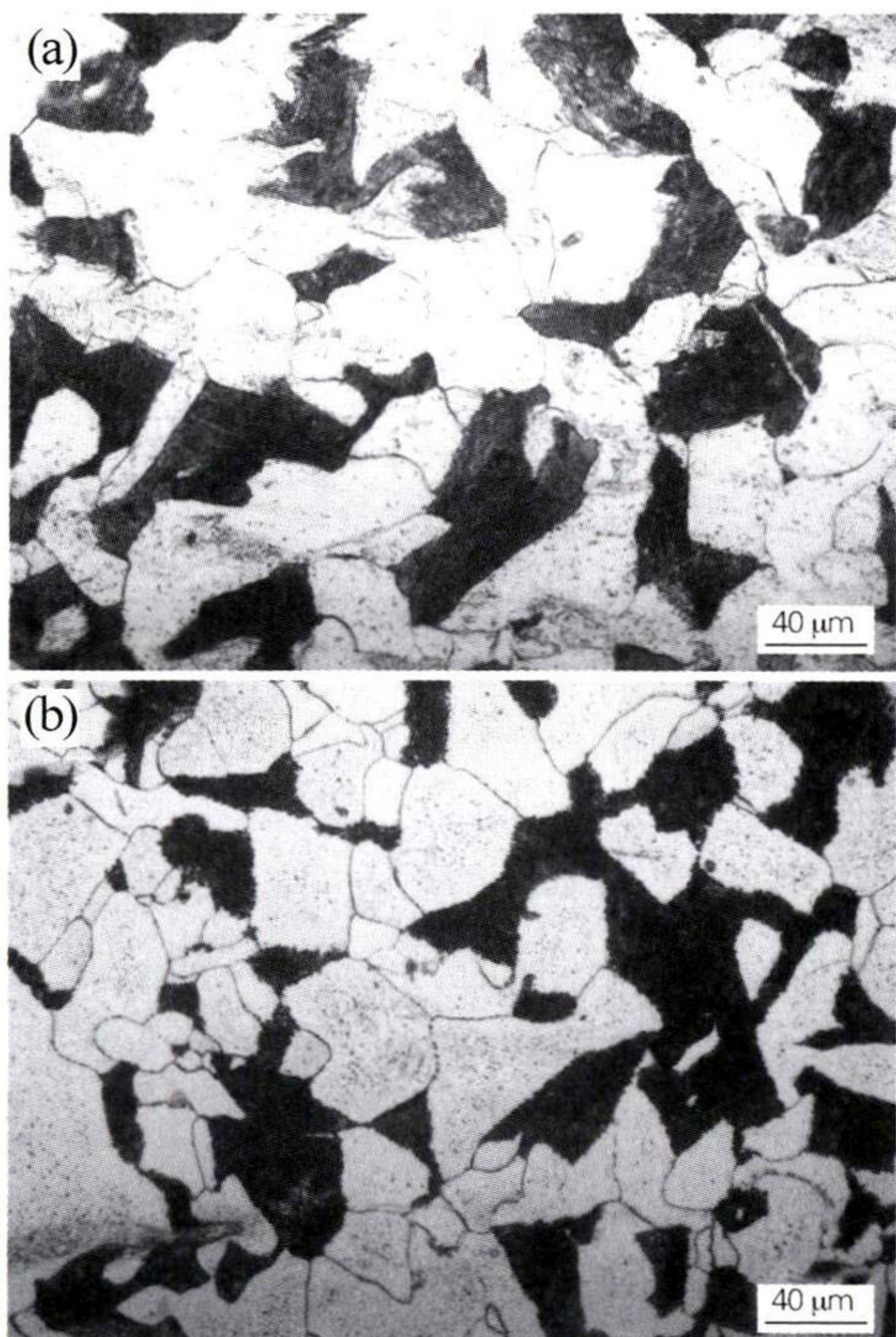


图5 固溶处理前(a)、后(b)基材晶界和晶粒形貌

Fig.5 Morphologies of grain boundary and grain of substrate before(a) and after(b) solution treatment

2.4 固溶处理前后堆焊层的残余应力

图7为抱轴箱堆焊层试样固溶处理前后的残余

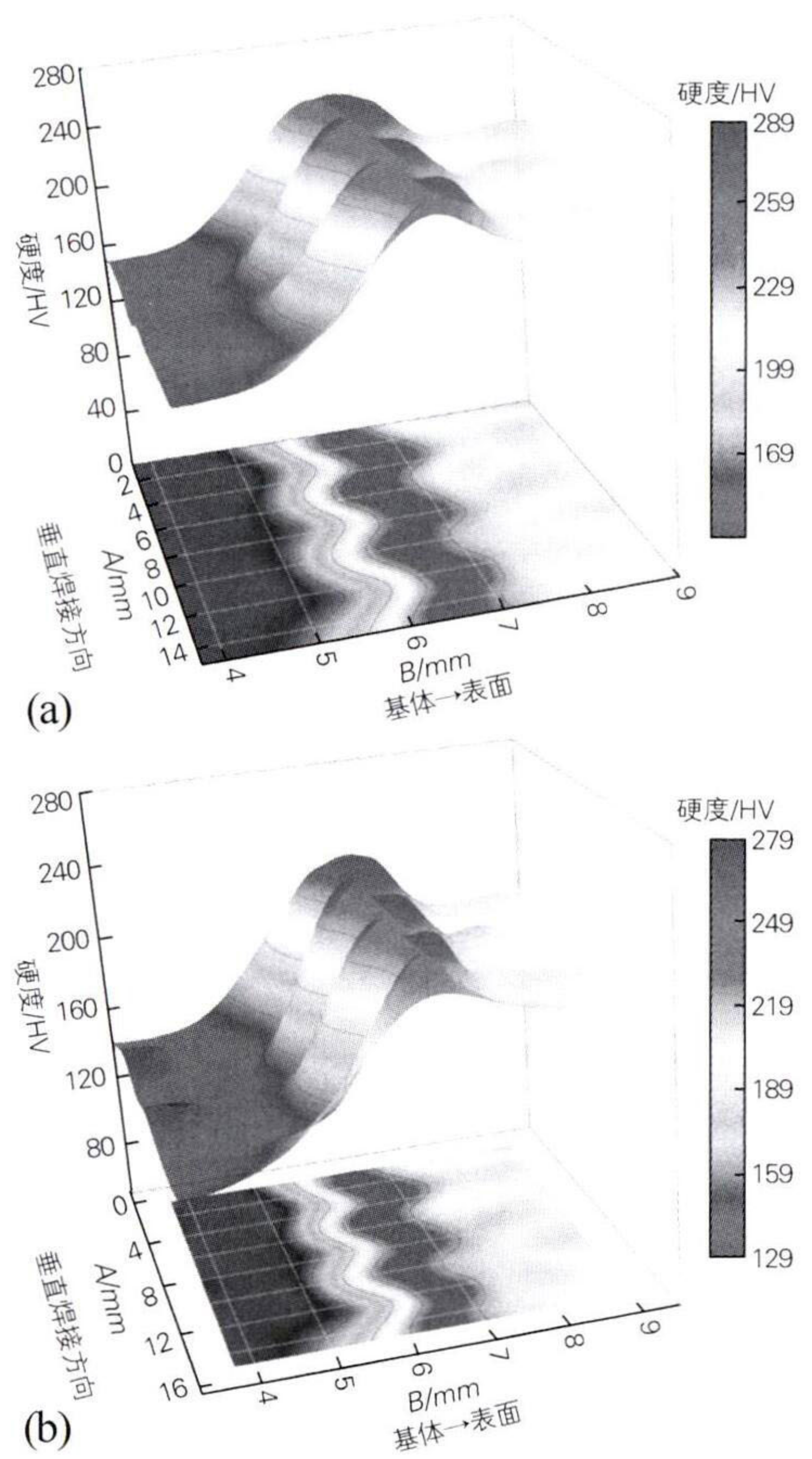


图6 固溶处理前(a)、后(b)堆焊层试样的硬度

Fig.6 Hardness of surfacing layer specimen before(a) and after(b) solution treatment

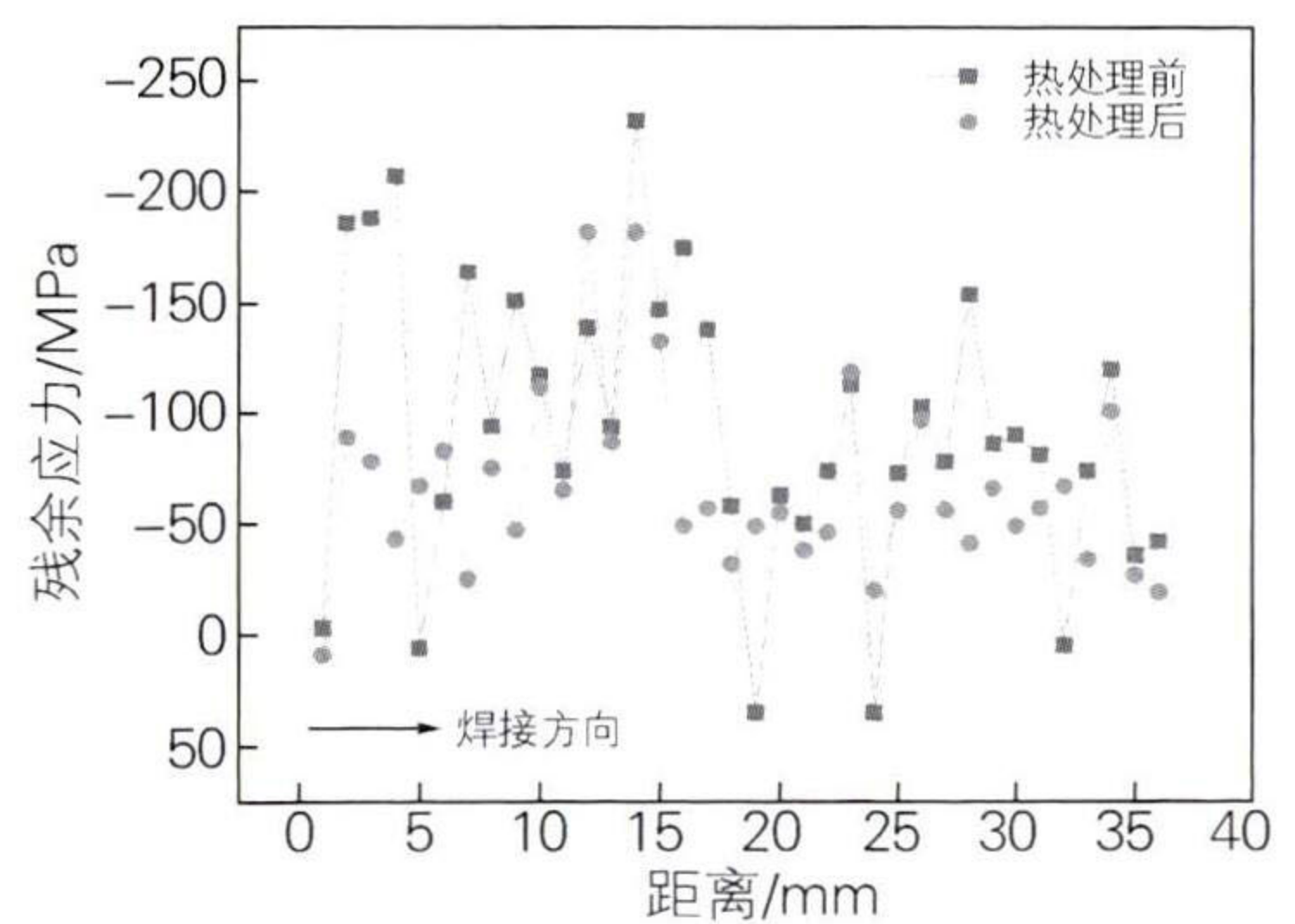


图7 固溶处理前后堆焊层试样的残余应力分布

Fig.7 Residual stress distribution of surfacing layer specimen before and after solution treatment

应力分布及应力峰值参数,可以看出,固溶处理前熔覆区的压应力峰值为232 MPa,固溶处理后压应力峰值降低到182 MPa,降低幅度达到21.6%,说明了固溶处理可以显著改善应力集中的问题。此外,固溶处理后的应力较固溶处理前的分布更加均匀。这主要是由于焊接过程引起材料的不均匀收缩,从而产生残余应力。特别是在熔覆区和热影响区附近,残

余应力变化可能更加明显。进行固溶处理后,再结晶作用可以通过晶格重排和应力释放来减轻残余应力,改变材料的晶粒结构和晶界特性,从而影响残余应力的分布。图7(b,d)为固溶处理前后残余应力峰值处的衍射峰强度及分布,进一步说明固溶处理后晶粒的重新排列有利于减少应力集中并促进应力的均匀分布。

3 结论

1) 抱轴箱堆焊层试样固溶处理前,熔覆区晶粒较大且不均匀,热影响区晶粒粗大,基材区则呈现铁素体与珠光体相间分布。经 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\times 3.5\text{ h}$ 固溶处理后,整体结构变化不大,但基材区的铁素体占比增大且分布更均匀,热影响区和熔覆区的粗大晶粒消失,晶粒细化,显著改善了晶界特性和晶粒结构。

2) 通过固溶处理,抱轴箱堆焊层试样的抗拉强度显著提高,从固溶处理前的 810 MPa 提升至固溶处理后的 925 MPa ,增幅约为 14% 。这一提升主要归因于缺陷的减少、晶粒尺寸和结构的均匀性改善,从而增大了材料的强度和抗断裂能力。

3) 固溶处理能够适当降低抱轴箱堆焊层试样的硬度并改善其残余应力分布。基材硬度从 154 HV 降至 143 HV ,热影响区从 238 HV 降至 228 HV ,熔覆区从 243 HV 降至 226 HV ;同时,残余压应力峰值从 232 MPa 降低至 182 MPa ,降低幅度达到 21.6% 。因此, $900\text{ }^{\circ}\text{C}\times 3.5\text{ h}$ 固溶处理可以减少缺陷、改善晶粒均匀性和消除残余应力,提升材料的塑性变形能力和整体性能。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第2分册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [2] 中国机械工程学会固溶处理学会. 固溶处理手册: 第1册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 石永军. 浅析HX_D3型电力机车驱动装置高级修检修故障[J]. 铁道机车与动车, 2022(12): 42-44, 66.
Shi Yongjun. Analysis on high-grade repair of driving device for HX_D3 electric locomotive [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2022 (12): 42-44, 66.
- [4] 李 敏, 张 晶, 王良涛. 机车轴箱体成品焊后固溶处理变形试验研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(3): 97-100.
Li Min, Zhang Jing, Wang Liangtao. Experimental study on post-welding heat treatment deformation of axle box body of locomotive[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2022, 45 (3): 97-100.
- [5] 施 峰, 姚伟民, 沈 俭, 等. 固溶处理对长期服役燃机透平叶片组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(8): 99-105.
Shi Feng, Yao Weimin, Shen Jian, et al. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of turbine blade after long-term service[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(8): 99-105.
- [6] 王 建, 宋 蕾, 王艺卓, 等. 固溶处理对 Mg-1Zn-1Ca 合金组织和耐腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(9): 48-53.
Wang Jian, Song Lei, Wang Yizhuo, et al. Effect of solution treatment on microstructure and corrosion resistance of Mg-1Zn-1Ca alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(9): 48-53.
- [7] 张双艳. SS4B型机车齿轮箱组工艺分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(S1): 64-66.
Zhang Shuangyan. Analysis of assembling technology of gearbox for SS4B locomotive[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2019, 42(S1): 64-66.
- [8] 马 超. SS4B型机车抱轴箱体裂纹修复工艺[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(S1): 69-71.
Ma Chao. Repair technology of axle box crack for SS4B locomotive[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2019, 42 (S1): 69-71.
- [9] 兰伟峰, 孙晓菲. 不解体抱轴箱体焊修工艺[J]. 机车车辆工艺, 2016(1): 43-44.
Lan Weifeng, Sun Xiaofei. Welding repair process of non-disassembling axle box body [J]. Locomotive and Rolling Stock Technology, 2016 (1): 43-44.
- [10] 荆留生, 沈新建. HX_N5型内燃机车抱轴箱体修复工艺研究[J]. 机车车辆工艺, 2013(3): 18-19, 32.
Jing Liusheng, Shen Xinjian. HX_N5 type diesel locomotive holding the axle box body repair technology research[J]. Locomotive and Rolling Stock Technology, 2013(3): 18-19, 32.
- [11] 隋岩斌. 箱体类铸钢件成形性能及缺陷的分析研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2011.
- [12] 刘宇浩. 抱轴箱激光增材再制造工艺研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- [13] 张运伟, 封全保, 杨俊杰. SS7机车抱轴箱体裂纹研究[J]. 机电传动, 2005(6): 25-28.
Zhang Yunwei, Feng Quanbao, Yang Junjie. Study on cracks of axle-hang box for SS7 locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2005 (6): 25-28.
- [14] 朱春勇, 赵明光. DF_{4D}型机车滚动抱轴箱裂损原因分析及改进[J]. 铁道机车与动车, 2005(2): 4-8, 49.
Zhu Chunyong, Zhao Mingguang. Reason analysis and improvement of cracking of box for axle hung rolling bearing of DF_{4D} locomotive[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2005(2): 4-8, 49.
- [15] 姜春华. 东风_{10F}型准高速机车滚动抱轴箱轴承游隙的确定及调整[J]. 铁道机车与动车, 1998(6): 20-22.
Jiang Chunhua. Dongfeng_{10F} type quasi high-speed locomotive rolling have the determination and adjustment of the axle box bearing clearance [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 1998 (6): 20-22.