

焊接电流对等离子堆焊 H13 钢显微组织及裂纹的影响

李中成¹, 潘成海², 董旭刚², 李再久¹, 金青林^{1*}

(¹昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093; ²重庆大江杰信锻造有限公司, 重庆 401321)

摘要 为改善熔化极气体保护堆焊工作效率低、人工成本高等问题, 采用等离子堆焊技术, 以 H13 钢粉末作为焊材对热作模具钢母材(5CrNiMo)进行堆焊试验。研究焊接电流对焊接熔深、熔宽、微观结构以及堆焊层裂纹倾向性的影响, 探讨了焊接裂纹形成机理。结果表明, 焊接熔深与熔宽都随着焊接电流的增加逐渐增大。堆焊层的显微组织由马氏体和残余奥氏体组成。随着焊接电流的增加, 堆焊层中部马氏体枝晶逐渐粗化。多层焊接时, 层间界面上方奥氏体含量明显多于下方。焊接电流变化时, H13 堆焊层的裂纹敏感性较大, 堆焊层的裂纹按形成机理主要分为应力诱发裂纹和缺陷诱发裂纹。当焊接电流为 150 A 时, 可以获得裂纹缺陷数量较少的堆焊试样。通过等离子堆焊的方法, 实现了热作模具的快速堆焊, 为后续等离子堆焊填充热作模具提供指导。

关键词 等离子堆焊; H13 钢; 微观结构; 焊接裂纹

中图分类号: TG 456.2

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20234303.033

Effect of Welding Current on Microstructure and Crack of Plasma Surfacing H13 Steel

Li Zhongcheng¹, Pan Chenghai², Dong Xugang², Li Zaijiu¹, Jin Qinglin^{1*}

(¹School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, Yunnan, China; ²Chongqing Dajiang Jiexin Forging Co., Ltd., Chongqing 401321, China)

Abstract In order to improve the low efficiency and high labor cost of FGM surfacing, this paper adopts plasma surfacing technology and uses H13 steel powder as welding material to conduct surfacing test on hot work die steel base metal (5CrNiMo). The influence of welding current on weld depth, weld width, microstructure and crack sensitivity of surfacing layer was studied, and the forming mechanism of welding crack was discussed. Results show that the weld depth and weld width increase with the increase of welding current. The microstructure of the surfacing layer is composed of martensite, residual austenite and carbide. With the increase of welding current, the martensite dendrites in the middle of the surfacing layer become coarser gradually. During multilayer welding, the austenite content in the upper part of interlayer interface is obviously higher than that in the lower part. When the welding current changes, the crack sensitivity of H13 surfacing layer is large. When the welding current is 150A, the surfacing sample with fewer cracks can be obtained. The cracks in surfacing layer can be divided into stress induced cracks and defect induced cracks according to their forming mechanism. By means of plasma surfacing, fast surfacing of hot working die is realized, which provides guidance for plasma surfacing of filling hot working die.

Key words plasma arc surfacing; H13 steel; microstructure; welding crack

0 引言

热作模具受高温载荷、金属流动形成的摩擦力以及交变载荷作用, 其表面经常发生磨损、疲劳裂纹和塑性变形等失效形式。为保证生产的正常运行, 需对失效后的模具进行修复或更换^[1]。由于更换新

模具成本高且周期长, 工厂中普遍采用熔化极气体保护堆焊的方法修复失效模具的型腔或表面, 从而提高模具寿命、降低生产成本。熔化极气体保护堆焊技术存在工作效率低、劳动强度大等缺点, 因此需选用一种高效的堆焊技术来修复失效的模具。

收稿日期: 2022-2-24; 修回日期: 2022-03-10

基金项目: 地区科学基金项目(51964030)

作者简介: 李中成(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向为热作模具等离子堆焊实验。E-mail: 1439255469@qq.com

*通信作者: 金青林(1971—), 男, 博士, 教授。研究方向为凝固成形。E-mail: jinqinglin@kust.edu.cn

等离子堆焊技术为失效模具的高效修复提供了解决思路。等离子堆焊的原理是利用高温等离子弧作为热源,将具有特殊性能的合金粉末熔化在母材表面,使堆焊层与母材形成冶金结合。该技术具有工作效率高、使用材料范围广泛、堆焊层与母材之间呈冶金结合等优点^[2-5]。等离子堆焊可以利用不同性能的焊接材料,使母材表面获得各种性能优良的堆焊层,提高母材表面的耐腐蚀、抗氧化和耐磨损等性能^[6],因此该技术经常用于热作模具的表面修复。目前,研究者们使用等离子堆焊方法修复热作模具时,大多选用钴基或镍基材料作为焊接材料^[7-15]。钴基和镍基材料虽然综合性能优异,但是两种材料的成本高。相比钴基和镍基材料,铁基合金的成本廉价且综合性能良好,但铁基合金的裂纹敏感性较高^[16-19],因此研究铁基合金等离子堆焊工艺的裂纹敏感性及其形成机理具有重要的意义。铁基合金作为焊接材料,利用等离子堆焊工艺修复热作模具的研究非常少。

本文选用具有优异的抗热疲劳、良好的耐磨损等性能的 H13 钢粉末作为焊材,利用等离子堆焊工艺在热作模具钢(5CrNiMo)表面进行堆焊试验,制备单层及多层堆焊试样。主要分析焊接电流对焊接熔宽、熔深以及组织演变的影响。测试 H13 钢堆焊层的硬度并与基体硬度进行比较。探讨堆焊层裂纹敏感性及其形成机理,为铁基合金等离子堆焊快速修复热作模具的研究与应用提供参考。

1 试验材料与方法

在本研究中,堆焊母材选用尺寸为 150 mm×150 mm×30 mm 的退火态 5CrNiMo 钢。母材表面经机械抛光并在堆焊前用酒精清洗干净。堆焊材料选用北京十月新材料公司生产的 45~150 μm 的球形 H13 合金粉末,母材和堆焊金属的成分如表 1 所示。试验前将合金粉末放入保温炉中,在 350 °C 下干燥 10 h,确保焊接时送粉流畅,防止焊接时送粉管堵塞。母材利用氧乙炔火焰加热至 500 °C 后进行堆焊试验。试验在 LHM-500 型等离子堆焊机上进行,等离子堆焊原理图如图 1 所示。试验所用工作气体、送粉气体、保护气体均为高纯氩气,主要试验参数如表 2 所示。

试验后,对制备的堆焊试样采用线切割沿垂直于焊接方向切开,制备金相试样,对所有金相试样的横截面进行研磨、抛光,并使用 5 g 苦味酸+100 mL 酒精+1 mL 磷酸+5%(体积分数)硝酸酒精腐蚀剂进行腐蚀。使用 NiKon ECLIPSE MA200 型光学显微镜(OM)观察堆焊层显微组织,并利用 Image-Pro Plus 6.0 统计相比;利用游标卡尺测量堆焊层的熔深与熔宽;采用 HMV-G-FA 型全自动维氏显微硬度计进行维氏显微硬度测试,加载力为 200 g,加载时间 10 s。采用 ANSYS 参数化设计语言(简称“APDL”)建立等离子堆焊铁基堆焊层热-结构耦合模型,求解焊接温度场和应力场。

表 1 母材与焊材(H13)化学成分

Table 1 Chemical composition of base material and welding material (H13)

Material	Element mass fraction/%									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	V	Fe
5CrNiMo	0.50~0.60	≤0.40	0.50~0.80	0.50~0.80	1.40~1.80	0.15~0.30	≤0.03	≤0.03	—	95.24~96.95
H13	0.30	0.88	0.43	4.90	1.20	1.19	—	—	0.40	90.70

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

Welding parameters	Numerical value
Swing speed/(cm·min ⁻¹)	14
Powder gas flow rate/(L·h ⁻¹)	4
Shield gas flow rate/(L·h ⁻¹)	9
Plasma gas flow rate/(L·h ⁻¹)	12
Welding current/A	100~150
Welding speed/(m·h ⁻¹)	80
powder feed rate/(g·s ⁻¹)	15

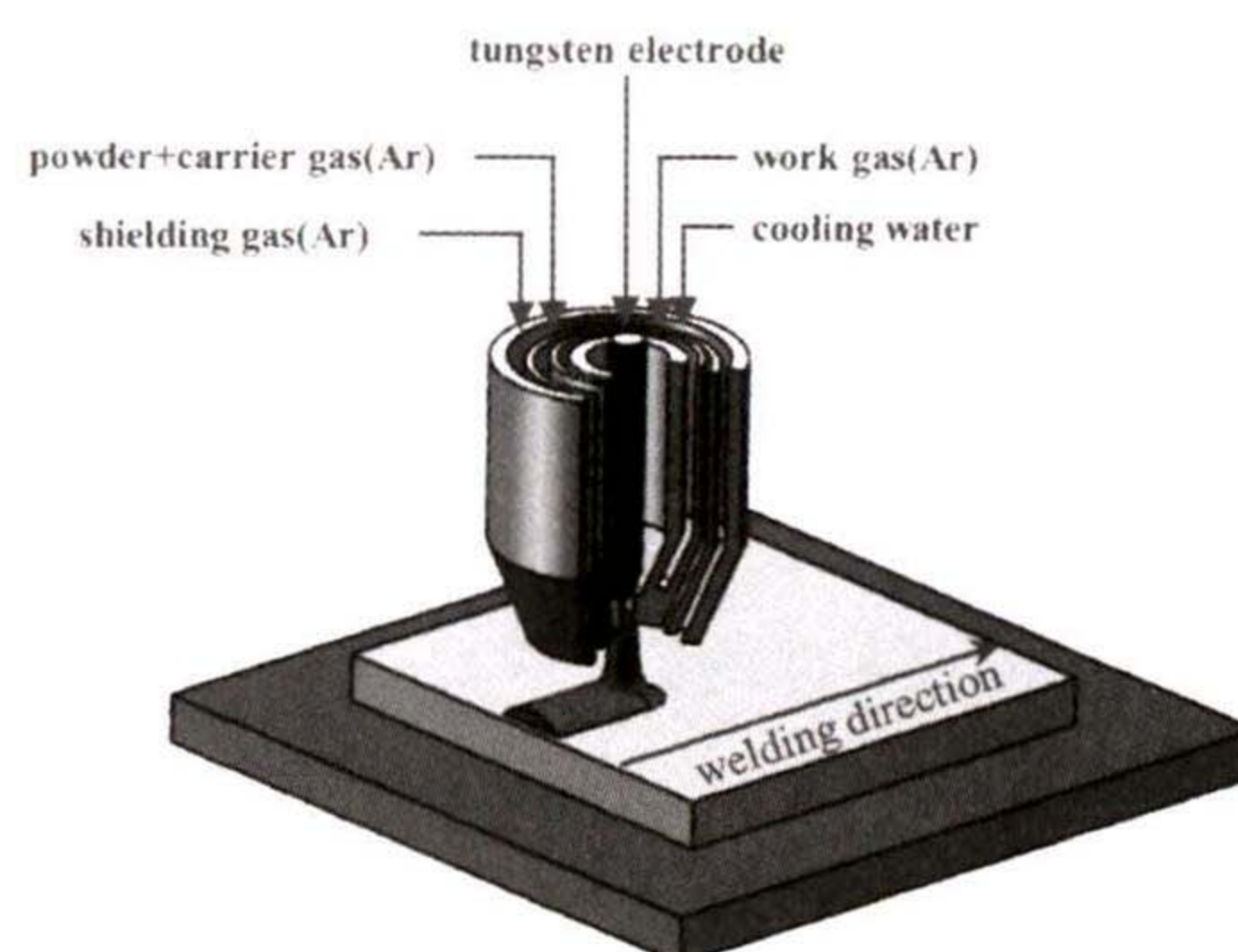


图 1 等离子堆焊原理图

Fig. 1 Schematic diagram of plasma arc surfacing

2 结果与讨论

2.1 焊接电流对试样宏观形貌的影响

焊接电流对堆焊层的几何形状、成分稀释、微观组织和力学性能等具有重要的影响。图 2 展示了不同焊接电流条件下,堆焊试样整体外观及横截面(图中方框为选取位置)的宏观形貌。从试样的整体外观[图 2(a)、图 2(c)、图 2(e)、图 2(g)]可以观察到,堆焊层连续,堆焊试样均未见到肉眼可见的未熔合、气孔等缺陷且堆焊层表面较平整,制备的堆焊层均

呈现规则的鱼鳞状波纹形态。当焊接电流较小时,堆焊层宽度较窄,增加焊接电流,堆焊层宽度增加。根据试样横截面的宏观形貌[图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)、图 2(h)]可以看到,堆焊试样横截面主要由堆焊层、热影响区两部分组成。焊接熔深随着焊接电流的增加具有逐渐增加的趋势。在横截面中,可以看到焊接裂纹的产生,并且随着焊接电流的增加,裂纹数量呈现先增多后减少的趋势。

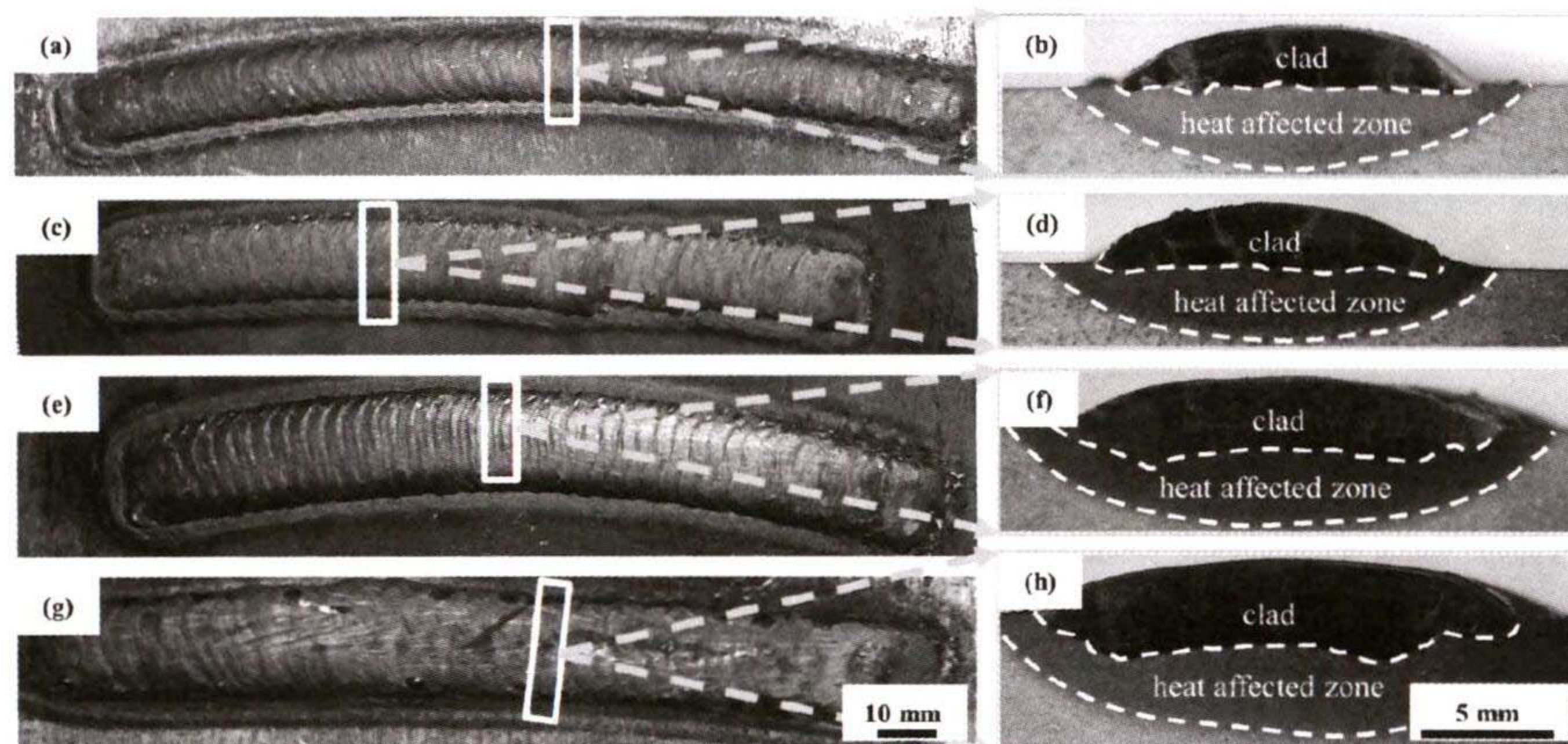


图 2 不同焊接电流条件下的堆焊试样整体及横截面宏观形貌
(a)(b)100 A;(c)(d)110 A;(e)(f)130 A;(g)(h)150 A

Fig. 2 Macroscopic morphology of the whole and cross section of the surfacing sample under different welding current conditions
(a) (b) 100 A; (c) (d) 110 A; (e) (f) 130 A; (g) (h) 150 A

焊缝成形对焊接质量具有重要的影响,为保证堆焊试样的性能,必须了解焊接电流对焊接熔深和熔宽的影响^[20-21]。图 3(a)为焊接电流变化时,堆焊层的焊接熔宽、熔深数值测量结果。从中可以看出,当焊接电流从 100 A 增加到 150 A 时,试样焊接熔深从 0.44 mm 增至 1.74 mm,熔宽从 12.76 mm 增至 17.26 mm。焊接电流对熔深、熔宽的影响,可由

以下观点解释:(1)随着焊接电流的增加,作用在焊件上的电弧力增加,对母材产生更加明显的冲击,同时热输入量增大,热量向熔池的下部传导,从而导致熔深变大;(2)温度的升高增强了堆焊金属与母材的润湿性,有利于堆焊金属在母材上的铺展和表面流动,因此熔宽也增加^[22-23]。

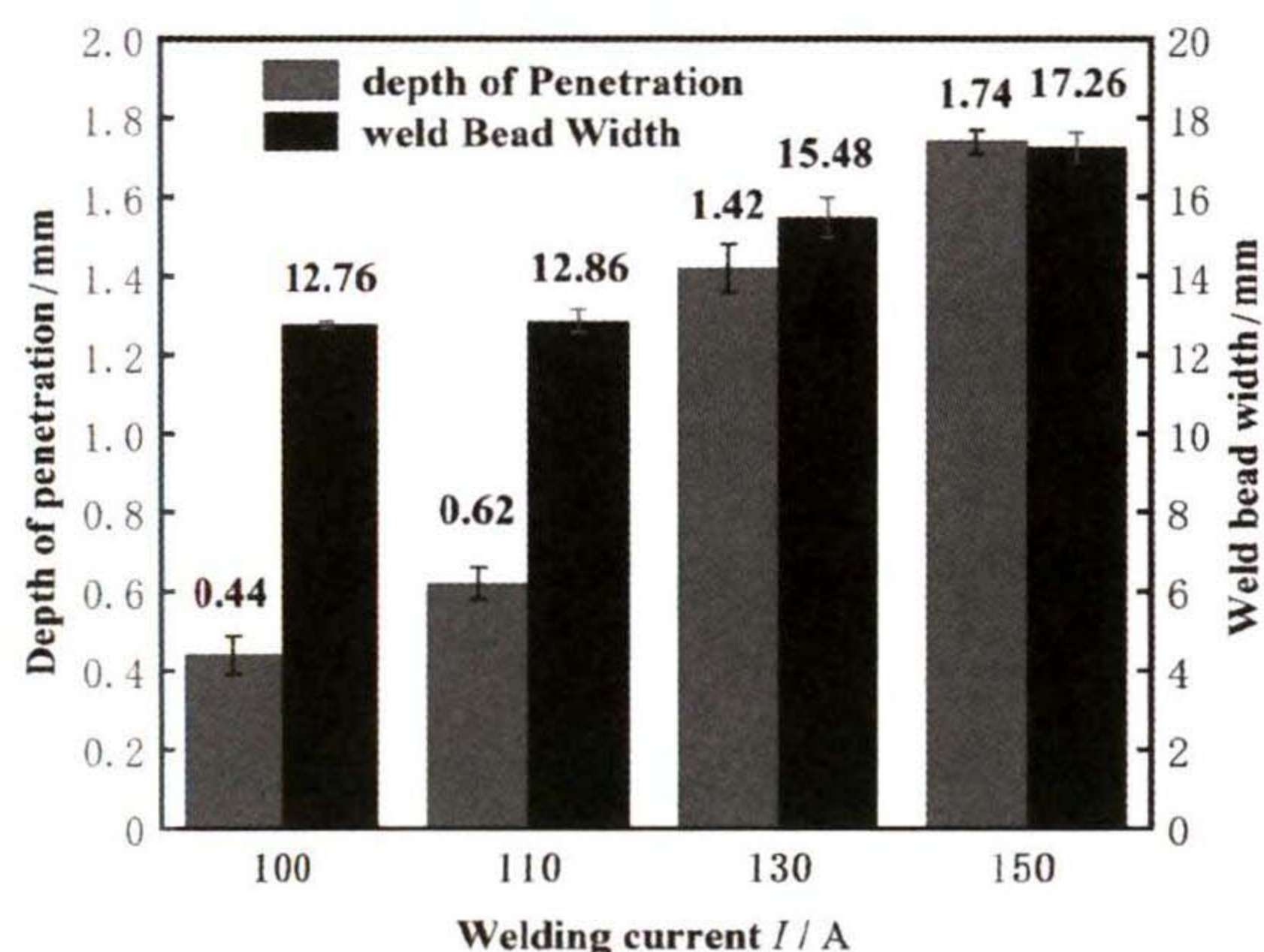


图 3 焊接电流对焊接熔深与熔宽的影响

Fig. 3 Effect of welding current on depth of penetration and weld bead width

2.2 焊接电流对显微组织及显微硬度的影响

图4表示的是堆焊层横截面的宏观形貌及不同部位的显微组织。从中可以观察到堆焊层顶部、中部和底部的显微组织明显不同。堆焊层顶部[图4(b)]组织形态为等轴树枝晶,中部[图4(c)]和底部[图4(d)]为柱状枝晶,但是中部的柱状枝晶要比底部的粗大。出现上述显微组织特征的主要原因是,在焊接过程中母材的温度较低,导致底部堆焊金属的冷却速度快,热量向母材方向迅速扩散,形成了相对细小的柱状枝晶。相对于冷却速度快的底部,堆焊层中部与母材之间的距离变远,导致凝固速度有所降低,因此会出现柱状枝晶粗化的现象。然而,堆焊层顶部直接与冷空气接触,散热方向杂乱,因此枝晶向各方向生长的速度较为接近,所以形成了表层等轴树枝晶区。图5表现的是焊接电流对堆焊层中部显微组织的影响规律。从中可以看出,马氏体枝晶随着焊接电流的增加逐渐粗化。这是由于焊接电流增加致使焊接热输入增大,凝固速度变慢,初生奥

氏体发生粗化,并最终导致马氏体发生粗化。

图6(a)为焊接速度80 m/h、送粉量15 g/s,不同焊接电流条件下堆焊试样的显微硬度随深度变化曲线。图6(b)为堆焊层显微硬度平均值与马氏体含量随焊接电流变化统计图。可以发现,随着焊接电流从100 A增加到150 A,堆焊层中马氏体的含量从48.96%增加到74.74%,堆焊层的显微硬度平均值从556.43 HV增至648.35 HV。随着焊接电流的增加,焊接热输入逐渐增大,样品焊接完毕后统一冷却,即试样的冷却速度相同,奥氏体向马氏体转变的时间越充足即马氏体相变越完全,马氏体含量越多,所以堆焊层的显微硬度平均值逐渐增大。等离子堆焊后的堆焊层硬度高于母材,这种硬度的提升是因为堆焊层中形成了高硬度的马氏体组织。热影响区与母材界线附近的硬度呈现下降趋势的原因是这部分材料受到等离子热源的影响,产生了回火软化效应。

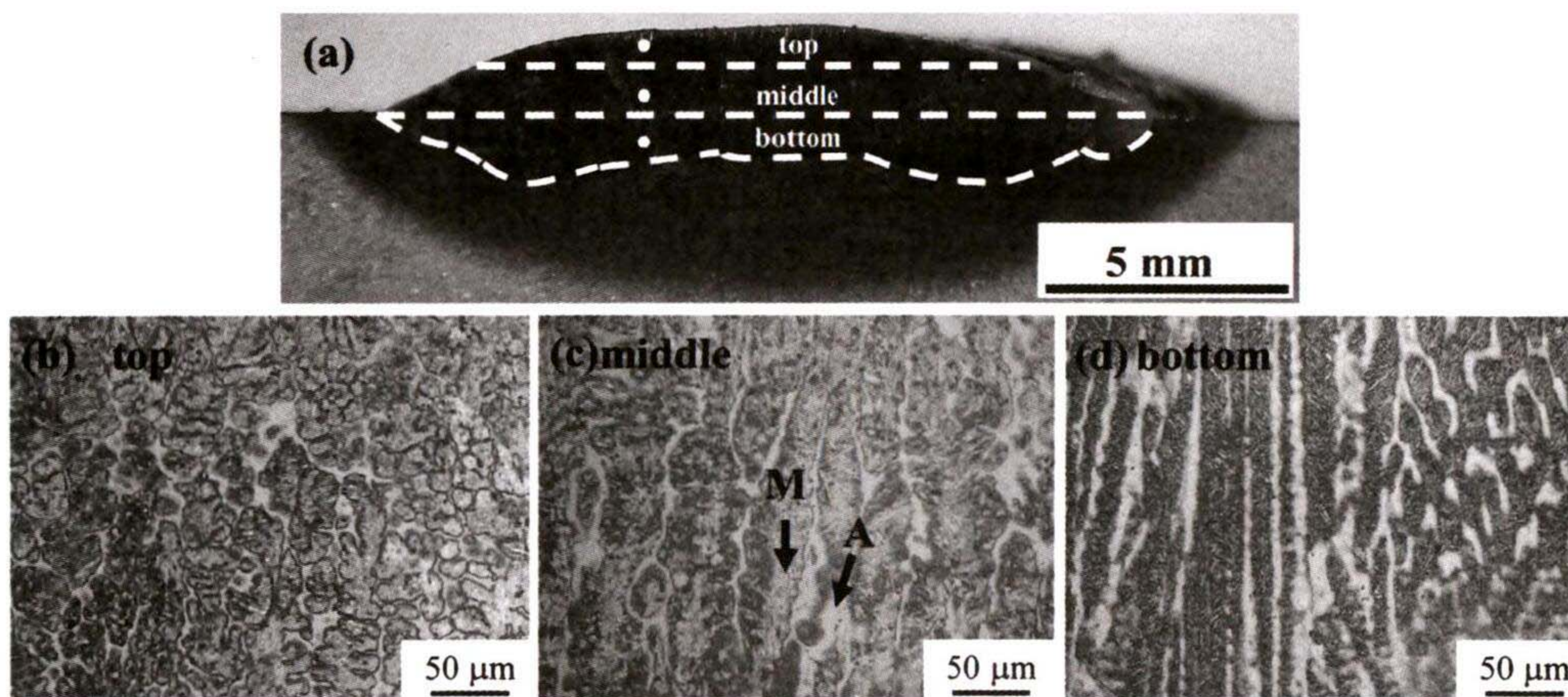


图4 堆焊层横截面宏观形貌及不同部位的显微组织

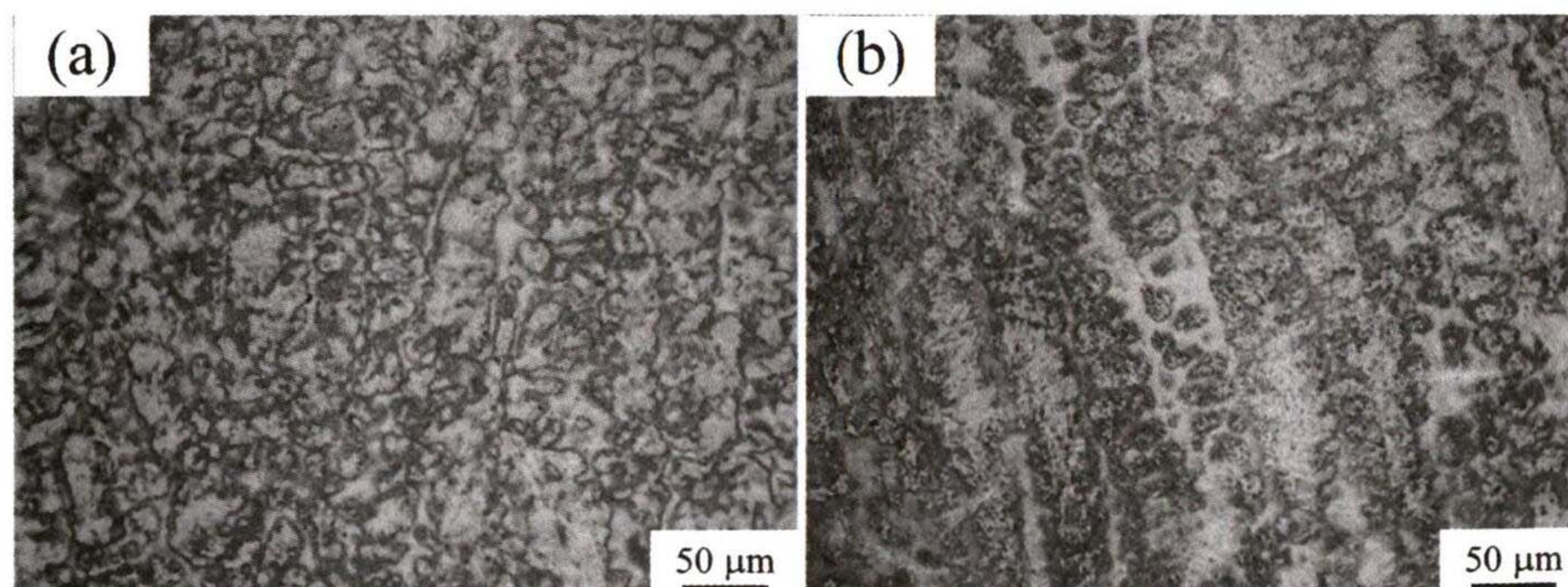
(a)堆焊层横截面宏观形貌;(b)堆焊层顶部显微组织;(c)堆焊层中部显微组织;
(d)堆焊层底部显微组织(焊接电流130 A,焊接速度80 m/h,送粉量15g/s)

Fig. 4 Macro morphology of cross section and microstructure of different parts of surfacing layer

(a) Macroscopic morphology of the cross section of surfacing layer;

(b) microstructure at the top of the surfacing layer; (c) microstructure at the middle of the surfacing layer;

(d) microstructure at the bottom of the surfacing layer (welding current: 130 A, welding speed: 80 m/h, powder feed: 15 g/s)



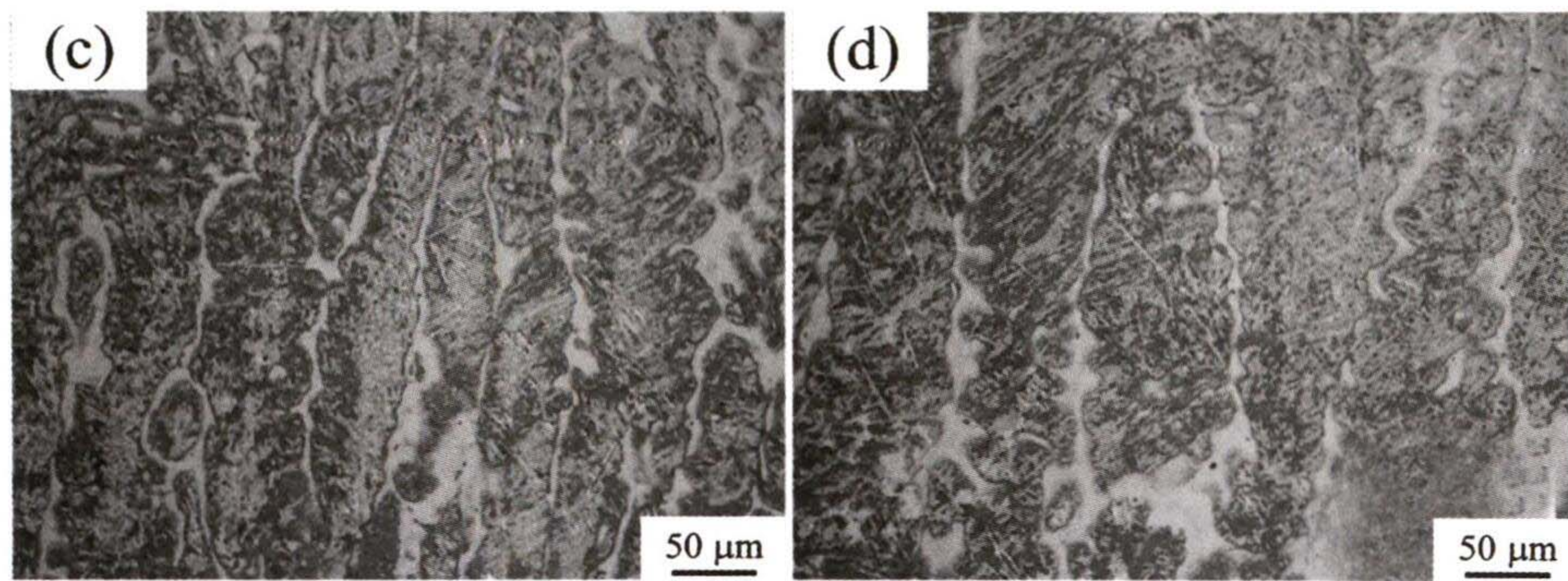


图5 焊接电流对堆焊层(中部)显微组织的影响

(a)100 A;(b)110 A;(c)130 A;(d)150 A

Fig. 5 Effect of welding current on microstructure of middle part of surfacing layer

(a) 100 A; (b) 110 A; (c) 130 A; (d) 150 A

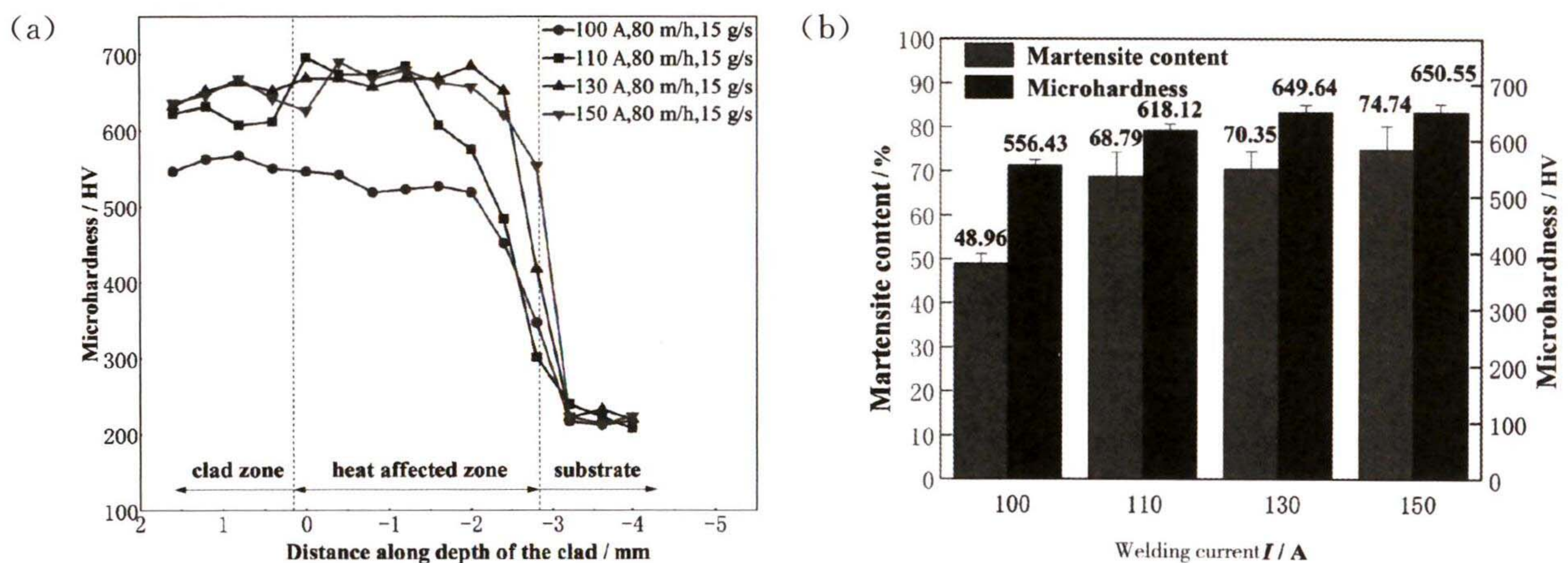


图6 焊接电流对堆焊层硬度与马氏体含量的影响

(a)堆焊试样显微硬度;(b)堆焊层显微硬度平均值与马氏体含量

Fig. 6 Effect of welding current on hardfacing layer hardness and martensite content

(a)Microhardness of hardfacing sample; (b) average microhardness and martensite content of hardfacing layer

2.3 焊接电流对焊接裂纹的影响及裂纹形成机理

焊接裂纹的形成会影响零件的力学性能和使用寿命。查阅文献可知,当堆焊层某个区域局部应力的数值大小高于材料的强度极限时,会造成裂纹的萌生与扩展,等离子堆焊制备的试样内部残余应力主要有两个来源^[24]。其中,第一个来源是由于等离子弧的快速加热导致熔池金属的温度分布不均匀,在冷却过程中,不同区域的堆焊金属收缩程度存在差异,同时该过程还会受到冷母材的限制,从而在堆焊层中产生了拉伸残余应力^[24]。另外,残余应力的第二种主要来源是马氏体相变,它可能导致材料的体积膨胀和位错的移动,从而产生残余应力,Yan等^[25]使用透射电子显微镜(TEM)和XRD证实了激光粉末床熔化成形H13钢中含有大量的马氏体和高的残余应力值。

为了探讨等离子堆焊成形H13堆焊层焊接裂

纹的形成机理,对堆焊层应力分布及裂纹形态进行表征和分析。图7为焊接电流100 A条件下,堆焊试样温度场和等效应力分布云图。可见,由温度场云图显示的焊接熔深(0.48 mm)和试验结果(0.44 mm)接近,说明该模型可用于预测堆焊层中应力分布。从图7(b)可知,堆焊层两侧的应力值较中间大,说明两侧更易产生裂纹。

图8(b)~8(e)显示了不同焊接电流条件下堆焊试样横截面低倍整体形貌。从中可以看出,在四个焊接电流条件下,堆焊层中存在数量不一的焊接裂纹,说明焊接电流变化时,H13等离子堆焊层的裂纹敏感性较大。同时,随着焊接电流的增加,堆焊层中的裂纹数量先增加后减小。此外,焊接裂纹多数分布在堆焊层的两侧[图8(b)~8(e)],说明堆焊层两侧的应力集中大,该现象与数值模拟预测应力分布获得结果相同。经过分析,裂纹主要有两种形

式:第一种为应力造成的裂纹[图 8(f)],第二种为与凝固缺陷结合在一起的裂纹,即缺陷诱发裂纹[图 8(g)]。图 8(a)为应力诱发裂纹局部放大图。结合数值模拟、图 8(a)以及图 8(f)可以分析出应力诱发裂纹在堆焊层顶部萌生,主要沿着马氏体和奥氏体的界面扩展,至堆焊层底部马氏体处停止。经过上述描述,可以总结出应力诱发裂纹的形成机制为:一方面,堆焊层顶部与焊接热源及冷空气接触,温度分

布不均匀,应力容易集中,所以焊接裂纹从堆焊层顶部萌生;另一方面,马氏体和奥氏体两相界面处容易富集大量的脆性化合物,两相之间的结合力薄弱,所以在拉应力的作用下两相分离而导致裂纹扩展。第二种裂纹[图 8(g)]由于与未熔合缺陷结合在一起,所以具有穿晶形态。缺陷附近属于薄弱区,所以易导致焊接裂纹的形成。

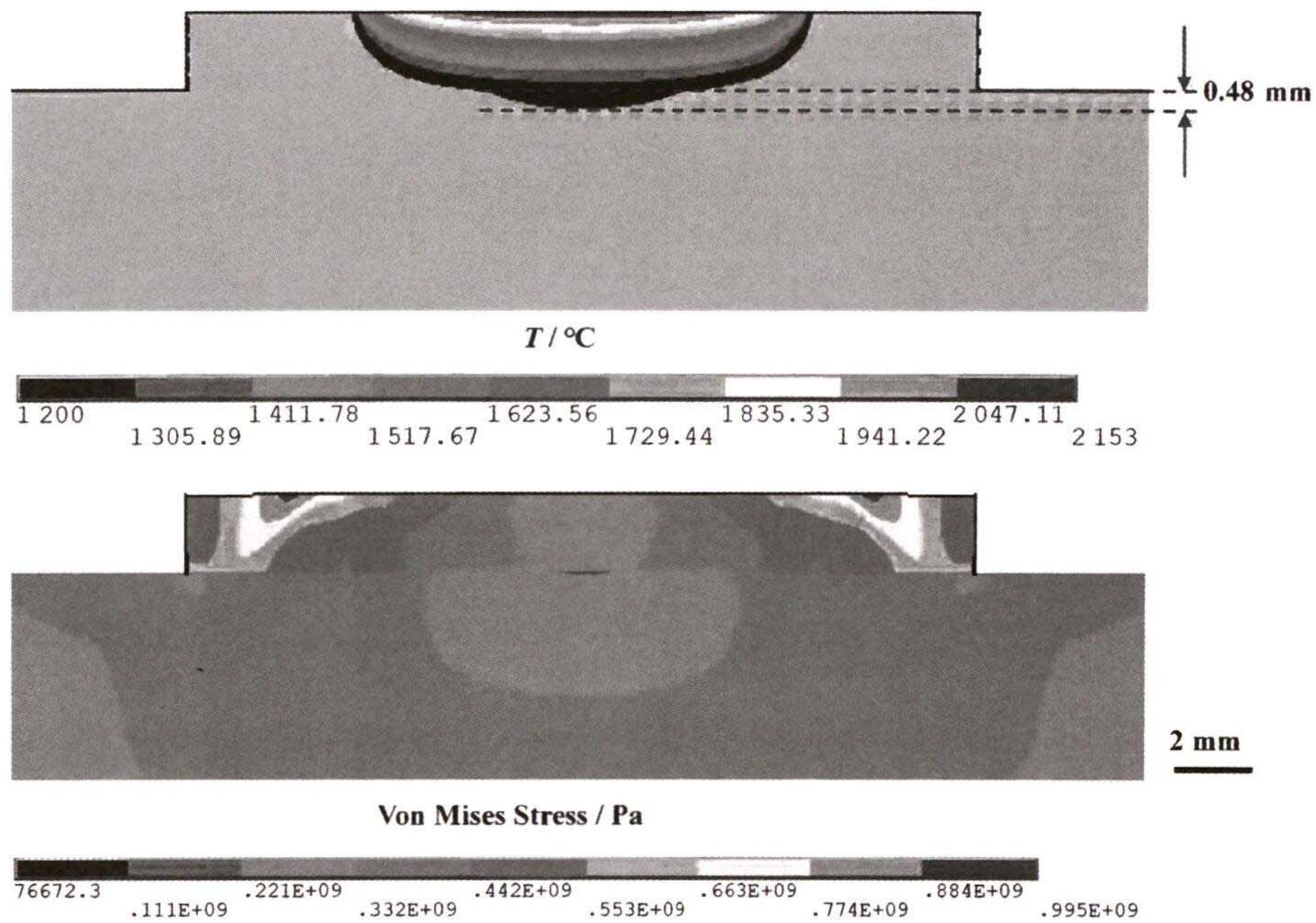


图 7 焊接电流 100 A 时,试样的温度场云图与等效应力分布云图
(a)温度场云图;(b)等效应力分布云图

Fig. 7 Temperature field cloud diagram and von mises stress distribution cloud diagram of the sample when welding current is 100 A
(a) Temperature field cloud diagram; (b) von mises stress distribution cloud diagram

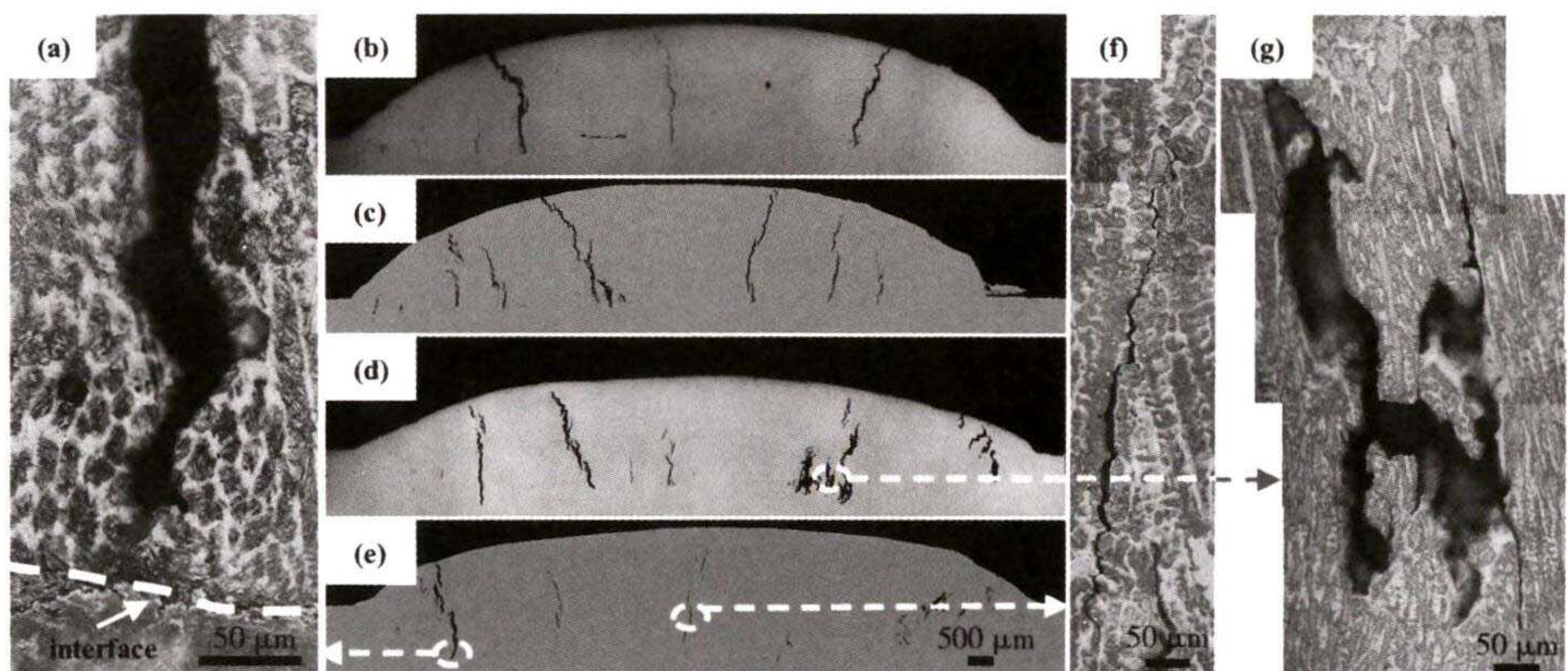


图 8 不同焊接电流条件下堆焊层裂纹形貌以及裂纹局部放大形貌
(a)(f)(g)裂纹局部放大形貌;(b)100 A;(c)110 A;(d)130 A;(e)150 A

Fig. 8 Crack morphology of surfacing layer under different welding current conditions and the local amplification morphology of crack
(a) (f) (g) the local amplification morphology of crack
(b) 100 A; (c) 110 A; (d) 130 A; (e) 150 A

堆焊层两侧裂纹倾向性大的原因是堆焊层两侧的温度分布不均匀程度高于中间位置,导致两侧的应力值比中间大。焊接电流的增加可改变堆焊层裂纹敏感性的原因为:当焊接电流较低时,随着焊接电流的增加,热输入量逐渐升高,使得熔池凝固过程中产生的拉应力增加,同时堆焊层组织粗化,裂纹更易扩展,从而使得裂纹倾向性增大^[26]。当焊接电流超过一定值时,随着焊接电流的增加,熔池处于液态的时间变长,有利于杂质的上浮,减少了堆焊层中晶界夹杂物的形成,提高了晶界结合力。

H13 等离子堆焊层的裂纹敏感性与焊接电流有密切的关系。通过焊接电流的优化可以降低裂纹敏感性,当焊接电流为 150 A 时,可以获得焊接裂纹数量较少的试样。

2.4 堆焊层数对显微组织及焊接裂纹的影响

在焊接电流 130 A 条件下,进行了多层焊接试验。图 9 分别显示了堆焊层横截面的宏观形貌、层间界面显微组织以及焊接裂纹形貌。从图 9(b)~(d)中可以看出,界面处组织连续分布,这说明每层之间形成了冶金结合。同时,还可以观察到层间界

线上部的奥氏体含量明显多于下方。该特征的形成主要与界面附近堆焊金属中奥氏体向马氏体转变数量的多少有关。前一层焊接完毕后,该层顶部的堆焊金属温度较高,在焊接后一层时,后一层的底部金属与前一层的顶部堆焊材料相接触,致使后一层底部材料的温度梯度较小,冷却速度缓慢,最终导致该区域只有少量的奥氏体向马氏体发生转变。图 9(e)和图 9(f)表现的是层间界面处裂纹形貌,从这两幅图中可以看出,焊接裂纹在层间连续扩展。

经过分析,多层焊接时,焊接裂纹的形成可能有以下两个原因:(1)每焊接一层时,堆焊层中都会造成应力的集中与积累,在焊接前三层时,堆焊层中无焊接裂纹的产生,当第四层焊接完毕后,堆焊层内的应力值超过了材料的断裂强度,致使焊接裂纹的萌生并在层间连续扩展;(2)在焊接第一层时,堆焊层中便已形成了贯穿整个堆焊层的裂纹。当第二层焊接完毕后,由于第一层顶部焊接裂纹的影响,导致与第一层焊接裂纹相邻的区域在很小的应力集中条件下,焊接裂纹继续向堆焊层中连续扩展。

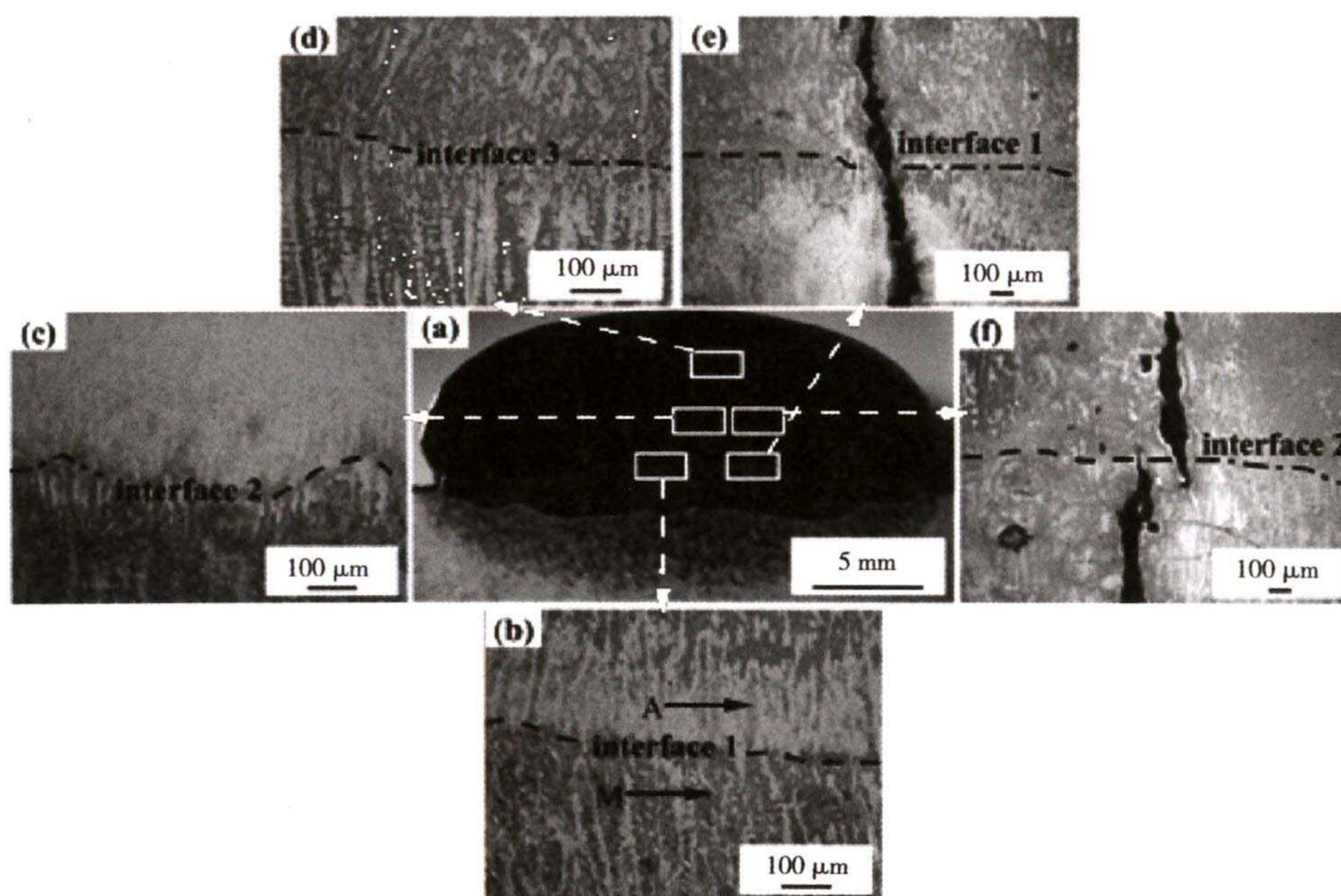


图 9 焊接电流 130 A 条件下,焊接四层时试样的宏观形貌、显微组织形貌以及裂纹形貌
(a)宏观形貌;(b)~(d)显微组织形貌;(e)(f)裂纹形貌

Fig. 9 Macroscopic morphology, microstructure and crack morphology of the sample when welding four layers with welding current of 130 A

(a) Macroscopic morphology; (b)-(d) microstructure; (e) (f) crack morphology

3 结论

(1)用等离子堆焊方法在 5CrNiMo 钢基体上可

制备与基体结合良好的 H13 钢堆焊层。随着焊接电流的增加,焊接熔深和熔宽具有逐渐增大的趋势。

(2) 等离子堆焊后, H13 堆焊层顶部组织形态为等轴树枝晶, 中部和底部为柱状枝晶, 且随着焊接电流增大, 马氏体枝晶逐渐粗化。堆焊层的最高平均显微硬度可达母材的 3 倍。

(3) 焊接电流变化时, H13 堆焊层的裂纹敏感性较大, 堆焊层的裂纹形式主要有两种: 一是应力诱发裂纹; 二是缺陷诱发裂纹。在焊接电流 150 A 条件下可以获得裂纹缺陷少的堆焊层。

(4) 堆焊层层间界面上方的奥氏体含量明显多于下部。多层焊接时, 焊接裂纹在层间连续扩展。

参考文献

- [1] 员霄, 王井, 朱青海, 等. H13 钢的铁基和钴基熔覆层组织与耐磨性[J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 105-109.
YUAN X, WANG J, ZHU Q H, et al. Microstructure and abrasion resistance of Fe-based and Co-based coatings of AISI H13[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 105-109.
- [2] HOU Q Y, GAO J S, ZHOU F. Microstructure and wear characteristics of cobalt-based alloy deposited by plasma transferred arc weld surfacing[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 194(2/3): 238-243.
- [3] KIM H J, YOON B H, LEE C H. Wear performance of the Fe-based alloy coatings produced by plasma transferred arc weld-surfacing process[J]. Wear, 2001, 249(10/11): 846-852.
- [4] CHEN G Q, FU X S, WEI Y H, et al. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228: S276-S282.
- [5] LIU Y F, MU J S, XU X Y, et al. Microstructure and dry-sliding wear properties of TiC-reinforced composite coating prepared by plasma-transferred arc weld-surfacing process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 458(1/2): 366-370.
- [6] 魏仕勇, 彭文屹, 陈斌, 等. 等离子弧粉末堆焊熔覆材料的研究现状与进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9143-9151.
WEI S Y, PENG W Y, CHEN B, et al. Current status and progress of cladding materials for plasma arc powersurfacing[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9143-9151.
- [7] 饶润胤. 压扭载荷下热锻模镍基堆焊层的组织与性能[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
RAO R Y. Microstructure and properties of nickel-based surfacing layer for hot forging die under twist-compression test[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [8] LIYANAGE T, FISHER G, GERLICH A P. Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries[J]. Wear, 2012, 274/275: 345-354.
- [9] 牛龙飞, 洪峰, 王华君, 等. 碳化铬对 H13 钢镍基等离子弧堆焊覆层组织与硬度的影响[J]. 焊接技术, 2018, 47(6): 12-15.
NIU L F, HONG F, WANG H J, et al. Effect of chromium carbide on microstructure and hardness of H13 steel nickel based plasma surfacing coating[J]. Welding Technology, 2018, 47(6): 12-15.
- [10] DENG D W, XIA H F, GE Y L. Influence of welding currents on microstructure and microhardness of Ni45 alloy reinforced with spherical tungsten carbides (40 mass%) by plasma transferred arc welding[J]. Materials Transactions, 2013, 54(11): 2144-2150.
- [11] 肖轶, 徐呈艺, Ryou Min, 等. Cr₃C₂ 粒径对等离子堆焊铁基合金层组织与耐磨性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(24): 4329-4333.
XIAO Y, XU C Y, MIN R, et al. Effect of Cr₃C₂ grain size on the microstructure and wear performance of Fe-based alloy plasma transferred arc surfacing[J]. Materials Review, 2018, 32(24): 4329-4333.
- [12] 李孝露. TiC 增强钴基合金等离子堆焊层组织和性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
LI X L. Microstructure and properties of cobalt-based alloy plasma-arc surfacing layers reinforcement by TiC[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [13] 袁修饶. 基于 GRNN 和 NSGA-II 的激光熔覆工艺参数多目标优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
YUAN X R. Multiobjective optimization of laser cladding process parameters based on GRNN and NSGA-II[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [14] 赵洪运, 田泽, 贺文雄, 等. Q235 钢表面等离子喷焊钴基自熔性高温合金工艺分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 47-50.
ZHAO H Y, TIAN Z, HE W X, et al. Process research of Co-based coating on Q235 steel by PTAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 47-50.
- [15] 刘舜尧, 张松, 崔文东, 等. W₂C 增强镍基合金等离子堆焊层组织与空蚀性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 39-42.
LIU S Y, ZHANG S, CUI W D, et al. Microstructure

- and cavitation erosion performance of W_xC reinforced Ni-base alloy composite coating by plasma transferred arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4): 39-42.
- [16] 余菊美, 晁明举, 梁二军, 等. TiO_2 对铁基合金激光熔覆层组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2003, 23(4): 201-204.
- YU J M, CHAO M J, LIANG E J, et al. Effect of TiO_2 on the microstructure and properties of laser cladding layers of Fe-based alloy[J]. applied Laser, 2003, 23(4): 201-204.
- [17] 梁志刚, 战金明, 师文庆, 等. 硅粉添加量对铁基合金激光熔覆涂层的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 593-597.
- LIANG Z G, ZHAN J M, SHI W Q, et al. The effect of Si addition amount on Fe-based alloy laser cladding coating[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 593-597.
- [18] 杨振, 柳宁, 樊湘芳, 等. $2Cr_{12}NiMoWV$ 钢表面激光熔覆铁基合金组织及力学性能研究[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 22-28.
- YANG Z, LIU N, FAN X F, et al. Microstructure and mechanical properties of laser clad iron-based alloy on $2Cr_{12}NiMoWV$ steel surface[J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 22-28.
- [19] 齐勇田, 曹润平, 栗卓新. 激光熔覆铁基合金涂层开裂行为及其产生机制[J]. 应用激光, 2015, 35(6): 639-642.
- QI Y T, CAO R P, LI Z X. Forming character and mechanism of cracks for Fe-based alloy coatings by laser cladding [J]. Applied Laser, 2015, 35(6): 639-642.
- [20] 徐锴, 武鹏博, 梁晓梅, 等. 铝合金激光-多股绞合焊丝 MIG 复合焊特性分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(1): 16-23.
- XU K, WU P B, LIANG X M, et al. Analysis of characteristics of aluminum alloy laser multi stranded welding wire MIG hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(1): 16-23.
- [21] LI Y Z, WANG K Y, JIN Y J, et al. Prediction of welding deformation in stiffened structure by introducing thermo-mechanical interface element[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 440-446.
- [22] 蒋金玲, 张恩华, 李硕, 等. 激光焊接参数对焊接质量影响的实验研究[J]. 应用激光, 2020, 40(5): 867-872.
- JIANG J L, ZHANG E H, LI S, et al. Experimental-study on the effects of laser welding parameters on welding quality[J]. Applied Laser, 2020, 40(5): 867-872.
- [23] 毛远平. ZG29MnMoNi 堆焊过渡层组织和硬度研究及焊接参数优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- MAO Y P. Study on microstructure and hardness of transition layer and welding parameters optimization by surfacing on ZG29MnMoNi[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [24] HE Y N, ZHONG M, BEUTH J, et al. A study of microstructure and cracking behavior of H13 tool steel produced by laser powder bed fusion using single-tracks, multi-track pads, and 3D cubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 286: 116802.
- [25] YAN J J, ZHENG D L, LI H X, et al. Selective laser melting of H13: Microstructure and residual stress[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(20): 12476-12485.
- [26] 安娜, 张心怡, 王启明, 等. 2060 铝锂合金光纤激光填丝焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003009.
- AN N, ZHANG X Y, WANG Q M, et al. Fiber laser welding of 2060 aluminum-lithium alloy with filler wire [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 1003009.