

镍基合金电渣焊大厚度带极堆焊金属 工艺及性能

杜丽萍^{1,2}, 杜兵¹, 宋建廷³, 喻朝飞⁴, 王小刚⁴

(1. 中国机械科学研究总院集团有限公司, 北京 100044; 2. 哈尔滨职业技术大学, 哈尔滨 150080;
3. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 哈尔滨 150060; 4. 哈焊所华通(常州)焊业股份有限公司, 江苏 常州 213100)

摘要:针对 Inconel 600 镍基合金大厚度带极电渣堆焊, 解决传统工艺效率低、稀释率高及易开裂等问题, 采用带极电渣堆焊工艺在 SA508-III 低合金钢基体上进行大厚度多层多道堆焊, 研究堆焊层的组织形貌及力学性能。通过金相显微镜观察焊态与热处理态堆焊层的显微组织, 按照标准方法进行室温拉伸、弯曲和冲击韧性实验, 分析断口形貌。结果表明, 焊态堆焊层组织中存在偏析带与析出相, 热处理后偏析带显著减少。热处理后屈服强度略有提升, 塑性和冲击韧性明显改善, 弯曲试样未出现裂纹, 显示出良好的韧性和结构完整性。该研究为 Inconel 600 合金堆焊工艺优化及其在工程应用中的性能提升提供了参考。

关键词:镍基合金; 电渣堆焊; 微观组织; 力学性能

doi:10.3969/j.issn.2095-7262.2026.03.015

中图分类号:TG456.7

文章编号:2095-7262(2026)03-0432-07 **文献标志码:**A

ESW overlay welding process and performance of nickel-based alloy cladding metal with thick strip electrode

Du Liping^{1,2}, Du Bing¹, Song Jianting³, Yu Zhaoifei⁴, Wang Xiaogang⁴

(1. China General Academy of Machinery Science & Technology Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. Harbin Vocational & Technical University, Harbin 150080, China; 3. Harbin Weld Welding Co. Ltd., Harbin 150060, China;
4. Harbin Welding Institute Huatong (Changzhou) Welding Co. Ltd., Changzhou 213100, China)

Abstract: This paper intends to address the low traditional process efficiency, high dilution rate and cracking tendency by the electrosag overlay welding with thick strip electrode of Inconel 600 alloy. The study includes performing the thick multi-layer multi-pass overlay welding on a SA508-III low-alloy steel substrate with the process of strip electrosag overlay welding to investigate the tissue morphology and mechanical properties of the overlapping welding layer; characterizing the microstructure of the as-welded and post-weld heat treated (PWHT) surfacing layers via metalloscope; performing the room-temperature tensile, bending, and impact toughness tests according to standard methods; and analyzing the fracture surface morphology. The results show that the segregation bands and precipitated phases exist in microstructure of welded overlay layer in as-welded state, and the segregation bands significantly decreases after heat treatment, while the yield strength of the surfacing layer slightly increases with remarkably improved plasticity and impact toughness, without cracks, demonstrating excellent toughness and structural integrity. This study can provide a practical reference for the optimization of Inconel 600 alloy surfacing process and the performance improvement of related engineering applications.

Keywords: nickel-based alloy; ESW cladding; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2025-11-26

第一作者简介: 杜丽萍(1976-), 女, 吉林省永吉人, 教授, 博士研究生, 研究方向: 材料表面改性, E-mail: 635432848@qq.com。

0 引言

Inconel 600 是一种以镍为基的高温合金,主要由镍、铬和铁三种元素组成,在耐腐蚀性、抗氧化性和力学性能方面表现优异,被广泛应用于化工、核能、航空航天等领域^[1-3]。Inconel 600 合金通过堆焊技术在普通基材表面形成一层功能性合金材料,不仅可以显著提高部件的服役性能,还可实现成本与性能之间的平衡。

堆焊是一种通过熔焊方式在母材表面沉积一层或多层合金材料,从而赋予其特定性能(如耐磨、耐腐蚀或耐高温等)的表面强化技术^[4-5]。尤其在承压设备、管道、阀门等关键部件上,堆焊技术不仅可以显著提高其使用寿命,还能降低高性能合金的使用成本。针对镍基合金的堆焊,目前常用的方法包括埋弧焊(SAW)、钨极氩弧焊(TIG)、焊条电弧焊(SMAW)等^[6-9]。其中,TIG 焊因其良好的稳定性和高质量的焊缝而被广泛应用于镍基合金的焊接中^[10-11]。

随着大型复杂构件对堆焊层厚度和沉积效率要求的提高,传统焊接方法在厚层堆焊方面存在效率低、热输入控制困难等问题。因此,探索适用于大厚度堆焊的新型高效焊接技术成为研究热点。带极电渣焊(Electroslag welding, ESW)是一种高效的大电流堆焊技术,具有熔池稳定、热影响区小、适合厚板焊接等优点,近年来在厚层堆焊与增材制造领域受到关注^[12]。焊接过程中热输入、冷却速度等工艺参数对镍基合金焊缝组织与性能有显著影响。例如,宋建廷^[13]对 Inconel 600 分别采用 ESW 和 SAW 焊接方式进行比较,通过焊带与焊剂组合匹配设计不同浓度 Nb、Mn、Mo 的熔覆金属,分析了合金元素对熔覆金属性能的影响。实验结果表明,采用 ESW 带极堆焊熔覆金属与 SAW 带极堆焊熔覆金属的力学性能差别不大,ESW 熔覆金属冲击性能略优,而 SAW 熔覆金属拉伸性能略强。

针对 Inconel 600 合金在实际应用中对厚层堆焊结构的需求,基于带极电渣焊(ESW)具有的堆焊效率高和堆焊速度快的优势,在 SA508 - III 低合金钢基体上开展了大厚度多层多道堆焊实验。研究内容包括:在不同堆焊状态(焊态与 650 °C 热处理态)下,通过金相观察分析其显微组织特征;采用标准方法对堆焊层不同部位进行拉伸、弯曲和冲击韧性测试,并结合断口形貌分析,揭示热处理对堆焊层组织和性能的影响机理。该研究旨在为 Inconel 600 镍基合金的大厚度堆焊工艺优化、结构设计及工程应

用提供理论依据与实验数据支持。

通过系统分析堆焊层组织演变与力学性能的变化规律,可为后续基于 ESW 工艺的高性能镍基合金堆焊制造及其增材制造应用提供工艺参考和技术路径,有助于拓展高性能镍基合金材料在极端环境下的工程应用。

1 实验

1.1 堆焊材料与工艺

本实验选用 SA508 - III 低合金钢作为试板母材,试样尺寸为 300 mm × 300 mm × 60 mm。为确保焊接质量,试板表面经充分清理,去除铁屑、锈迹、油污及水分等杂质,并在焊前进行预热,温度控制在不低于 150 °C。所用焊带为 H600 合金,规格为 0.5 mm × 30 mm,其具有良好的耐蚀性和力学性能,适用于高性能堆焊工艺。焊材的具体化学成分,如表 1 所示。

表 1 H600 焊带化学成分

Table 1 Chemical composition of H600 welding strip

元素	标准值	H600	元素	标准值	H600
C	≤0.040	0.026	S	≤0.010	0.001
Si	≤0.25	0.080	Ni	≥67.00	70.78
Mn	2.50 ~ 3.50	3.48	Cr	18.00 ~ 22.00	21.48
P	≤0.010	0.004	Co	≤0.050	—
Cu	≤0.20	0.033	Ta	—	—
Ti	≤0.75	0.22	Nb	—	2.98
Fe	≤3.00	0.70	N	—	—
Nb + Ta	2.30 ~ 3.00	2.98	其他	≤0.50	—

本研究选用粒度为 0.18 ~ 2.00 mm 的 SJ85B 焊剂,采用电渣焊(ESW)工艺对试板进行堆焊。焊接过程中各项参数经优化设计,主要考虑焊接速度的影响。焊接速度过快会导致热输入不足,造成熔合不充分、冶金反应不完全等问题,从而形成缺陷;焊接速度过慢则会导致热输入过大,产生过热和晶粒粗化,进而导致性能恶化。单层的具体工艺参数焊带规格为 0.5 mm × 30 mm,焊接电压为 26 V,焊接速度为 180 mm/min,干伸长为 30 ~ 35 mm,焊接厚度为 20 ~ 30 mm,堆焊层厚度为 3 ~ 3.5 mm^[13-14]。在大厚度堆焊过程中,严格控制层间温度不超过 225 °C,以减少热裂纹倾向并确保组织均匀性。整体堆焊结构由约 30 层、每层 30 道构成,总计约 900 道焊

道,实现大厚度、多层多道堆焊,堆焊厚度为 40 mm,堆焊长度为 200 mm。堆焊的宏观示意图和形貌见图 1。图中,单位为 mm。

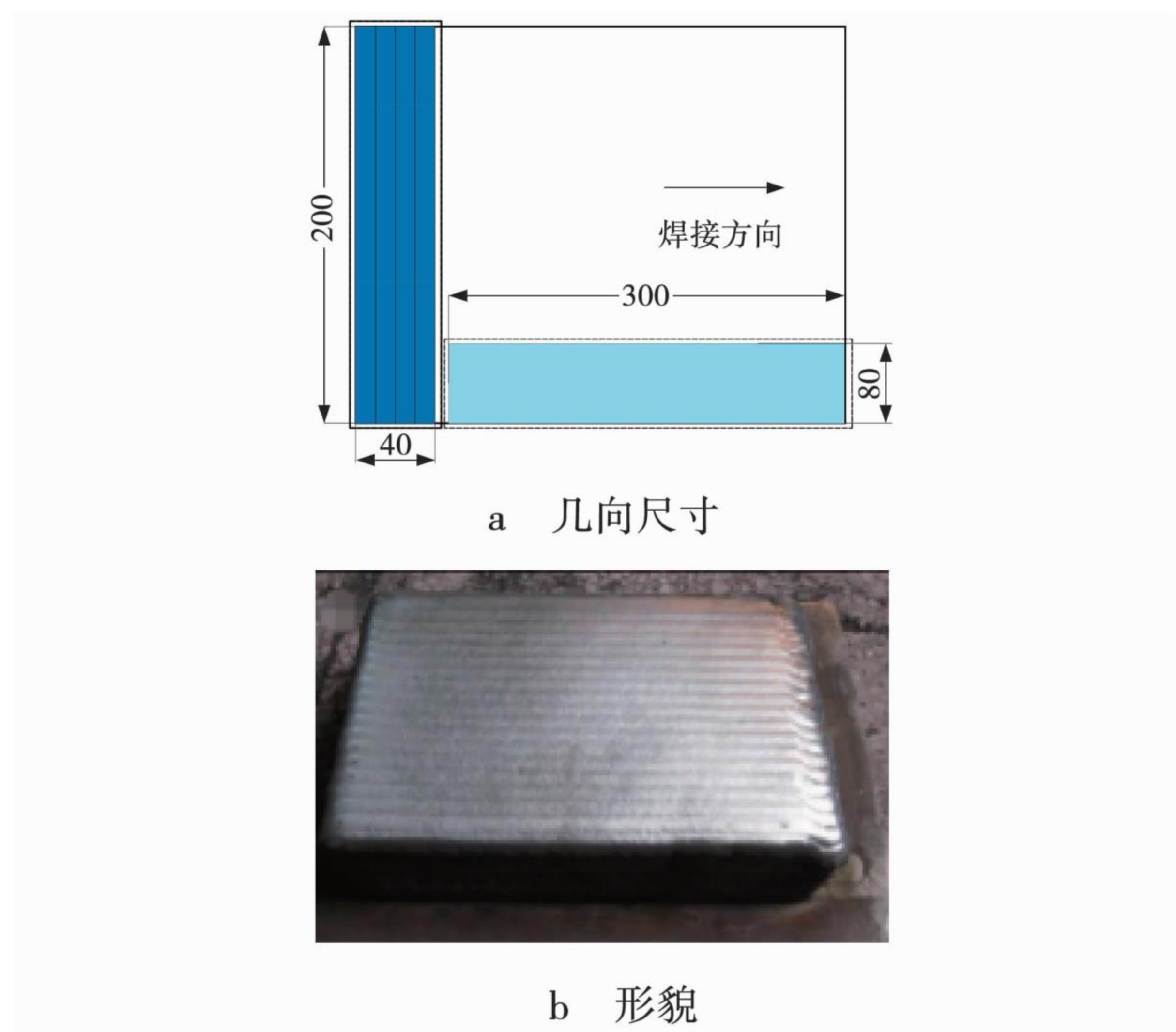


图 1 大厚度多层多道堆焊试板焊接示意

Fig. 1 Schematic of large thickness multi-layer multi-pass surfacing welding test plate

大厚度多层多道堆焊试板的焊接结构,如图 1 所示。采用垂直分层、均匀堆积的焊接方式构建,焊道排列致密,层间结合良好,体现了 ESW 工艺在高厚度焊接中的稳定性与成形能力。堆焊层整体结构完整,形貌平整,无明显缺陷,焊缝宽度均匀,熔敷质量良好,显示出优异的宏观质量。堆焊后试板的宏观形貌特征详见图 1b,为后续组织与性能测试提供了可靠基础。

1.2 堆焊层的显微组织与力学性能

为观察堆焊层的显微组织形貌,选用不同型号的砂纸对堆焊层试样进行逐级打磨和抛光,制备金相显微样品。腐蚀剂采用由 1 g FeCl₃ 与 20 mL 盐酸按比例配制的混合溶液,对样品表面进行适度腐蚀后,使用 OLYMPUS GX51 型金相显微镜观察其金相组织。

为开展堆焊金属的组织观察与性能测试,对焊接试板进行系统解剖,截取不同部位的试样用于金相分析、拉伸、弯曲及冲击试验。试板解剖示意图如图 2 所示。明确划分了取样区域和对应的测试方向,为后续实验提供了清晰的样品分布依据和标准化参考。在焊态和焊后热处理(650 ℃保温)状态下对熔敷金属进行室温拉伸试验。室温拉伸试验方法应按照 AWS B4.0M—2000(R2010)标准执行,试样尺寸见图 3。分别在焊态和焊后热

处理状态下进行弯曲性能测试与冲击韧性实验。

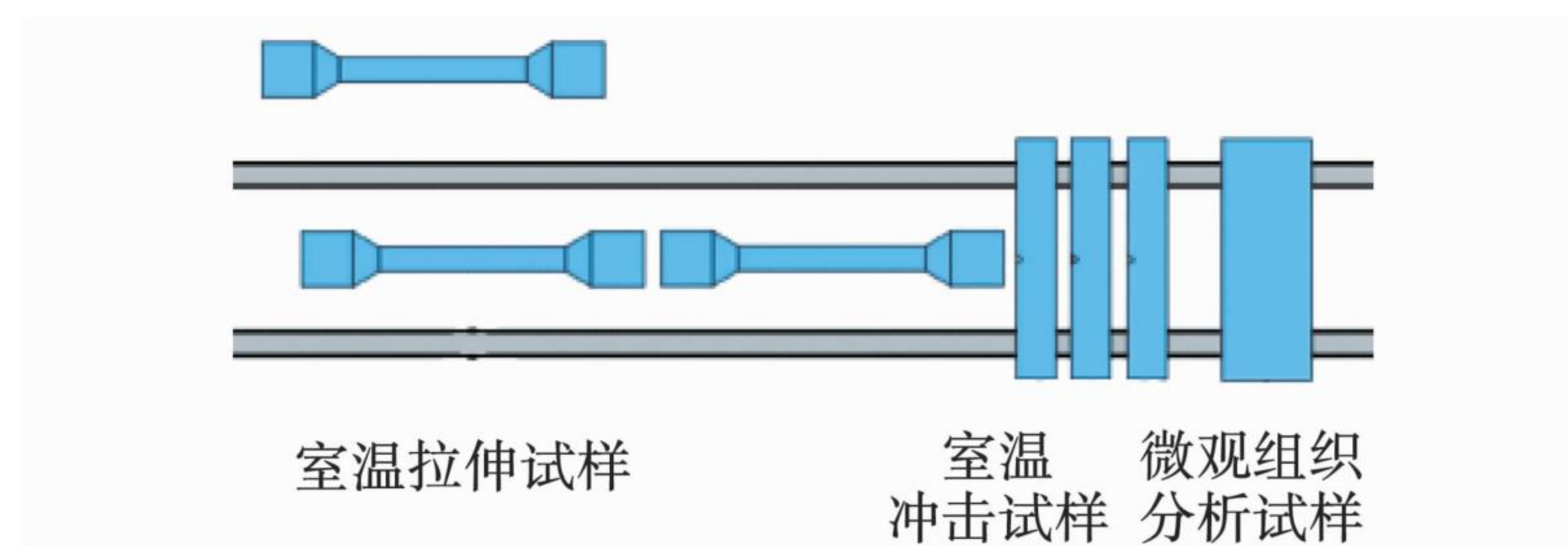


图 2 堆焊金属焊接试板剖面

Fig. 2 Cross-sectional anatomy of surfacing metal welded test plate

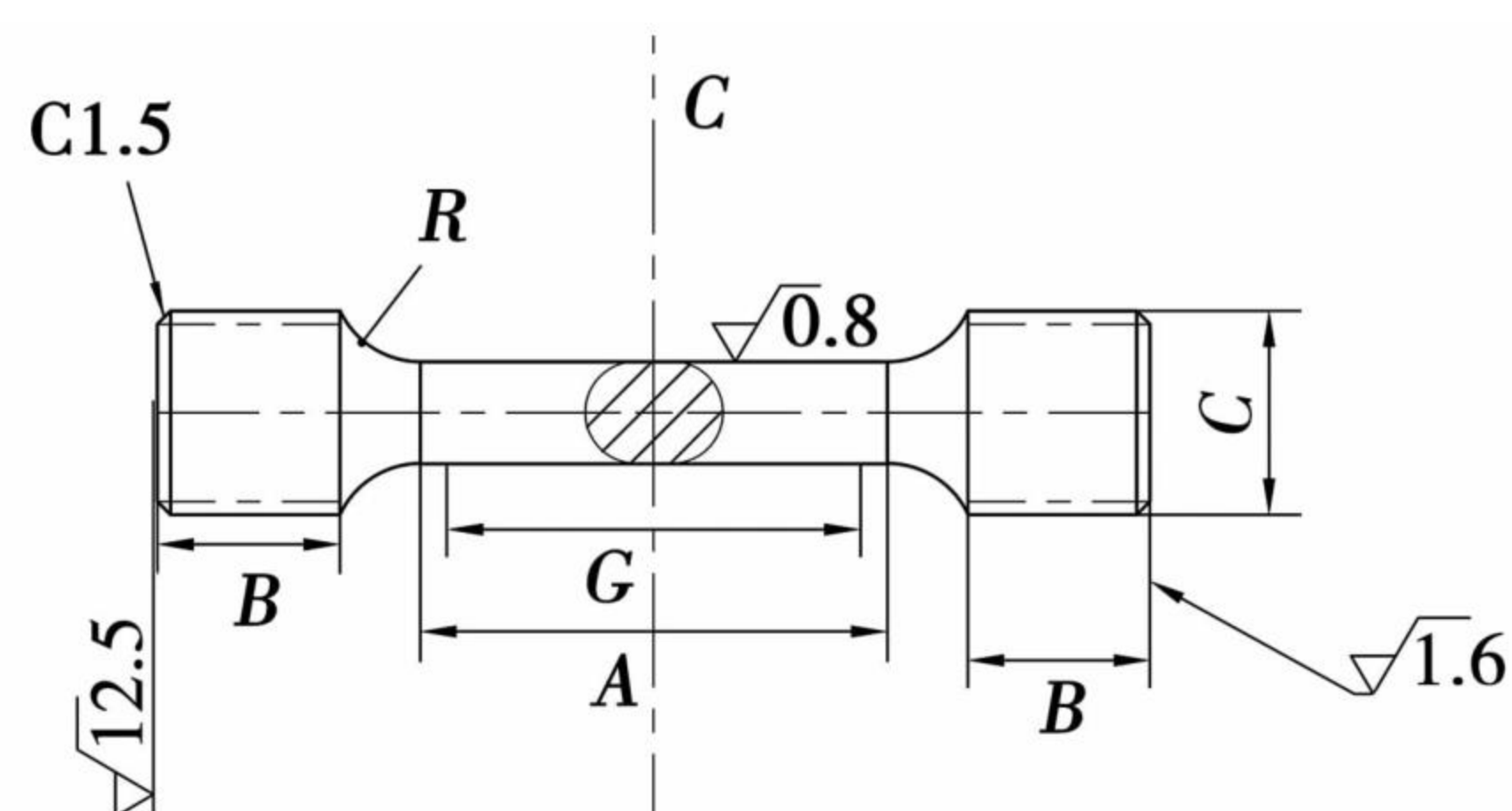


图 3 室温拉伸试样尺寸示意

Fig. 3 Dimensional schematic of room temperature tensile specimen

冲击试样的尺寸应符合 ASTM E23 标准中对标准试样的规定,具体见图 4。图中,单位为 mm。依据 AWS B4.0M—2000(R2010)的要求,在室温条件下开展夏比 V 型缺口冲击实验。实验采用美特斯工业系统公司生产的 ZBC2452 - C 型摆锤式冲击试验机。

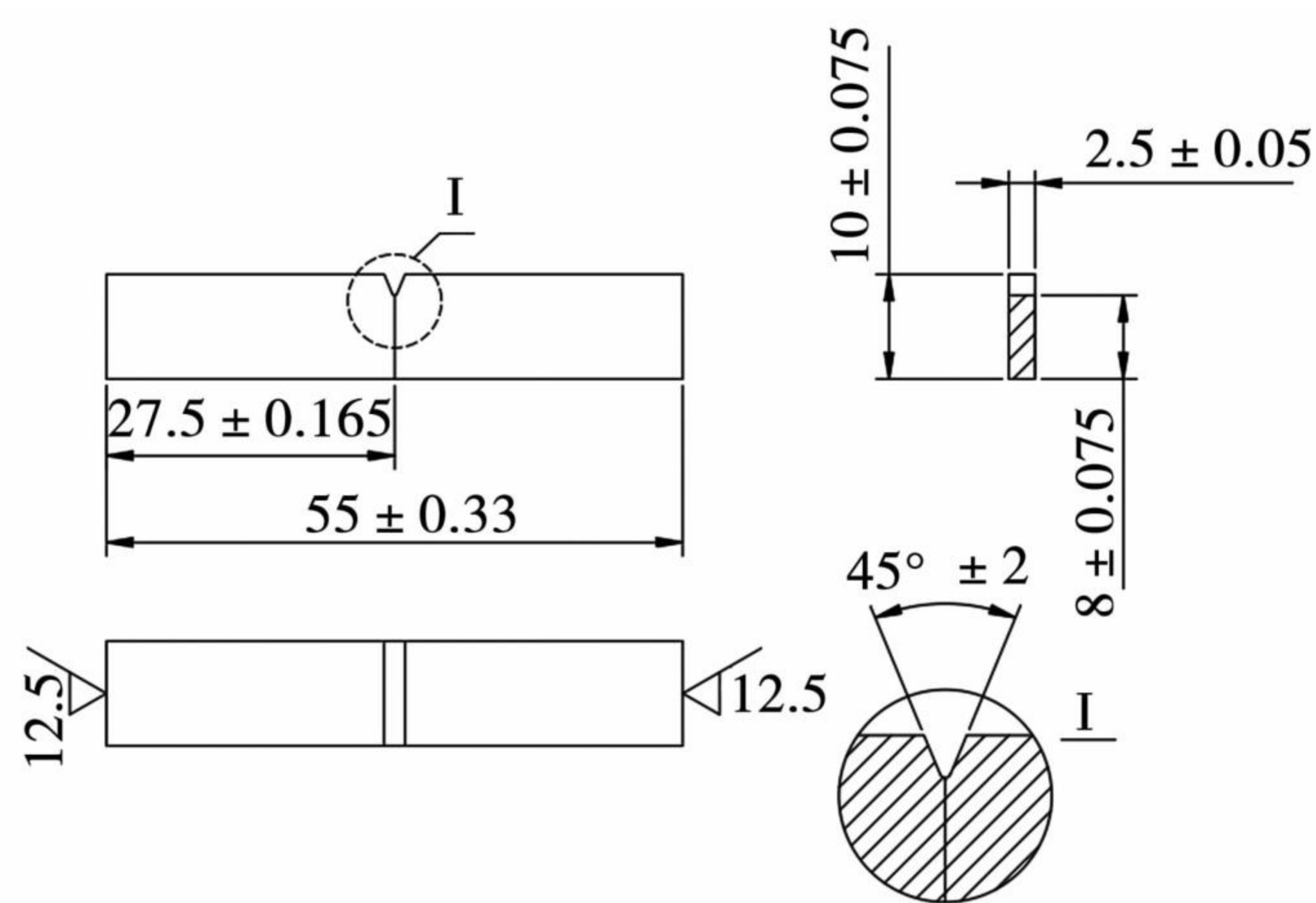


图 4 夏比 V 型冲击试样尺寸示意

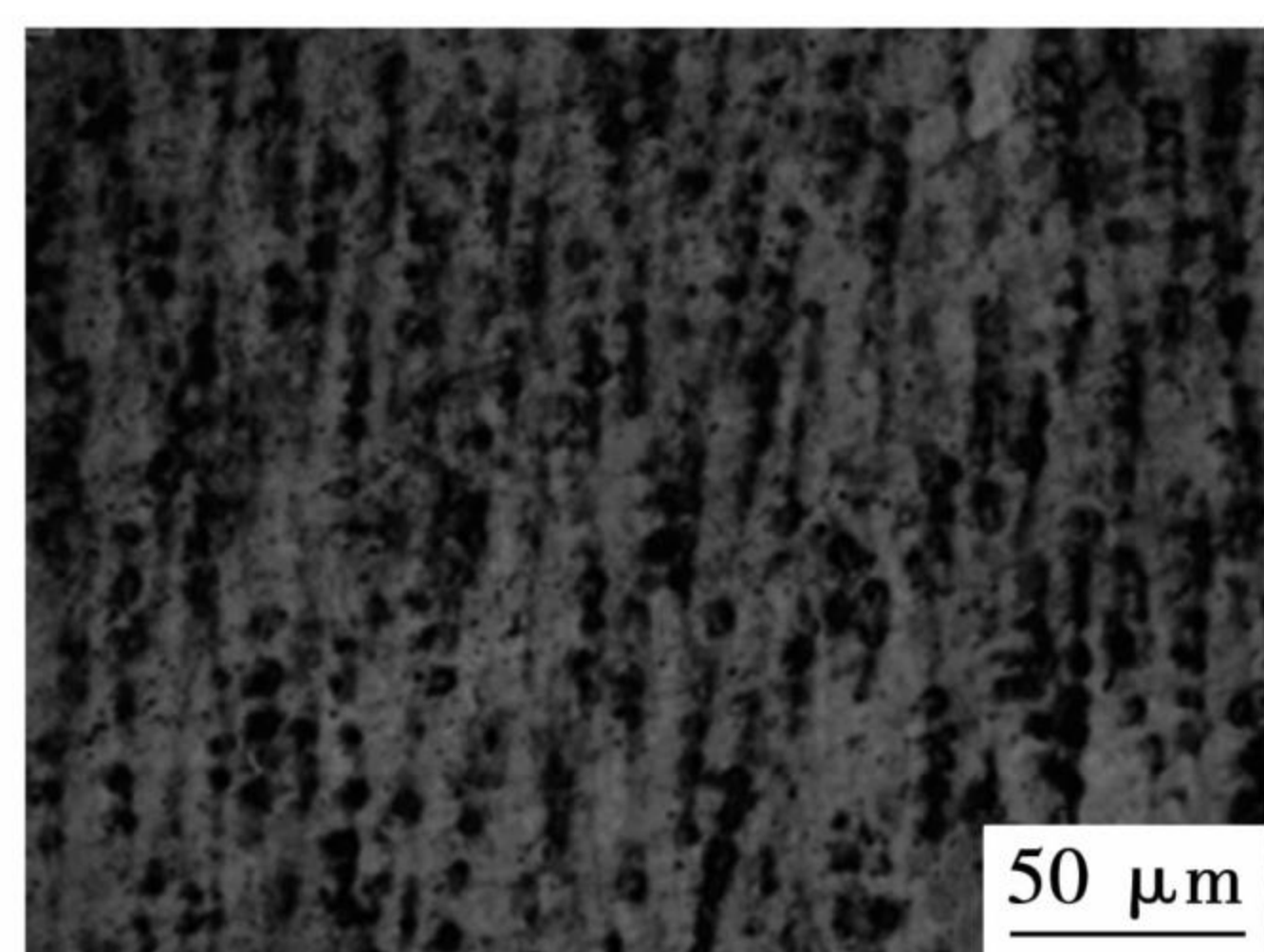
Fig. 4 Dimensional schematic of Charpy V-notch impact specimen

2 实验结果与分析

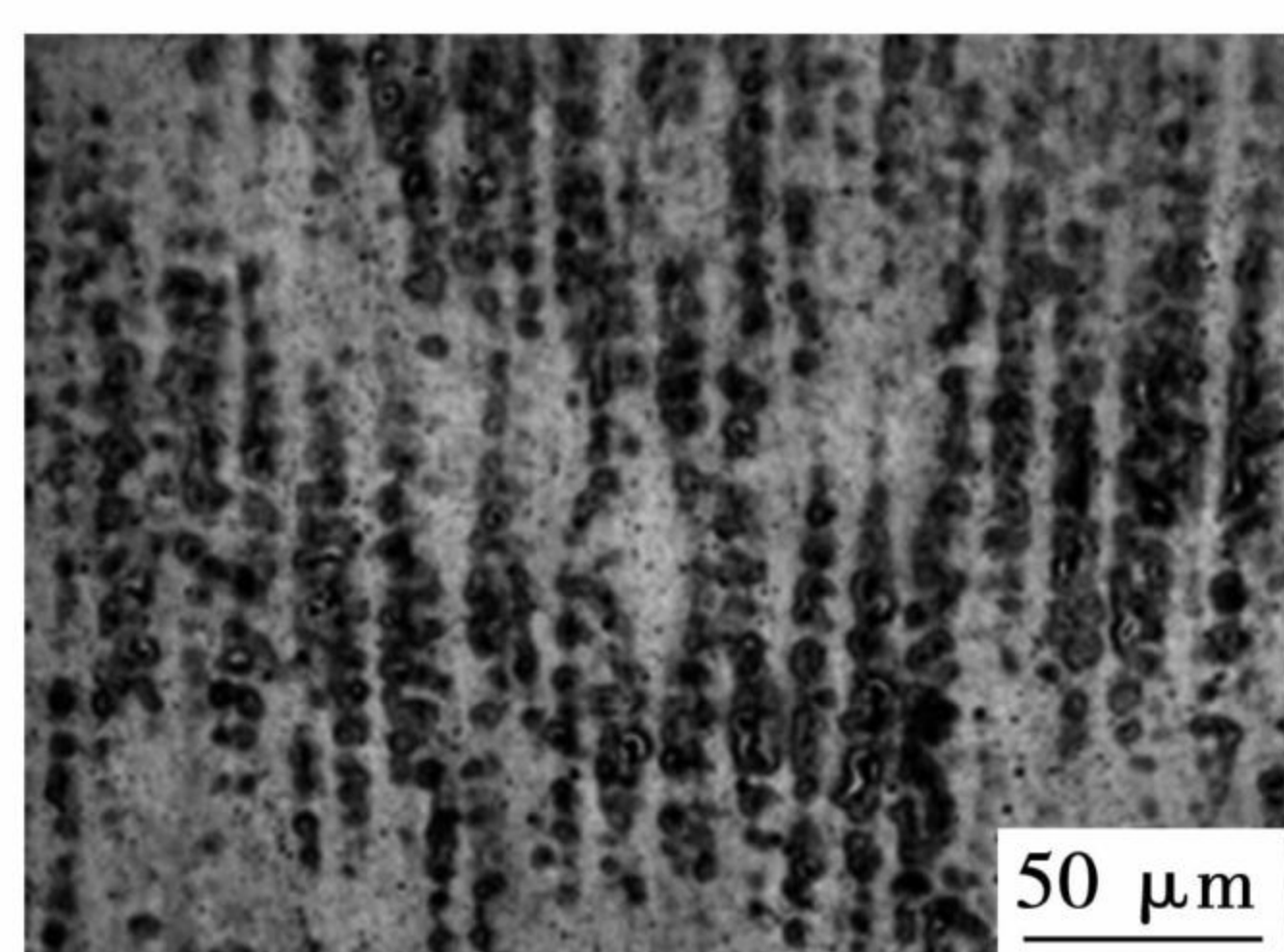
2.1 堆焊层组织

堆焊层焊态和热处理态的金相组织,如图 5 所

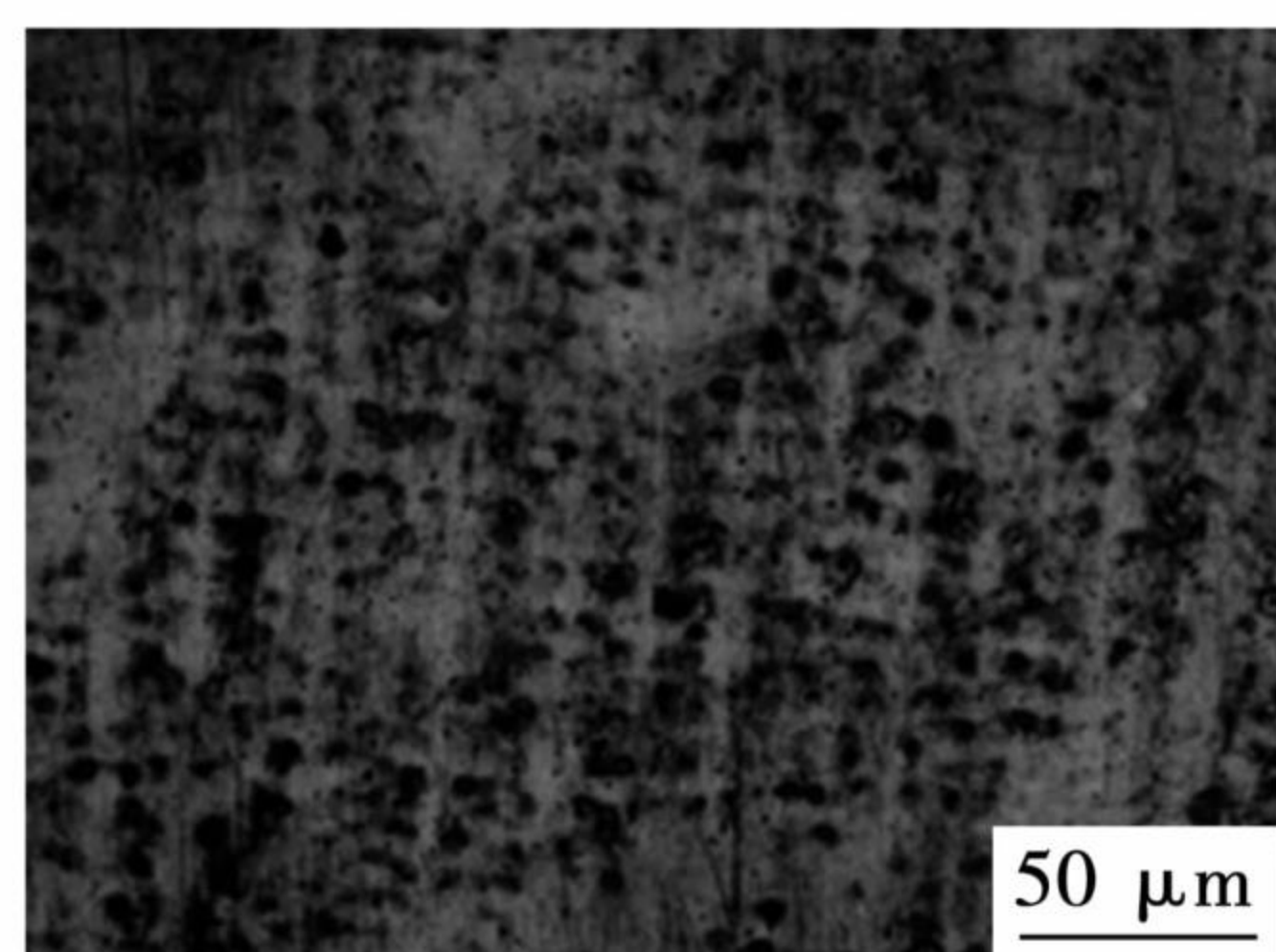
示。通过 ImageJ 软件对黑色析出相进行定量分析的结果,如图 6 所示。



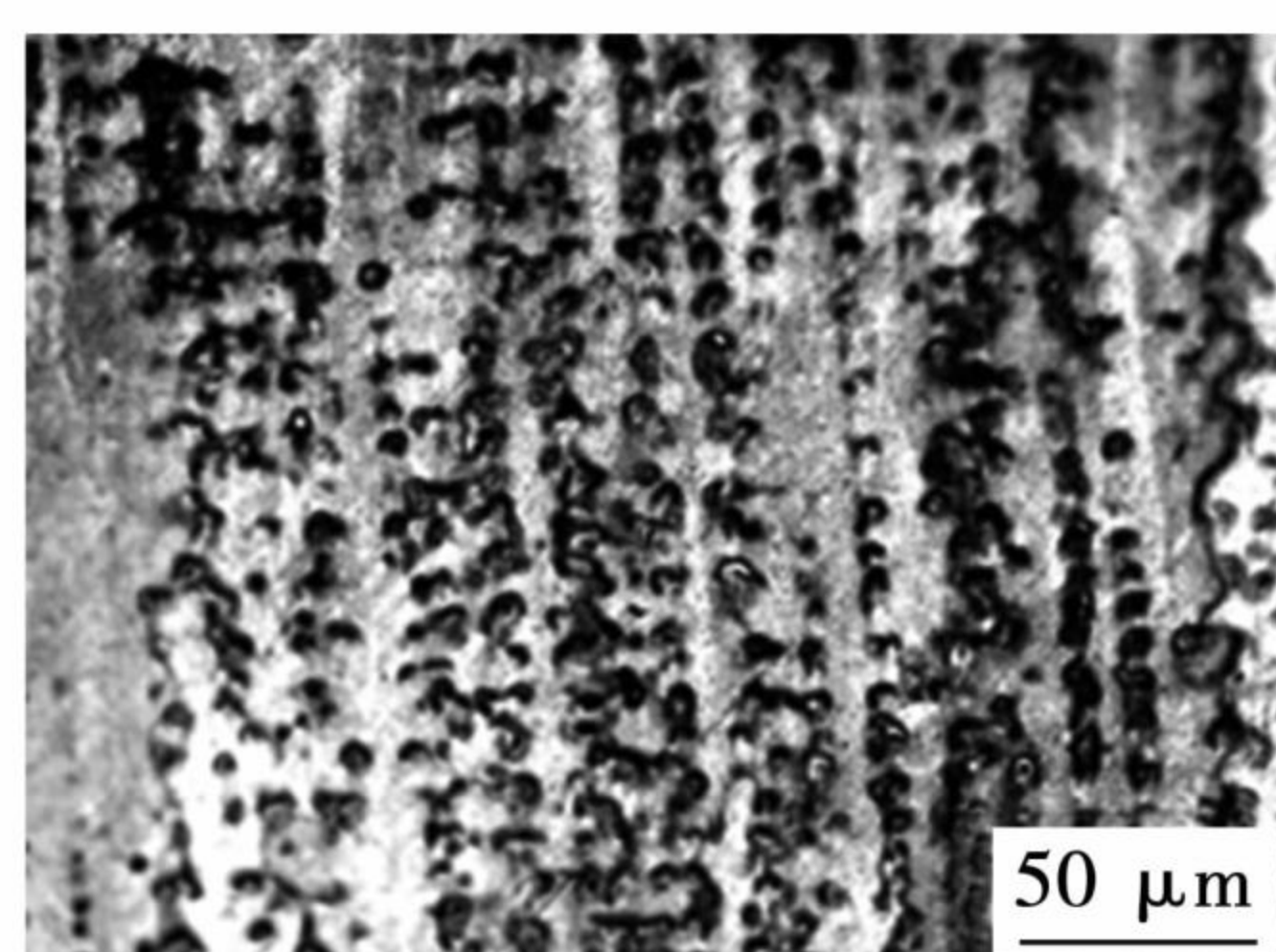
a 焊态上部



b 焊态下部



c 热处理态上部组织

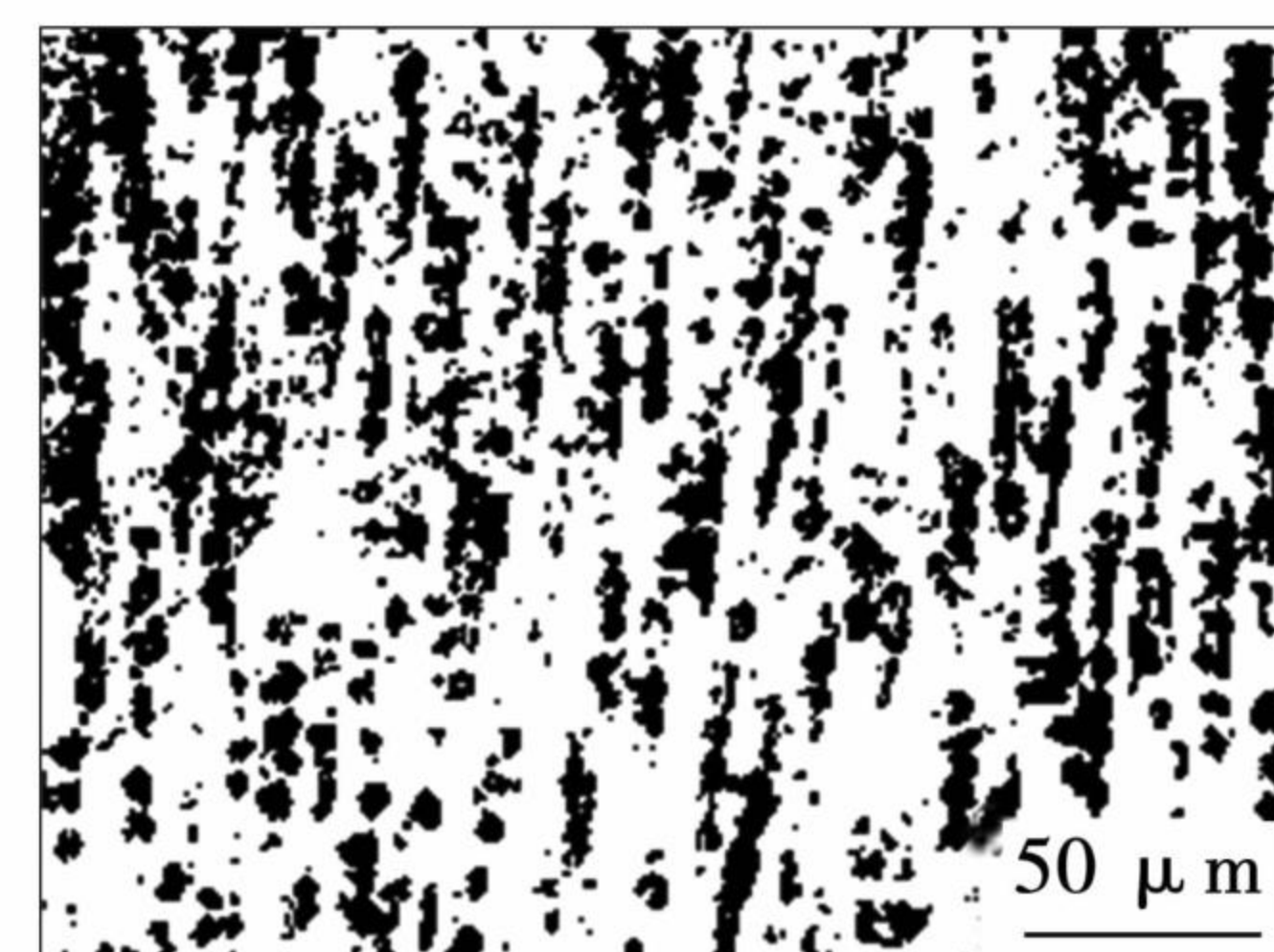


d 热处理态下部

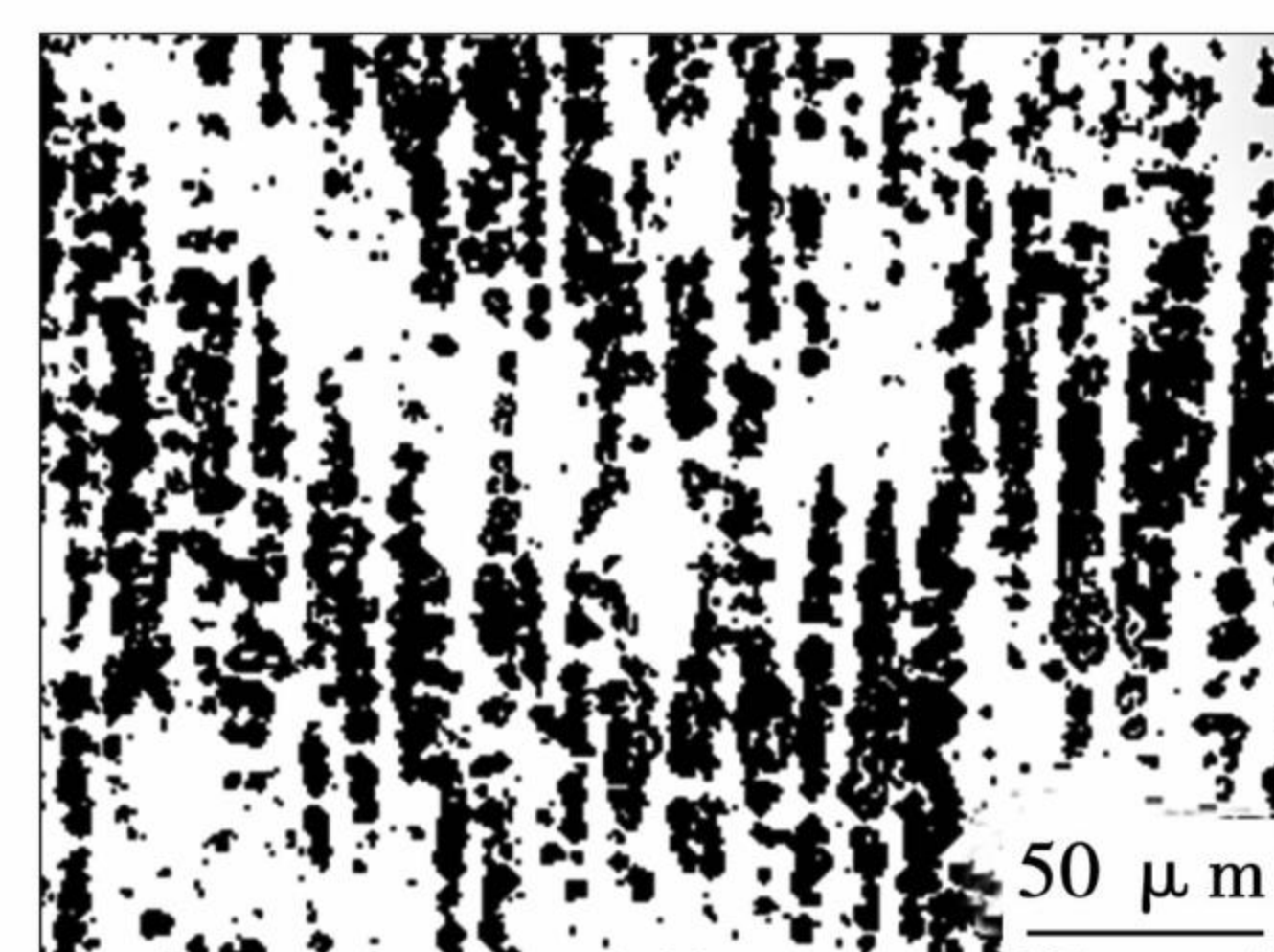
图 5 堆焊层的显微组织形貌

Fig. 5 Microstructural morphology in clad layer

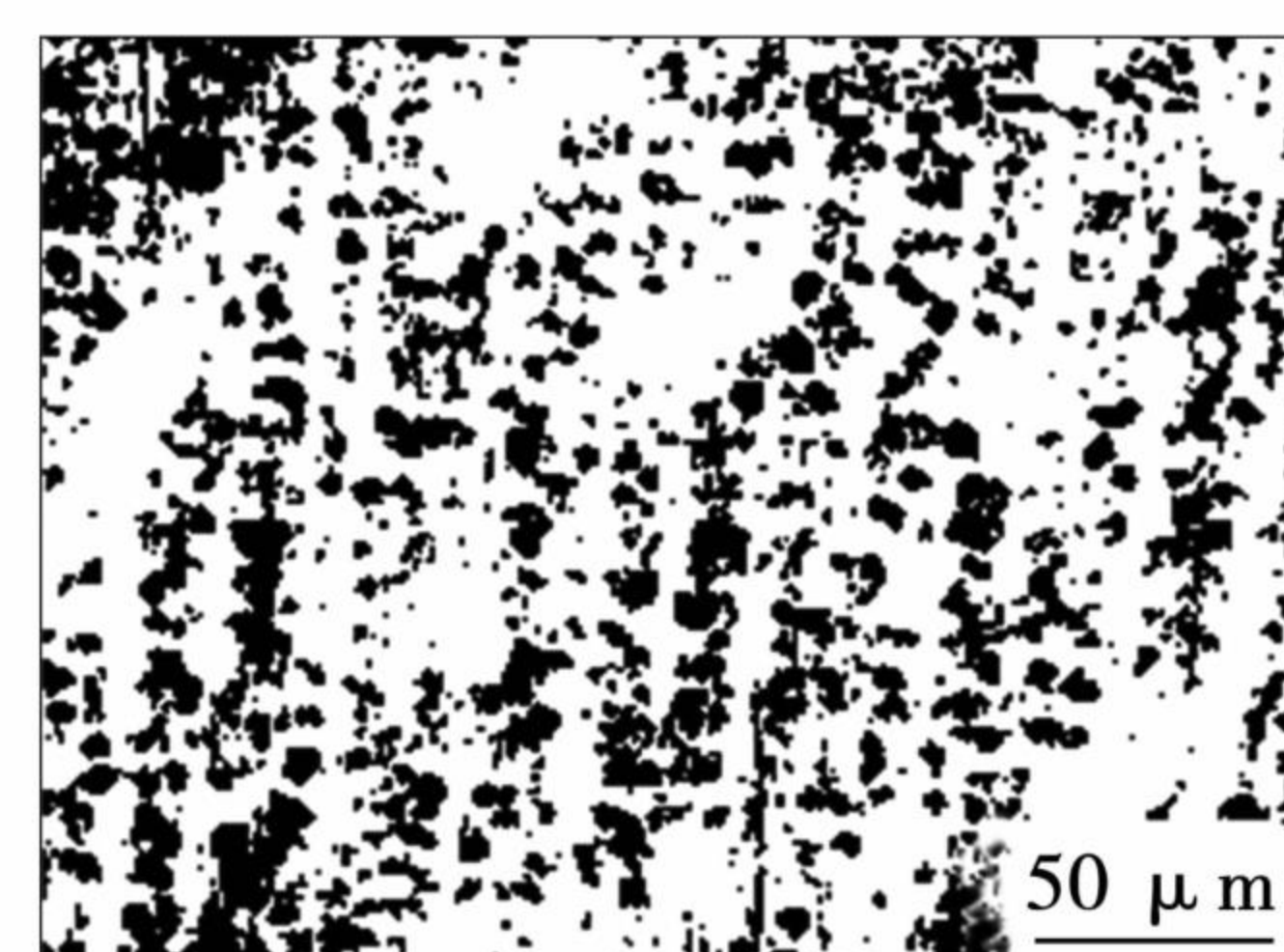
由图 5 和 6 可见,熔敷金属的微观组织包括灰色基体上分布着灰白色偏析带以及黑色析出物。偏析带的分布呈现出一定的方向性,其形状呈柱状枝晶形态。黑色析出相尺寸较小,形态有岛状、链状,弥散分布在灰白色偏析带上,其边界较为曲折复杂。结合文献[15]可知,偏析带上的析出物主要为 Laves 相、Laves/ γ 共晶组织以及少量碳化物。根据 690 合金成分可确定其为 Ni-Fe-Cr 三元合金,依据三元相图的等温截面。



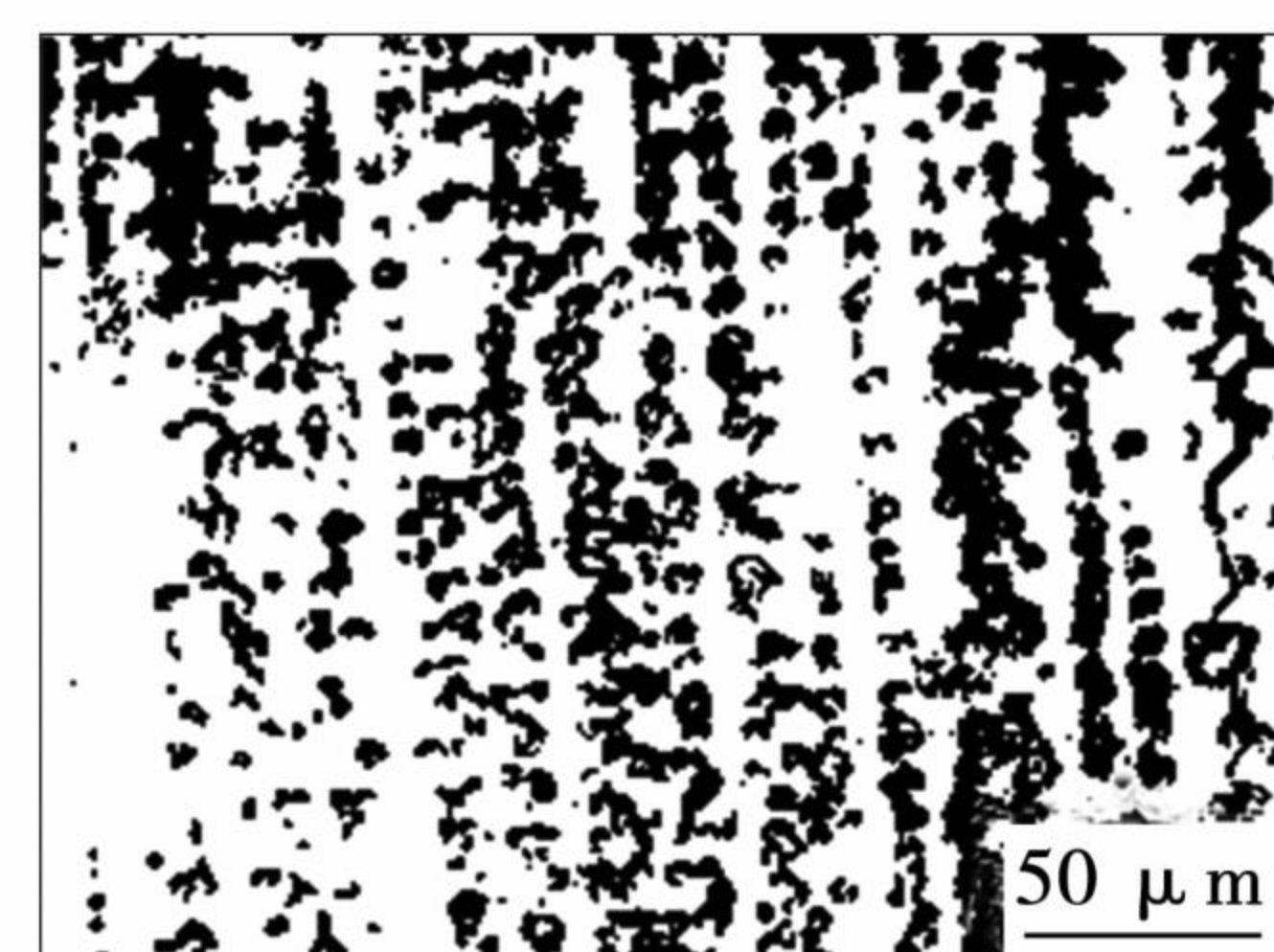
a 焊态上部



b 焊态下部



c 热处理态上部组织



d 热处理态下部

图 6 堆焊层的析出相分布

Fig. 6 Distribution of precipitated phases in clad layer

在 1 400 ℃ 时,随后冷却的凝固路径为 L(液态) $\rightarrow$ L + γ $\rightarrow$ L + γ + MC $\rightarrow$ L + γ + MC + Laves $\rightarrow$ γ + MC + Laves。焊带的材料主要为 Ni 和 Cr 元素,堆焊层在高温凝固及后续冷却过程中,碳元素会与 Cr 等合金元素结合形成碳化物,呈块状分布于晶内或晶界。随着温度降低, $M_{23}C_6$ 型碳化物(如 $Cr_{23}C_6$)在晶界处析出,形成连续或断续的网状结构。这些碳化物通过弥散强化和晶界钉扎作用提高堆焊层的强度和耐磨性。通过 ImageJ 软件分析,焊态上部偏析带所占比例为 29.161%,焊态下部为 36.243%,热处理态上部为 28.121%,热处理态下部为 30.757%。从析出相的定量分析可以看出,热处理后相同位置

的析出相所占比例略有降低。分析原因为 650 ℃ 热处理温度正好处于焊接接头组织内部“应力松弛温度”(通常为 $0.5 \sim 0.6T_m$, T_m 为熔点),使金属原子通过位错运动和晶界滑移消除残余应力,减少应力集中区的“原子聚集驱动力”,从而抑制第二相在这些区域的析出,同时可使部分细小第二相因应力释放而溶解,避免其进一步长大或聚集。

2.2 堆焊层的拉伸性能

对于堆焊层上部和下部的焊态及热处理态进行拉伸试验,试样分别标记为 X141A、X141B、X141C 和 X141D,每种试样测试三个平行样。对力学性能指标强度和塑性进行表征,不同试样的拉伸实验结果见表 2。柱状图见图 7。

表 2 不同状态拉伸试样的结果
Table 2 Results of tensile specimens in different states

试样	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa	
	实验值	平均值	实验值	平均值
X141A	338	353	560	571
	340		575	
	357		580	
X141B	339	346	592	600
	352		600	
	347		608	
X141C	356	356	462	468
	353		469	
	359		475	
X141D	363	364	602	609
	363		610	
	367		615	

试样	断后伸长率/%		断面收缩率/%	
	实验值	平均值	实验值	平均值
X141A	35.6	39	34	39
	37.8		39	
	40.2		44	
X141B	50.2	54	50	54
	53.6		54	
	59.8		59	
X141C	16.0	26	22	26
	18.6		25	
	21.0		31	
X141D	49.5	52	47	52
	54.4		51	
	60.2		58	

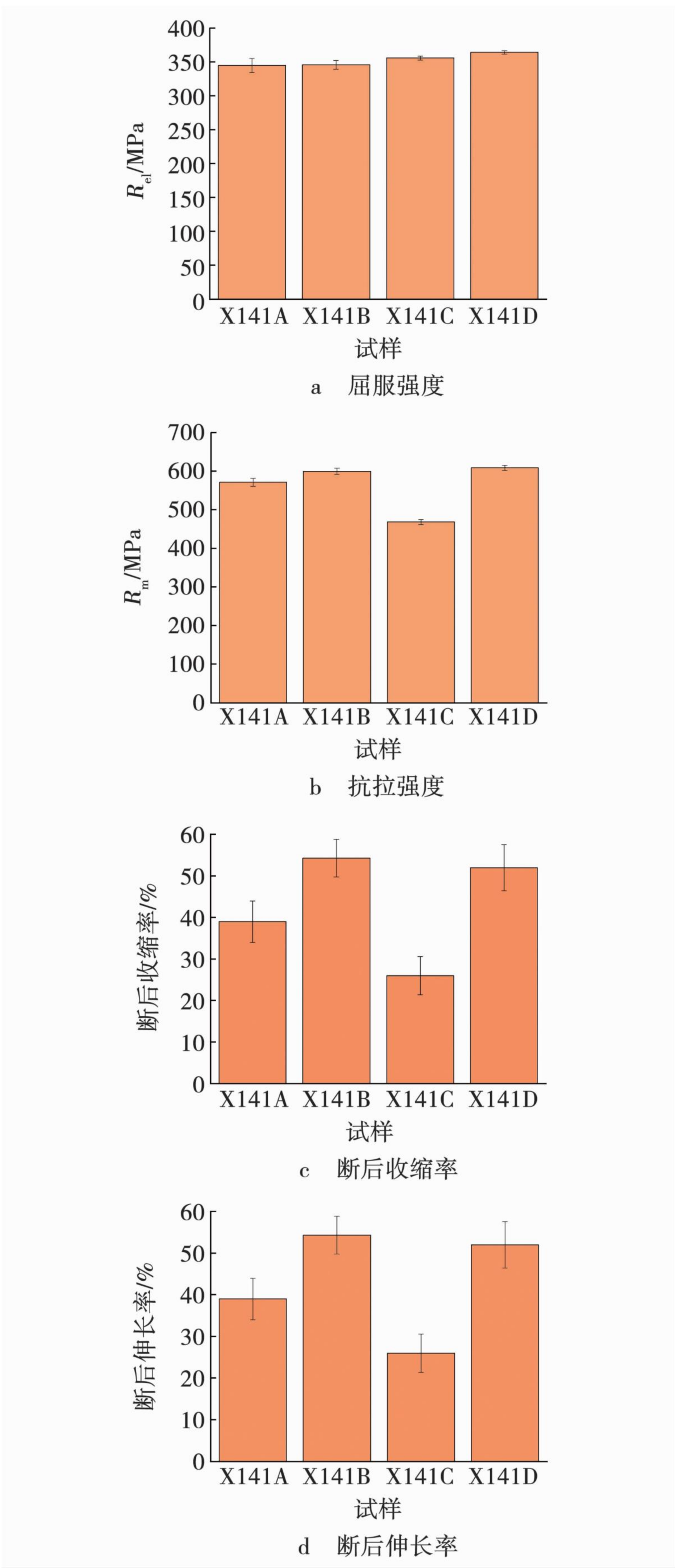


图 7 力学拉伸性能指标
Fig. 7 Mechanical tensile performance metrics

堆焊层上部焊态的屈服强度为 345 MPa,热处理态为 346 MPa;焊态的抗拉强度为 572 MPa,热处理态为 600 MPa;焊态的屈强比为 0.6,热处理态为 0.57。堆焊层下部焊态的屈服强度为 356 MPa,热处理态为 364 MPa;焊态的抗拉强度为 468 MPa,热处理态为 609 MPa;焊态和热处理态的屈强比分别为 0.76 和 0.6。对比以上数据可以看出,下部焊态的屈强比最高,这与组织形貌中下部焊态相分布比

例较高有关。从图 7c 和 d 可以看出,上部和下部焊态的断面收缩率分别为 39% 和 26%,断后伸长率分别为 38% 和 19%;上部和下部热处理态的断面收缩率分别为 54% 和 52%,断后伸长率分别为 54% 和 55%。从塑性指标可以看出,热处理态的塑性显著优于焊态的塑性。

2.3 堆焊层的弯曲性能

按 AWS B4.0M—2000 (R2010) 标准进行实验,结果如表 3 所示。弯曲宏观形貌,如图 8 所示。焊态试样 X142A、X142B、X142G 和 X142H 均在宽度方向的中间位置发生开裂,而热处理态试样均未出现裂纹。这主要归因于热处理态试样具有更优的塑性,热处理后组织细化。此外,690 合金中 Ni 含量较高,其组织以 γ 奥氏体为主,奥氏体结构具有良好的滑移系(12 个滑移系),在弯曲过程中原子可通过滑移实现自由变形,从而不易发生脆性断裂。

表 3 弯曲实验结果
Table 3 Bending test results

试样	状态	取样方向	弯曲角度/(°)	弯曲结果
X142A	焊态	纵向	90 裂断	裂断
X142B	焊态	纵向	110 裂断	裂断
X142G	焊态	横向	85 裂断	裂断
X142H	焊态	横向	100 裂断	裂断
X142C	热处理	纵向	180	无裂纹
X142D	热处理	纵向	180	无裂纹
X142E	热处理	横向	180	无裂纹
X142F	热处理	横向	180	无裂纹

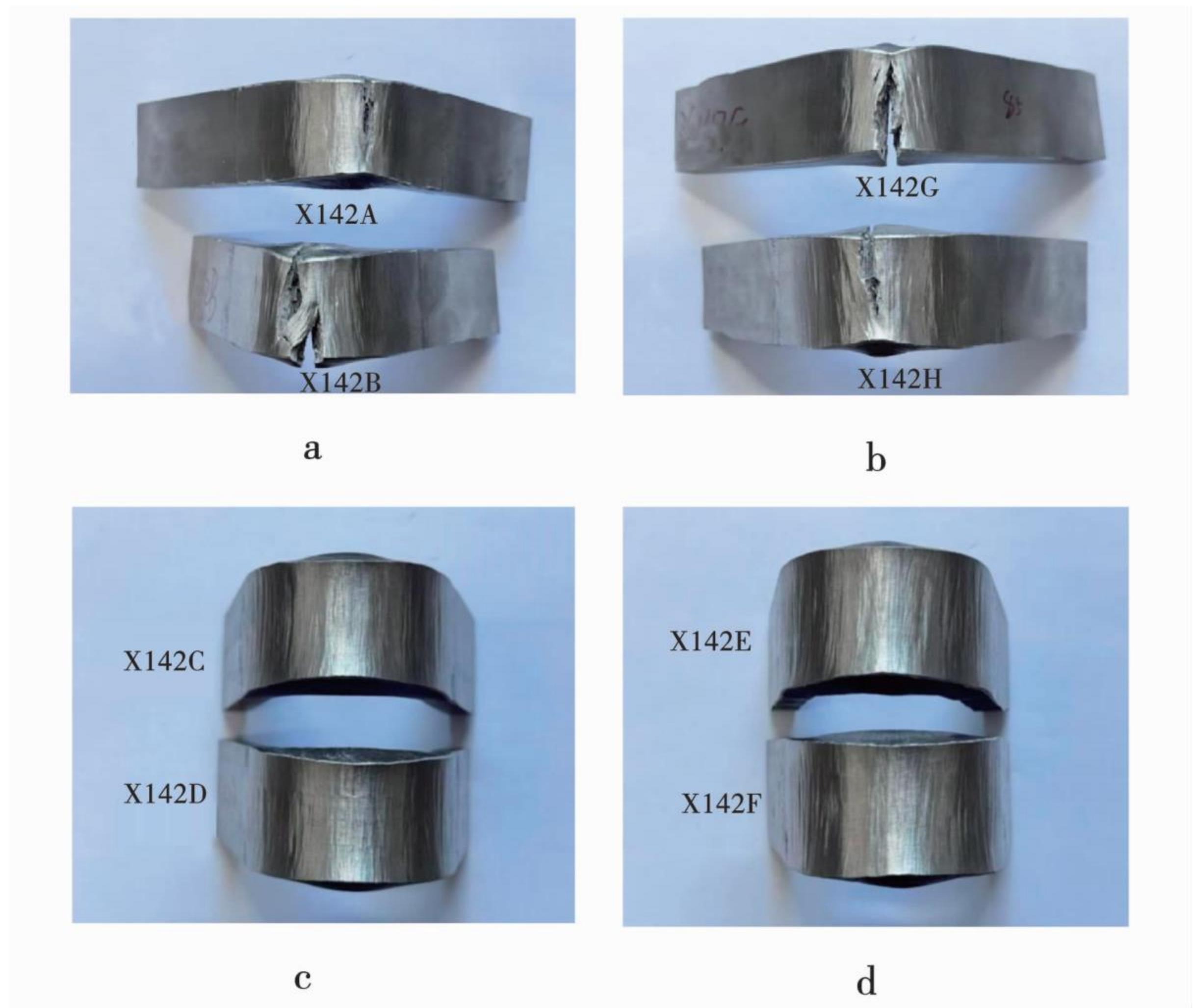


图 8 弯曲试样宏观形貌
Fig. 8 Macrostructure of bending specimen

2.4 冲击韧性

冲击实验结果见表 4,柱状图见图 9。从图 9 可以看出,焊接接头上部焊态和热处理态的冲击韧性分别为 211 和 249 J/cm²,下部焊态和热处理态的冲击韧性分别为 217 和 225 J/cm²。根据韧性指标分析,焊态下部试样的韧性最佳。通过组织形态分析可知,焊态下部的第二相粒子分布比例最大,在冲击过程中裂纹扩展需绕过第二相粒子,导致裂纹路径延长且方向发生改变,每次偏转均会消耗额外能量,从而延缓断裂进程。

表 4 不同状态的冲击韧性
Table 4 Impact toughness in different states

试样	$\alpha/(J \cdot cm^{-2})$			
	试样 1	试样 2	试样 3	平均值
X141A	209	206	218	211
X141B	274	242	230	249
X141C	217	225	210	217
X141D	255	217	202	225

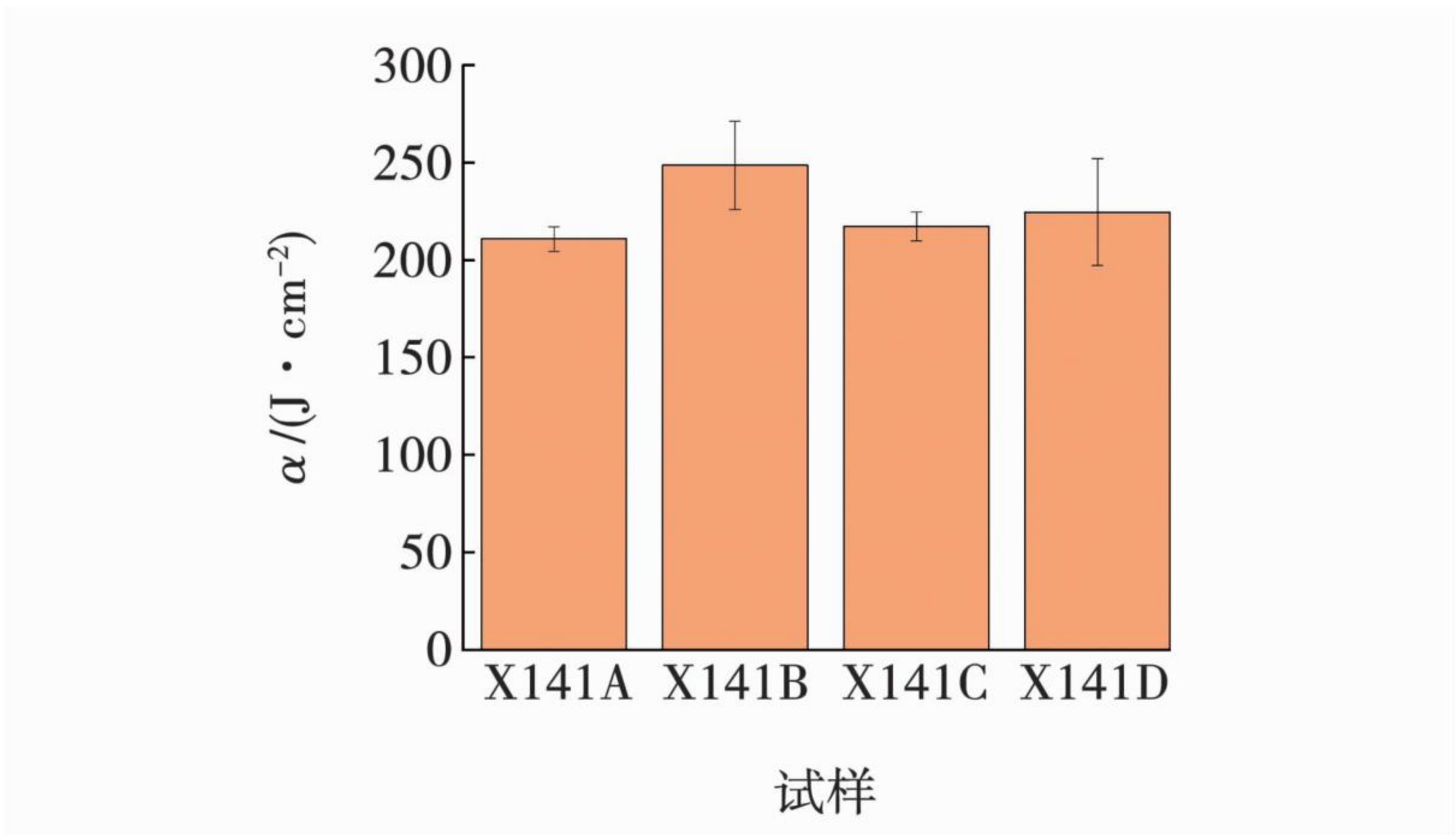
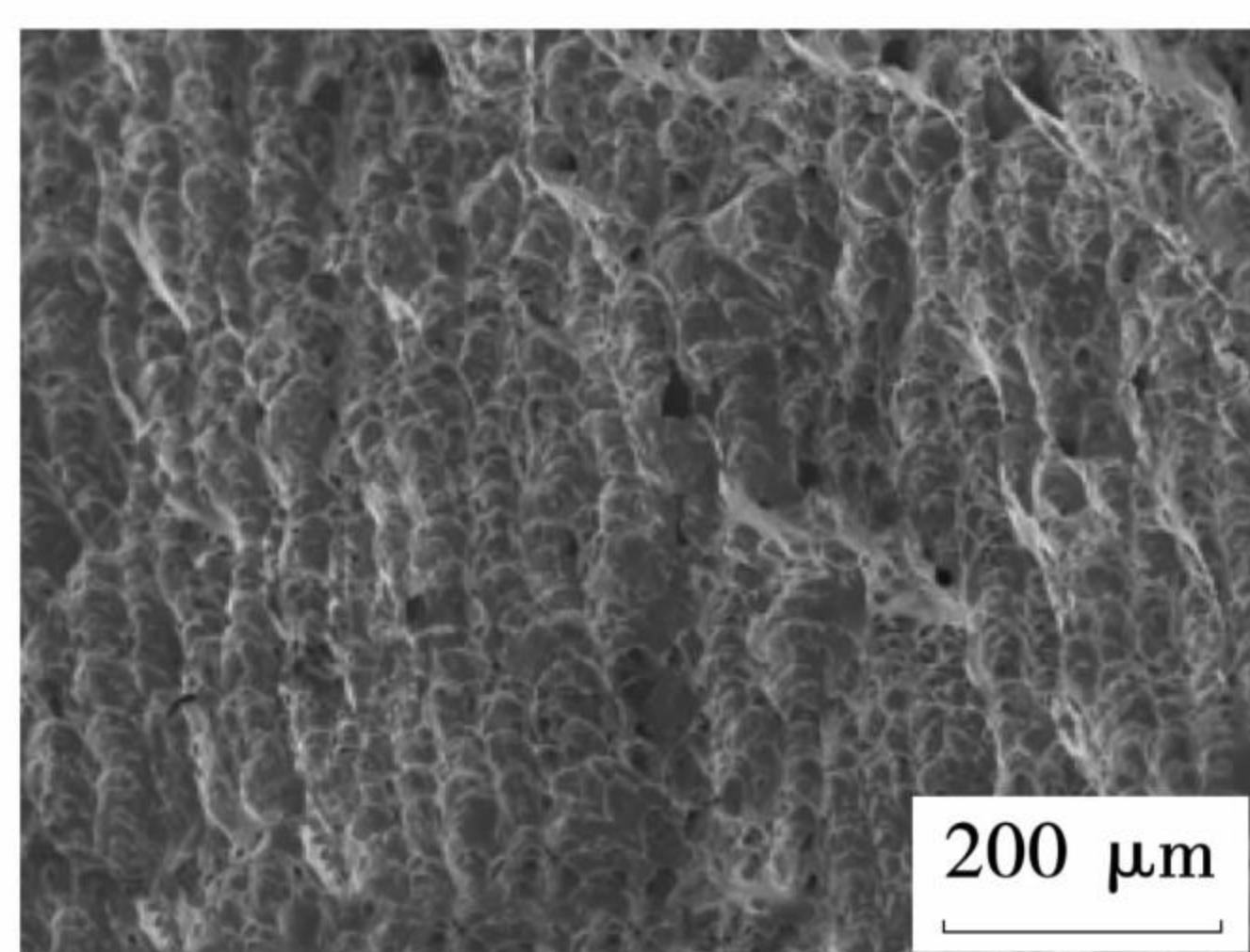
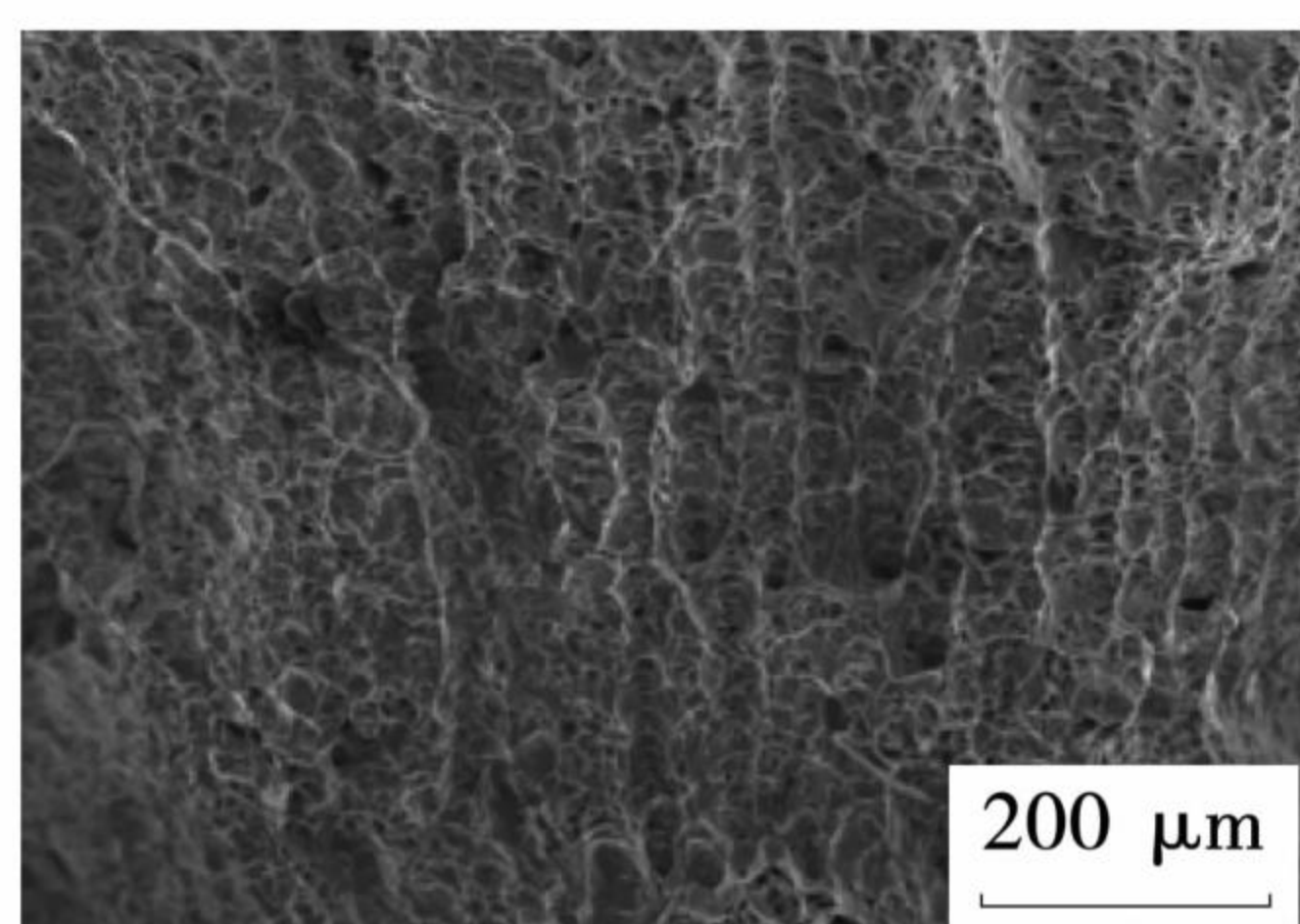


图 9 不同状态堆焊层的冲击韧性
Fig. 9 Impact toughness of weld overlay layers in different states

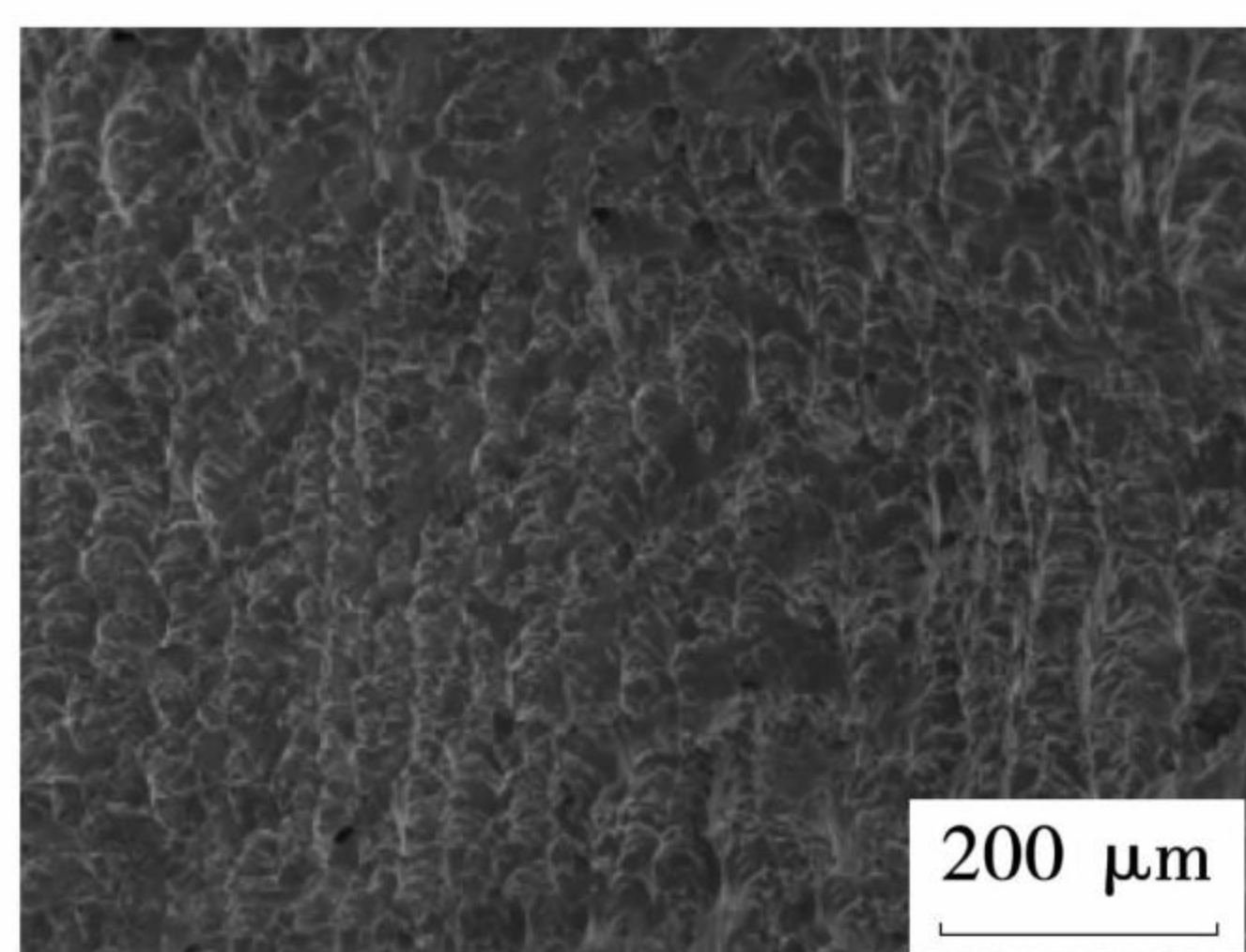
冲击断口的微观形貌如图 10 所示。从图 10 可以看出,断口均表现为韧性断裂特征,具有明显的韧窝。然而,焊态下部(图 10b)试样的断口韧窝尺寸明显小于上部及热处理态的断口。这一现象与拉伸、冲击及弯曲实验结果完全吻合,主要取决于组织中第二相粒子的大小及其分布状态。焊态下部组织中的第二相粒子分布最为密集,在拉伸过程中,这些粒子会引起应力集中;在应力集中作用下,第二相粒子与基体发生剥离,形成微孔;在外力作用下,微孔不断扩展并连接,最终发展为宏观裂纹,其微观形貌表现图 10 中的韧窝特征。



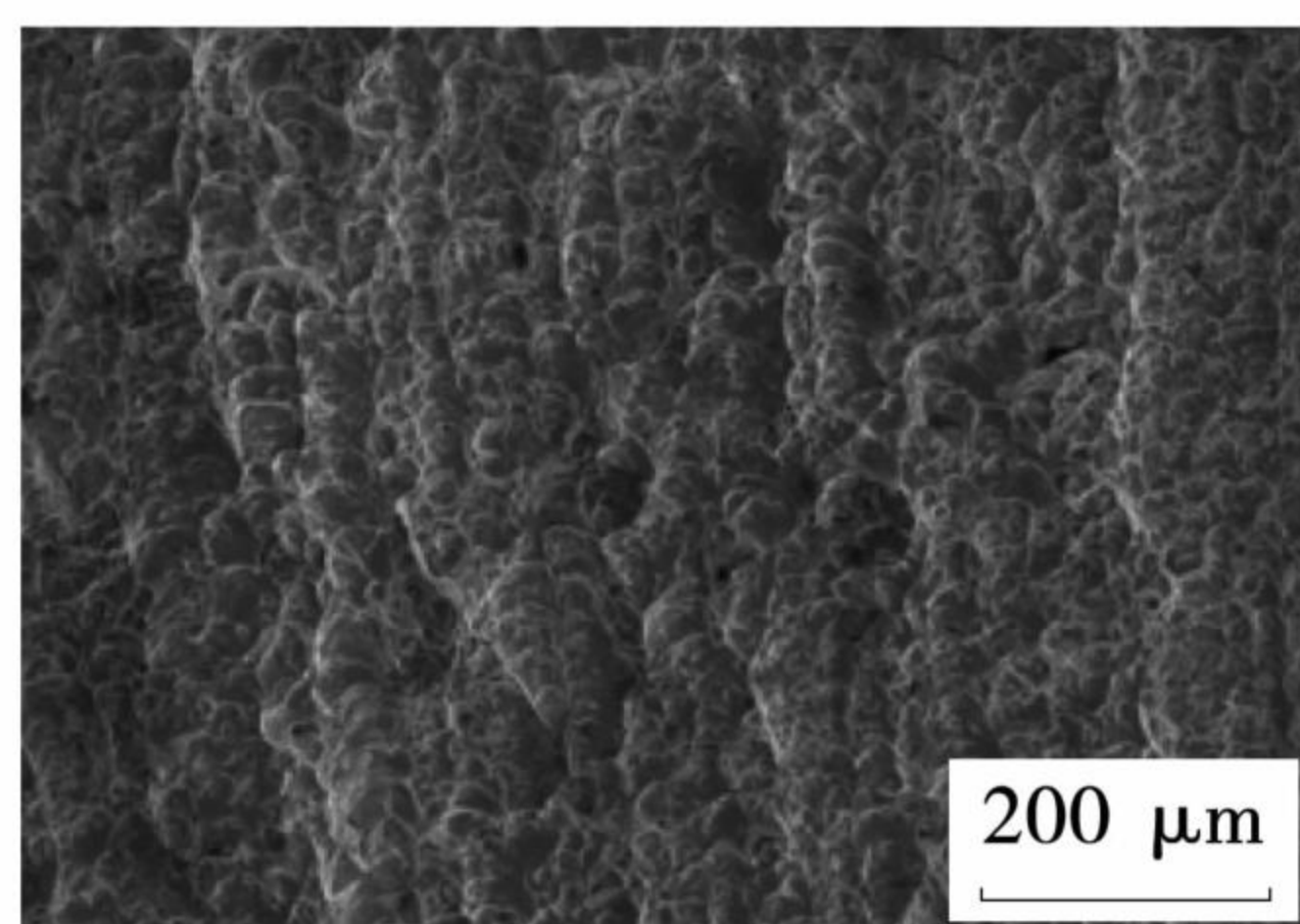
a 焊态上部



b 焊态下部



c 热处理态上部组织



d 热处理态下部

图10 不同状态堆焊层的断口形貌

Fig. 10 Fracture morphology of surfacing layer in different conditions

3 结 论

采用电渣焊(ESW)工艺,在SA508-Ⅲ低合金钢基体上成功实现了Inconel 600镍基合金的大厚度多层多道堆焊。

1)焊态堆焊层中存在明显的偏析带及析出相,经热处理(650℃保温)后,偏析现象有所减弱,且堆焊层下部的析出相比比例显著增加,有助于提升组织均匀性及抗裂纹扩展能力。

2)热处理后,堆焊层的屈服强度略有提升,塑性显著增强,弯曲试样未出现裂纹,冲击韧性明显提高。微观断口分析显示,其断裂模式均为微孔聚集型断裂。

综上所述,该工艺条件下大厚度堆焊未出现裂纹倾向,热处理后堆焊层的综合性能得到提升,为Inconel 600镍基合金大厚度堆焊应用提供了技术参考。

参考文献:

- [1] Lindmark H, Phother J, Olausson M D, et al. A material degradation study of novel FeCrAl alloys, stainless steels and nickel base alloy in fluidized bed heat exchangers of a waste-fired CFB boiler[J]. Fuel, 2023, 338: 127299.
- [2] 王诗洋, 刘士伟, 侯星宇, 等. 焊丝成分对镍基高温合金 TIG 焊焊接性的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(3): 31-36.
- [3] 李伟, 杨笑瑾, 马东华. 镍基合金换热管分段式机械胀接试验[J]. 压力容器, 2015, 32(9): 75-79.
- [4] 黄智泉, 李长久, 贺定勇, 等. 堆焊及热喷涂领域关键技术进展及应用[J/OL]. 中国表面工程, 1-23[2025-10-24]. <https://link.cnki.net/s.v.pn.usth.edu.cn/urlid/11.3905.TG.20250910.1140.002>.
- [5] 张楷, 高辉, 林渊浩, 等. 基于 RSM 和 NSGA-Ⅱ算法的同轴送粉氩弧熔覆工艺参数分析[J]. 焊接学报, 2024, 45(12): 106-116.
- [6] 王雪骄, 何鹏, 晏君文, 等. 12Cr2Mo1V 钢凸台附加填充丝埋弧堆焊工艺研究[J]. 压力容器, 2024, 41(4): 16-21.
- [7] 韩焱飞. 百米级水深 EH40 钢水下埋弧焊接工艺过程及接头组织性能的调控机理[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [8] 刘洪冰, 卢仁峰, 陈超凡, 等. 风电机组用 QT400-18AL 焊条电弧焊堆焊修复研究[J]. 电焊机, 2022, 52(8): 89-94.
- [9] 柏忠炼, 李诗易, 叶义海, 等. 手工钨极氩弧焊修复密封面不锈钢堆焊层工艺技术研究[J]. 电焊机, 2025, 55(7): 106-111.
- [10] 王诗洋, 刘士伟, 侯星宇, 等. 焊丝成分对镍基高温合金 TIG 焊焊接性的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(3): 31-36.
- [11] 杨子威, 余进, 洪浩源, 等. Inconel 600 热电偶套管焊接的组织性能研究[J]. 电焊机, 2020, 50(2): 99-102.
- [12] 李伟, 边境, 王学东, 等. 加氢反应器用不锈钢带极堆焊焊剂的研制[J]. 电焊机, 2021, 51(10): 37-42.
- [13] 宋建廷. 核电用镍基合金带极堆焊熔敷金属性能研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2021.
- [14] 郭泉. 基于合金化的核电 Inconel 690 堆焊金属组织性能调控机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [15] 边书, 张玉妥, 王承志. Fe-Cr-Ni 系相图计算[J]. 沈阳理工大学学报, 2011, 30(6): 17-21.

(编辑 李德根)