

P20 模具钢的双层回火激光熔覆修复技术^{*}

刘 京, 李铸国, 姚成武

(上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 传统的焊接方法修复失效模具, 易造成较大的热输入, 导致热影响区性能恶化, 需要进行后续高温回火热处理。利用双层回火激光熔覆修复技术, 通过充分利用后道熔覆层对前道熔覆层的回火作用, 可免去后续回火热处理步骤。采用 3.5 kW 半导体激光器对 P20 模具钢进行了双层回火熔覆, 基于修正后的 Higu-chi 模型确定了最优层间能量密度组合, 利用光学显微镜和显微硬度仪表征了修复部位热影响区的微观组织和硬度分布。结果表明, P20 模具钢最优的双层回火激光熔覆层间能量密度组合为 5~10 kJ/cm²; 采用该能量密度组合的双层回火激光熔覆修复工艺, 可获得组织为均匀回火索氏体、平均硬度约 400 HV 的修复热影响区, 其修复效果优于需要进行后续回火热处理的传统单层模具修复工艺。

关键词: 激光熔覆; 模具修复; 双层回火; 热影响区; P20 钢

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)01-0006-07

Dual-layer Temper Technique for Laser Cladding Repair of P20 Mold Steel

LIU Jing, LI Zhu-guo, YAO Cheng-wu

(Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Mold repair using conventional welding methods is likely to cause a large heat input, resulting in the deterioration of performance of the heat affected zone (HAZ) and the need for subsequent high-temperature heat treatment. This paper presents a dual-layer temper laser cladding repair technique, which can avoid subsequent high-temperature heat treatment by taking full advantage of the temper effect of the second layer against the first layer. Dual-layer temper cladding repair was carried out on P20 steel plates using a diode laser of 3.5 kW. Interlayer power density combinations were determined by the modified Higuchi model. Optical microscope and micro-hardness tester were used to characterize the morphology, microstructure and hardness profile of the HAZ of the repair area. The results show that the optimal power density combination for dual-layer temper laser cladding repair of P20 mold steel is 5 ~ 10 kJ/cm². The dual-layer temper laser cladding repair technique using this optimal power density combination can obtain a better repair effect than the traditional single-layer repair technique that need subsequent heat treatment, and the microstructure of its repair HAZ is tempered sorbite and its hardness is approximately 400 HV.

Key words: laser cladding; mold repair; dual-layer temper; heat affected zone; P20 steel

0 引 言

模具常因为在服役过程中发生表面磨损、剥落和裂纹等失效情况, 以及在模具制作过程中出现设计更改或加工错误而需要进行修复。传统

的焊接修复工艺(如氩弧焊), 由于热输入量大, 导致模具材料表层形成组织粗大、硬度高而韧性低的热影响区(HAZ)。为了改善 HAZ 的组织和性能, 不可避免地需要进行长时间的高温焊后回火热处理(PWHT)。尽管 PWHT 对降低 HAZ

收稿日期: 2012-12-17; 修回日期: 2013-01-09; 基金项目: * 科技部国际科技合作基金(2009DFB50350)

作者简介: 刘京(1989-), 男(汉), 湖南永州人, 硕士生; 研究方向: 激光焊接与熔覆

网络出版日期: 2013-01-14 11:45; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130114.1145.005.html>

引文格式: 刘京, 李铸国, 姚成武. P20 模具钢的双层回火激光熔覆修复技术 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 6-12.

硬度值和提高其韧性非常有益,但它通常也带来一系列问题,如需要添加 PWHT 设备而增加成本,模具修复耗时长而造成设备长时间停工等。因此,开发一种无需 PWHT 的模具修复新工艺具有显著的经济效益。

目前,在锅炉及压力容器的焊接修复领域已有多种无需 PWHT 的焊接修复技术得到实际应用,如半焊道技术、双层回火焊道技术和控制沉积技术等^[1-3]。这些焊接修复技术无一例外都是应用回火焊道焊接(TBW)方法^[4],即通过最大限度的利用层内及层间的后续焊道对前序焊道 HAZ 的回火作用,获得硬度和韧性满足要求的修复热影响区,从而实现免去 PWHT 工序的目的。双层回火焊道技术是应用较为广泛的修复技术,其难点在于如何确定最佳匹配的首层及第二层(回火层)的焊接热输入组合,以获得最优的回火层焊道对首层焊道 HAZ 的回火效果。热输入组合一般根据实际焊接修复的经验原则通过尝试法来获得^[5]:首层焊道通常选用较低的热输入值,回火层焊道选用比首层焊道高 1.3~1.8 倍的热输入值。这种方法获得的热输入组合需要经过多次试验,且数据精度较差。近年来,Higuchi 工艺参数优化模型^[6]被广泛关注,通过基于实际焊接修复相关数据的理论推导,可以简洁经济地获得最优的层间热输入组合。在焊接方法的选择方面,激光熔覆方法由于具有热输入小、熔覆层与基体冶金结合好且熔覆材料可根据不同修复基体材料进行成分设计等优点,在表面工程领域获得了广泛应用^[7]。模具的焊接修复目标是获得与母材性能尽可能接近的修复区,因此修复区的组织和性能与母材的一致性为判定焊接修复是否成功的重要标准。

文中借鉴压力容器焊接领域的双层回火焊道技术,采用激光熔覆方法对 P20 模具钢进行双层回火熔覆,以基材表层形成的热影响区微观组织和硬度同母材的一致性为判定指标,通过对比试验探讨无需后续高温热处理的双层回火激光熔覆修复技术的可行性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及设备

试验基材为常用模具钢 AISI P20,尺寸为 150 mm×100 mm×10 mm。激光熔覆材料采用

自制合金粉末,粒度 75~150 μm。基材及熔覆合金粉的化学成分如表 1 所示。试验所用激光熔覆设备包括最大输出功率为 3.5 kW 的 ROFIN DL035Q 型半导体激光器(光斑宽度为 6 mm,激光束能量在快轴和慢轴分别为高斯和高帽分布),FANUC M-710ic 型机器人控制系统及同轴送粉系统等。送粉速率为 15 g/min。保护气为纯氩气,流量为 10 L/min。采用 HVS-10 数显维氏硬度计进行试样显微硬度测试,载荷为 1 kg。试样经 4% 苦味酸乙醇溶液腐蚀后采用 Axio imager alm 金相显微镜进行显微组织观察。

表 1 基材及熔覆合金粉的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of the base metal and filler metal (ω/%)

	C	Mn	Si	Cr
Base metal	0.28-0.40	0.6-1.0	0.20-0.80	1.40-2.0
Filler metal	0.10	0.80	0.50	1.40

	Mo	S	P
Base metal	0.30-0.55	<0.03	<0.03
Filler metal	0.30		

1.2 Higuchi 模型及其修正

在焊接修复过程中,根据热影响区不同位置在焊接热循环作用下所经历的不同温度区间,可将 HAZ 大致分为 4 个微区(如图 1 所示)。

微区包括粗晶区(1 000℃~熔点)、细晶区

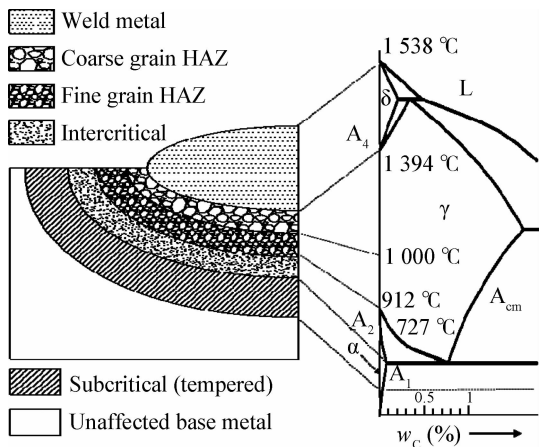


图 1 热影响区各微区分布及组织转变示意图^[6]
Fig. 1 Transition points for various parts of the HAZ as related to the iron-carbon equilibrium diagram^[6]

(912~1 000 ℃)、临界区/两相区(727~912 ℃)和有效回火区/软化区(550~727 ℃),前 3 个微区合称为硬化区(H),有效回火区(S)的界定与具体修复材料相关。R、P、H 和 S 分别代表熔高、熔深、硬化区尺寸和有效软化区尺寸(如图 2 所示)。

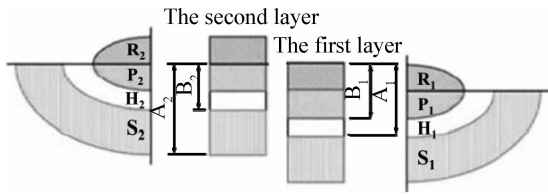


图 2 双层回火焊道技术原理示意图

Fig. 2 Illustration of dual-layer temper bead technique

Higuchi 模型是通过分析第二层回火焊层焊道与首层焊道的 HAZ 各微区间相对位置和尺寸之间的关系,建立起来的一套确定最优层间焊接热输入组合的工艺参数优化方法:首先需要通过少量实际焊接试验获得不同热输入值的单焊道 HAZ 各微区的尺寸,然后根据该尺寸数据推导出满足特定限制条件的所有层间热输入组合,进而根据相关原则确定其中的最优组合。Higuchi 模型共有 2 个限制条件:

$$\Delta_1 = A_2 - A_1 = (P_2 + H_2 + S_2) - (R_1 + P_1 + H_1) > 0 \tag{1}$$

$$\Delta_2 = B_1 - B_2 = (R_1 + P_1) - (P_2 + H_2) > 0 \tag{2}$$

限制条件(1)是为了确保回火层焊道的热输入值相对首层焊道要足够大,使得其有效回火区(S₂)能够“覆盖”并“软化”首层焊道 HAZ 的硬化区(H₁),且 Δ₁ 正值越大意味着回火效果越好;限制条件(2)则是为了确保首层焊道形成的硬化区不会在回火层焊道的热作用下被再次硬化。由于 Higuchi 模型的两个限制条件所包含的尺寸关系是建立在单焊道的模型之上,而在实际焊接修复过程中却往往采用的是多道焊接,多道焊接与单道焊接的不同之处在于需要考虑焊道搭接率这一非常关键的参数,需要对 Higuchi 模型进行必要的修正。因此,针对激光熔覆的特点,文中修改 Higuchi 模型的限制条件,将单焊道熔高 R 修改为平均焊层厚度 R'。在激光功率和熔覆速率等其他参数不变的情况下,单位时间内熔化的熔覆材料体积 V₀ 是恒定的,所以熔覆层平均厚度 R' 与搭接率 α 的关系为: $R = V_0 / [(1 - \alpha) \times L]$,其中 L 为单焊道熔宽。

1.3 试验方法

试验共分两个阶段。第一阶段通过 Higuchi 试验获得 P20 钢不同能量密度值的单焊道 HAZ 各微区的尺寸数据,进而应用 Higuchi 修正模型推导出双层回火激光熔覆技术的最优层间能量密度组合;第二阶段采用最优层间能量密度组合进行双层回火激光熔覆修复,并设计相应对比试验用以验证其修复效果。

1.3.1 Higuchi 试验

该试验阶段基材为淬火态 P20 钢,其淬火温度 860 ℃,保温 20 min,油冷。采用如表 2 所示熔覆工艺参数,获得 4 组不同激光熔覆能量密度值的单道 Higuchi 试样。沿如图 3 所示的 3 条横贯 HAZ 的直线方向获取显微硬度值(打点间距 0.1 mm),取其平均值绘制硬度分布曲线,并选用 550 HV 作为 P20 钢淬火态组织的平均硬度值,用于确定 HAZ 的硬化区尺寸 H 和有效软化区尺寸 S;熔宽 L 和熔深 P 通过光学显微镜测量;单道熔覆层面积 V₀。通过图像软件测量,用于计算熔覆层平均厚度 R'。

表 2 Higuchi 试验激光熔覆工艺参数

Table 2 Laser cladding parameters of Higuchi test samples

Sample	Power/ W	Scanning speed/ (cm · min ⁻¹)	Power density/ (kJ · cm ⁻²)
HT1	2 800	56	5
HT2	3 000	36	8.3
HT3	3 200	32	10
HT4	3 500	28	13.3

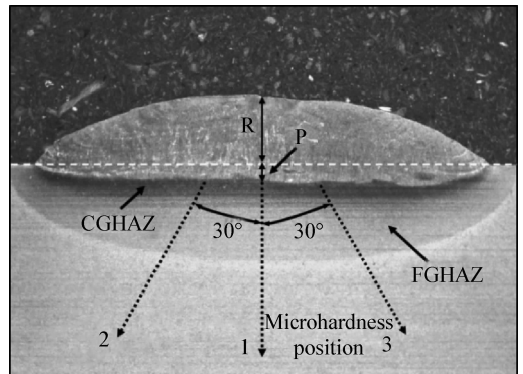


图 3 Higuchi 试验样品硬度测量位置示意图

Fig. 3 Location of the hardness measurement of Higuchi test samples

1.3.2 熔覆修复试验

熔覆修复试验阶段的基材为调质态 P20 钢, 硬度为 340 HV。根据 Higuchi 修正模型的推导结果, 选择了 5&10、5&13.3 和 10&5 kJ/cm² 三组能量密度组合进行双层回火激光熔覆修复试验, 前者为预期最优组合, 后 2 个组合分别代表因回火层能量密度值过大而发生再次硬化和因首层能量密度值过大而形成过大热影响区的情况。另外选择能量密度值为 5 kJ/cm² 的传统单层修复工艺作为对比组, 用以评估无需后续回火热处理的双层回火激光熔覆修复技术的可行性。焊道搭接率统一选择 70%。每组熔覆工艺参数制作两个试样, 一个保留焊态, 另一个进行 2 h 550 ℃ 后续回火热处理。具体熔覆工艺参数如表 3 所示。熔覆修复的焊道布置、硬度测试位置和方向(打点间距 0.2 mm)以及宏观金相照片拍摄位置如图 4 所示。

表 3 激光熔覆修复工艺参数

Table 3 Laser cladding repair parameters

Sample number	Layer	Power /W	Scanning speed / (cm · min ⁻¹)	Power density / (kJ · cm ⁻²)
0	Single layer	2 800	56	5
1	First layer	2 800	56	5
	Second layer	3 000	30	10
2	First layer	2 800	56	5
	Second layer	3 200	24	13.3
3	First layer	3 000	30	10
	Second layer	2 800	56	5

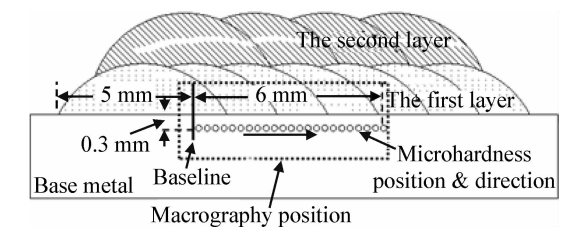


图 4 焊道布置、硬度测量位置和方向以及宏观金相照片拍摄位置示意图

Fig. 4 Illustration of bead sequence, location of the hardness measurements and macroscopic cross-sections

2 试验结果与分析

2.1 Higuchi 试验

表 4 列出了所有 Higuchi 试样热影响区各微区的尺寸值。基于此数据结果, 应用 Higuchi 修正模型进行最优层间能量密度组合推导。图 5 给出了不同层间激光熔覆能量密度组合对 Higuchi 修正模型两个限制条件的满足情况。由表 4 和图 5 可知, 对于限制条件(1), 仅有熔覆能量密度组合 5&8.3、5&10、5&13.3 和 8.3&13.3 kJ/cm² 能够满足 $\Delta_1 > 0$ (如图 5(a)), 且不难发现所有满足条件的组合都选用了较低的首层能量密度值和比首层高的回火层能量密度值, 这是因为较小的首层能量密度值能够获得较小尺寸的热影响区, 而选用一个较大的回火层能量密度值能够获得对首层熔覆层 HAZ 较大程度的回火作用。对于限制条件(2), 除了 5&13.3 kJ/cm² 组合外, 其他所有组合都能满足 $\Delta_2 > 0$ (如图 5(b)), 5&10 kJ/cm² 组合的值虽为负值但几乎等于 0, 仍视为满足条件), 这是因为该限制条件是为了确保首层焊道形成的硬化区不会在回火层焊道的热作用下被再次硬化, 而首层能量密度值在(5~13.3) kJ/cm² 范围内时都获得了足够大的熔覆层厚度, 只有层间能量密度组合为 5&13.3 kJ/cm² 时, 即首层熔覆层厚度最小而回火层硬化区最大这一极端情况下, 才会发生再次硬化现象。

表 4 Higuchi 试验数据结果

Table 4 Results of Higuchi test

Sample	Power density / (kJ · cm ⁻²)	V ₀ / mm ²	L / mm	P / mm	H / mm	S / mm	R' / mm
HT1	5	3.22	5.60	0.18	1.05	1.35	1.92
HT2	8.3	4.70	5.80	0.20	1.55	1.70	2.70
HT3	10	5.97	6.00	0.27	1.85	2.00	3.32
HT4	13.3	8.20	6.40	0.42	2.45	2.45	4.27

综上所述, 能够同时满足两个限制条件的层间能量密度组合共有 5&8.3、5&10 和 8.3&13.3 kJ/cm² 三组, 基于首层能量密度值在获得良好成型的前提下尽量小和回火层能量密度值在满足限制条件的前提下尽量大的原则, 可知 5&10 kJ/cm² 为预期最佳层间能量密度组合。

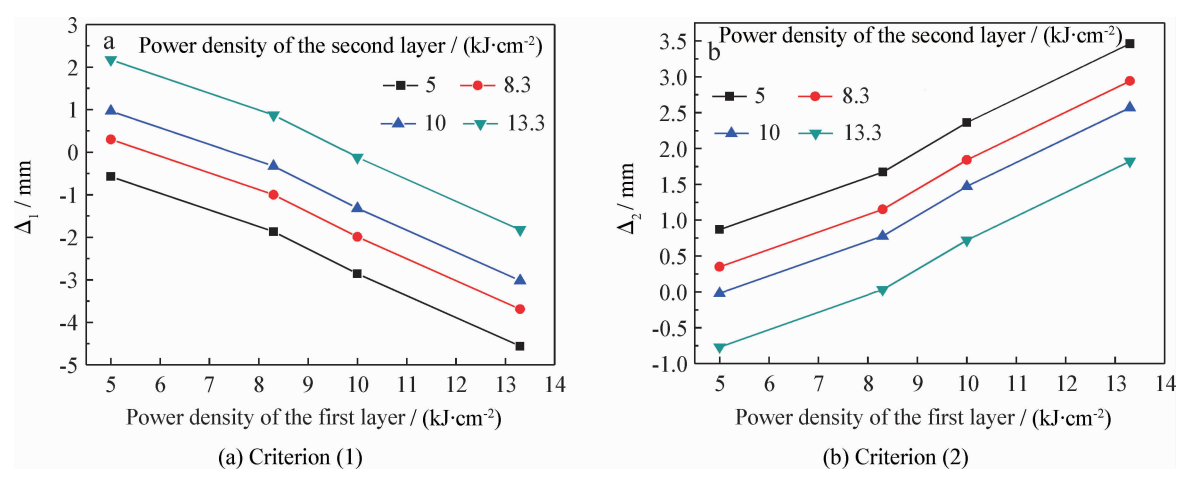
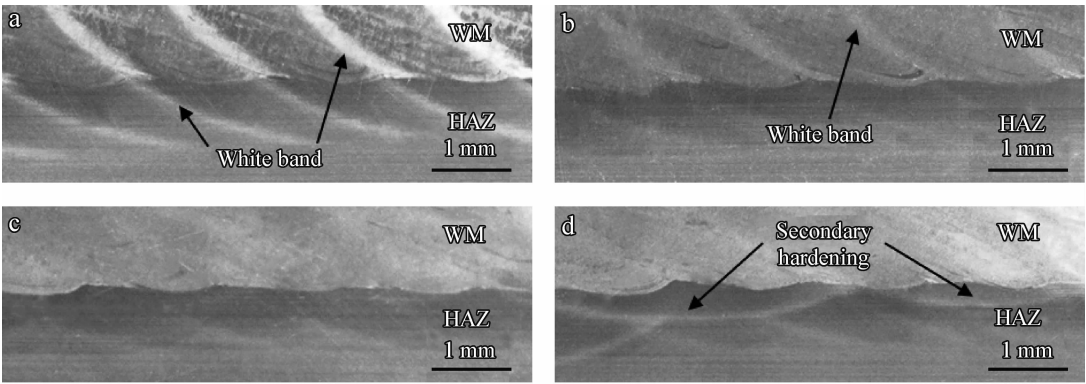


图 5 各能量密度组合对 Higuchi 修正模型限制条件的满足情况
Fig. 5 Diagram of decision according to the criteria of modified Higuchi Model

2.2 熔覆修复试验

图 6 给出了部分焊态试样和经过后续高温热处理试样的宏观金相照片,其拍摄位置如图 4 中虚线方框所示。可以看出:采用传统单层修复工艺的 0 号焊态试样(图 6(a)),其熔覆层和热影响区均可见衬度明显的白亮带,经过 550℃×2 h 回火均匀化处理后,其熔覆层的白亮带仍隐约可见(图 6(b))。由于选用了不同的层间能量密度组合,同样采用双层回火熔覆修复工艺的 1 号和 2 号焊态试样的宏观金相照片有着非常大的差别。采用能量密度为 5&10 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的 1 号试样(图 6(c))的熔覆层和热影响区均不见明显的白

亮带,而采用能量密度为 5&13.3 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的 2 号试样(图 6(d))的热影响区在回火层的热作用下发生了明显的再次硬化。形成白亮带的区域对应于图 1 中的临界区,即后续焊道对前焊道的热作用过程中温度在奥氏体化温度 A_1 线附近的区域。该处组织非常不均匀,呈现由回火组织到重新奥氏体化后快冷获得的淬火组织过渡,故而经腐蚀后与周围组织较均匀的区域形成明显衬度。通过以上分析,可初步认为能量密度组合为 5&10 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的 1 号试样获得了较理想的回火效果,甚至优于经过 550℃×2 h 后续高温回火热处理的 0 号试样。



(a) No. 0 as weld (b) No. 0 with PWHT (c) No. 1 as weld (d) No. 2 as weld

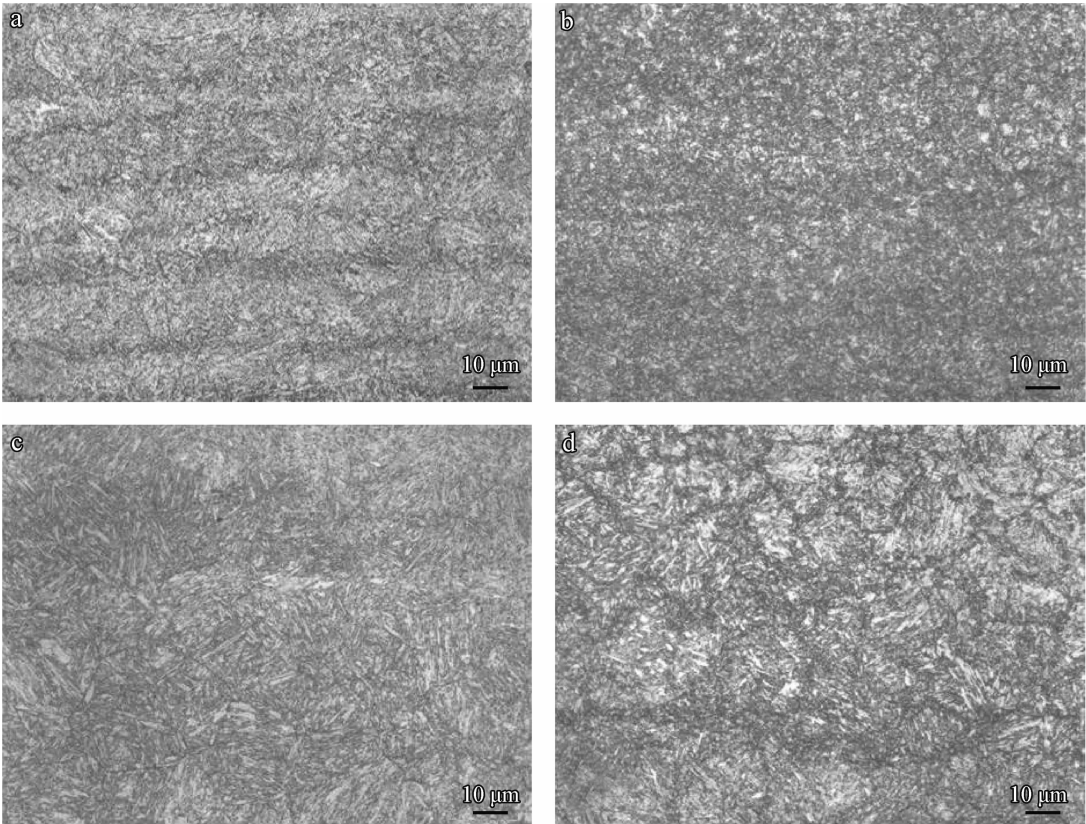
图 6 代表试样选定位置处的宏观金相图
Fig. 6 Macrographs of specific location of representative samples

图 7 给出了母材以及代表试样热影响区(白亮带界线处)的微观组织。图 7(a)为母材回火索氏体组织,且有较明显的轧制方向。图 7(b)为 1 号

焊态试样热影响区组织,同样由回火索氏体组成,但其均匀性及回火程度尚不及母材。图 7(c)为 0 号焊态试样热影响区组织,由回火马氏体组成。

图 7(d)为 0 号回火态试样热影响区组织,由回火索氏体和少量未分解的回火马氏体组成,原马氏体板条清晰可见。由此可见,采用双层回火熔覆修复工艺,能量密度组合为 $5\&10\text{ kJ/cm}^2$ 的 1 号

焊态试样,后道熔覆层对前道熔覆层的回火作用比较充分,其回火效果甚至优于采用传统单层修复工艺经过 $550\text{ }^\circ\text{C}\times 2\text{ h}$ 回火热处理的 0 号试样。



(a) Base metal (b) No. 1 as weld (c) No. 0 as weld (d) No. 0 as weld

图 7 代表试样热影响区的显微金相图

Fig. 7 Micrographs of the HAZ of representative samples

图 8 为各焊态及回火态试样热影响区的显微硬度分布曲线,其具体硬度测点位置和方向如图 4 所示。由图 8(a)可以看出:0 号焊态试样在不进行后续高温回火热处理的条件下,尽管通过选用较大的搭接率(70%)获得了层内后续焊道对前面焊道较大程度的回火作用,但仍只能将 HAZ 的最高硬度值从 680 HV 降至 500 HV,远高于母材 340 HV,且其硬度分布非常不均匀,故常规的单层修复工艺不可避免的需要进行后续高温回火热处理;采用双层回火熔覆修复工艺的三组焊态试样,其 HAZ 的硬度值相对于 0 号焊态试样均有不同程度的降低,这是源于第 2 层回火焊道对首层焊道热影响区有不同程度的回火作用。相比较而言,熔覆能量密度组合为 $10\&5\text{ kJ/cm}^2$ 的 3 号试样最高硬度值的降低幅度最小(由 500 HV 降至 470 HV),这是由于首层选用了较大的熔覆能量

密度值,形成的热影响区较宽且获得的首层熔覆层厚度较大;能量密度组合为 $5\&13.3\text{ kJ/cm}^2$ 的 2 号试样,由于其第二层能量密度值过大导致首层熔覆层的热影响区被再次硬化,其最高硬度值高达 480 HV 且硬度分布最不均匀;只有能量密度组合为 $5\&10\text{ kJ/cm}^2$ 的 1 号试样获得了硬度值最低(400 HV)且分布均匀的焊态组织。由图 8(b)可以看出:经过 2 h $550\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温回火后,0 号、2 号和 3 号试样的最高硬度值均降低至约 440 HV,仍高于 1 号焊态试样;而 1 号回火试样的最高硬度值仍为 400 HV,较焊态试样并没有获得明显降低。综上可知:采用层间熔覆能量密度组合为 $5\&10\text{ kJ/cm}^2$ 的双层回火熔覆修复工艺,获得了比需要后续高温回火热处理 ($550\text{ }^\circ\text{C}\times 2\text{ h}$) 的传统修复工艺组织更为均匀且硬度值更接近母材的热影响区。

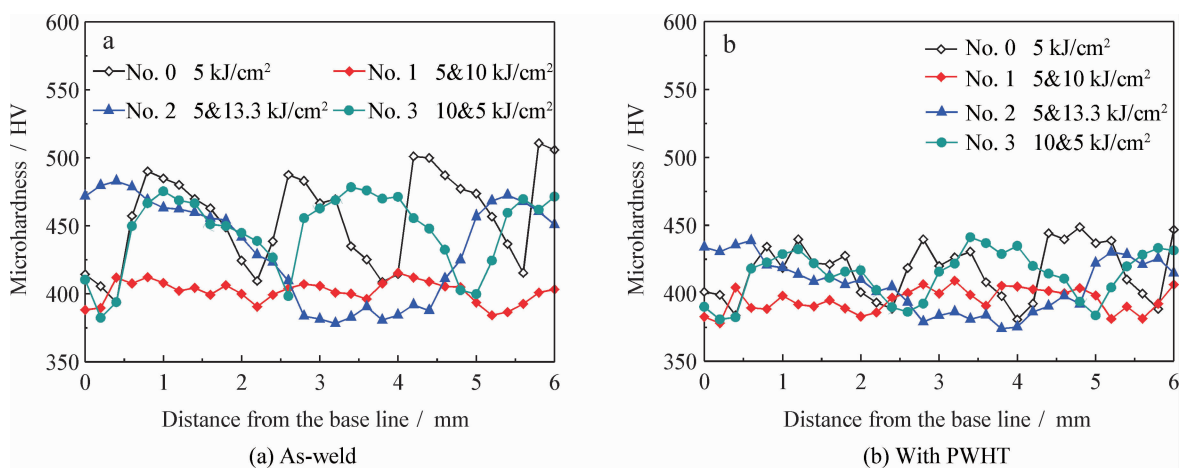


图 8 各试样热影响区的显微硬度分布曲线
Fig. 8 Microhardness profiles of the HAZ of each sample

3 结 论

通过对 P20 模具钢双层回火激光熔覆修复技术的试验研究,获得以下结论:

(1) 选用精确匹配的层间能量密度组合是双层回火激光熔覆模具修复成功的关键,不同的层间能量密度组合获得的修复热影响区显微组织和硬度差异非常大。

(2) 根据 Higuchi 修正模型确定的 P20 模具钢最优层间能量密度组合为 5&10 kJ/cm²。选用该能量密度组合对 P20 模具钢进行双层回火激光熔覆修复,可以获得组织为均匀回火索氏体、平均硬度约 400HV 的修复热影响区,其修复效果优于需要进行后续回火热处理的传统单层模具修复工艺。

参考文献

[1] Canonico D A, Holz P P. Half bead welding technique [R]. TN(USA): Oak Ridge National Lab, 1978.
[2] Albuquerque D, Victor H C, Cleitton C Silva, et al. Effect of nonmetallic inclusion and banding on the success of the

two-layer temper bead welding technique [J]. Materials & Design, 2009, 30(4): 1068-74.
[3] Lundin C, Wang Y, Batten G. Half bead, temper bead, controlled deposition techniques for improvement of fabrication and service performance of Cr-Mo steels [R]. America: Welding Research Council, 1994.
[4] Asme Boiler, Pressure Vessel Code. Section IX welding and brazing qualification, paragraph QW-290, temper bead welding [S]. American Society of Mechanical Engineers, 2010.
[5] Sperko W J. Exploring temper bead welding [J]. Welding Journal, 2005, 84(7): 37-40.
[6] Higuchi M, Sakamoto H, Tanioka S. A study on weld repair through half bead method [J]. IHI Engineering Review, 1980, 13(2): 28-33.
[7] 戎磊, 黄坚, 李铸国, 等. 激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层的组织与性能 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 40-44.

作者地址: 上海市闵行区东川路 800 号 200240
上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室
Tel: (021) 5474 5789-8010
E-mail: liujing8971@gmail.com