

# 热处理对 Q345B 钢基堆焊复合板显微组织及力学性能的影响

陈友明<sup>1</sup>, 佟海云<sup>2</sup>, 郑毅力<sup>2</sup>, 赵玉萍<sup>3</sup>, 李滔<sup>4</sup>, 储爱民<sup>4</sup>

(1. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201; 2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司计量中心, 内蒙古包头 014010; 3. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201; 4. 湖南科技大学材料科学与工程学院, 湖南湘潭 411201)

**摘要:**采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊方法,在 Q345B 钢基体表面堆焊 YD212 型焊丝形成复合板。研究了淬火、正火和喷液淬火+回火 3 种热处理工艺对复合板显微组织与力学性能的影响,并与未热处理复合板进行比较。结果表明:3 种热处理工艺均使复合板的熔合层和堆焊层显微组织发生了改变,同时也使基板层珠光体含量发生变化。热处理使复合板的各层硬度均有不同程度的提高,其中正火处理的提升幅度较小。采用喷液淬火+回火热处理得到的复合板,其基板层珠光体含量较高,硬度和韧性显著提高,熔合区韧性明显改善,堆焊层硬度优良,其冲击吸收能量是未热处理复合板的 1.57 倍。

**关键词:**Q345B 钢; 堆焊; 热处理; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2023)08-0034-09

## Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Q345B steel-based surfacing composite plate

CHEN You-ming<sup>1</sup>, TONG Hai-yun<sup>2</sup>, ZHENG Yi-li<sup>2</sup>, ZHAO Yu-ping<sup>3</sup>, LI Tao<sup>4</sup>, CHU Ai-min<sup>4</sup>

(1. Health Maintenance for Mechanical Equipment Key Lab of Hunan Province, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Measurement Center of Inner Mongolia Baogang Ganglian Co Ltd, Baotou 014010, China; 3. School of Civil and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Using CO<sub>2</sub> gas shielded welding method, YD212 type welding wire was deposited on the surface of Q345B steel substrate to form a composite plate. The effects of three heat treatment processes, namely quenching, normalizing, and spray quenching+tempering, on microstructure and mechanical properties of the composite plate were studied, and compared with untreated composite plate. The results show that the microstructure of fusion zone and surfacing layer of the composite plate are changed by three heat treatment process, in addition, the pearlite content of the substrate layer is also changed. The hardness of each layer of the composite plate is improved by heat treatment in varying degrees, among them, the increment of the normalized composite plate is smaller. The composite plate treated by spray quenching and tempering heat treatment has a higher content of pearlite in the substrate layer, significantly improves hardness and toughness, and significantly improves toughness in the fusion zone. The hardness of the surfacing layer is excellent, and its impact absorbed energy is 1.57 times that of the untreated composite plate.

**Keywords:** Q345B steel; surfacing; heat treatment; microstructure; mechanical property

**收稿日期:** 2023-01-08 **修订日期:** 2023-06-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(52174344);湖南省自然科学基金(2021JJ30249, 2021JJ30250, 2023JJ30222);湖南省大学生创业训练项目(S202210534024X)

**作者简介:** 陈友明(1981—),男,讲师,博士,主要从事复合材料制备及性能研究,发表论文 20 余篇,E-mail:ymchen@hnust.edu.cn。

**通信作者:** 储爱民(1975—),男,教授,博士,主要从事金属材料连接与热处理研究,发表论文 50 余篇,E-mail:chuaiminanzyp@163.com。

**引用格式:** 陈友明,佟海云,郑毅力,等. 热处理对 Q345B 钢基堆焊复合板显微组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(8):34-42.

CHEN You-ming, TONG Hai-yun, ZHENG Yi-li, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Q345B steel-based surfacing composite plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(8):34-42.

Q345 低合金钢具有良好的力学、耐低温、焊接等性能,被广泛应用于桥梁、车辆、船舶、建筑等领域<sup>[1-4]</sup>。根据冲击温度的不同,Q345 系列合金钢可分为 A、B、C、D、E 五个等级,其中 Q345B 钢的冲击温度为 20 ℃。工业上,Q345B 钢制造的零件常在高温、高压、高速以及腐蚀等条件下工作,极易造成零部件的工作表面失效,需要对其进行表面强化处理。近年来,镀膜、激光熔覆、等离子喷涂等表面强化处理技术发展迅速<sup>[5-8]</sup>,实际工作中,利用堆焊技术进行表面强化也是一种应用广泛的方法<sup>[9-10]</sup>。

堆焊技术是利用热源将具备特殊性能的材料熔覆到基材的表面,从而使基材具备耐蚀、耐磨、抗衰老等特殊性能或修复基体局部损坏部位<sup>[11-12]</sup>。堆焊材料和堆焊方法是影响堆焊熔覆层显微组织和力学性能的两个关键因素,决定了堆焊零部件在工作条件下的服役寿命<sup>[10,12-14]</sup>。Q345 钢板常用的堆焊方法有手工电弧焊、埋弧焊和气体保护焊等<sup>[15-17]</sup>。

堆焊容易引起热应力,使结合界面产生裂纹或变形,界面的微观结构发生变化还会使堆焊复合板的性能恶化,给零部件的应用带来困难<sup>[18-19]</sup>。对焊接复合板进行后续热处理,可以大幅提高复合板的耐磨性、强度和硬度等,满足零部件不同的使用要求<sup>[20-21]</sup>。如邵甄胰等<sup>[20]</sup>对 Q345/KB968 堆焊复合板进行热处理改性研究,发现复合板硬度与冲击韧性有大幅提升;刘燕平等<sup>[22]</sup>探究了热处理工艺对 2205-

Q345R 爆炸复合板性能的影响,发现在 480~600 ℃ 之间进行去应力退火,复合板的耐蚀性、强度及弯曲性能可满足使用要求;王凤会等<sup>[23]</sup>对 Q345R/316L 焊接复合板进行了热处理,发现热处理后复合板接头两侧的残余应力均大大降低。可见,热处理工艺已成为保证和改善焊接复合板性能的重要手段。

本文采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊方法,以 YD212 铬钼型焊丝堆焊 Q345B 钢基体,获得 Q345B 钢基复合板,并对堆焊复合板进行不同的热处理。通过对比未热处理和不同热处理复合板的显微组织和力学性能,分析各层界面的显微组织变化,探究热处理工艺对复合板显微组织和力学性能的影响,实现对 Q345B 钢基堆焊复合板性能的优化。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

基板材料为 4 mm 厚的 Q345B 型低合金钢,其屈服强度为 345 MPa,含碳量较低,强度、硬度较差,但塑性、韧性及焊接性能优良。其化学成分(质量分数,%)如表 1 所示。实验采用 YD212 铬钼型堆焊焊丝,具体型号为 EDPCrMo-A4-03,堆焊层硬度 ≥50 HRC,焊丝直径为 1.6 mm,焊丝中的铬、钼元素可提高耐磨损、耐冲击等性能,可满足 Q345B 钢的表面强化要求,其化学成分(质量分数,%)如表 1 所示。

表 1 实验材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of the experimental materials (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	V	Cr	Mo	Fe
Q345B steel	0.2	0.55	1.70	0.04	0.04	0.02-0.15	-	-	Bal.
YD212 welding stick	0.5	1.50	1.20	0.02	0.01	-	4.95	0.98	Bal.

### 1.2 实验方法

采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊方法,选用 NBC-350 型直流弧焊机进行焊丝堆焊,焊接电流为 220 A,气体流量为 20 L/min,焊速为 35 cm/min,采用直流反接。Q345B 钢基板层尺寸为 70 mm×90 mm×4 mm(长×宽×高),堆焊层高度为 6 mm,因此,最终形成的堆焊复合板厚度为 4 mm+6 mm=10 mm。采用多层(3 层)多道焊方式形成 6 mm 的堆焊层,层间温度控制在 200 ℃ 以下,堆焊稀释率约为 32%。为使焊接板材具有更好的结合面,焊接之前,使用粗砂纸打磨基材焊接面,以除去材料表面的杂质和污垢。将堆焊形成的复合板分别采用未热处理、淬火

(880 ℃)、正火(880 ℃)和喷液淬火(880 ℃)+回火(200 ℃)的处理,制备出 4 组试样。将试样沿高度方向切开,从下往上依次为基板层、过渡区、熔合区和堆焊层。采用 DMIRM 型光学显微镜观察各部位的显微组织;采用 TMDHV-1000 型维氏硬度计测试各部位的硬度,其中加压载荷为 9.8 N(1 kg),保压时间为 10 s,相邻硬度测试位置的距离为 5 mm;利用线切割法将复合板加工成标准冲击试样(图 1),采用 JBS-300.500A 型数字式冲击试验机测试未热处理和(喷液淬火+回火)处理两种复合板的冲击韧性;采用 JSM-6301F 型扫描电镜(SEM)观察两种试样的冲击断口形貌。

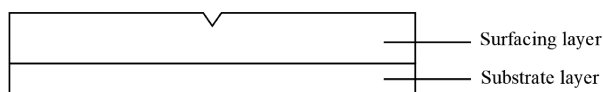


图1 标准冲击实验试样

Fig. 1 Standard impact test sample

## 2 实验结果

### 2.1 不同热处理堆焊复合板的显微组织及硬度

图2为未热处理复合板沿厚度方向截面的显微

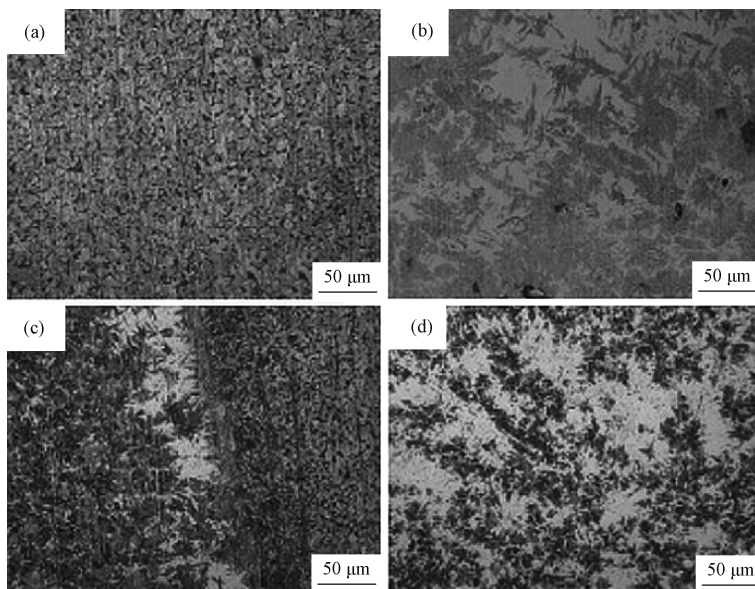


图2 未热处理试样的显微组织 (a) 基板层; (b) 堆焊层; (c) 过渡区; (d) 熔合区

Fig. 2 Microstructure of the sample without heat treatment

(a) substrate layer; (b) surfacing layer; (c) transition zone; (d) fusion zone

图3为未热处理复合板的硬度曲线,横轴表示复合板高度方向(从基板层到堆焊层),纵轴表示复合板不同高度部位的硬度值。由图3可知,基板层硬度在0~2 mm的高度方向约为130 HV1,与堆焊前基板的硬度值相比较,未发生明显的变化,表明该区域未受热处理影响,其组织仍然为等轴铁素体和片状珠光体,表现为塑性韧性较好,硬度较低;在2~4 mm范围硬度迅速增加,归因于该区域为熔合区,出现了晶粒细小的铁素体和珠光体组织;在4~10 mm之间为堆焊层,其硬度值趋于稳定,为620 HV1左右,归因于该组织为析出的大量团絮状石墨和一些高硬度碳化物,使硬度迅速提高。

图4为880℃淬火热处理复合板沿高度方向截面的显微组织。可以发现,基板层(图4a)的组织未发生明显变化,仍然以等轴铁素体为主,但珠光体的含量相比未处理前(图2a)略微增加,且淬火后组织

组织。可以发现,基板层(图2a)主要为原始的等轴铁素体和片状珠光体组成的长条带状组织<sup>[24]</sup>,晶粒尺寸约80 μm(图2a)。堆焊层(图2b)存在团絮状石墨和块状铁素体组织,这是由于多层堆焊时,堆焊层多次受到低于共析温度的加热,高碳钢逐步球化,导致珠光体破碎,形成团絮状石墨和块状铁素体<sup>[25]</sup>;过渡区(图2c)为基板层与熔合区的中间部分,左边为熔合区,右边为基板层;熔合区(图2d)因冷却速度较快,出现了晶粒较为细小的铁素体和珠光体组织。

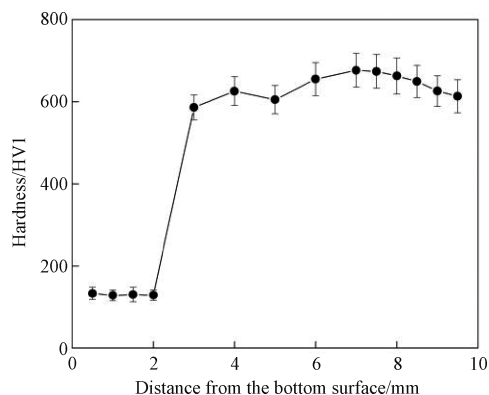


图3 未热处理试样板高度方向的硬度

Fig. 3 Hardness in the height direction of the sample without heat treatment

晶粒变细;堆焊层(图4b)为奥氏体和枝状分布δ铁素体组成的尺寸较小的柱状晶,这是由于焊丝中铬、钼元素含量高,对堆焊层有细晶强化作用;熔合区

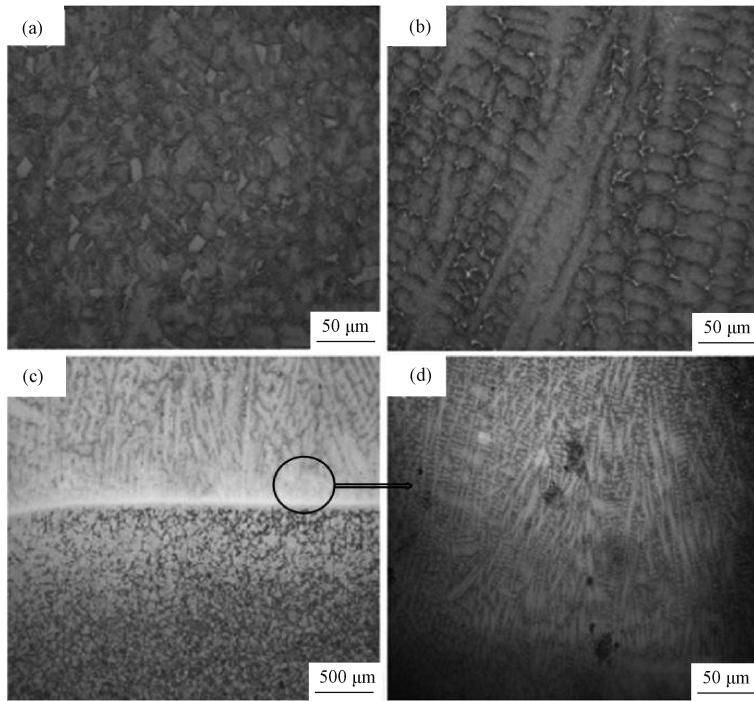


图 4 880 °C 淬火热处理试样的显微组织 (a) 基板层; (b) 堆焊层; (c) 过渡区; (d) 熔合区

Fig. 4 Microstructure of the sample quenched at 880 °C

(a) substrate layer; (b) surfacing layer; (c) transition zone; (d) fusion zone

(图 4d) 组织(为过渡区图 4c 的局部放大区域)也为 δ 铁素体组成的柱状晶组织,但相较于堆焊层组织晶粒更细,这是因为多层堆焊时后层金属的熔覆会对前层金属产生热处理作用,使其组织致密度高,晶粒变细。

图 5 为经 880 °C 淬火后复合板的硬度曲线。淬火保温时间  $t$  由公式(1)计算为 18 min。

$$t = \alpha \times k \times D \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为加热系数,取 1.2 min/mm; $k$  为加热修正系数,取 1.4; $D$  为工件有效厚度,取 10 mm。

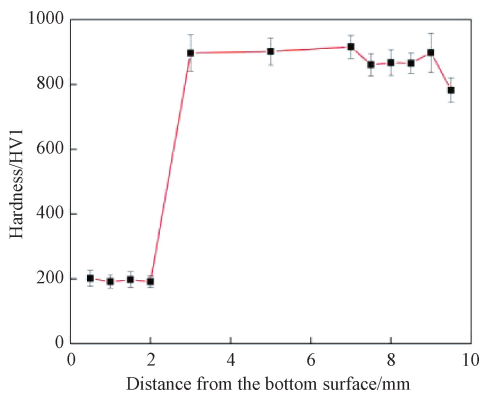


图 5 880 °C 淬火热处理试样高度方向的硬度

Fig. 5 Hardness in the height direction of the sample quenched at 880 °C

由图 5 可知,基板层硬度值约为 195 HV1,堆焊层硬度值约为 890 HV1,相比未热处理试样的硬度(图 3),淬火后复合板的各部分硬度均有大幅提升。但淬火试样的堆焊层与基板层接合处,多部位出现了明显的裂纹(图 6),会影响复合板的冲击韧性,表明淬火热处理不适用于堆焊复合板性能的提升。

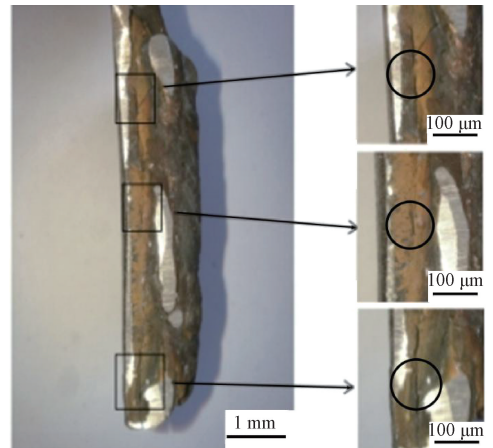


图 6 880 °C 淬火热处理试样的裂纹

Fig. 6 Cracks of the sample quenched at 880 °C

图 5 中,在 0~2 mm 之间,硬度曲线基本水平;在 2~3 mm 之间,曲线斜率陡然增大,这是因为在熔合区位置,其宽度不能很好地控制所致。由图 5 还可

见,在3~7 mm之间硬度曲线基本处于稳定状态,然而在7~10 mm之间硬度值出现了一定范围的波动或轻微降低,这可能归因于淬火热处理引起的微裂纹(见图6中圆圈处),且越靠近堆焊层表面,产生的裂纹越明显,降低了其硬度。

经过880 °C正火后的试样通过光学显微镜观察,发现基板层(图7a)主要组织为灰白色铁素体,晶界

处有少量渗碳体和片状黑色珠光体,珠光体的含量相较于未热处理试样略低;堆焊层(图7b)含有部分针状马氏体组织;过渡区(图7c)左侧呈现出先共析铁素体和柱状晶形态,焊缝柱状晶较为粗大,出现了较多魏氏体组织<sup>[17]</sup>;熔合层(图7d)冷却速度低于复合板两端,奥氏体未完全分解,且沿某一晶面对称,形成孪晶奥氏体。

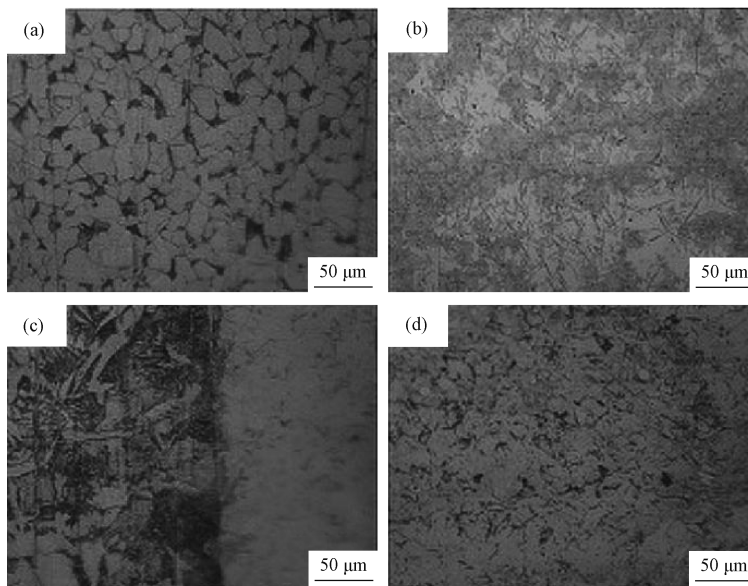


图7 880 °C正火热处理试样的显微组织 (a) 基板层; (b) 堆焊层; (c) 过渡区; (d) 熔合区

Fig. 7 Microstructure of the sample after normalizing at 880 °C

(a) substrate layer; (b) surfacing layer; (c) transition zone; (d) fusion zone

经过880 °C喷液淬火+回火的试样通过光学显微镜观察,发现基板层(图8a)形成了更多珠光体,其含量比其他热处理方式要多,而珠光体具有较好的力学性能,珠光体含量越高,其理论硬度也更高<sup>[17]</sup>。此外,相比未热处理试样,喷液淬火+回火试样的基板层晶粒明显细化,晶粒长度尺寸减至约15 μm(图8a);堆焊层(图8b)组织较致密,出现许多细长的方向性组织,可以有效提升硬度,阻止裂纹生成;过渡区(图8c)出现大量针状马氏体;熔合区(图8d)晶粒边界析出一些石墨和碳化物。

由以上分析可知,热处理工艺对堆焊复合板的显微组织种类、含量以及晶粒尺寸产生了较大影响。相比未热处理,不同热处理复合板基板层的显微组织种类基本不变,但珠光体的含量发生变化,两种淬火后的基板层珠光体含量明显提高,尤其喷液淬火方式降温速率快且均衡,使得喷液淬火+回火后基板层珠光体含量提高更多,而正火后的基板层珠光体含量略微减少。3种热处理复合板的晶粒均发生细化,其中喷

液淬火+回火处理复合板的晶粒细化明显,归因于喷液冷却方式让复合板整体降温快速且均衡,使其晶粒细化,而回火在消除残余应力的同时,使晶粒进一步细化。

## 2.2 不同热处理堆焊复合板硬度的比较

图9为未热处理、淬火、正火和喷液淬火+回火4组试样不同厚度部位的硬度曲线。横轴表示复合板厚度,纵轴表示复合板各部位硬度值。可以看出,未热处理、淬火和正火处理的复合板在0~2 mm时曲线皆平缓,其基板层硬度分别约为130、200和140 HV1,而喷液淬火+回火处理的复合板在0~2 mm时有略微倾斜,倾斜角约为30°,其基板层平均硬度约为270 HV1。同时4组试样的堆焊层硬度较基板层硬度有较大提高,其硬度分别约为620、900、700和900 HV1,不同的是硬度区间略有差异。这主要是因为,相比基板层,堆焊层中C元素含量增多,Fe元素含量下降(见表1),使得堆焊层的硬度更高。此外,焊丝中的Cr、Mo元素能够起到固溶强化作用,可

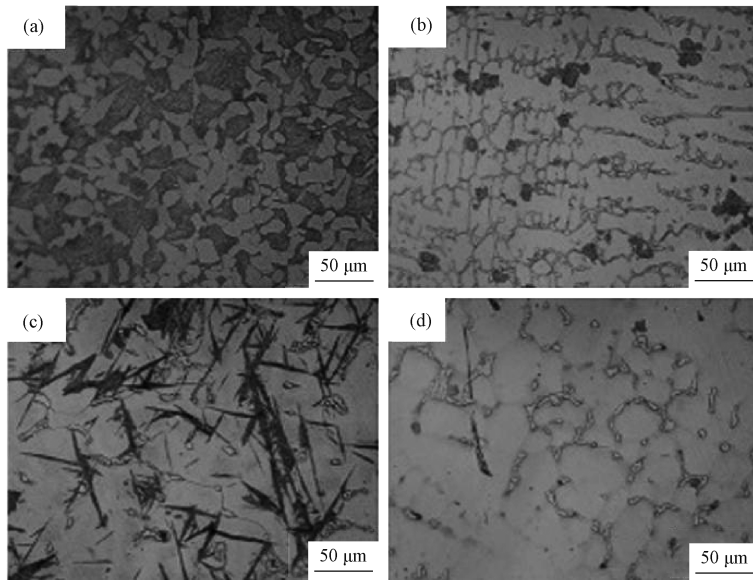


图 8 喷液淬火+回火处理试样的显微组织 (a) 基板层; (b) 堆焊层; (c) 过渡区; (d) 熔合区

Fig. 8 Microstructure of the sample treated by spray quenching and tempering  
(a) substrate layer; (b) surfacing layer; (c) transition zone; (d) fusion zone

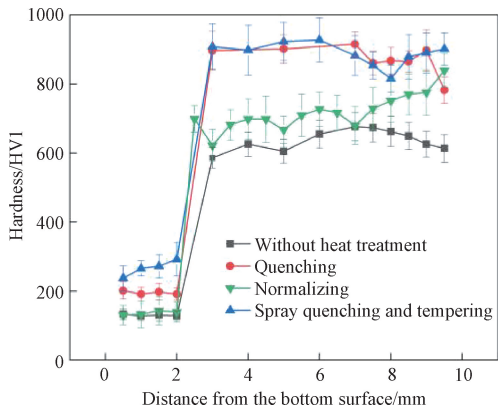


图 9 不同热处理试样的硬度曲线

Fig. 9 Hardness curves of the various heat treatment samples

进一步提高堆焊层的硬度<sup>[26]</sup>。整体来说,不同热处理下,硬度曲线中斜率突变区间宽度大致相同,但倾斜度略有差异,这是因各组试样的基板层和堆焊层硬度不同所致。值得注意的是,尽管正火处理后的基板层珠光体含量比未热处理略低,但由于正火处理后晶粒细化,其硬度仍然略高于未热处理基板层的硬度。

复合板堆焊层由含铬钼元素的焊丝堆焊而成,因此堆焊层的硬度与基板层相差较大。由图 9 可知,相比未热处理复合板,热处理工艺使复合板各层硬度得到不同程度提高,其中单一淬火和喷液淬火处理的复合板各层硬度均明显提升,而正火处理复合板的硬度提升幅度较小,这是因为正火处理后复合板基板层的

珠光体含量降低;而淬火处理后在堆焊层生成的奥氏体和枝晶状  $\delta$  铁素体组成的柱状晶致密度高且晶粒细小,其硬度(900 HV1)相比正火得到的马氏体硬度(700 HV1)更高。相比未热处理试样堆焊层,正火使堆焊层产生了晶粒细化效果,因此,正火试样堆焊层的硬度(700 HV1)比未热处理试样(620 HV1)高。

此外,由图 9 还可见,单一淬火处理复合板的硬度整体略低于喷液淬火+回火处理,尤其在基板层较为明显,这归因于喷液冷却方式使基板层产生的珠光体含量比单一淬火处理的更多。对于堆焊层,单一淬火处理与喷液淬火处理复合板均生成了柱状晶,因此硬度相近,约为 900 HV1。值得注意的是,单一淬火处理的复合板堆焊层会出现裂纹(图 6),为淬火产生的应力超过材料本身的塑性变形极限所致,而喷液淬火+回火处理试样的低温回火工艺,不仅消除了内应力,还使堆焊层组织更为致密,同时堆焊层内生成的细长方向性组织,也可阻止裂纹产生。

### 2.3 复合板的冲击韧性及断口分析

选取未热处理和喷液淬火+回火热处理试样,采用夏比冲击摆锤进行冲击实验。利用 SEM 观察上述两组试样的冲击断口形貌。可以看到在未热处理试样基板层(图 10a)的断面有明显撕裂带,内部存在大量的等轴韧窝,韧窝细小且均匀,属于韧性断裂。但同时也发现一部分韧窝深度较浅,存在明显的撕裂脊线,属于局部准解理断裂。在熔合区(图 10b),观察

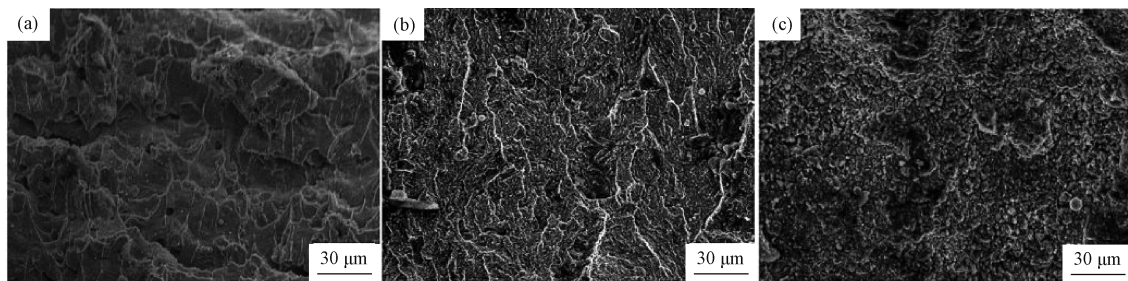


图10 未热处理试样的断口形貌 (a) 基板层; (b) 熔合区; (c) 堆焊层

Fig. 10 Fracture surface morphology of the sample without heat treatment

(a) substrate layer; (b) fusion zone; (c) surfacing layer

到大量的河流花样以及极少的解理舌,为解理断裂。在熔合区,由于焊丝与基板开始互相熔合,且铬钼元素的加入,减少了基板中的铁素体,使得基板容易脆断。观察堆焊层(图10c)的断口形貌,可知其为脆性断裂。

图11为喷液淬火+回火热处理试样的冲击断口形貌。可以发现基板层(图11a)为准解理断裂,有较多的撕裂痕,断口呈现浮雕状。基板层经淬火处理后,其组织从不均匀分布的铁素体和珠光体转变为均

匀奥氏体,随后的回火处理使珠光体含量增多且组织更加致密。熔合区(图11b)可见有较多韧窝,为韧性断裂。其原因是,在熔合区随着铬钼焊丝的熔覆,与基板层的熔化互渗,铬钼元素有细化晶粒的作用,组织得到细化,韧性增强,韧窝变多。堆焊层(图11c)的断裂方式为沿晶断裂,可看到明显的冰糖状断口,还能清晰地看到多边形晶粒沿晶界分离的特征,沿晶断裂属于脆性断裂。虽然热处理使组织细化,但因堆焊层的铬钼含量较高,使其韧性的提升不大。

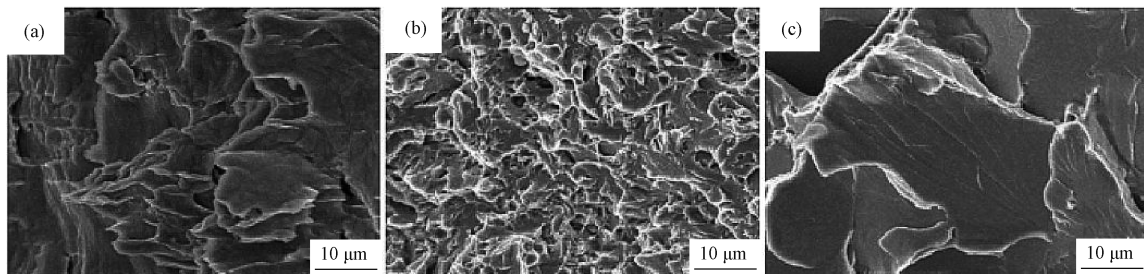


图11 喷液淬火+回火热处理试样的断口形貌 (a) 基板层; (b) 熔合区; (c) 堆焊层

Fig. 11 Fracture surface morphology of the sample treated by spray quenching and tempering

(a) substrate layer; (b) fusion zone; (c) surfacing layer

冲击实验结果表明,未热处理试样的平均冲击吸收能量为18.2 J,喷液淬火+回火试样的平均冲击吸收能量为28.6 J。与未热处理试样相比,喷液淬火+回火试样的冲击吸收能量约为其1.57倍,可以看出,采用喷液淬火+回火的热处理工艺,可以较大幅度提高复合板的冲击韧性。

### 3 结论

1) 堆焊复合板基板层组织由铁素体+珠光体组成,热处理使其珠光体含量发生变化,其中喷液淬火+回火处理后的珠光体含量最高,正火后的珠光体含量略微减少,热处理使焊后复合板组织晶粒得到细化,焊接缺陷也得到一定程度的消除,复合板硬度均

有提高;

2) 经过淬火、正火、喷液淬火+回火的试样堆焊层硬度差别较大,其中淬火处理试样的硬度最高,但淬火处理容易产生裂纹;对于基板层,喷液淬火+回火试样的硬度最高;整体上正火试样的硬度较低,但仍比未热处理试样的硬度要高,表明热处理工艺使复合板硬度均有不同程度的提高;

3) 喷液淬火+回火试样的冲击吸收能量约为未热处理试样的1.57倍,原因为喷液淬火+回火试样熔合区的韧窝较多,韧性较好,冲击吸收能量较高,而未热处理试样为脆性断裂,仅基板层有少量韧窝,因而冲击韧性较差。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 李琴,王于豪,丁雅萍,等. 焊接工艺参数对 Q345 钢平板焊接残余应力的影响[J]. 材料科学与工艺,2020,28(6):80-87.  
LI Qin,WANG Yu-hao,DING Ya-ping,et al. Influence of welding process parameters on welding residual stress of Q345 steel plate [J]. Materials Science and Technology,2020,28(6):80-87.
- [ 2 ] Qiang B,Li Y D,Yao C R,et al. Through-thickness welding residual stress and its effect on stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks in a butt-welded steel plate[J]. Engineering Fracture Mechanics 2018,193:17-31.
- [ 3 ] Chen J L,Shu W Y,Li J W. Constitutive model of Q345 steel at different intermediate strain rates[J]. International Journal of Steel Structures 2017,17(1):127-137.
- [ 4 ] 李鑫炎,李灿阳,王丹,等. 激光扫描速度对 Q345 钢表面锈层清洗质量的影响[J]. 中国激光,2020,47(10):112-120.  
LI Xin-yan,LI Can-yang,WANG Dan,et al. Effect of laser scanning speeds on cleaning quality of rusted layer on Q345 steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers,2020,47(10):112-120.
- [ 5 ] 雷世雄,汪洋,刘兰轩,等. 不锈钢表面强化处理技术的新进展[J]. 表面工程资讯,2010,10(4):8-9.  
LEI Si-xiong,WANG Yang,LIU Lan-xuan,et al. New progress in surface strengthening of stainless steel[J]. Information of Surface Engineering,2010,10(4):8-9.
- [ 6 ] 张津超,冯爱新,薛伟,等. 激光熔覆  $\text{CaF}_2/\text{Ni}$  基合金复合涂层的裂纹敏感性及其力学性能研究[J]. 应用激光,2017(1):22-26.  
ZHANG Jin-chao,FENG Ai-xin,XUE Wei,et al. Research on crack susceptibility and mechanical properties of  $\text{CaF}_2/\text{Ni}$  composite coating by laser cladding[J]. Applied Laser,2017(1):22-26.
- [ 7 ] Liu P,Cui S G,Li Z H,et al. Influence of surrounding rock temperature on mechanical property and pore structure of concrete for shotcrete use in a hot-dry environment of high-temperature geothermal tunnel[J]. Construction and Building Materials 2019,207:329-337.
- [ 8 ] 于海青,王金涛,王东. Q345 钢表面  $\text{SiC}$  颗粒掺杂锌钙系磷化膜的制备与性能[J]. 电镀与精饰,2021,43(7):20-24.  
YU Hai-qing,WANG Jin-tao,WANG Dong. Preparation and properties of zinc-calcium phosphate film doped with  $\text{SiC}$  particles on Q345 steel[J]. Plating and Finishing,2021,43(7):20-24.
- [ 9 ] 邓德伟,刘海英,张林,等. 电流对等离子堆焊 Fe90 组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报,2017,38(7):138-144.  
DENG De-wei,LIU Hai-ying,ZHANG Lin,et al. Effect of current on microstructure and properties of Fe90 alloy overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2017,38(7):138-144.
- [ 10 ] 曾春杰,李东,方虎. 不同工艺制备 52M 合金堆焊层的高温低塑性裂纹敏感性[J]. 机械工程材料,2019,43(5):30-34.  
ZENG Chun-jie,LI Dong,FANG Hu. High-temperature ductility-dip cracking susceptibility of 52M alloy surfacing layer prepared by different processes[J]. Materials for Mechanical Engineering,2019,43(5):30-34.
- [ 11 ] 黄本生,杨江,卢东华,等. Q345/316L 异种钢焊接接头显微组织结构与力学性能[J]. 材料热处理学报,2016,37(5):45-51.  
HUANG Ben-sheng,YANG Jiang,LU Dong-hua,et al. Microstructure and mechanical properties of the Q345/316L dissimilar steel welded joints[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2016,37(5):45-51.
- [ 12 ] 任艳艳,张国赏,魏世忠,等. 我国堆焊技术的发展及展望[J]. 焊接技术,2012,40(6):1-4.  
REN Yan-yan,ZHANG Guo-shang,WEI Shi-zhong. Development and prospect of surfacing technology in China [J]. Welding Technology,2012,40(6):1-4.
- [ 13 ] 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):147-155.  
WEI Shi-yong,PENG Wen-yi,CHEN Bin,et al. Current status and progress of cladding materials for plasma arc powder surfacing [J]. Materials Reports,2020,34(9):147-155.
- [ 14 ] 龚建勋,许继青,路德斌,等.  $\text{TiC}$  颗粒对铁-碳-铬-硅合金堆焊层显微组织及耐磨性的影响[J]. 机械工程材料,2015,39(4):43-47.  
GONG Jian-xun,XU Ji-qing,LU De-bin,et al. Effect of  $\text{TiC}$  particles on microstructure and wear resistance of iron-carbon-chromium-silicon alloy surfacing layer[J]. Materials for Mechanical Engineering,2015,39(4):43-47.
- [ 15 ] 张敬斋. 高强度低合金 Q345 钢焊接接头的微观组织与力学性能研究[J]. 铸造技术,2014,35(12):3018-3020.

- ZHANG Jing-zhai. Study on microstructure and mechanical properties of high-strength low-alloy Q345 steel welded joints[J]. Foundry Technology, 2014, 35(12): 3018-3020.
- [16] 杨华, 刘凤伟, 陈君, 等. 柳钢轧机托架体 Q345 钢基体上铝青铜的焊接工艺[J]. 装备制造技术, 2016(12): 85-87.  
YANG Hua, LIU Feng-wei, CHEN Jun, et al. Welding process of aluminum bronze on Q345 steel substrate of rolling mill bracke [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(12): 85-87.
- [17] 李丹, 宋珏蓉, 李长青, 等. Q345B 钢 CO<sub>2</sub> 气体保护焊接接头组织与性能的研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(17): 184-186.  
LI Dan, SONG Jue-rong, LI Chang-qing, et al. Study on microstructure and properties of CO<sub>2</sub> gas shielded welded joint of Q345B steel[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(17): 184-186.
- [18] Chu Q L, Zhang M, Li J H, et al. Joining of CP-Ti/Q345 sheets by Cu-based filler metal and effect on interface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 67-76.
- [19] Shi Y, Wang J, Zhou X H, et al. Post-fire properties of stainless-clad bimetallic steel produced by explosive welding process[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 201: 107690.
- [20] 邵甄胰, 姚作杨, 黄浩东, 等. Q345/KB968 复合板热处理改性工艺研究[J]. 成都工业学院学报, 2021, 24(2): 1-6.  
SHAO Zhen-yi, YAO Zuo-yang, HUANG Hao-dong, et al. Study on heat treatment modification process of Q345/KB968 composite board[J]. Journal of Chengdu Technological University, 2021, 24(2): 1-6.
- [21] 吴志强, 严明明, 卢立伟. 焊后热处理对 Q235 堆焊复合板的冲击性能影响[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 96-100.  
WU Zhi-qiang, YAN Ming-ming, LU Li-wei. Effects of postweld heat treatment on impact properties of Q235 overlaying composite board[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(4): 96-100.
- [22] 刘燕平, 李平仓, 刘凯, 等. 热处理工艺对 2205-Q345R 爆炸复合板性能的影响[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(3): 128-132.  
LIU Yan-ping, LI Ping-cang, LIU Kai, et al. Effect of heat treatment process on properties of 2205-Q345R explosive composite plate [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(3): 128-132.
- [23] 王凤会, 刘立伟, 许静, 等. 550 °C 热处理对 Q345R/316L 复合板焊接接头残余应力及腐蚀性能的影响[J]. 焊接技术, 2017, 46(4): 5-7.  
WANG Feng-hui, LIU Li-wei, XU Jing, et al. Effect of 550 °C heat treatment on the residual stress and corrosion properties of the welded joints of Q345R/316L composite plates[J]. Welding Technology, 2017, 46(4): 5-7.
- [24] 张舒婷, 周友龙, 李雄兵, 等. 900 MPa 钢与 Q345B 异种钢焊接接头的组织与力学性能分析[J]. 电焊机, 2015, 45(9): 107-109.  
ZHANG Shu-ting, ZHOU You-long, LI Xiong-bing, et al. Analysis on microstructure and mechanical properties of the welded joints on 900 MPa and Q345C dissimilar steels[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(9): 107-109.
- [25] 张紫凌, 卢立伟, 李艺权, 等. 钢基堆焊复合板的硬度分布及冲击韧性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(1): 57-61.  
ZHANG Zi-ling, LU Li-wei, LI Yi-quan, et al. Study on the hardness distribution and impact toughness of steel based composite plate fabricated by built-up welding[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(1): 57-61.
- [26] 江山, 姚宗湘, 郑靖上, 等. Q345 钢表面堆焊金属的组织与性能研究[J]. 电焊机, 2019, 49(1): 35-39.  
JIANG Shan, YAO Zong-xiang, ZHENG Jing-shang, et al. Study on the organization and properties of Q345 steel surface surfacing metal[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(1): 35-39.