

MAG 焊过程中热输入对 DL510 超高强钢焊接接头组织及力学性能的影响^①

李扬¹, 王金凤²

(1.天津轻工职业技术学院 机械工程学院, 天津 300350; 2.湖北汽车工业学院 材料科学与工程学院, 湖北 十堰 442002)

摘要: 采用熔化极活性气体保护电弧焊(MAG焊)焊接5 mm厚的DL510超高强钢(1 500 MPa级),研究了热输入量对焊接接头组织及力学性能的影响,并采用边焊边锤击的方式消除焊接接头残余应力。结果表明,热输入在43~70 kJ/cm范围内,均能获得成型良好的焊接接头;锤击时间低于20 min时,随着锤击时间延长,接头抗拉强度不断提升,但锤击时间超过20 min后,焊接接头抗拉强度变化不大;随着热输入增加,焊接接头晶粒明显长大;热输入为70 kJ/cm时,粗晶区出现少量细小粒状贝氏体组织,焊接接头韧性得到改善。

关键词: 熔化极活性气体保护电弧焊; 焊接; 热输入; 显微组织; 焊接接头; 接头组织; 超高强钢

中图分类号: TG444

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.034

文章编号: 0253-6099(2023)03-0151-05

Effect of Heat Input of MAG Welding on Microstructure and Mechanical Properties of DL510 Ultra-high Strength Steel

LI Yang¹, WANG Jinfeng²

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin Light Industry Vocational Technology College, Tianjin 300350, China; 2.School of Materials Science & Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, Hubei, China)

Abstract: A 5 mm thick DL510 ultra-high strength steel (1 500 MPa) was welded by using metal active gas (MAG) arc welding. The influence of heat input on the microstructure and mechanical properties of weld joint was investigated, and the residual weld stress of the joint was eliminated by hammering while welding. The results show that with heat input within the range of 43–70 kJ/cm, the obtained weld joints can have a good shape. If hammering time is less than 20 min, the tensile strength of weld joint increases as hammering time prolongs; however, after hammering time exceeds 20 min, there is little variation in the tensile strength. With the increasing of heat input, the grain size of weld joints grows obviously, and a small amount of fine granular bainite structure appears in the coarse-grained area with the heat input of 70 kJ/cm, leading to improvement in the toughness of weld joints.

Key words: metal active gas (MAG) arc welding; welding; heat input; microstructure; weld joint; joint structure; ultra-high strength steel

某汽车制造厂使用DL510(厂家牌号)低合金超高强防弹钢板制作某款军车车身、底盘等零部件,该钢材强度很高,焊接工艺较难控制,焊丝与母材强度和韧性匹配存在一定困难。本文结合工厂生产条件,利用实际生产中采用的焊丝,研究获得合格焊接接头的焊接工艺参数,以满足车辆的使用要求;此外在实际生产中,车身及底盘的焊接构件存在较大残余应力,该残余

应力会严重影响车辆的使用性能^[1-4],为此对该钢种焊后残余应力的消除进行初步探索。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验母材

本文采用DL510超高强钢作实验材料。DL510

① 收稿日期: 2022-11-28

基金项目: 湖北省中央引导地方科技发展专项资助项目(2019ZYD023)

作者简介: 李扬(1985—),女,河北石家庄人,博士,副教授,主要研究方向为焊接工艺及结构、模具设计与制造。

通信作者: 王金凤(1978—),女,内蒙古赤峰人,博士,副教授,主要研究方向为焊接工艺及焊接结构。

高强钢具有抗拉强度高、焊接性能一般等特点,其化学成分和力学性能如表1、表2所示。

表1 母材 DL510 主要化学成分(质量分数) %

Cr	Mn	Mo	Ni	Al	C	S	Fe
0.87	0.26	0.01	0.70	0.89	0.30	0.009	余量

表2 母材 DL510 力学性能

抗拉强度/MPa	延伸率/%
1 590	9.44

1.1.2 焊缝材料选择

焊接材料的选择主要考虑生产设备、焊接母材、焊接缺陷等方面。按照“低强匹配”原则,经比较最终采用 MG50-6 型气体保护焊丝,强度等级为 500 MPa。MG50-6 型气体保护焊丝具有抗母材表面氧化皮、油污能力强,气孔敏感性小等优点,且采用该焊丝焊接时不需预热处理。

1.2 焊接方法

本实验焊接方式为:熔化极气体保护焊,保护气体为 80%Ar+20%CO₂。采用带钝边的双 V 形坡口,坡口参数为:坡口角 45°、钝边 1 mm、根部间隙 1 mm。

1.3 焊接参数选择

经过多次调整以及试焊,在表3所示的焊接参数范围(43~70 kJ/cm)下能够获得完整的焊接接头,并且没有明显的焊接缺陷,同时又能保证生产效率以及节约能量。

表3 焊接工艺参数

电压/V	电流/A	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	实际热输入/(kJ·cm ⁻¹)	气体流量/(L·min ⁻¹)
20	100	28	43	25
18	90	21	46	25
20	100	24	50	25
17	150	26	59	25
19	160	26	70	25

2 实验结果与讨论

2.1 宏观形貌分析

焊接接头的宏观分析一方面可以观察焊接构件焊接前后的形态特征,同时可以分析焊接接头的宏观缺陷,例如未熔合、热裂纹等。

通过拉伸实验发现,热输入在 50 kJ/cm 以下时,获得的焊接接头力学性能较差,因此本实验选用热输入 50 kJ/cm 和 70 kJ/cm 的 2 种试样进行宏观分析。

热输入 50 kJ/cm 和 70 kJ/cm 的焊接接头宏观形貌如图 1~2 所示。由图 1~2 可知,焊接接头为双 V 形坡口,焊接采用双面焊,伴有一定量的余高。双面焊的效果较好,母材与焊缝之间没有出现咬边、未熔合等缺陷,焊缝中间没有明显夹杂、气孔等缺陷。对比图 1 和图 2 可见,热输入由 50 kJ/cm 增加到 70 kJ/cm,焊接接头熔宽由 8 mm 增加到了 10 mm,余高则由 2 mm 增加到了 3 mm,热影响区宽度由 1.5 mm 增加到了 3 mm。从外观上看,热输入增加后焊缝较均匀但焊纹变粗。热输入为 50 kJ/cm 时,焊缝有时会出现内凹的现象,但热输入增加到 70 kJ/cm 后,这种现象消失。

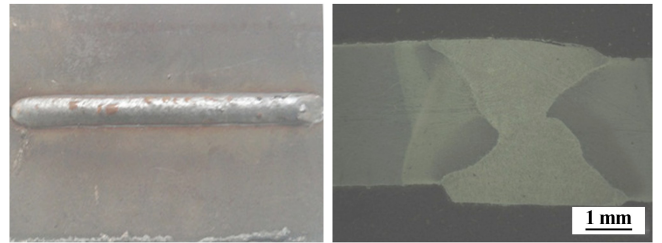


图1 热输入 50 kJ/cm 焊接接头宏观形貌

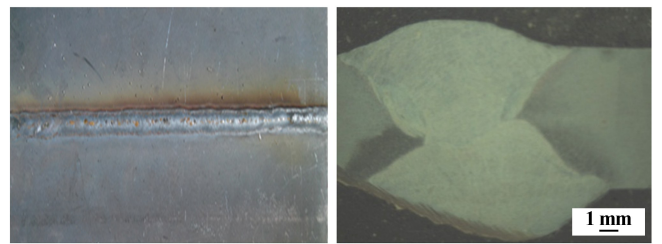


图2 热输入 70 kJ/cm 焊接接头宏观形貌

2.2 焊件力学性能分析

采用熔化极气体保护焊,在不同焊接工艺参数下对 DL510 高强钢板进行平板对接焊,从焊接件上切取试样进行拉伸实验、拉伸断口电镜扫描以及硬度测试。

2.2.1 拉伸实验

焊接接头横向拉伸试样见图 3。

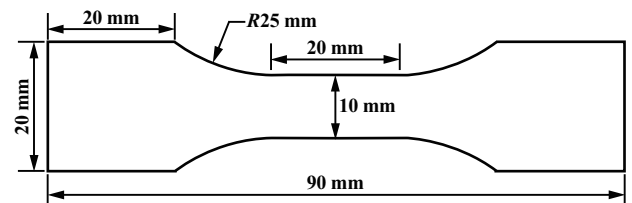


图3 焊接接头横向拉伸试样

图3中拉伸试样平行段的中间为焊缝位置。拉伸时,预先画出原始标距长为 20 mm,然后进行拉伸试验。横向焊接接头不同焊接工艺参数下拉伸的力学性能如表4所示。从表4可以看出,随着热输入增加,焊

接接头抗拉强度逐渐提高,延伸率也随之增加。热输入较低时,特别是在双面开坡口焊接时,由于坡口的影响,对焊接试样清根不方便,焊接第二面时,可能出现未焊透的现象,造成焊接接头抗拉强度、延伸率降低。随着热输入增大,熔深会增加,未焊透现象消失,焊接接头抗拉强度和延伸率升高。焊接接头抗拉强度和延伸率还与焊接材料的选择有关,本文选用“低强匹配”原则,采用的焊丝是 500 MPa 级别的。热输入为 70 kJ/cm 时焊接接头抗拉强度达到 740 MPa,高于焊丝强度,且焊接接头韧性较好,延伸率接近母材。

表 4 不同热输入时横向焊接接头拉伸结果

热输入/(kJ·cm ⁻¹)	平均抗拉强度/MPa	平均延伸率/%
46	452	3.53
59	598	7.31
70	743	10.83

在车辆使用过程中,焊接接头不仅要承受横向外力,同时也要承受纵向拉力。纵向拉伸试验是沿着焊缝拉伸焊接试样,拉伸前用机械法去除焊接接头余高。纵向拉伸试样如图 4 所示。

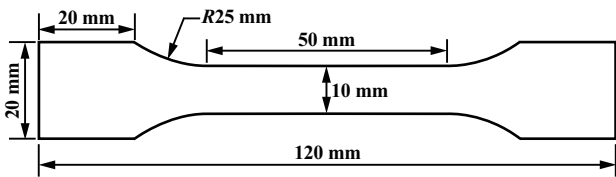


图 4 焊接接头纵向拉伸试样

图 4 中拉伸试样轴向平行段的中间为焊缝位置。拉伸时,预先画出原始标距长为 50 mm。不同焊接工艺参数下纵向焊接接头拉伸试验结果如表 5 所示。由表 5 可知,随着热输入增加,焊接接头抗拉强度逐渐提高,但延伸率差别不大,均较接近母材延伸率。

表 5 不同热输入时焊接接头纵向拉伸结果

热输入/(kJ·cm ⁻¹)	抗拉强度/MPa	延伸率/%
43	890	9.77
46	985	10.64
50	1 010	10.44

热输入为 70 kJ/cm 时,纵向焊接接头延伸率与横向焊接接头延伸率差别不大,均接近母材。

2.2.2 锤击对焊接接头力学性能的影响

一般而言,焊接构件在焊后都会存在焊接残余应力,残余应力会对焊接构件力学性能产生不利影响。本文采用锤击消除焊接残余应力,方法如下:在焊接试

样自然冷却到室温后进行锤击处理,采用超声波振动仪进行锤击实验,锤击频率为 50 次/min,在热输入 46 kJ/cm 条件下,锤击处理后焊接试样的拉伸数据如表 6 所示。从表 6 可以看出,随着锤击时间增加,焊接接头抗拉强度和延伸率都有所提升。对照表 4 可知,锤击过的焊接试样力学性能整体上都有所提升。可见锤击焊接接头可以消除焊接残余应力,有利于提高焊接接头力学性能。从锤击处理 10 min 到锤击处理 20 min,焊接接头抗拉强度由 490 MPa 提升到了 522 MPa,有较大提升;锤击处理 20 min 到锤击处理 30 min,焊接接头抗拉强度几乎没有变化。这是由于锤击 20 min 时,焊接接头残余应力已经释放完毕,继续增加锤击处理时间对焊接焊接抗拉强度影响不大。

表 6 不同锤击时间下焊接接头拉伸结果

锤击时间/min	平均抗拉强度/MPa	平均延伸率/%
10	490	4.47
20	522	4.93
30	525	5.90

2.3 拉伸断口形貌分析

热输入 70 kJ/cm 时焊接接头抗拉强度最高,因此选用该条件下所得焊接试样的拉伸断口进行 SEM 形貌分析,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,断口呈典型的韧窝状,韧窝大小、方向较均匀,试样断裂形式为韧性断裂。断口没有发现热裂纹特征,说明焊接接头没有形成热裂纹。

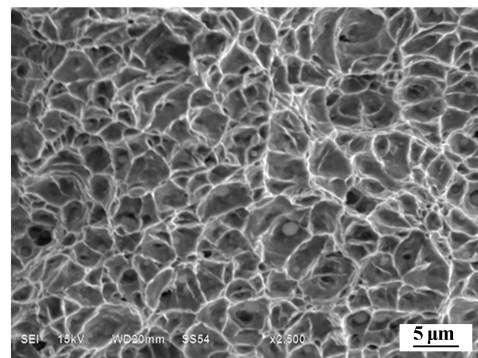


图 5 热输入 70 kJ/cm 时焊接试样拉伸断口形貌

2.4 焊接接头硬度分析

对 DL510 高强钢的焊接接头进行显微硬度测试,从焊缝中心到母材依次测试显微硬度,得到若干组数据,处理后结果见图 6。由图 6 可知,母材硬度 490HV 左右;2 种热输入条件下焊缝附近硬度均低于母材硬度,热输入 50 kJ/cm 时的硬度整体高于热输入 70 kJ/cm

时的硬度。这是因为,热输入较大时,焊接温度高,导致晶粒更加粗大;同时热输入增大后,熔敷在焊接接头中的焊接材料也增多,焊丝硬度比母材低,也会导致焊接接头硬度降低。

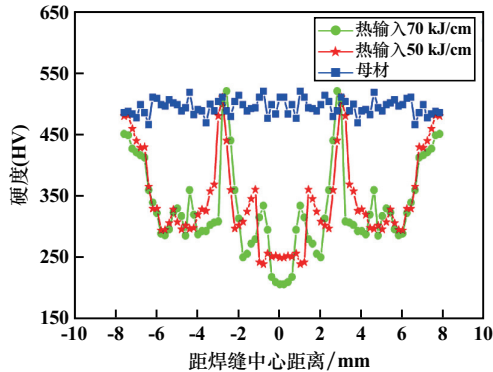


图6 焊接接头及母材硬度分布

比较同一热输入条件下焊接接头的硬度可知,焊缝组织的硬度较低,从焊缝往母材方向看,熔合区的硬度比焊缝组织更低,这是熔合区的化学成分不均匀、组织粗大所致。在焊接热影响区,粗晶区的硬度比细晶区的低,这是因为粗晶区距离焊缝中心更近,在焊接热循环作用下,加热峰值温度高,该区域内的晶粒生长快、组织粗大。而细晶区的硬度相比母材有所增加,这是因为在焊接热循环作用下,细晶区内的晶粒得到细化,硬度升高且高于母材。在不完全重结晶区,因存在珠光体和铁素体,硬度低于母材。

2.5 金相组织观察

2.5.1 母材金相分析

DL510 母材由北京钢铁研究院研制,抗拉强度高,其高抗拉强度是由热处理得到的。母材金相微观组织如图7所示。由图7可见,母材显微组织为马氏体。马氏体钢一般是钢经过高温奥氏体化后再经过快速冷却,抑制珠光体和贝氏体的形成,使其发生马氏体转变。本文的母材组织为较细小的板条马氏体。

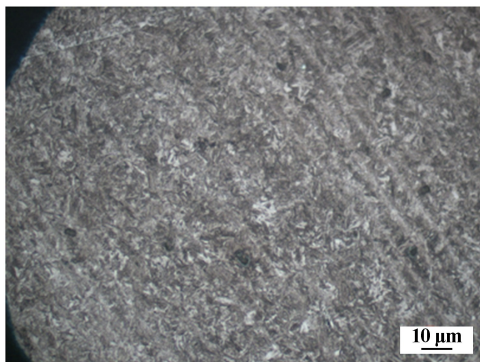
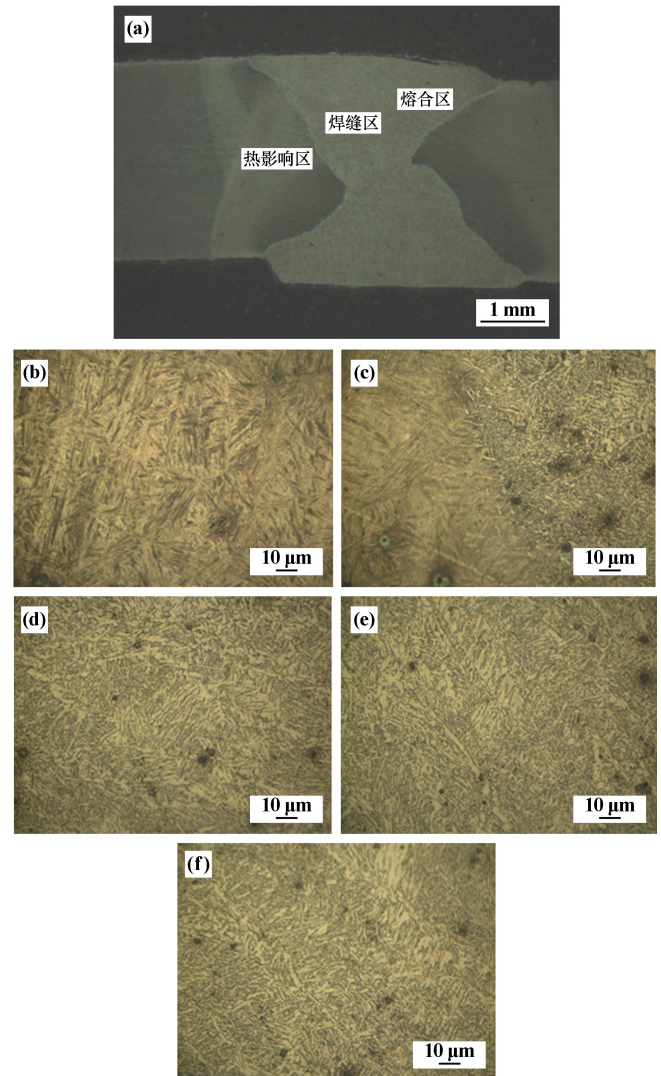


图7 母材微观组织

2.5.2 焊接接头金相分析

焊接接头中的焊缝、熔合区以及热影响区是进行金相分析的重点。热输入 50 kJ/cm 和 70 kJ/cm 时焊接接头各区域的金相组织如图8~9所示。



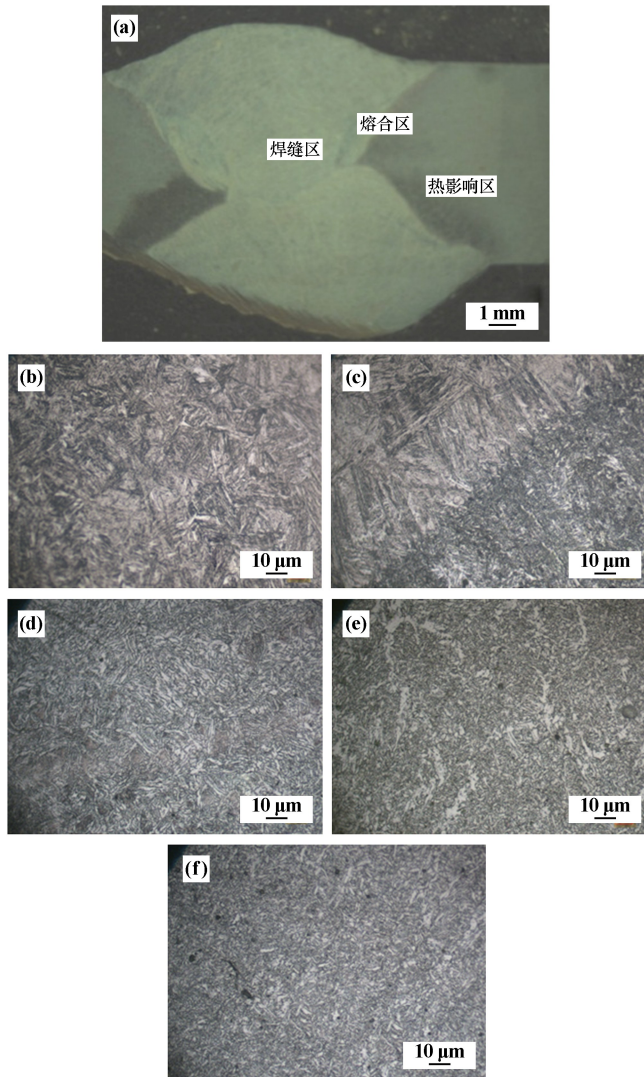
(a) 取样位置; (b) 焊缝区; (c) 熔合区;
(d) 粗晶区; (e) 细晶区; (f) 正火区

图8 热输入 50 kJ/cm 时焊接接头金相组织

焊缝组织对焊接接头的质量有决定性作用,从熔合区金相图可以清楚看出焊缝晶粒的生长方向,即垂直于焊缝与母材的熔合线方向生长,有明显的联生特征。熔合区是焊缝与母材的过渡部分,该区组织粗大,且其微观组织为过热组织和铸态柱状晶。熔合区附近的母材组织有长大趋势。这个区域是焊接接头性能最差的部位。

焊接过程中,在焊接热循环作用下,焊缝两侧处于固态但发生明显组织和性能变化的母材区域,称为焊接热影响区。焊接热影响区部位距离焊缝中心位置不

同,所经历的焊接热循环不同,可分为粗晶区、细晶区和正火区。



(a) 取样位置; (b) 焊缝区; (c) 熔合区;
(d) 粗晶区; (e) 细晶区; (f) 正火区

图9 热输入 70 kJ/cm 时焊接接头金相组织

粗晶区的焊接热循环峰值温度非常高,金属处于严重过热状态,晶粒会严重长大,在焊接过后空冷条件下会得到粗大的淬火组织马氏体和碳化物。粗晶区是焊接接头很薄弱的部位,韧性明显下降。细晶区的热循环峰值温度比粗晶区低,比 AC3 的温度稍高,组织会完全奥氏体化,但奥氏体组织没有过热长大,冷却时形成细小的马氏体组织,因此该区域组织细小而均匀,伴随析出的碳化物细小而弥散,固溶形式存在于马氏体中。正火区为细晶等轴状板条马氏体和铁素体。这个区域内热循环峰值温度在 AC1~AC3 之间,在快速加热条件下,铁素体很少溶入奥氏体;在随后冷却时,

奥氏体转变为细小的马氏体;铁素体保持不变,并不同程度地长大,最后形成马氏体加铁素体的组织^[5-7]。

对比图 8、图 9 可知,热输入增加时,焊接接头和粗晶区晶粒有了明显长大。热输入增大时,高温停留时间变长,冷却速度变慢,粗晶区有粒状贝氏体出现,使组织变为板条状马氏体和少量细小粒状贝氏体的混合组织,韧性得到改善。

3 结 论

1) 采用 80%Ar+20%CO₂ 的熔化极气体保护焊焊接 DL510 高强钢,焊接热输入在 43~70 kJ/cm 范围时,焊接接头没有咬边、气孔、未熔合等明显焊接缺陷。

2) 焊接热输入在 43~70 kJ/cm 范围时,随着焊接热输入增加,焊接接头抗拉强度增加,接头整体硬度降低。

3) 焊后锤击能提升焊接接头力学性能。锤击时间 10~20 min 时,焊接接头抗拉强度随锤击时间增加而增加,锤击时间超过 20 min 后,焊接接头抗拉强度变化不大。

4) 热输入增加时,焊接接头粗晶区晶粒明显长大。热输入增加时,高温停留时间变长,冷却速度变慢,粗晶区有粒状贝氏体出现,组织变为板条状马氏体和少量细小粒状贝氏体的混合组织,韧性得到改善。

参考文献:

- [1] 罗 登,张志云,郑生斌. Q690 钢焊接接头微观组织对冷裂纹的影响研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):114-118.
- [2] 潘龙博,张 硕,江 济,等. 连铸中间包焊接残余应力数值模拟[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):147-150.
- [3] Thibault D, Gagnon M, Godin S. Bridging the gap between metallurgy and fatigue reliability of hydraulic turbine runners [C]//27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Montreal, Canada, 2014: 012019.
- [4] LIU Y, YE D, YONG Q, et al. Effect of heat treatment on microstructure and property of Cr13 super martensitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011,18(11):60-66.
- [5] 杜 兵,孙凤莲,徐玉君,等. 焊接方法对超低碳马氏体不锈钢熔敷金属冲击韧性的影响[J]. 焊接学报, 2014,35(8):1-4.
- [6] 裴 冲,王东坡,邓彩艳,等. 不同焊接位置海洋平台用钢焊缝金属低温断裂韧性[J]. 焊接学报, 2016,37(3):111-114.
- [7] 巴凌志,王东坡,张 智,等. 热输入对海工用钢不同合金系焊缝金属韧性的影响[J]. 焊接学报, 2020,41(6):42-47.

引用本文: 李 扬,王金凤. MAG 焊过程中热输入对 DL510 超高强钢焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):151-155.