

随焊旋转冲击抑制 30CrMnSi 接头热影响区软化

张勇, 唐家成, 葛泽龙, 綦秀玲

(辽宁工程技术大学, 阜新, 123000)

摘要: 研究了随焊旋转冲击方法在抑制 30CrMnSi 接头热影响区软化中的影响规律. 采用随焊旋转冲击装置对焊接过程中产生软化的区域进行旋转冲击, 利用维氏硬度计对不同随焊旋转冲击工艺参数作用下的焊接接头热影响区进行硬度测试, 通过倒置金相显微镜对常规焊接试样及不同随焊旋转冲击工艺参数作用下的接头软化区进行组织观察, 并对软化区 C 元素分布情况进行能谱分析. 结果表明, 随焊旋转冲击作用使得接头软化区硬度明显提高, 接头软化区铁素体含量明显增加, C 元素弥散分布消除局部偏聚, 接头热影响区软化现象得到有效抑制, 接头力学性能显著提升.

创新点: 采用随焊旋转冲击方法促进 C 元素弥散分布, 抑制了 30CrMnSi 接头热影响区软化.

关键词: 随焊旋转冲击; 焊接接头软化; 力学性能; 显微组织; 元素分布

中图分类号: TG 401 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20200309001

0 序言

低合金高强钢在生产建设中起到了重要作用, 实际工业应用中大多为调质 (淬火 + 高温回火) 状态, 在焊接的过程中热影响区会出现不同程度的性能恶化^[1-4], 当加热温度超过了不完全淬火区的回火温度便会引起接头热影响区的软化. 目前抑制焊接热影响区软化现象的方法有选择小的焊接热输入^[5-7]、焊前预热^[8]、焊后热处理^[9]. 小的焊接热输入难以实现有效的连接. 预热可以有效地避免焊接接头热影响区的软化, 但是焊前预热一方面恶化劳动环境, 另一方面会在金属表面产生氧化膜, 导致焊接缺陷. 对于大型焊接结构, 采用整体热处理是非常困难的, 局部热处理又会产生附加应力, 从而影响焊接质量. 范成磊等人^[10]采用随焊冲击碾压法使得 LY12CZ 铝合金接头组织得到改善、硬度提高, 接头软化区得到强化. 管建军等人^[11]应用数值模拟探讨焊前预拉伸、焊前温差拉伸、动态温差拉伸、低应力无变形焊接 (LSND) 等方法中应力、塑性应变等物理量的时程分布情况, 认为任意时刻外加位移

控制载荷产生的机械应变和热输入满足一定条件时焊后残余应力为零. 目前这些方法主要实现对焊接残余应力和焊接变形的有效控制, 同时提高焊接质量. 表明采用随焊机械加载强化焊接接头性能是可行的. 由吉布斯相率可知: $F = C - P + n$ (其中 F 为自由度, C 为系统的组元数, P 为在该点的相数, n 为外界因素). 对于凝固体系, 由于压力的影响较小, 故视为等压下进行.

当存在较大的外界应力时, 对于凝聚态体系则需要考虑压力对相变体系的影响. 徐祖耀^[12]系统的阐述了钢在应力 (水静压力及单向应力) 作用下的铁素体、珠光体和贝氏体相变的动力学特征, 应力作用下的相变规律. 结果表明, 通过施加应力作用促进相变是可行的. 基于上述研究及基本理论, 文中采用随焊旋转冲击法^[13], 对焊接时处于较高温度的 30CrMnSi 钢接头软化区域进行随焊旋转冲击处理, 并阐明随焊旋转冲击工艺抑制高强钢接头热影响区软化的机制.

1 试验方法

试验选用 3 mm 厚 30CrMnSi 低合金高强钢板, 试样尺寸为 100 mm × 80 mm. 焊前进行调质处理, 调质热处理工艺为 870 °C 保温 30 min, 油冷淬

火 530 ℃ 保温 1 h, 空冷回火。焊接方法采用的不添丝表面熔覆 TIG 焊。焊接工艺参数为焊接电压 12 V, 焊接电流 150 A, 氩气流量 7 L/min, 焊接速度 60 mm/min。

在焊接过程中, 在较短时间对焊件热影响区发生软化的区域施加随焊旋转冲击作用。焊枪、旋转冲击系统和试样被固定在刚性夹具上, 其相对位置可通过十字滑台来调整。图 1 所示为冲击杆的加载位置。利用电子温度枪实测焊接过程中热影响区温度, 发现距焊缝中心 12 mm 处热影响区温度已达到 530 ℃, 将该处作为冲击杆加载位置。随焊旋转冲击电压是通过利用 220 V 单相调压器调整, 随焊旋转冲击电压分别为 150, 160, 170, 180 和 190 V。并在焊接前使用角磨机将试样表面进行打磨, 去除试样表面氧化膜。

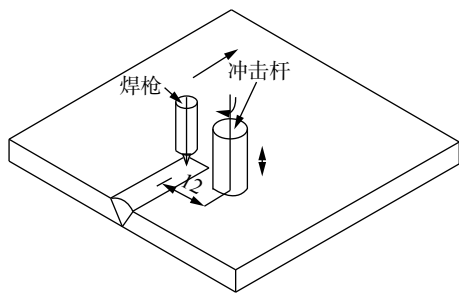


图 1 随焊旋转冲击加载位置

Fig. 1 Loading position of welding with rotation impact

随焊旋转冲击试验完成后, 使用线切割在垂直于焊缝方向切取硬度试验试样, 在加载旋转冲击作用区截取金相试样, 在旋转冲击作用结束位置沿焊接方向截取包含旋转冲击区与未旋转冲击区的金相试样。使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀抛光后的金相试样, 在 Axiovert 40 MAT 型倒置显微镜下进行金相组织观察。使用 HV-50 型维氏硬度计进行硬度试验, 载荷力为 50 N, 加载时间为 10 s。利用 JSM-7500F 型扫描电镜中的 EDS 分析旋转冲击作用区碳元素的分布情况。

2 结果与分析

2.1 维氏硬度结果与分析

图 2 所示为调质态 30CrMnSi 的常规焊件和随焊旋转冲击电压为 150 ~ 190 V 的焊件接头及热影响区硬度的测定结果。由图 2 可知, 在常规焊接过程中, 接头两侧热影响区距离焊缝中心大约 12 ~ 22 mm

区间均出现硬度明显低于母材的软化区域, 随焊旋转冲击处理的试件在未施加旋转冲击作用一侧也出现了硬度低于原始母材的软化区域。对比加载了随焊旋转冲击作用的一侧, 发现旋转冲击作用区域硬度较未作用区域均有不同程度的提高, 随焊旋转冲击作用的软化区硬度值随冲击电压的增加而增大。

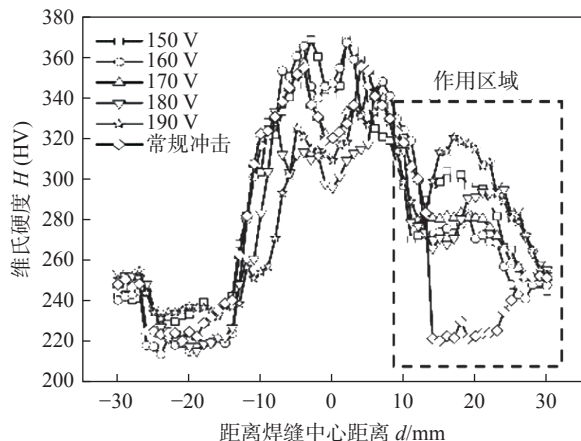


图 2 接头及热影响区维氏硬度

Fig. 2 Vickers hardness of joint and heat-affected zone

表 1 所示为常规焊接接头软化区及加载不同旋转冲击电压处理过的软化区维氏硬度值。常规焊接接头软化区的平均硬度值为 218.9 HV, 相比母材区域硬度均值 252.3 HV 下降了 33.4 HV, 软化现象比较明显。而进行了随焊旋转冲击处理的 5 组试件的硬度均大幅提升, 且随着旋转冲击电压的提升, 旋转冲击作用区的硬度提升更加明显。加载随焊旋转冲击电压 190 V 时, 接头受旋转冲击作用区硬度平均值为 310.7 HV, 比常规焊接的接头软化区域硬度值提升了 91.8 HV。

2.2 组织与分析

图 3 为调质态 30CrMnSi 加载 150 ~ 190 V 的旋转冲击电压试样的旋转冲击作用区与未旋转冲击作用区交界处金相组织形貌。图中左侧为未冲击作用区, 右侧为冲击作用区。对比 5 组交界处金相组织发现, 在加载了随焊旋转冲击作用的区域中, 在原调质组织中出现了大量的细小均匀的针状铁素体。由焊接冶金学相变过程可知: 温度低于 30CrMnSi 的 A_{c1} 区域未发生相变, 而是发生了再结晶^[14], 由于外加的随焊旋转冲击作用, 宏观上将使仍处于较高温度的区域发生塑性变形, 微观上是位错密度的增加, 同时外加载荷的作用促进了针状铁素体相的生成, 有效的细化晶粒并拥有较强的强韧性匹配^[15]。

表 1 接头软化区维氏硬度值 (HV)

Table 1 Vickers hardness value HV in softening zone of joint

| 不同旋转冲击电压 U/V | 测量值1 | 测量值2 | 测量值3 | 测量值4 | 测量值5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 无 | 221.5 | 216.5 | 217.0 | 220.0 | 219.5 |
| 150 | 270.0 | 274.5 | 271.5 | 278.0 | 277.0 |
| 160 | 273.0 | 274.0 | 273.5 | 283.0 | 273.0 |
| 170 | 284.0 | 281.0 | 281.5 | 281.5 | 281.0 |
| 180 | 281.0 | 292.0 | 294.0 | 295.5 | 285.5 |
| 190 | 284.0 | 314.0 | 321.5 | 318.0 | 316.0 |

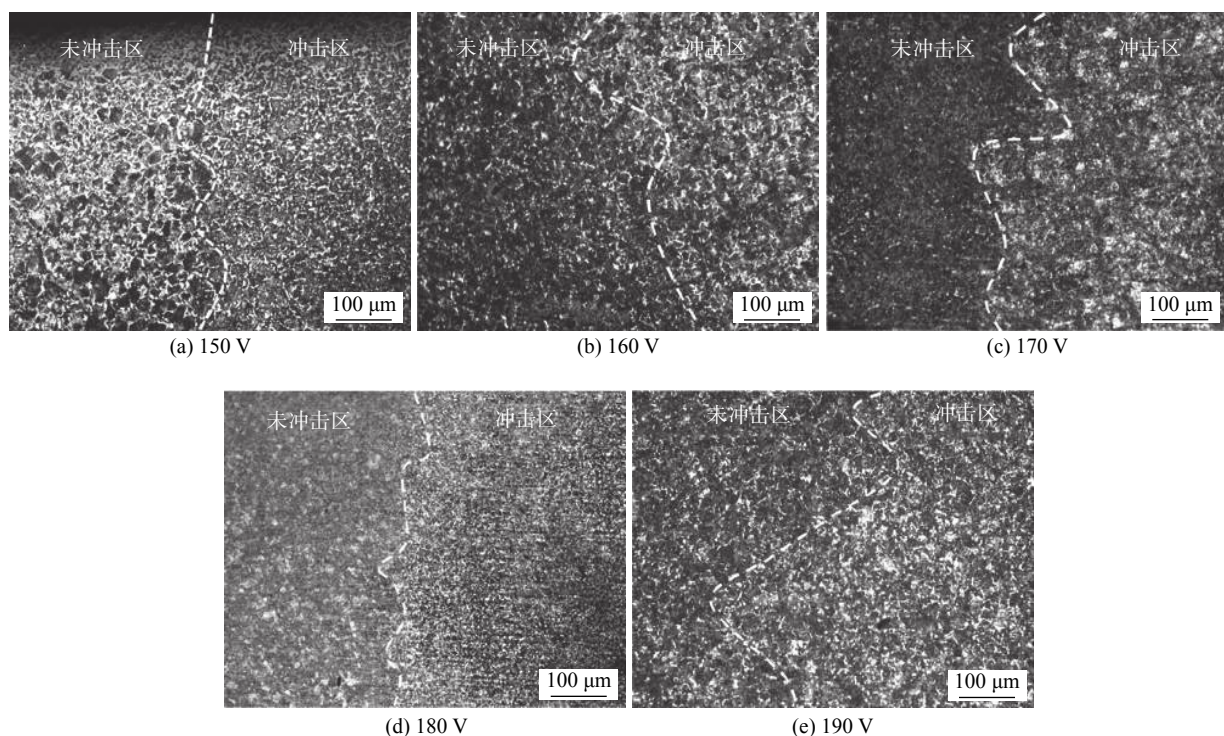


图 3 不同的旋转冲击电压下冲击交界处金相组织形貌

Fig. 3 Rotary impact junction metallography with rotational impulse voltage. (a) 150 V; (b) 160 V; (c) 170 V; (d) 180 V; (e) 190 V

为了对产生组织变化的区域进一步分析,如图4所示,分别为调质态 30CrMnSi 的常规焊接接头软化区和加载了旋转冲击电压为 150 ~ 190 V 的接头软化区显微组织形貌.从图4a中可以看出,常规焊件回火软化区组织为珠光体和层片状铁素体混合组织.从图4b ~ 4f可以看出随着旋转冲击电压的增大,旋转冲击作用区铁素体含量明显增加.依据 Johnson-Mehl-Avrami 相变动力学方程的扩展型^[12],即应力作用下铁素体的等温相变动力学方程

$$f = 1 - \exp(-b(\bar{\sigma})t^n) \quad (1)$$

式中: f 是相变程度; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $b(\sigma)$ 为应力 σ 下的 b 参量; t 是时间;常数 n 与没有应力作用时基本

一致,温度不同 n 值不同.

由旋转冲击带来的应力作用 $\bar{\sigma}$ 随着旋转冲击电压的增加而增大,因此在施加随焊旋转冲击作用后,软化区内铁素体相随旋转冲击电压的增加而增加,反映了以应力所做的功对增加铁素体形核率和孕育期的缩短具有明显效果,旋转冲击作用力使得铁素体的孕育期缩短,继而促进晶粒细化.

随焊旋转冲击试验时旋转冲击作用区温度处于 500 °C 附近,针状铁素体在此温度形核、长大,因此该温度下的力学作用有利于针状铁素体形成,针状铁素体具有良好的力学性能.随着针状铁素体的增加,软化区的力学性能逐渐提高.

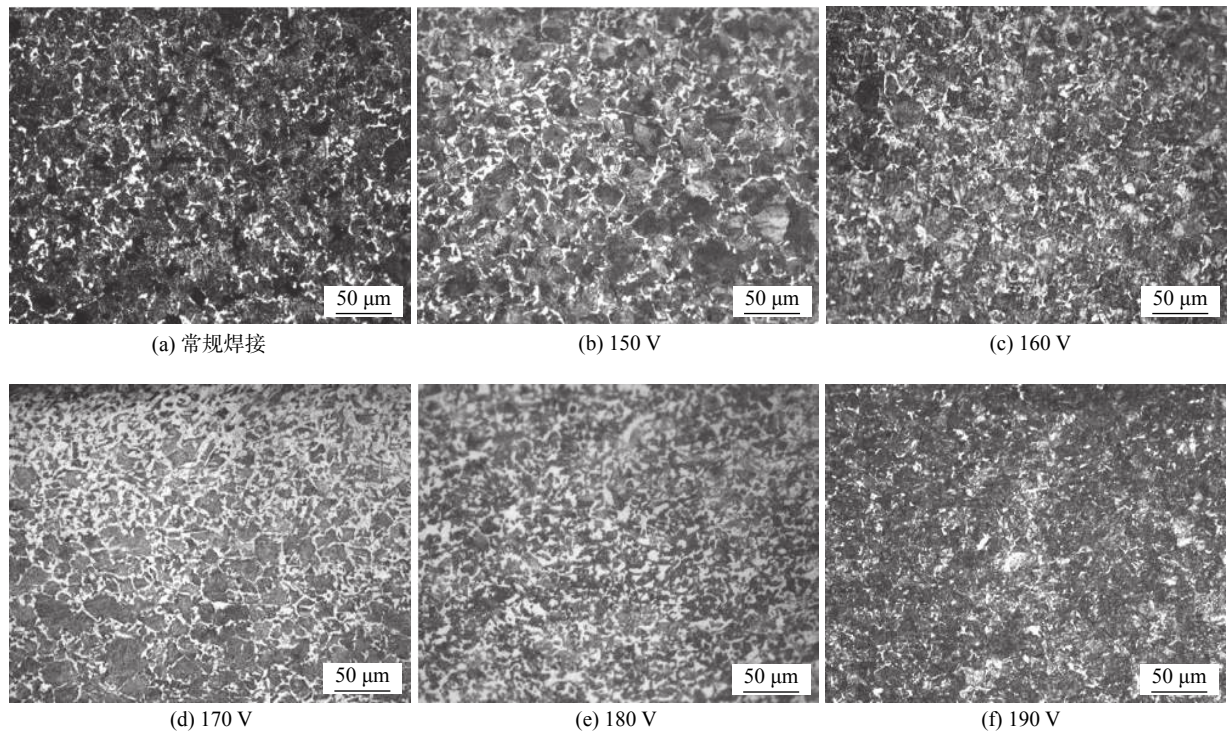


图 4 不同的旋转冲击电压下软化区金相组织形貌

Fig. 4 Metallography of softening zone structure with rotational impulse voltage. (a) conventional welding; (b) 150 V; (c) 160 V; (d) 170 V; (e) 180 V; (f) 190 V

2.3 软化区 C 元素分布与分析

焊接过程中在焊接热循环作用下, 接头热影响区被加热至回火温度以上的区域内会出现碳化物

偏聚长大, 这是形成硬度和强度低于母材的软化区出现的一个原因^[16]. 图 5 为调质态 30CrMnSi 的常规焊接接头软化区和加载了旋转冲击电压为 150 ~

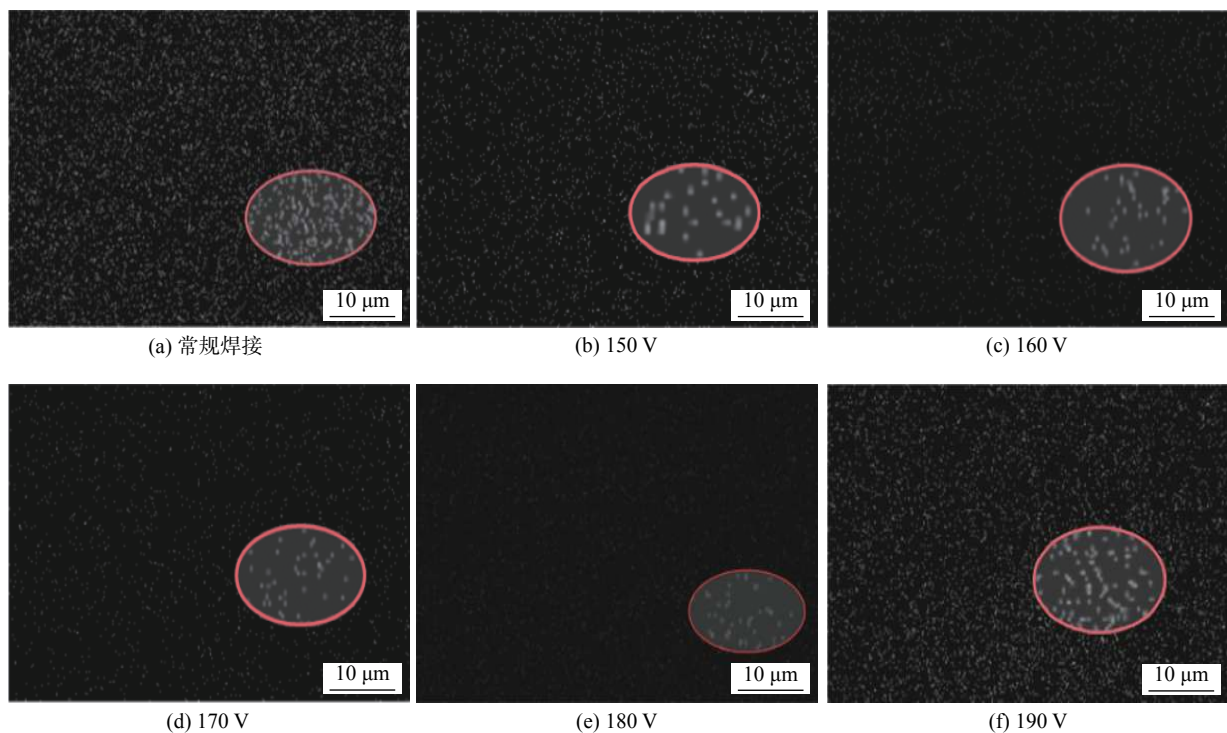


图 5 不同的旋转冲击电压下软化区碳元素面扫描结果

Fig. 5 Scanning results of carbon surface in softening zone with rotational impulse voltage. (a) conventional welding; (b) 150 V; (c) 160 V; (d) 170 V; (e) 180 V; (f) 190 V

190 V 的接头软化区 C 元素面扫描的结果. 由图 5a 可以看出, 常规焊接接头软化区的 C 元素出现局部聚集分布不均匀出现碳化物偏聚长大现象. 由图 5b ~ 5f 可知, 经旋转冲击作用过的试样软化区 C 元素分布整体上更加均匀, 随着加载的旋转冲击电压的增大, 对应的作用区域内碳化物的弥散程度越高.

经过随焊旋转冲击作用的接头软化区内的 C 元素的扩散将受到由随焊旋转冲击作用带来的应力和 C 元素浓度梯度的共同影响. 由菲克第一定律可知, 非均匀体系中碳原子在单位时间内通过垂直扩散方向的单位面积的流量为

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

式中: J 为碳原子的流量; D 为扩散系数; C 为浓度.

如果在均匀体系中存在应力作用, 由于应力所产生的碳原子流量为^[17]

$$J = \frac{DC}{kT} F \quad (3)$$

式中: F 为应力; k 为玻尔兹曼常量; T 为绝对温度. 所以随焊旋转冲击处理后的软化区内碳原子扩散流量 J 为^[17]

$$J = D \left(\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{CF}{kT} \right) \quad (4)$$

随着随焊旋转冲击电压的增大, 接头软化区受到的作用力也随之增大, 导致碳原子的运动速度增大, 碳原子的扩散流量增大, 对应的作用区域内碳原子的弥散分布.

3 结论

(1) 常规焊件接头两侧热影响区均出现硬度低于母材的软化区, 软化区平均硬度值为 218.9 HV, 比母材下降了 33.4 HV, 软化现象明显. 随焊旋转冲击作用的试样软化区平均硬度随着旋转冲击电压增大而增大, 由旋转冲击电压 150 V 的 274.2 HV 增加至旋转冲击电压 190 V 的 310.7 HV, 旋转冲击强化效果较明显, 接头热影响区软化现象得到改善, 接头力学性能得到提升.

(2) 随焊旋转冲击作用的软化区中, 针状铁素体的含量相较于常规焊接接头软化区有明显增多. 随焊旋转冲击作用能够促进作用区域中的组织转变.

(3) C 元素面扫描结果表明, 在随焊旋转冲击作用下, 有利于碳的迁移扩散、消除局部偏聚, 从而抑制了作用区内碳化物局部聚集长大, 使得作用的软化区内性能得到提升.

参考文献

- [1] Lan L, Qiu C, Zhao D, *et al.* Microstructural characteristics and toughness of the simulated coarse-grained heat affected zone of high strength low carbon bainitic steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 529: 192 – 200.
- [2] 张熹, 董现春, 陈延清, 等. Q690CFD 钢粗晶区再热脆化研究[J]. *钢铁*, 2010, 45(11): 86 – 89.
Zhang Xi, Dong Xianchun, Chen Yanqing, *et al.* Study on reheat embrittlement in coarse grain region of heat affected zone of Q690CFD steel[J]. *Iron & Steel*, 2010, 45(11): 86 – 89.
- [3] Liu B, Qu J X, Sun W J. Effects of thermal cycle on mechanical properties and fract-ography in HAZ of HQ130 steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2004, 17(3): 274 – 278.
- [4] Kim S, Kang K, Lee C. Variation in microstructures and mechanical properties in the coarse-grained heat-affected zone of low-alloy steel with boron content[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 559: 178 – 186.
- [5] 张楠, 田志凌, 张书彦, 等. 700 MPa 微合金高强度钢焊接软化机理及解决方案[J]. *钢铁研究学报*, 2019, 31(3): 318 – 326.
Zhang Nan, Tian Zhiling, Zhang Shuyan, *et al.* Welding softening mechanism and solution of 700 MPa micro alloy high strength steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2019, 31(3): 318 – 326.
- [6] 李学军, 黄坚, 潘华, 等. QP1180 高强度钢薄板激光焊接接头的组织与成形性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 72 – 79.
Li Xuejun, Huang Jian, Pan Hua, *et al.* Micro-structure and forming performance of QP1180 high strength steel sheet laser welded joint[J]. *China Laser*, 2019, 46(3): 72 – 79.
- [7] 雷振, 王旭友, 滕彬, 等. JFE980S 高强度钢焊接接头软化分析[J]. *焊接学报*, 2010, 31(11): 33 – 37.
Lei Zhen, Wang Xuyou, Teng Bin, *et al.* Softening analysis of welded joints in high strength steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(11): 33 – 37.
- [8] 蔡啸涛. Q690MPa 级高强度钢焊接方法与工艺要点分析[J]. *科技创新导报*, 2018, 15(3): 112 – 114.
Cai Xiaitao. Analysis on welding method and process points of Q690MPa high strength steel[J]. *Science and Technology Innovation Guide*, 2018, 15(3): 112 – 114.
- [9] 安同邦, 田志凌, 单际国, 等. 后热温度对 1 000 MPa 级高强度焊缝组织与性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(4): 40 – 46.
An Tongbang, Tian Zhiling, Shan Jiguo, *et al.* Effect of post-weld heat treatment temperature on weld microstructure and properties of 1000MPa high strength steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*

- earing, 2015, 51(4): 40 – 46.
- [10] 范成磊, 方洪渊, 田应涛, 等. 随焊冲击碾压对 LY12CZ 铝合金接头组织和性能的影响 [J]. *材料工程*, 2004(10): 24 – 28.
Fan Chenglei, Fang Hongyuan, Tian Yingtao, *et al.* Effect of impact rolling with welding on microstructure and properties of LY12CZ aluminum alloy joints[J]. *Materials Engineering*, 2004(10): 24 – 28.
- [11] 管建军, 杨男, 钟宏远, 等. 随焊加载冷源或位移控制载荷的无应力焊接方法 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(1): 91 – 96.
Guan Jianjun, Yang Nan, Zhong Hongyuan, *et al.* Principle of stress-free welding with cold source or displacement-controlled load[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(1): 91 – 96.
- [12] 徐祖耀. 应力作用下的相变 [J]. *热处理*, 2004(2): 1 – 17.
Xu Zuyao. Phase transition under stress[J]. *Heat Treatment*, 2004(2): 1 – 17.
- [13] 张勇, 綦秀玲. 随焊冲击旋转挤压控制 LD10 薄板件焊接变形和热裂纹的研究 [J]. *中国机械工程*, 2013, 24(13): 1817 – 1820.
Zhang Yong, Qi Xiuling. Control of welding residual deformation and hot crack of LD10 thin plate by welding with impacting rotate on compression[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(13): 1817 – 1820.
- [14] 李立英. ASTM4130 钢焊接热影响区组织与性能研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
Li Liying. Study on microstructure and properties in heat-affected zone of ASTM4130 steel[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [15] 万响亮, 李光强, 吴开明. 低合金高强度钢针状铁素体组织特征和形成机理 [J]. *钢铁研究学报*, 2016, 28(6): 1 – 12.
Wan Xiangliang, Li Guangqiang, Wu Kaiming. Microstructure characteristics and formation mechanism of acicular ferrite in high-strength low-alloy steels[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2016, 28(6): 1 – 12.
- [16] 魏世同, 孙健, 刘景武, 等. V 含量及回火工艺对高强度钢 TIG 熔敷金属组织性能的影响 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(11): 1 – 6.
Wei Shitong, Sun Jian, Liu Jingwu, *et al.* Effect of V content and tempering treatment on microstructure and mechanical properties of the high strength steel TIG weld metal[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(11): 1 – 6.
- [17] 冯端. 金属物理学 (第一卷 结构与缺陷)[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Feng Duan. Physics of metals (volume 1, structure and defects)[M]. Beijing: Science Press, 2017.

第一作者: 张勇, 博士, 副教授; 主要从事焊接结构及工艺方面的科研和教学工作; Email: zhangyongdiyi@163.com.

(编辑: 郑红)