

DP980 激光焊接温度场模拟及力学性能

贾 强¹, 郭 伟¹, 彭 鹏¹, 朱 颖¹, 邹贵生²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191)

(2. 清华大学, 北京 100084)

摘 要: 采用光纤激光焊接高强钢 DP980, 并对温度场分布进行有限元计算。结果表明, 焊缝中心热循环温度高达 3204 °C, 迅速冷却后形成马氏体组织, 硬度较母材提高 30%, 抗拉强度达到了 1115.7 MPa, 延伸率相对母材下降 49.1%。回火区应力应变曲线存在明显的屈服平台, 抗拉强度 (850.7 MPa) 明显低于母材 (986.9 MPa)。焊接接头抗拉强度为母材的 87.1%, 延伸率为母材的 32.7%。焊接接头拉伸试样和杯突试样均断于回火区。焊接接头的杯突值较母材下降 32.58%, 母材主应变值高于焊接接头。

关键词: 高强钢; 激光焊接; 有限元模拟; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)07-1905-07

自 2000 年以来, 中国汽车工业发展跨入了快车道。随着汽车产量持续攀升, 燃油消耗、排放和安全成为日渐突出的社会问题。汽车轻量化是减少燃油消耗和降低排放的有效途径。大量实验表明汽车自重每降低 10%, 油耗下降 6%~8%^[1]。各种高强度的轻量化材料能够减轻自重同时又能保证汽车安全。双相钢 (dual-phase steel) 一般是指在铁素体基体上均匀分布着一定量的马氏体, 通常由低碳钢或低合金钢经临界区处理或控轧控冷而得到。马氏体与铁素体的双相组合提高了材料的强度, 同时具有较高的协调变形能力, 保证了材料的塑性和韧性。与其他轻量化材料相比, 其生产工艺简单, 冲压成形性能良好, 具有非常高的强度和良好的韧性, 在汽车制造中具有广阔的应用前景^[2]。

焊接是汽车制造过程中最常用的连接工艺。大量研究表明, 双相钢在焊接过程中热影响区产生不同程度的软化。该软化效应是由于母材中已有的马氏体组织受热发生回火并生成强度较低的回火马氏体所致^[3]。热影响区的软化效应恶化了双相钢焊接接头的一系列力学性能, 例如, 抗拉强度、疲劳强度、成形性能等。双相钢焊接热影响区软化的程度主要取决于焊接工艺和双相钢的强度等级。激光焊接由于具有焊接效率高、深宽比大、接头质量优异和自动化程度高等一系列优点, 在汽车制造中正逐渐取代电阻焊、电弧焊等传统焊接技术^[4,5]。同时, 激光焊接的高能量密度优势可以

极大的降低热影响区的软化程度^[6]。高强度的双相钢能够有效促进汽车轻量化发展。目前国内针对 980 MPa 级别的双相钢 (DP980) 激光焊接接头组织和常规拉伸性能已有部分研究^[7,8], 但是针对焊接热循环以及焊接接头的断裂还缺少研究, 因此研究高强钢 DP980 的激光焊接对我国汽车轻量化进程具有重要的意义。

与半导体激光、CO₂ 激光等激光相比, 光纤激光具有更高的能量密度, 能够更有效地降低焊接接头热影响区的软化程度。试验采用光纤激光对 DP980 双相钢进行了对接。由于激光焊接焊缝及热影响区都非常窄, 常规热电偶测量热循环曲线存在热电偶焊点过大以及定位不精确等问题。本研究通过有限元模拟了实际焊接过程中的热循环, 并与焊接接头的微观组织相对应。分析了焊接接头局部以及整体的拉伸性能、成形性能, 讨论了焊接接头的断裂机制, 旨在为激光焊接在双相钢的应用提供理论基础。

1 实 验

试验采用 DP980 镀锌钢板, 厚度为 1.2 mm, 利用线切割加工成 100 mm×200 mm。DP980 主要化学成分如表 1 所示, DP980 母材组织如图 1 所示。图 1a 为 DP980 在光学显微镜 (OM) 下的组织, 其中白色块状组织为铁素体, 黑色网状组织为马氏体; 图 1b 为

收稿日期: 2016-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50705050); 国家国际科技合作专项 (2013DFR50590; 2015DFA51460)

作者简介: 贾 强, 男, 1991 年生, 硕士生, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191, 电话: 010-82317712, E-mail: jiaqiang0510@163.com

表 1 DP980 的化学成分

Table 1 Chemical composition of DP980 (ω/%)

C	Mn	Si	Al	Cr	Mo	Cu	Fe
0.15	1.5	0.31	0.05	0.02	0.05	0.02	Balance

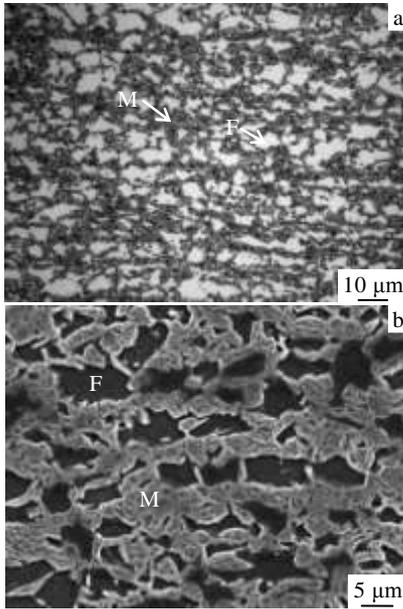


图 1 DP980 双相钢的微观组织

Fig.1 Microstructure of DP980 (F: Ferrite; M: Martensite):

(a) OM and (b) SEM

DP980 在扫描电镜 (SEM) 下的组织, 白色凸起部分是比较硬的马氏体组织, 黑色凹下部分为较软的铁素体组织。

温度场有限元计算采用 ABAQUS 6.14 软件。考虑到拼焊板的对称性, 为了减少计算量, 所建模型为实际拼焊板的一半 (100 mm×200 mm)。焊缝附近网格尺寸较小 (0.2 mm×0.25 mm×0.5 mm), 由焊缝到母材网格尺寸逐渐变大。热源模型采用高能束焊接常用的锥形热源。本工作所用热源模型任意一点(x, y, z)的热生成率 Q 为:

$$\begin{cases} Q(x, y, z) = \frac{2\eta Pe}{\pi r_e^2 h} \exp\left(\frac{-r^2}{r_0^2}\right) \\ r^2 = x^2 + y^2 \\ r_0 = r_i + \frac{(r_e - r_i)z}{h} \end{cases} \quad (1)$$

式中, η 是激光吸收效率, P 是激光功率, r_e 是焊缝上表面的半宽, r_i 是焊缝下表面的半宽, h 是焊缝熔深^[9]。该热源模型将焊缝形貌作为热源参数, 能够更准确的模拟温度场的分布。边界条件考虑激光的加热, 材料表面的对流换热与辐射换热。随着温度的升高, 辐射换热越强烈, 而对流换热相对较弱。为了计算方便,

将对流换热与辐射换热折合成随温度变化的综合换热系数。另外相变潜热对温度场分布影响也很大, 在 ABAQUS 计算时采用等效比热容的方法加入相变潜热因素。DP980 的密度为 7840 kg/m³, 固相线温度为 1468 °C, 液相线为 1514 °C, 熔化潜热为 2.46 ×10⁵ J/kg。比热容和热导率随温度变化而变化, 如表 2 所示。

采用德国 IPG 公司生产的 IPG Photonics YLS-6000 (最大功率 6 kW) 光纤激光器进行激光焊接, 焊接工艺参数如表 3 所示, 焊接过程无气体保护, 接头形式采用对接。焊前采用数控铣床制备待焊接面, 并用丙酮对试样边缘进行清洗, 焊接示意图如图 2 所示, 焊接方向垂直于母材轧制方向, 采用连续激光模式进行焊接。

焊后在垂直于焊缝截面取金相试样, 经不同型号砂纸逐级打磨、镶样、抛光后, 用 3% 硝酸乙醇溶液腐蚀。利用光学显微镜 Axio Scope.A1 和扫描电镜 JSM 6010 进行显微组织观察, 利用 FM-800 显微硬度计测量硬度, 施加载荷为 200 g, 持续时间为 15 s。

按照标准 ASTM: E8/E8M 垂直于焊缝方向制备拉伸试样, 焊缝位于试样中间, 平行端宽度为 6 mm, 长

表 2 DP980 热物理性能

Table 2 Thermo-physical properties of DP980 steel

Temperature/°C	25	125	325	525	725	925	1225
Specific heat capacity, t/ J (kg · K) ⁻¹	449	491	572	675	961	607	651
Thermal conductivity/ W (m · K) ⁻¹	69.5	66.5	55.1	44.3	40.5	36.6	36.6

表 3 DP980 激光焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters used for DP980

Laser power/kW	Welding speed/m min ⁻¹	Defocusing amount/mm	Spot diameter/mm
4	1	0	0.6

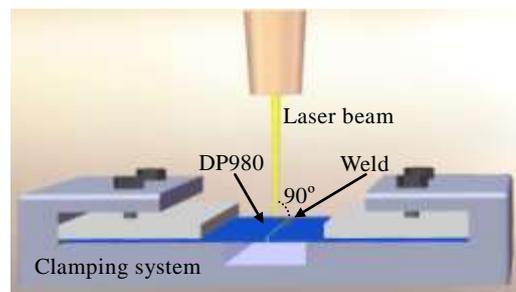


图 2 焊接试样装配示意图

Fig.2 Schematic illustration of the welded blank

度为 32 mm。在室温下采用万能试验机 INSTRON8801 进行拉伸试验, 应变速率 0.001 s^{-1} 。拉伸性能取 3 组试样的平均值。采用美国 ABE 公司生产的三维白光干涉表面形貌仪对拉伸试样变形进行测量。依据 GB/T4156-2007 进行 Erickson 杯突试验, 试样尺寸为 $90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$, 冲压速度 10 mm/min 。

2 结果与讨论

2.1 焊接温度场分布及组织演变

图 3a 为有限元模拟激光焊接时接头区域的温度场分布。将熔池截面的温度场分布与试验接头截面微观形貌进行对比, 如图 3b 所示, 模拟结果与试验焊缝形貌吻合较好。根据微观组织的不同, 焊接试样分为母材、热影响区和焊缝 3 部分。随着与焊缝中心距离的增大, 焊接热循环的最高温度依次下降。焊缝已经完全熔透, 焊缝区域未发现气孔和裂纹等缺陷(图 3)。为了进一步研究焊缝及热影响区组织变化, 提取各个区域的热循环曲线如图 4 所示^[10]。焊缝中心热循环温度最高, 达到 $3204 \text{ }^\circ\text{C}$, 激光焊接具有加热速度快, 冷却迅速的特点(图 4), 焊缝区域组织受热奥氏体化后, 其冷却速度远大于马氏体转变的临界冷却速度, 奥氏体组织淬火转变成马氏体组织^[11]。因此焊缝区域组织主要是马氏体组织, 如图 5 所示。

根据所经历最高温度的不同, 热影响区细分为淬火区、不完全淬火区以及回火区(分别对应图 3b 中 A、B、C 3 个位置)^[12]。图 6 为 DP980 焊接接头热影响区组织。淬火区(图 3b 中 A 区域)靠近熔合线, 焊

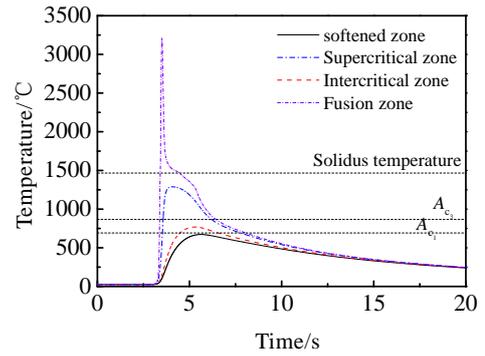


图 4 有限元模拟热循环曲线

Fig.4 Simulated thermal cycles

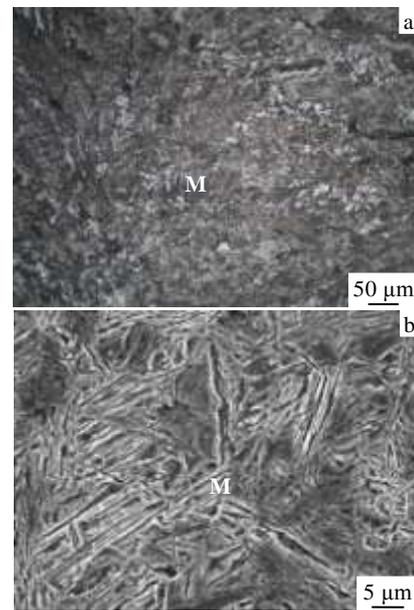


图 5 焊缝区微观组织

Fig.5 Microstructures of the weld zone (M: Martensite): (a) OM and (b) SEM

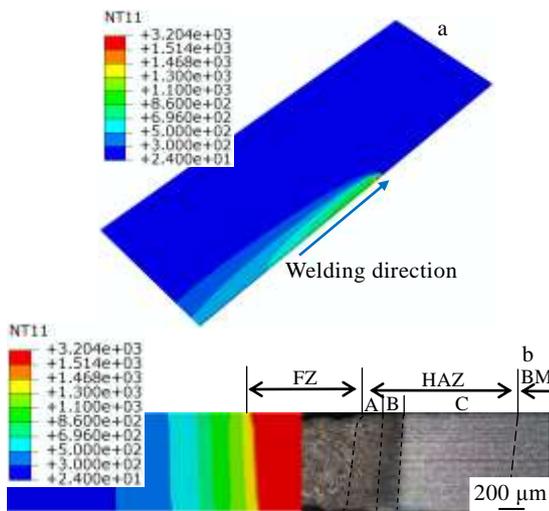


图 3 焊接温度场分布及接头形貌

Fig.3 Temperature field (a) and cross-section (b) of welded joint (A: supercritical zone; B: intercritical zone; C: softened zone)

接时温度超过了 A_{C3} 温度(图 4), 该区域原始母材组织完全奥氏体化, 如图 6a、6b 所示, 淬火区组织主要为针状马氏体。不完全淬火区(图 3b 中 B 区域)焊接时所受最高温度在 $A_{C1} \sim A_{C3}$ 之间(图 4), 该区域组织部分奥氏体化, 因此该区域最终组织为铁素体和马氏体^[12], 如图 6c、6d 所示。回火区(图 3 中 C 区域)靠近母材且焊接过程中最高温度低于 A_{C1} , 宽度大约为 1.5 mm 。该区域母材中原有马氏体发生回火, 伴随碳化物(Fe_3C)的析出生成回火马氏体^[13], 最终组织为铁素体和回火马氏体, 如图 6e、6f 所示。

2.2 焊接接头硬度分布

图 7 为 DP980 焊接接头显微硬度分布。可以看出, 焊缝硬度最高, 较母材硬度 HV (3300 MPa) 提高约

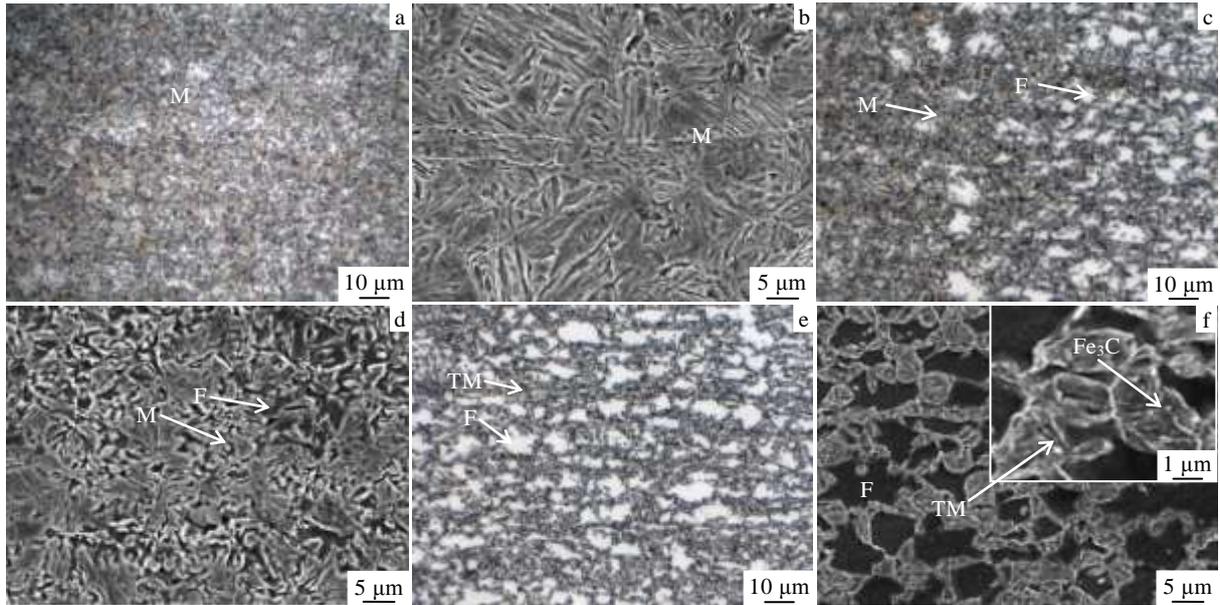


图 6 热影响区微观组织

Fig.6 Microstructures of heat affected zone (M: Martensite; F: Ferrite; TM: Tempered martensite): (a) supercritical zone (OM); (b) supercritical zone (SEM); (c) intercritical zone (OM); (d) intercritical zone (SEM); (e) softened zone (OM); (f) softened zone (SEM)

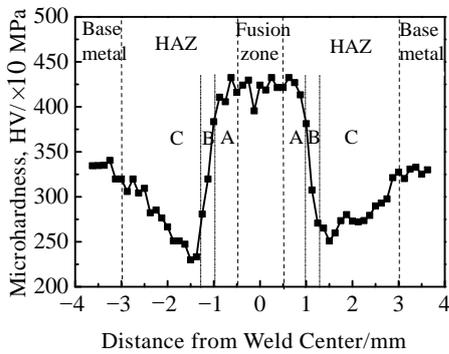


图 7 DP980 焊接接头硬度分布

Fig.7 Microhardness profile of the DP980 weld joint (A: supercritical zone; B: intercritical zone; C: softened zone)

30%。这是因为熔池凝固时大量奥氏体转化成高硬度的马氏体。焊缝两侧淬火区、不完全淬火区硬度迅速下降，回火区硬度最低，较母材下降 33%。结合热影响区组织分布可知，随着与熔合线距离的增大，焊接过程中冷却速度依次降低，导致了马氏体含量的变化。淬火区马氏体含量高于母材，硬度较母材有所上升。回火区马氏体发生回火生成塑性、韧性较好的回火马氏体，降低了该区域的硬度，因此回火区也被称为软化区。软化区的存在对焊接接头的拉伸性能、疲劳性

能、成形性能等产生了不同程度的影响^[14]。

2.3 焊接接头拉伸性能

对 DP980 焊接接头硬化区域焊缝以及软化区域回火区进行了局部区域的拉伸性能测试，其中焊缝的拉伸性能通过微小拉伸试样测得。由于回火区精确定位困难，难以直接加工拉伸试样，因此采用图 4 所示焊接热循环曲线，用热模拟试验机 Gleeble1500 进行回火区的热模拟，并对热模拟试样进行拉伸试验以代表回火区的拉伸性能。焊缝、回火区、焊接接头以及母材的应力应变曲线如图 8 所示。DP980 母材应力应变曲线无明显屈服平台，这是由于双相钢在制造的过程中，奥氏体急冷转变为马氏体时伴随着体积膨胀，生成了大量可移动位错所致^[15]。DP980 焊接接头应力应变曲线具有类似规律。焊缝的抗拉强度达到了 1115.7 MPa，延伸率相对母材下降 49.1%，这是因为焊缝中的高硬度马氏体组织影响了拉伸过程中应变的分布。回火区应力应变曲线存在明显的屈服平台，抗拉强度（850.7 MPa）明显低于母材（986.9 MPa）。因此，回火区的存在最终降低了焊接接头抗拉强度，抗拉强度为母材的 87.1%，焊接接头发生断裂时应变远小于母材断裂时的应变。

2.4 焊接接头断裂分析

焊接接头拉伸试样均断在热影响区中的回火区，且断口呈 45°斜向并发生明显的屈服变形，如图 9a 所

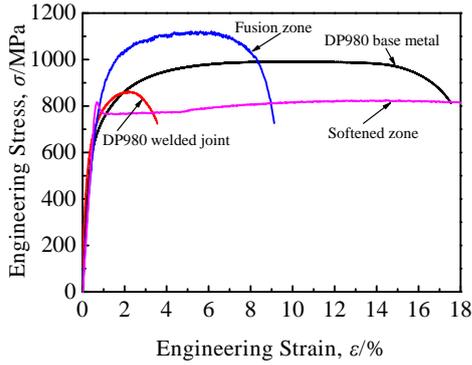


图 8 工程应力应变曲线
Fig.8 Engineering stress-strain curves

示。对断后试样未发生破坏一侧变形进行测量 (图 9a 中虚线区域), 拉伸试样厚度方向变形如图 9b 所示。可以看到, 回火区相对两侧的母材及不完全淬火区发生了明显变形, 宽度方向收缩长度高达 107 μm。焊接试样的其它部位 (母材、焊缝等) 并没有发生明显变形, 拉伸试样协调变形的能力降低, 因此与母材拉伸相比, 塑性变形量较小, 延伸率为母材拉伸的 32.7%。在拉伸过程中, 变形首先集中在回火区, 随后发生屈服。该区域成为整个接头的薄弱部位并发生断裂^[16]。断口处拉伸变形后的组织如图 9c 所示, 由于铁素体与回火马氏体组织的力学性能存在差异, 拉伸过程中发生不协调变形, 裂纹源主要集中在铁素体与回火马氏体的相界面。回火区与不完全淬火区交界 (A_c1 温度线) 附近同样发现微裂纹存在 (图 9d), 这可能是该处为微观组织过渡区, 力学性能不均匀导致。

母材及焊接接头靠近试样表面处断口形貌如图 10 所示。可见, 二者断口都有大量韧窝存在, 属于典型的韧性断裂^[11]。观察发现, 母材断口韧窝多为均匀的等轴韧窝, 而焊接接头由于断在热影响区的回火区, 组织并不均匀, 导致断口韧窝大小不一, 深浅也不尽相同。

2.5 杯突试验

为了比较拼焊板与母材的冲压性能, 对母材和焊接接头进行杯突试验。结果表明, 母材的平均杯突值为 8.81 mm, 焊接接头的平均杯突值为 5.94 mm, 较母材下降 32.58%。如图 11 所示, 焊接接头杯突试验裂纹发生在热影响区回火区位置, 这与拉伸试样失效位置一致。热影响区回火区强度相对于两侧的焊缝和母材强度较低, 因此在杯突试验过程中成为薄弱位置^[17]。

根据试验后网格的变形, 垂直于裂纹方向 (图 11 虚线位置) 测量主应变大小。结果如图 12 所示, 母材

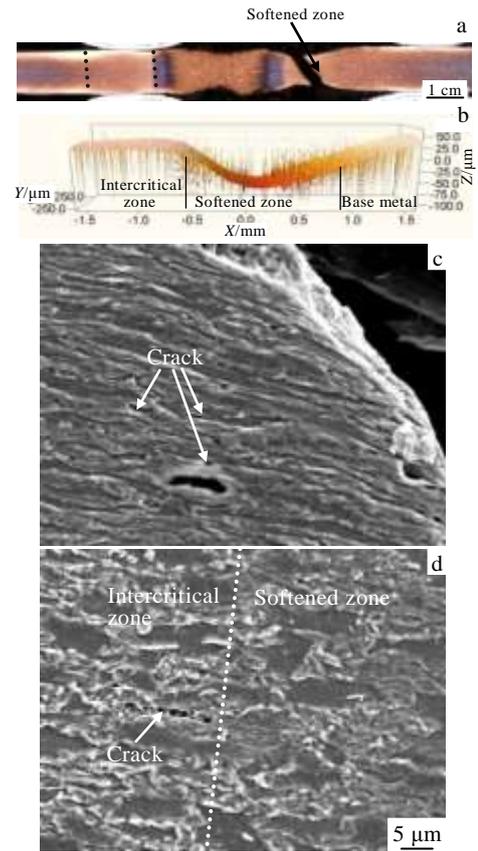


图 9 拉伸试样变形
Fig.9 Deformation of tensile sample: (a) failed sample of welded joint; (b) deformation in width direction; (c) SEM image near the fracture; (d) SEM image of softened zone and intercritical zone

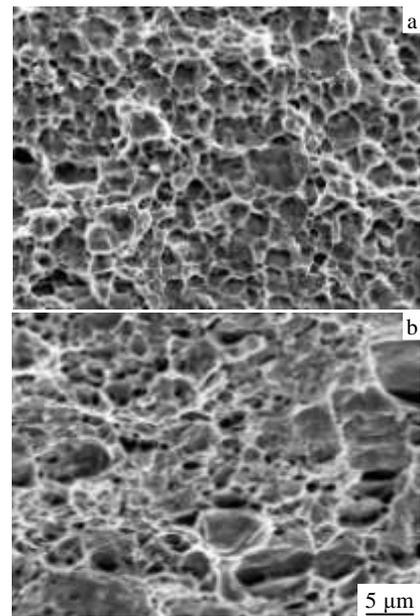


图 10 拉伸断口表面形貌
Fig.10 Microstructures of fracture surface: (a) base metal and

(b) welded joint

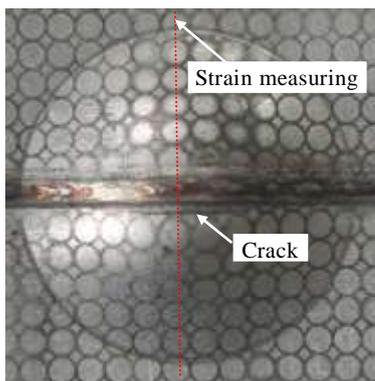


图 11 DP980 焊接接头杯突试样

Fig.11 Deformed samples of welded joint after Erichsen test

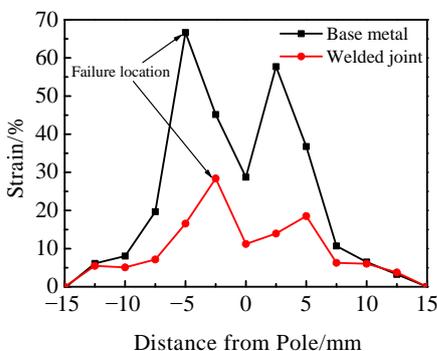


图 12 焊接接头与母材不同位置主应变

Fig.12 Major strain distribution of welded joint and base metal

由于没有硬化的焊缝以及相对薄弱的热影响区，因此主应变值高于焊接接头。对于母材和焊接接头，最大主应变均处于断裂位置，而杯突极点位置的应变相对较低。

3 结 论

1) 焊缝中心热循环温度高达 3204 °C，组织主要是马氏体，硬度较母材提高 30 %。热影响区根据热循环最高温度的不同可以分为淬火区、不完全淬火区以及回火区。回火区马氏体发生分解，硬度较母材下降 33%。

2) 焊缝的抗拉强度达到了 1115.7 MPa，延伸率相对母材下降 49.1%。回火区应力应变曲线存在明显的屈服平台，抗拉强度(850.7 MPa)明显低于母材(986.9 MPa)。焊接接头抗拉强度为母材的 87.1%。

3) DP980 焊接接头拉伸塑性变形主要集中在回火区，与之相邻的母材及不完全淬火区变形量很小。焊后拉伸试样断于回火区，延伸率为母材拉伸的 32.7%。

焊接接头断口存在大量不均匀韧窝，属于典型的韧性断裂。

4) DP980 焊接接头的杯突值较母材下降 32.58%，裂纹发生在回火区。母材主应变值高于焊接接头。母材和焊接接头最大主应变均处于断裂位置，杯突极点位置的应变相对较低。

参考文献 References

[1] Hu Zhaohui(胡朝辉). *Thesis for Doctor*(博士论文)[D]. Changsha: Hunan University, 2010

[2] Huang Qunfei(黄群飞), He Yanlin(何燕霖), Li Lin(李麟). *Heat Treatment Technology and Equipment*(热处理技术与装备)[J], 2007, 28(3): 11

[3] Baltazar Hernandez V H, Nayak S S, Zhou Y. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2011, 42(10): 3115

[4] Li Yaling(李亚玲), Huang Jian(黄坚), Gao Zhiguo(高志国) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2008, 35(12): 2047

[5] Lee J H, Park S H, Kwon H S *et al. Materials & Design*[J], 2014, 64: 559

[6] Wei Jing(魏菁), Wang Huang(王欢), Shi Shaojian(石少坚) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2016, 43(3): 50

[7] Wang Jinfeng(王金凤), Wang Lijun(王立君), Yang Lijun(杨立军) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2014, 41(9): 89

[8] Qiu Rongpeng(裘荣鹏). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2015, 21: 226

[9] Liu C, Zhang J X, Niu J. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2009, 38(8): 1317

[10] Zeng Z, Li X, Miao Y *et al. Computational Materials Science* [J], 2011, 50(5): 1763

[11] Saha D C, Westerbaan D, Nayak S S *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2014, 607: 445

[12] Dong D, Liu Y, Yang Y *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2014, 594: 17

[13] Baltazar Hernandez V H, Panda S K, Okita Y *et al. Journal of Materials Science*[J], 2010, 45(6): 1638

[14] Farabi N, Chen D L, Li J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527(4-5): 1215

[15] Farabi N, Chen D L, Zhou Y. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2012, 21(2): 222

[16] Xu W, Westerbaan D, Nayak S S *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2012, 553: 51

[17] Bandyopadhyay K, Panda S K, Saha P *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2016, 652: 250

Temperature Field Simulation and Mechanical Properties of Laser Welded DP980 Steel Joints

Jia Qiang¹, Guo Wei¹, Peng Peng¹, Zhu Ying¹, Zou Guisheng²

(1. Beihang University, Beijing 100191, China)

(2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: High strength steel DP980 was welded using fiber laser, and the temperature field was evaluated via numerical simulation. The results reveal that the peak temperature of weld center reached 3204 °C and then martensite microstructure forms after rapid cooling. The fusion zone mainly contains martensitic microstructure with hardness 30% higher than that of the base metal. The ultimate tensile strength of the fusion zone reaches 1115.7 MPa, while the elongation is decreased by 49.1% compared with that of the base metal. The stress-strain curve of the softened zone exhibits obvious yield platform, and the ultimate tensile strength (850.7 MPa) is significantly lower than that of the base metal (986.9 MPa). The ultimate tensile strength of the welded joint reaches 87.1% of that of the base metal, while the elongation reaches 32.7% of that of the base metal. All the tensile and Erichsen test samples fail at the softened zone. The major strain of the base metal is higher than that of the welded joint.

Key words: high-strength steel; laser welding; finite element modeling; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Peng Peng, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82317712, E-mail: ppeng@buaa.edu.cn