热处理工艺参数对超高强度钢性能的影响

黄超群¹,肖贵乾²

(1. 重庆工商职业学院 智能制造与汽车学院,重庆 401520;
 2. 重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044)

摘要:目的研究热处理工艺参数对BR1500HS 超高强度钢的微观组织、拉伸断口以及力学性能的影响, 并且研究保温时间和加热温度对淬火后的硬度、抗拉强度、微观组织以及伸长率等的影响规律。方法将 BR1500HS 加热到一定温度,并保温使得试样充分奥氏体化,随后在水中冷却,并测试冷却后的材料力学 性能。此外,将克立金模型引入用于近似加热温度、保温时间与硬度、抗拉强度、伸长率之间的关系,用 NSGA-Ⅱ多目标遗传算法优化代理模型。结果 当保温时间一定时,硬度随着加热时间的增加先增加后减小、 抗拉强度先增加后减小最后趋于平稳;当加热温度一定时,硬度随保温时间的增加先增加后减小、 当加热温度不同时,抗拉强度随保温时间的变化规律不同;当加热温度在 950 ℃以下时,随着保温时间的增加而 增加;当加热温度在 950~1000 ℃时,随着保温时间的增加先增加后减小。结论 采用实验和代理模型的优 化结果的误差较小,对 BR1500HS 超高强度钢的热处理工艺具有一定的指导作用。

关键词:超高强度钢;热处理;多目标优化;NSGA-Ⅱ

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.018

中图分类号: TG161 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2021)04-0127-06

Effect of Heat Treatment Parameters on the Properties of Ultra-High-Strength Steel

HUANG Chao-qun¹, XIAO Gui-qian²

 Institute of Intelligent Manufacturing and Automotive, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the effect of heat treatment process parameters on microstructure, tensile fracture and mechanical properties of BR1500HS ultra high strength steel, and to study the effect of holding time and heating temperature on hardness, tensile strength, microstructure and elongation after quenching. BR1500HS was heated to a certain temperature, and the sample was fully austenitized by holding, then cooled in water, and the mechanical properties of the material after cooling were tested. In addition, Kriging model is introduced to approximate the relationship between heating temperature, holding time and hardness, tensile strength and elongation, and NSGA- II multi-objective genetic algorithm is used to optimize the surrogate model. The results show that when the holding time is fixed, the hardness first increases and then decreases, the tensile strength first increases and then decreases, and finally tends to be stable with the increase of heating time. When the heating temperature is inconstant, the change of tensile strength with holding time is different; When the heating temperature is below 950 °C, it increases with the increase of holding time. The results of experiment and surrogate model show that the error is small, which can guide the heat treatment process of BR1500HS ultra-high strength steel.

收稿日期: 2021-03-22

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1106504);重庆工商职业学院科研项目(ZD2016-01)

作者简介:黄超群(1981-),女,硕士,副教授,主要研究方向为材料加工工程。

KEY WORDS: ultra-high-strength steel; heat treatment; multi-objective optimization; NSGA- II

车身覆盖件的轻量化设计是汽车轻量化设计的 核心内容之一,而超高强度钢材的使用是车身轻量化 设计的有效途径。国内外学者对超高强钢的热成形技 术进行了比较深入的研究。李学涛等[1]利用扫描电镜 及能谱仪,研究了不同保温时间对热冲压后镀层组织 及镀层中裂纹的影响,找出了热冲压时减少裂纹产生 的工艺参数。M. Naderihe 等^[2]研究冷却速率对不同高 强钢的热成形性能的影响,其研究表明冷却速率较 高时,马氏体含量较高,但是成形性能较差。梁江 涛等[3]研究了超高强度热成形钢的应变速率敏感性, 结果表明超高强度热成形钢在低应变速率时应变敏 感性不高,高应变速率下应变速率敏感性较大。杨涛 等^[4]利用计算机仿真软件分别对涂层板在一般加热 工艺和多梯度控温工艺下的升温曲线进行模拟,并通 过试验对计算模型进行了修正。姜超^[5]研究了汽车超 高强钢件热冲压强化机理,较好解释了超高强钢热成 形强化的原因。张勇^[6]研究了 BR1500HS 超高强度钢 热冲压工艺仿真,其结果表明热-力-相耦合的有限元 模型可以有效预测微观组织。李沁阳^[7]使用 LS-DYNA对 BR1500HS 热轧钢 U 形件热冲压进行模 拟,并用试验进行验证,结果表明,成形温度分别为 810 ℃和 840 ℃时, U 形件组织几乎都转变为马氏体 且晶粒较小,具有较高的抗拉强度。尚欣等^[8]通过高 温拉伸实验研究超高强度钢 BR1500HS 不同变形参 数对真应力-真应变曲线及抗拉强度的影响,研究结 果表明,不同变形参数对抗拉强度、流变应力的影响

规律不同,增大变形温度或减小应变速率均可减小材料流变应力。

尽管许多学者都对超高强度钢的热成形进行了 研究^[9],但其基础性能的研究却还是比较有限。文中 将超高强钢热成形基础性能作为研究对象,研究淬 火工艺参数对材料的微观组织和力学性能的影响, 得到了 BR1500HS 超高强度钢的最佳热成形工艺参 数,为 BR1500HS 超高强度钢的工业应用提供指导 作用。

1 实验

所用材料为 BR1500HS 超高强度钢,通常被用于 汽车覆盖件中强度要求较高的构件^[14]。BR1500HS 的 Ac1 温度大约为 689.5 ℃, Ac3 温度大约为 853.4 ℃, 临界冷却速度大约为 20 ℃/s。其化学成分如表 1 所示。

BR1500HS 超高强钢中加入了微量的硼元素,其可以提高钢材的淬透性从而提高材料的强度,使钢淬火后的强度达到 1800 MPa。淬火试样的尺寸为 160 mm×40 mm,淬火后的拉伸试样按照 GB/T 228— 2002 进行制样。硬度观察试样的尺寸为 10 mm× 10mm,金相试样尺寸为 20 mm×10 mm。

如图 1 所示,淬火前钢材的组织为带状组织,淬 火后钢材的组织为块条状马氏体。BR1500HS 淬火后 的抗拉强度得到显著提升,屈服现象不明显,弹性模 量变化较小。

表 1 BR1500HS 的化学元素含量(质量分数) Tab.1 Chemical Composition of BR1500HS (mass fraction) % С Si Mn S Ρ Cr Al Ti В 0.19~0.25 0.40 1.10~1.4 0.015 0.025 0.15~0.35 0.02~0.06 0.02~0.05 0.0008~0.005 1800 为了研究工艺参数对超高强钢力学性能的影响。 淬火前



1600

1400

1200

1000 800

600

並力/MPa

淬火后

Fig.1 Structure and stress-strain curve of BR1500H before and after quenching

为了研究工艺参数对超高强钢力学性能的影响, 将 BR1500HS 加热到一定温度,并保温使试样充分奥 氏体化,随后在水中冷却,并测试冷却后材料的力学 性能,实验需要的设备有加热炉、拉伸试验机、硬度 仪、金相测试仪等。

2 工艺参数对材料性能的影响

2.1 加热温度对材料微观组织的影响

由图 2 可知,加热温度直接决定了奥氏体化的程 度。为了研究奥氏体化程度对材料力学性能的影响, 将 BR1500HS 钢加热到不同温度并保温 120 s 后进行 淬火,其加热温度从 750 ℃到 1000 ℃间隔 50 ℃进行 取值。



e 950 ℃ 图 2 不同加热温度淬火金相组织 Fig.2 Metallographic at different heating temperatures

如图 2 所示,不同加热温度淬火后的金相组织不 同,当加热温度为 750 ℃时,淬火后未得到马氏体组 织,这说明该超高强钢加热到 750 ℃保温时未发生奥 氏体化;当加热温度为 800 ℃时,得到了马氏体和网 状铁素体,此时高强钢发生了奥氏体化转变;当加热 温度为 850 ℃时,得到了片状以及板条状马氏体;当 温度高于 950 ℃时,得到打片状以及板条状马氏体。这说 明,加热温度越高得到的板条状马氏体越多;加热温 度低于 750 ℃时,不能得到马氏体。大致可以确定, 奥氏体化转变温度为 750~800 ℃。

2.2 加热温度和保温时间对力学性能的影响

除微观组织外,材料淬火后的硬度也是影响成形 性能的关键因素。将 BR1500HS 加热到不同温度并保 温不同的时间后淬火,并测试淬火后材料的硬度和 抗拉强度。热温度从 750 ℃到 1000 ℃间隔 50 ℃进 行取值,保温时间分别为 0 s 到 480 s 中间间隔 60 s 取值,共计 30 个试验组合。将得到的硬度数据在 MATLAB 中进行插值得到了如图 3 所示的曲面分布, 其中红色点表示实验样本,曲面是用样本进行插值得 到的。

如图 3a 所示,超高强钢淬火后的硬度总体趋势 为随着加热温度的增加硬度先增加后减小,随着保温 时间的增加硬度先增加后减小。该现象的原因在于, 加热温度越高、保温时间越长,奥氏体化越彻底、淬 火后转变的马氏体越多因而硬度越大,但是过高的温 度和过长的保温时间会导致再结晶现象发生,晶粒长 大,从而降低硬度。当加热温度为900℃,保温时间 为120 s时,淬火后的硬度最大。如图3b所示,超高 强钢淬火后的抗拉强度与硬度具有相似的规律。其原 因也和硬度变化的原因相同,受到马氏体含量和晶粒 大小两个因素的影响。从图3可知,为了得到最好的 抗拉强度,加热温度应在850~950℃内选择。如图 3c 所示,当加热温度在850~950℃时,伸长率受到 保温时间的影响较大。硬度和拉升强度受到保温时间 的影响小于伸长率受到保温时间的影响。



Fig.3 Effect of different holding time and heating temperature on hardness, tensile strength and elongation

2.3 加热温度对断口形貌的影响

为了研究 BR1500HS 超高强钢的塑性,可以从拉 伸断裂时的断裂模式出发进行研究。将 BR1500HS 钢 加热到不同温度并保温 120 s 后进行淬火,其加热温 度从 750 ℃到 1000 ℃间隔 50 ℃进行取值;使用扫描 电镜对拉伸断口进行分析,如图 4 所示。当加热温度 低于 800 ℃时,断口较为平坦;当加热温度高于 800 ℃时,断口不平。

通过断口形貌分析可知,加热温度为 750 ℃和

800 ℃时,断裂为脆性穿晶断裂,这是由于该温度下 没有完全奥氏体化,淬火组织为铁素体和少量马氏 体。当加热温度到 850 ℃以上时,能够完全奥氏体化。 加热温度为 950 ℃时为韧窝断裂,这是因为材料中的 杂质在晶界上偏聚或脱溶而造成空洞,这些空洞会随 着温度升高逐渐长大,在拉应力作用下空洞相互连接 导致材料断裂,即韧窝断裂。提高加热温度能够改善 淬火后材料的塑性,然而过高的温度会导致断口空洞 较大,导致塑性反而降低,因此最佳的加热温度区间 应为 850~900 ℃。



d 900 ℃

e 950 ℃

f 1000 °C

图 4 不同加热温度拉伸断口形貌 Fig.4 Fracture appearance at different heating temperatures

3 工艺参数优化及其验证

经过前面的分析,可以得到影响超高强度钢 BR1500HS 淬火后材料性能的部分规律。为了更精确 定量地研究 BR1500HS 的最佳热处理工艺参数,本节 将对工艺参数进行优化。在不同加热温度和不同保温 时间下进行淬火实验,并测试材料的硬度、抗拉强度 和伸长率,得到如表2所示的数据。

表 2	实验设计方案
Гаb.2 E	xperiment design

序号	加热温度/	保温时间/	硬度	抗拉强度/	伸长率/
	°C	S	(HRC)	MPa	%
1	850	160	52	1522	11
2	900	160	50	1535	12
3	850	360	46	1494	10
4	950	360	50	1519	10
5	800	240	42	1123	10
6	1000	240	49	1126	8
30	900	240	51	1578	7

对于 30 个样本,克里金模型能够比较精确地模 拟输入变量和输出变量之间的关系。在热成形过程 中,BR1500HS 超高强钢的硬度、抗拉强度和伸长率 越大越好,使用多目标遗传算法(NSGA-)能够对 该类型的优化问题进行较好求解。

如图 5 所示,硬度、抗拉强度和伸长率不可能同时最大,当硬度增大时,抗拉强度先增大后减小,伸 长率却越来越小。这说明,伸长率和硬度之间存在着 一定的相反关系。在选取最优解时应当综合考虑指标 的重要性,文中将 3 个指标的权重都选取为1,即同 等重要。

帕累托前沿解集在设计变量空间中的分布见图 6,其分布于一条直线附近。通过 3 个指标的线性加 权,可以得到最优解。将得到的最优加热温度 899.6 ℃ 和保温时间 32.18 s进行实验,将实验得到的硬度、 抗拉强度和伸长率与优化得到的数值进行对比,如表 3 所示。

由表 3 可知,硬度优化值比实验值偏小,偏差大 约为 2.32%;抗拉强度偏差仅为 1.2%;伸长率的偏



Fig.5 Distribution of Pareto front solution set in design target space





表 3 最优解及其实验结果 Tab.3 Optimized solution and the experimental results

工艺参数	硬度(HRC)	抗拉强度/MPa	伸长率/%
最优值	49.19	1612.0	14.78
实验值	50.36	1592.6	12.82

差大,大约为 15.29%。实验数据和优化数据对比表 明,硬度、抗拉强度和伸长率的实验值和最优值的差 别都比较小,这说明代理模型的预测精度高并且优化 算法的优化效果显著,优化结果对高强度钢板 BR1500HS的工艺设计具有重要的指导作用。

4 结论

 1)保温时间一定时,硬度随着加热时间的增加 先增加后减小,抗拉强度先增加后减小最后趋于平 稳;加热温度一定时,硬度随保温时间的增加先增加 后减小。加热温度不同时,抗拉强度随保温时间的变 化规律不同,当加热温度在950℃以下时,随着保温 时间的增加而增加;当加热温度在950~1000℃时, 随着保温时间的增加先增加后减小。

2)断口形状表明,随着温度增加,断裂模式由 脆性断裂变为韧窝断裂,且加热温度为 850~920 ℃ 时,具有较好的韧性。

3)用克里金模型近似设计变量与设计指标之间 的关系,并用多目标遗传算法得到帕累托前沿解集, 最后用加权法得到最优解,并用实验验证了优化策略 的有效性,对 BR1500HS 超高强钢的热处理工艺有一 定的指导作用。

参考文献:

 [1] 李学涛,邱肖盼,张杰,等.保温时间对镀锌热成形 钢镀层组织及裂纹的影响[J].热加工工艺,2020, 49(22):156—158.

LI Xue-tao, QIU Xiao-pan, ZHANG Jie, et al. Effect of Holding Time on Microstructure and Crack of Galvanized Hot-Formed Steel[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 156-158.

- [2] NADERI M, KETABCHI M, ABBASI M. Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Different High Strength Carbon Steels after Hot Stamping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1117–1125.
- [3] 梁江涛,赵征志,尹鸿祥,等.超高强热成形钢的应 变速率敏感性[J].工程科学学报,2018,40(9):1083— 1090.

LIANG Jiang-tao, ZHAO Zheng-zhi, YIN Hong-xiang, et al. Strain Rate Sensitivity of Ultra-High Strength Hot Stamping Steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(9): 1083—1090.

 [4] 杨涛,李贤君,侯俊卿,等. 高强钢涂层板热成形加 热炉的多梯度控温仿真[J]. 金属热处理, 2019(5): 223
 —227.

YANG Tao, LI Xian-jun, HOU Jun-qing, et al. Simulation on Multi-Gradient Temperature Control of Hot Forming Heating Furnace for Coated High Strength Steel Plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2019(5): 223—227.

- [5] 姜超. 汽车超高强钢件热冲压强化机理研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2014.
 JIANG Chao. Strengthening Mechanism of Ultra-High Strength Steel Hot Stamping Automotive Parts[D]. Beijing: General Research Institute of Mechanical Science, 2014.
- [6] 张勇. 超高强钢板 U 形件热冲压工艺对相变的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(3): 649—654.
 ZHANG Yong. Effect of Hot Stamping Process on Phase Transition for U-Shaped Ultra High Strength Steel[J]. Foundry Technology, 2018, 39(3): 649—654.
- [7] 李沁阳,杨昭,洪圆圆.高强 BR1500HS 钢热冲压成
 形的计算机模拟研究[J].铸造技术,2018,39(1):137
 —140.

LI Qin-yang, YANG Zhao, HONG Yuan-yuan. Computer Simulation on Hot Stamping of High Strength BR1500HS Steel[J]. Foundry Technology, 2018, 39(1): 137—140.

 [8] 尚欣,周杰,卓芳,等.变形参数对 BR1500HS 材料 性能与微观组织的影响[J].中南大学学报(自然科学 版),2016,47(9):2958—2967.
 SUANC Vin ZUOU lie ZUUO Fana et al. Effect of

SHANG Xin, ZHOU Jie, ZHUO Fang, et al. Effect of Forming Parameters on Material Properties and Microstructure of BR1500HS[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9): 2958 -2967.

[9] 张茜,尚稚轩,刘志璞,等. 轧制及回火工艺对吉帕
 级超高强钢板组织性能的影响[J]. 轧钢, 2021, 38(1):
 8—13.

ZHANG Qian, SHANG Zhi-xuan, LIU Zhi-pu, et al. Effect of Rolling and Temperaturing Processes on Microstructure and Properties of GPa Grade Ultra-High Strength Steel Sheet[J]. Steel Rolling, 2021, 38(1): 8–13.

[10] 刘成杰,陈世超,王紫旻,等. BR1500HS 硼钢板热压 淬火工艺及其性能研究[J]. 热处理技术与装备, 2015, 36(5):41-46.

LIU Cheng-jie, CHEN Shi-chao, WANG Zi-min, et al. Study on Hot Press Quenching Process and Its Mechanical Performance of BR1500HS Boron Steel Sheet[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2015, 36(5): 41—46.

- [11] JING Cai-nian, YE Dao-min, ZHAO Jing-rui, et al. Effect of Hot Stamping and Quenching & Partitioning Process on Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-High Strength Steel[J]. Materials Research Express, 2021, 8(3): 41-49.
- [12] 郭运,顾浩,李亚.980 MPa 超高强钢前纵梁冲压成形 分析[J]. 模具工业, 2021, 47(2): 44—49.
 GUO Yun, GU Hao, LI Ya. Stamping Analysis of Front Side Member Made by 980 MPa Grade Ultra High Strength Steel[J]. Die & Mould Industry, 2021, 47(2): 44—49.
- [13] 周成,叶其斌,田勇,等. 超高强度结构钢的研究及发展[J]. 材料热处理学报,2021,42(1):14—23.
 ZHOU Cheng, YE Qi-bin, TIAN Yong, et al. Research and Application Progress of Ultra-High Strength Structural Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(1):14—23.
- [14] 张国进. 超高强度钢板 BR1500HS 热成形连续冲压热 平衡工艺参数研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.
 ZHANG Guo-jin. Research on Heat Balance Parameters during Hot Forming Continuous Stamping Process of BR1500HS Ultra High Strength Steel Plate[D].
 Chongqing: Chongqing University of Technology, 2016.
- [15] 吴亚平,郭幼丹,王刚. BR1500HS 防撞梁热成形后材 料抗冲击性能[J]. 塑性工程学报,2015,22(6):119— 123.

WU Ya-ping, GUO You-dan, WANG Gang. Research on Impact Resistant Performance of BR1500HS Anticollision Beam after Hot Forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(6): 119—123.