

材料与成形性能

动态碳配分对先进高强钢组织与力学性能的影响

张飞豹¹, 李鑫², 宋鸿武³, 张士宏³, 范海生⁴

- (1. 广东省航空航天装备技术研究所, 广东 珠海 519090;
2. 南昌航空大学, 南昌 330063;
3. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;
4. 北京中科普金特种材料科技发展有限公司, 北京 100081)

摘要: **目的** 为了使钢表现出更好的吸能特性, 以具有较高的强度以及较好的塑性。**方法** 提出了一种新型一步法成形碳配分一体化工艺, 即热冲压-动态碳配分(HS-DP)工艺。所提出的 HS-DP 工艺采用盐浴热处理的方式进行物理模拟。采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)和拉伸试验等方法, 研究了新工艺中的冷却速率对低碳先进高强钢的微观组织和力学性能的影响。针对冷却速率对残余奥氏体含量的影响进行了分析, 重点研究了残留奥氏体的体积分数和碳含量对钢伸长率的影响。**结果** 经过 HS-DP 工艺处理的钢显微组织主要由初始淬火态马氏体相、最终淬火态马氏体相和残余奥氏体相共存组成。**结论** 实验钢表现出优异性能, 说明了热冲压动态碳配分工艺前景广阔。

关键词: 先进高强钢; 热冲压; 动态碳配分; 残余奥氏体; 碳含量

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.019

中图分类号: TG113; TG316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)04-0121-05

Influences of Dynamic Carbon Partitioning Process on Microstructure Development and Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel

ZHANG Fei-bao¹, LI Xin², SONG Hong-wu³, ZHANG Shi-hong³, FAN Hai-sheng⁴

- (1. Guangdong Institute of Aeronautics and Astronautics Equipment & Technology, Zhuhai 519090, China;
2. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
4. Beijing Zhongke Pujin Special Materials and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100081, China)

ABSTRACT: This paper aims to make steel exhibit attractive properties as high strength and good ductility. A novel one step method for forming Q & P integration-Hot Stamping-Dynamic Partitioning (HS-DP) process was proposed. The proposed HS-DP process was simulated with salt bath heat treatment. The effect of microstructure and mechanical properties in a low-carbon AHSS with different cooling rate of the new process was investigated with scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and tensile test methods. The impact of retained austenite was also discussed, especially the influences of elongation caused by various retained austenite volume fraction and carbon-content. Microstructure of the steel subjected to HS-DP treatment was mainly composed of initial quenched martensite phase, final quenched martensite phase, final quenched martensite phase and retained austenite phase formed. This experiment steel illustrates the promising used in hot stamping dynamic carbon partitioning process.

KEY WORDS: AHSS; hot stamping; dynamic carbon partitioning; retained austenite; carbon content

收稿日期: 2018-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51034009)

作者简介: 张飞豹 (1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为先进成形技术。

许多学者在钢铁材料研究中发现了奥氏体热稳定化现象^[1-3]。热稳定化是指淬火时因缓慢冷却或在冷却过程中停留而引起奥氏体的稳定性提高,是马氏体转变迟滞的现象。正如 Rao 和 Thomas^[4]通过高分辨率点阵测量的那样,碳含量(质量分数)为 0.27% 的钢淬火后,残余奥氏体中碳的质量分数可高达 0.4%~1.04%。根据以往的研究,对马氏体形成时间和碳在马氏体和奥氏体中均匀扩散所需时间的计算结果进行比较,徐祖耀院士^[5-10]提出了以下结论:马氏体形成期间可能存在碳的扩散,但这不是一个主要或必要的过程,因此,基于传统的热冲压-碳配分 QP 工艺,结合刘伟杰^[11]提出的动态碳配分概念,文中提出了一个称为热冲压-动态碳配分(HS-DP)工艺思路,

即淬火和碳配分在热冲压和冷却过程后动态完成。

1 实验方法

实验采用 94#实验钢,其材料成分设计见表 1。实验钢在真空感应炉中熔化,浇铸后锻造成 80 mm×80 mm×150 mm 的锻坯。用 450 mm×450 mm 的双辊可逆式轧机对锻坯进行热轧。热轧过后板的厚度为 7 mm。将热轧板酸洗并冷轧以获得厚度为 2.5 mm 的最终实验钢板。冷轧设备采用四辊 $\Phi 325$ mm×400 mm 直拉式可逆轧机进行。通过 Formastor-FII 自动相变分析仪测量的实验钢相变点见表 2。

实际的热成形过程通过使用盐浴淬火来模拟。样

表 1 94#实验钢的化学成分(质量分数)
Tab.1 Chemical composition of 94# experimental steel (mass fraction)

Steel	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	B	Al
94#	0.19	1.55	1.53	0.95	1.01	0.45	1.01	0.033	0.0027	0.025

表 2 94#钢相变点
Tab.2 Phase transition point of 94# steel

Steel	Ac1	Ac3	M _s	M _f
94#	720	847	310	224

品采用不同的热处理工艺,加热至 890 °C,持续 300 s,从完全奥氏体化后开始淬火,见图 1。对于 QT 工艺,工艺路线从马氏体开始转变起始温度 310 °C (M_s 点),对样品实施二次淬火,选择不同的淬火介质(水、油、空气)冷却至室温,以实现动态淬火碳配分过程。

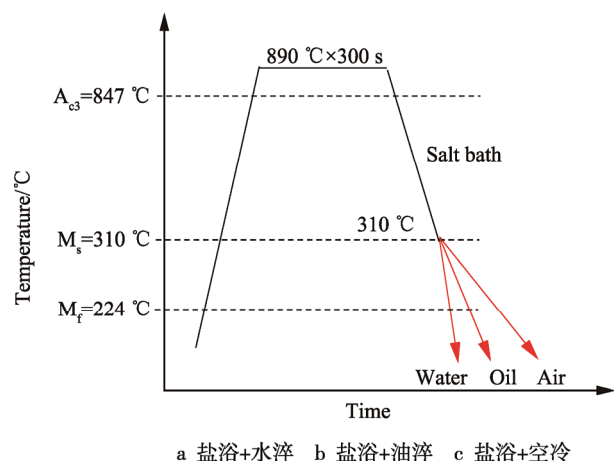


图 1 HS-DP 热处理工艺示意图

Fig.1 Schematic illustration of HS-DP heat treatment

对于拉伸试验,试样按照 GB/T 228—2002 测试标准进行处理。用于本试验的样品尺寸的图示见图 2。在 SANS CMT5105 计算机控制的万能拉伸试验机上,

测试试样的室温拉伸性能。

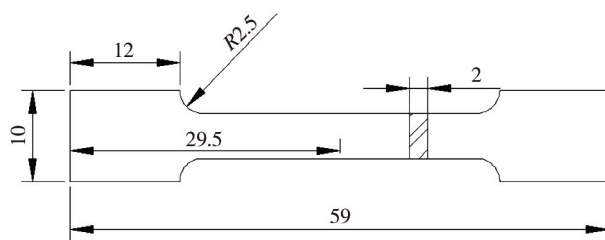


图 2 拉伸试验的样品尺寸
Fig.2 Sample dimensions for tensile tests.

经过体积分数为 4%硝酸酒精腐蚀 9 s 后,采用 SHIMADZU SSX-550 扫描电子显微镜(SEM),观察样品的显微结构。X 射线衍射试验在日本理学 Rigaku D/Max 2500 PC 衍射仪上进行,所用靶材为 Cu 靶($\lambda_a=0.154\ 06$ nm),工作电流为 300 mA,工作电压为 50 kV,样品在 40°~100°的 2θ 范围内扫描,包含(111), (200), (220)和(311)这 4 个主要奥氏体峰,速度为 3 min 扫描 1°,步长为 0.02°。XRD 测量的样品首先经过研磨和机械抛光,然后电解抛光,在由乙醇、高氯酸和水以 13:2:1 的体积比组成的电解液中,在 25 V 电压下电解 30 s 以消除内应力。奥氏体的碳浓度 x_c 的计算见式(1)^[12-14]。

$$a_\gamma = 3.556 + 0.0453x_c \quad (1)$$

根据式(2)^[15-17]从反射位置确定奥氏体晶格参数

a_γ :

$$a_\gamma = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2)$$

式中: h, K, L 是衍射晶面指数; λ 是辐射的波长。奥氏体晶格参数 a_γ 从最大的 4 个奥氏体峰的位置来

确定。由软件计算出对应的 2θ ，并使用式(2)来计算奥氏体晶格常数 a_γ ，代入式(1)，以获得奥氏体的碳含量。为了捕获冷却曲线，用 ADAM-4118 Rugged 型热电偶输入模块，搭载 K 型热电偶，以 115.2 kb/s 的速率进行实验。

2 实验结果

2.1 扫描电镜 SEM 下的微观结构与表征

进行 HS-DP 处理的样品显微结构扫描电子显微照片见图 3。

经过各种 HS-DP 工艺后，实验钢的显微组织见

图 3。1[#]工艺后，显微组织基本为板条马氏体，板条边界清晰。2[#]和 3[#]工艺处理后，实验钢的显微组织显示出明显的 QP 工艺特征：马氏体板条加宽、边缘弯曲。这表明在 2[#]和 3[#]工艺过程中发生了碳配分。热冲压动态-碳配分工艺在实验钢中得以实现。

2.2 HS-DP 过程的冷却特性

在 HS-DP 热处理工艺条件下，在 890 °C~ M_f 的温度范围内，平均冷却速率为 26.6 °C/s，大于钢的临界冷却速度(0.5 °C/s)。 M_s ~ M_f 温度范围内的冷却曲线见图 4。可以看出，不同介质的实验钢冷却速率不同，其中 $v_{\text{水}} > v_{\text{油}} > v_{\text{空}}$ ，见表 3。

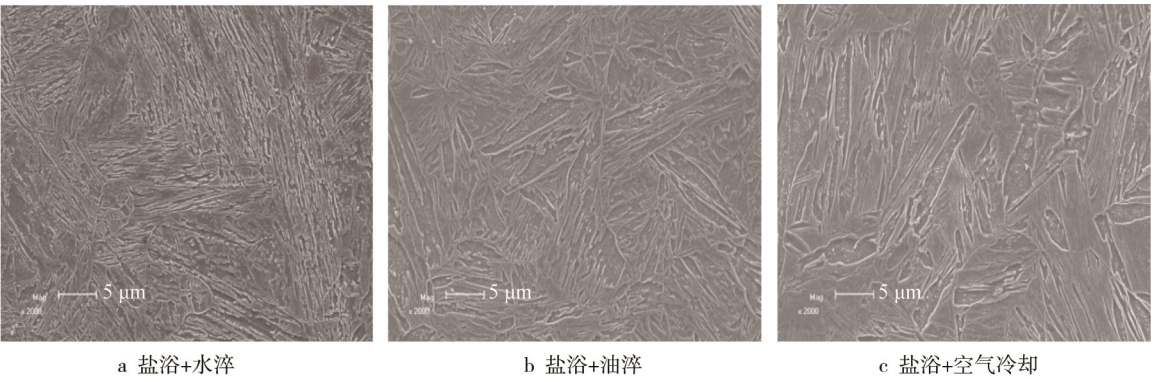


图 3 显示 HS-DP 过程后钢的显微组织的 SEM 显微照片
Fig.3 SEM micrographs showing microstructures of steels after HS-DP process

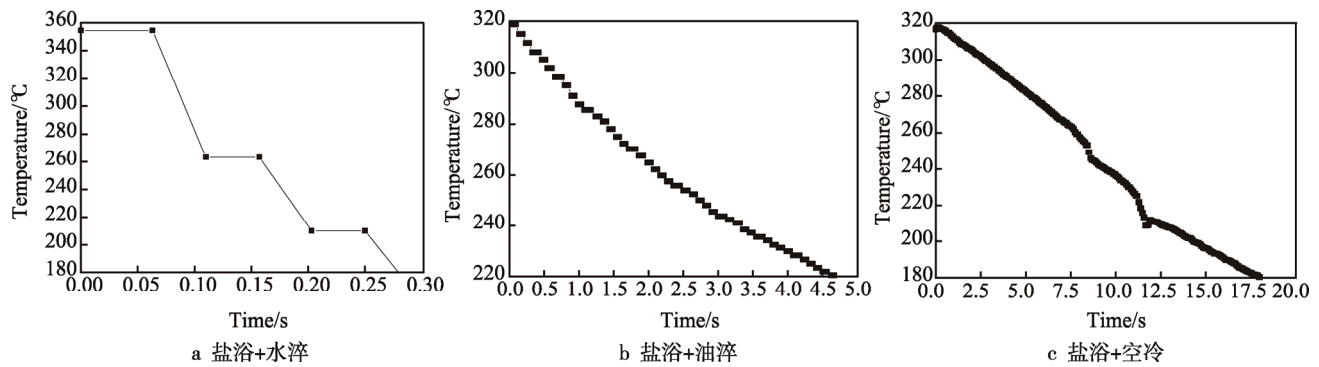


图 4 在 HS-DP 热处理工艺下的冷却曲线
Fig.4 Cooling curve of HS-DP under heat treatment process

表 3 在 M_s ~ M_f 范围内的平均冷却速率。
Tab.3 Average cooling rate in experimental temperature range M_s ~ M_f

热处理工艺	室温下平均冷却速率/(°C·s ⁻¹)
1 [#] (盐浴+水淬)	401.0
2 [#] (盐浴+油淬)	27.1
3 [#] (盐浴+空冷)	7.41

2.3 钢 HS-DP 处理之后的力学性能

实验钢的力学性能见表 4。可以看出，不同的 HS-DP 热处理过程对力学性能都有很大的影响。通过

1[#]工艺处理的钢材力学性能可以发现，与传统的水淬工艺相比，可以保持一致强度和伸长率。相比之下，2[#]和 3[#]处理可以提高伸长率、强塑积。

表 4 HS-DP 工艺下的力学性能
Tab.4 Mechanical properties under HS-DP process

热处理工艺	抗拉强度/MPa	伸长率/%	强塑积/(MPa·%)
1 [#] (盐浴+水淬)	1636	9.47	15 493
2 [#] (盐浴+油淬)	1527	11.11	16 965
3 [#] (盐浴+空冷)	1520	11.32	17 206

HS-DP 处理条件下的 XRD 图谱见图 5。可以发现, 1[#]工艺过程没有出现过奥氏体峰, 2[#]和 3[#]过程有明显的奥氏体峰出现。由于 2[#]和 3[#]淬火过程中钢的冷却速率较低, 钢在 $M_s \sim M_f$ 范围内经历的时间相对较长, 分别为 2.8 s 和 60 s。在马氏体转变过程中发生动态配分, $M_s \sim M_f$ 范围内较低的冷却速率有利于碳从马氏体扩散到残余奥氏体中。用 2[#]和 3[#]工艺处理的钢的残余奥氏体体积分数计算值分别为 7.2% 和 10.2%。2[#]和 3[#]工艺处理的残余奥氏体碳含量(质量分数)分别为 0.95% 和 1.03%, 因此, 提高钢的残余奥氏体含量及其相应的稳定性可以提高钢的强塑积。

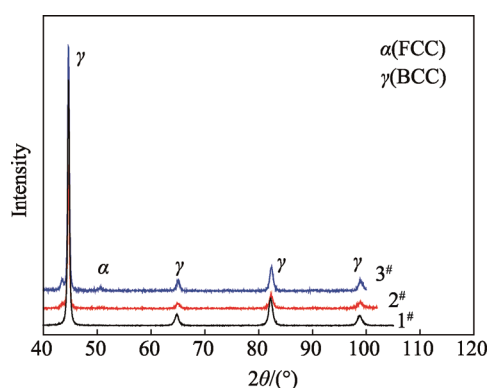


图 5 HS-DP 工艺下实验钢 XRD 图谱

Fig.5 Experimental XRD patterns of HS-DP steel in heat treatment process

3 结论

提出了一种热成形和 Q & P 工艺的集成工艺, 即新颖的热冲压-动态碳配分(HS-DP)的一步法配分工艺。设计的模拟实验表明碳钢配分发生于实验钢的淬火过程, 因此热冲压动态碳配分工艺可以在实验钢来实现。该实验说明热冲压-动态碳配分工艺应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
XU Zu-yao. Martensitic and Martensitic Transformation [M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [2] ZYLLA I M, HOUARDY H P. Cavitation Behaviour of a Metastable Cr-Mn-austenite[J]. Steel Research, 1994, 65(4): 132—137.
- [3] 傅万堂, 王政, 荆天辅, 等. 铬锰氮双相不锈钢过冷奥氏体热稳定性的研究[J]. 金属热处理, 1997, 3(11): 9—10.
FU Wan-tang, WANG Zheng, JING Tian-fu, et al. Thermal Stability of Undercooled Austenite in a CrMnN Dual-phase Stainless Steel[J]. Metal Heat Treatment, 1997, 3(11): 9—10.
- [4] RAO B V N, THOMAS G. Transmission Electron Microscopy Characterization of Dislocated Lath Martensite[J]. International Conference on Martensitic Transformations, 1979, 6(5): 24—29.
- [5] XU Zu-yao. Carbon Diffusion and Kinetics During the Lath Martensite Formation[J]. De Physique IV, 1995, 5(8): 351—354.
- [6] XU Zu-yao, LI X M. Diffusion of Carbon During the Formation of Low-Carbon Martensite[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1983, 19(1): 83—87.
- [7] 徐祖耀. 材料的相变研究及其应用[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(3): 323—330.
XU Zu-yao. Studies on Phase Transformations and Their Applications in Materials Engineering[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(3): 323—330.
- [8] 徐祖耀. 淬火-碳分配-回火(Q-P-T)工艺浅介[J]. 金属热处理, 2009, 34(6): 1—8.
XU Zu-yao. A Brief Introduction to Quenching-partitioning-tempering(Q-P-T) Process[J]. Metal Heat Treatment, 2009, 34(6): 1—8.
- [9] 徐祖耀. 将淬火-碳分配-回火(Q-P-T)及塑性成形一体化技术用于 TRIP 钢的创议[J]. 热处理, 2010, 25(4): 1—5.
XU Zu-yao. A Preliminary Suggestion of Application of a Unified Technology Combining Quenching-Partitioning-Tempering Process and Plastic Forming for TRIP Steels[J]. Heat Treatment, 2010, 25(4): 1—5.
- [10] 徐祖耀. 自主创新发展超高强度钢[J]. 上海金属, 2009, 31(2): 1—6.
XU Zu-yao. Self-Reliance Innovation on Development of Ultra-High Strength Steel[J]. Shanghai Metals, 2009, 31(2): 1—6.
- [11] 刘伟杰. 一种基于动态碳配分原理的马氏体钢: 中国, 201210259098.3[P]. 2012-07-25.
LIU Wei-jie. A Martensite Steel Based on Dynamic Carbon Partitioning Principle: China, 201210259098.3[P]. 2012-07-25.
- [12] FISCHER F, REISNER G, WERNER E, et al. A New View on Transformation Induced Plasticity(TRIP)[J]. International Journal of Plasticity, 2000, 20(16): 723—748.
- [13] 景财年, 王作成, 韩福涛. 相变诱发塑性的影响因素研究进展[J]. 金属热处理, 2005, 30(2): 26—30.
JING Cai-nian, WANG Zuo-cheng, HAN Fu-tao. Research Progress of the Influencing Factors on Transformation Induced Plasticity[J]. Metal Heat Treatment, 2005, 30(2): 26—30.
- [14] SANTOFIMIA M J, ZHAO L, ROUMEN P, et al. Microstructural Development During the Quenching and Partitioning Process in a Newly Designed Low-carbon Steel[J]. Acta Materialia, 2011, 59(15): 6059—6068.

- [15] 张永皞, 姚宗勇, 黄光杰, 等. 轧制变形铝合金微观组织与织构的 EBSD 研究[J]. 电子显微学报, 2009, 28(1): 43—45.
- ZHANG Yong-hao, YAO Zong-yong, HUANG Guang-jie, et al. EBSD Investigation on Microstructure and Texture in Rolling Aluminum Alloys[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2009, 28(1): 43—45.
- [16] 刘俊亮, 张作贵, 宓小川, 等. 80 钢中残余奥氏体定量分析的 XRD 与 EBSD 法比较[J]. 电子显微学报, 2010, 29(1): 689—692.
- LIU Jun-liang, ZHANG Zuo-gui, MI Xiao-chuan, et al. Comparison of XRD and EBSD for Quantitative Analysis of Remaining Austenite in X80 Pipeline Steel[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2010, 29(1): 689—692.
- [17] SUN J, YU H. Microstructure Development and Mechanical Properties of Quenching and Partitioning(Q&P) Steel and an Incorporation of Hot-dipping Galvanization during Q&P Process[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 586(1): 100—107.