

热变形对淬火配分低碳 CrNi3Si2MoV 钢组织和力学性能的影响

付勇涛^{1,2} 刘静¹ 王存宇³ 张玉杰³ 贾国翔^{3,4} 时捷³ 董瀚³

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430080; 2 武汉钢铁集团公司技术研究院, 武汉 430083;

3 钢铁研究总院特殊钢研究所, 北京 100081; 4 西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055)

摘要 试验用 CrNi3Si2MoV 钢(/% : 0.21C, 1.75Si, 0.29Mn, 0.0060P, 0.0007S, 1.03Cr, 2.86Ni, 0.31Mo, 0.08V) 由 50 kg 真空感应炉冶炼, 并锻成 $\Phi 15$ mm 的钢棒。通过 Gleeble-3800 热模拟试验机、扫描、透射电镜(SEM、TEM)和 X-射线衍射仪(XRD)等研究了 1 200 °C 奥氏体化的 CrNi3Si2MoV 钢在 750 °C 10% ~ 70% 热变形 + 淬火至 330 °C 和 550 °C 1 min 的淬火配分(Q&P, Quenching and Partitioning)处理后, 热变形量对 Q&P 处理试验钢组织和硬度的影响。试验结果表明, 热变形 + Q&P 处理后 CrNi3Si2MoV 钢的组织为板条奥氏体 + 5.7% ~ 17.2% 薄膜状残留奥氏体; 变形量为 30% 时残留奥氏体量最大(17.2%), 50% 变形时 HV 值最大为 448, 当变形量达 70% 时该钢发生明显的再结晶, 组织细化, 钢的硬度降低。

关键词 低碳 CrNi3Si2MoV 钢 热变形 Q&P(淬火配分) 马氏体 残留奥氏体 硬度

Effect of Hot Deformation on Structure and Mechanical properties of Quenched and Partitioned Low Carbon CrNi3Si2MoV Steel

Fu Yongtao^{1,2}, Liu Jing¹, Wang Cunyu³, Zhang Yujie³, Jia Guoxiang^{3,4}, Shi Jie³ and Dong Han³

(1 School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080;

2 Research and Development Center, WISCO, Wuhan 430080;

3 Institute for Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;

4 School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

Abstract Test steel CrNi3Si2MoV (/% : 0.21C, 1.75Si, 0.29Mn, 0.0060P, 0.0007S, 1.03Cr, 2.86Ni, 0.31Mo, 0.08V) is melted by a 50 kg vacuum induction furnace and forged to $\Phi 15$ mm bar product. The effect of hot deformation on structure and hardness of test steel CrNi3Si2MoV austenitized at 1 200 °C, then hot deforming with 10% ~ 70% at 750 °C + quenching and partitioning (Q&P) treated by quenching to 330 °C and 550 °C for 1 min is studied by Gleeble-3800 thermal simulation machine, scanning and transmission electron microscope (SEM and TEM), and X-ray diffractometer (XRD). Test results show that the structure of hot deformation + Q&P treated steel CrNi3Si2MoV is lath martensite + 5.7% ~ 17.2% lamella residual austenite, with 30% hot deformation the residual austenite amount (17.2%) in steel is maximum, with 50% hot deformation the hardness HV value of steel is maximum up to 448, and as hot deformation up to 70%, the obvious recrystallization of steel occurs with fine structure and the hardness of steel decreases.

Material Index Low Carbon CrNi3Si2MoV Steel, Hot Deformation, Quenching and Partitioning (Q&P), Martensite, Residual Austenite, Hardness

较高强度水平下, 传统淬火回火工艺处理的马氏体钢塑韧性较低, 制约了马氏体钢的广泛应用。Q&P(淬火配分)工艺(Quenching and Partitioning, 简称 Q&P)^[1-2] 获得马氏体基体上分布富碳残留奥氏体的混合组织^[1,3], 显著提高了高强度和超高强度钢的塑韧性^[4]。在合理控制参数条件下, 热变形以后直接进行 Q&P 处理可以有效的提高钢的综合性能^[5], 利用热变形改善钢的组织结构、提高生产效率的特点^[6], 通过形变与相变的结合获得高性能钢是 Q&P 工艺应用的重要方向之一, 即热轧之后直接

进行 Q&P 工艺处理^[7], 如 0.2C-2.0Mn-1.5Si-0.6Cr 钢在热变形之后进行了淬火配分工艺处理后, 屈服强度大于 1 100 MPa^[8], 并且较传统的热处理工艺的样品得到了更好的延展性和冲击韧性^[9-10]。目前形变对 Q&P 工艺处理钢组织和性能影响亦有报道^[11-12], 本文研究了通过压缩变形后进行 Q&P 工艺处理的低碳高硅钢组织和硬度。

1 实验材料及方法

实验用钢(/% : 0.21C, 1.75Si, 0.29Mn, 1.03Cr, 2.86Ni, 0.31Mo, 0.08V, 0.049Nb, 0.0007S, 0.0060P)

通讯作者: 刘静, 教授, 博士生导师, 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430080

E-mail: liujing@wust.edu.cn

由 50 kg 真空感应炉冶炼,膨胀法测量 $M_s = 375\text{ }^\circ\text{C}$, $M_f = 175\text{ }^\circ\text{C}$ 。改锻成直径为 15 mm 的试棒后进行软化退火处理,然后加工成 $\Phi 10\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的圆柱样品。

实验在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行,试样经(1)变形 + Q&P 工艺处理,如图 1(a)所示,1200 $^\circ\text{C}$ 充分奥氏体化后,以 10 $^\circ\text{C/s}$ 的速度冷却到 750 $^\circ\text{C}$ 10 s,然后以 1 s^{-1} 分别进行 10%、30%、50%、70% 压缩变形,再以 10 $^\circ\text{C/s}$ 淬火到 330 $^\circ\text{C}$ 1 min,再用 5 s 升至 500 $^\circ\text{C}$ 1 min 进行配分处理,最后水冷至室温;(2)正常 Q&P 工艺处理,如图 1(b)所示,900 $^\circ\text{C}$ 奥氏体化,以 10 $^\circ\text{C/s}$ 的速度冷却到 330 $^\circ\text{C}$ 1 min,然后用 5 s 升至 500 $^\circ\text{C}$ 1 min,水冷至室温。

用 X-Ray 方法测量了残留奥氏体量的体积分数。用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)进行组织形貌分析。用 VH-5 型硬度计测量样品的维氏硬度,载荷为 5 kg。

2 实验结果及讨论

2.1 微观组织

图 1(c) 可见, Q&P 处理后钢中不仅有淬火至 330 $^\circ\text{C}$ 的被腐蚀的板条状马氏体(M1),还有块状组织- Q&P 处理后淬火至室温过程形成的马氏体(M2)或马氏体奥氏体(M/A)岛^[4]。

热变形 + Q&P 样品的微观组织形貌与 Q&P 样品类似,宏观形貌主要由板条马氏体和条块状组织构成,典型组织照片如图 2 所示。变形量为 10% 和 30% 的样品晶粒呈扁平状,组织粗大(图 2a, b),变形量为 50% 的样品晶粒大多呈扁平状,局部尺寸有相对较小的再结晶晶粒(图 2c),而当变形量增加到 70%,试验钢发生了明显的再结晶,晶粒呈等轴状,微观组织发生明显细化(图 2d)。

TEM 观察发现,热变形 + Q&P 工艺处理样品的微观组织由板条马氏体和薄膜状残留奥氏体组成,试验结果表明,SEM 中观察到的条块状组织的细微结构为板条马氏体或者板条马氏体 + 薄膜状残留奥氏体组织。与 Q&P 工艺处理样品不同的,由于变形的作用,在透射电镜下可以观察到马氏体板条发生弯曲的现象,这说明变形被后续组织所继承。不同

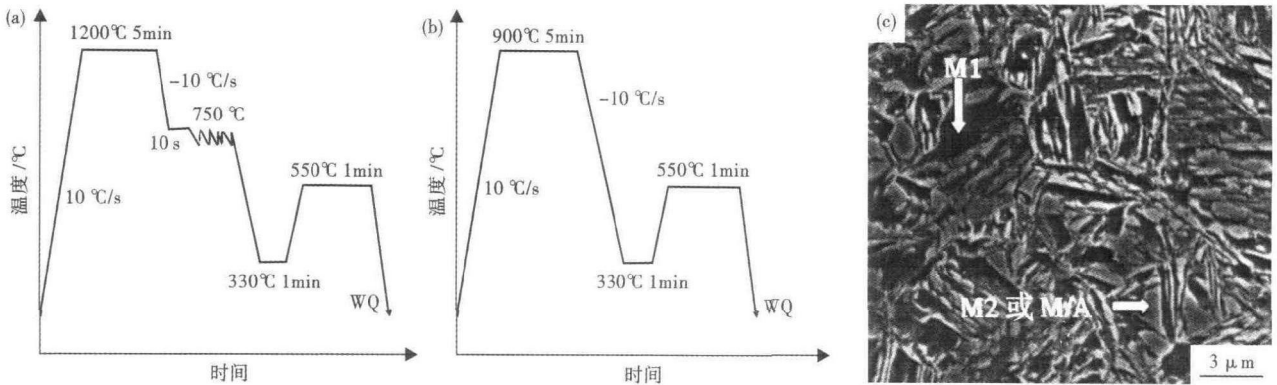


图 1 低碳 CrNi3Si2MoV 钢热变形 + Q&P(a), Q&P(b) 处理工艺示意图;以及 Q&P 处理后组织形貌, SEM (c)

Fig.1 Schematics of hot deformation + Q&P (a) and Q&P (b) treated process and morphology of structure after Q&P treatment, SEM (c), low carbon CrNi3Si2MoV steel

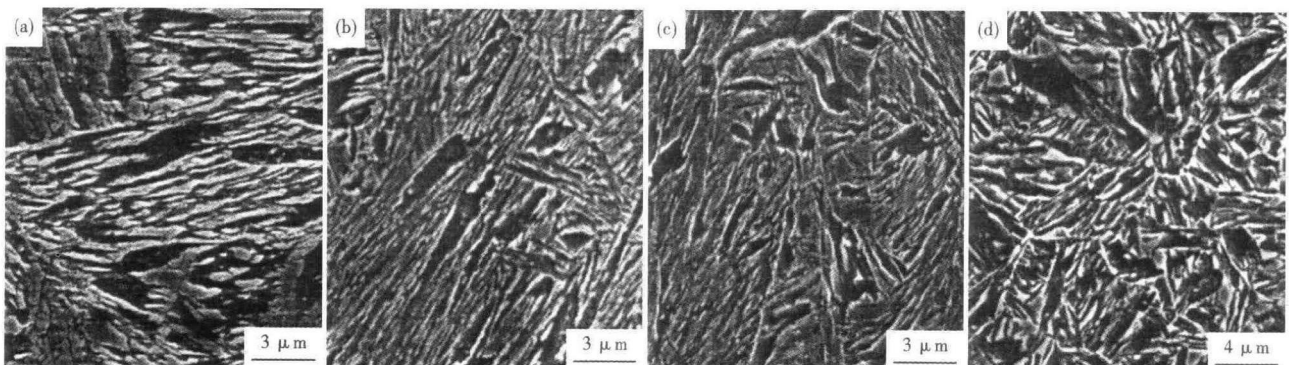


图 2 经 750 $^\circ\text{C}$ 10% (a), 30% (b), 50% (c), 70% (d) 变形 + Q&P 工艺处理 CrNi3Si2MoV 钢的组织形貌, SEM

Fig.2 Morphology of structure of CrNi3Si2MoV steel with 10% (a), 30% (b), 50% (c) and 70% (d) deformation at 750 $^\circ\text{C}$ + Q&P treated process, SEM

试验条件下,残留奥氏体主要以薄膜状的形式存在于马氏体板条之间,变形量为 10% 的样品残留奥氏体形貌的明场像(图 3a)。图 3(b,c)分别是变形量为 30% 和 50% 样品的透射电镜照片。

如图 4(a)所示,试验钢经奥氏体化温度为 900 °C 和 1200 °C 的 Q&P 工艺处理后分别获得了 14.1% 和 9.1% 的残留奥氏体,热变形 + Q&P 工艺处理后残留奥氏体的量受变形量的影响很大,在 5.7% ~ 17.2% 波动。随变形量的增加,残留奥氏体的量呈现先增加后减小的趋势,变形量为 30% 的样品获得了最大量的残留奥氏体(17.2%)。表明热变形 + Q&P 可以获得更多的残留奥氏体。

2.2 硬度

测量了试验钢经不同工艺处理后的维氏硬度(图 4b),热变形 + Q&P 工艺处理样品的硬度均高于 Q&P 工艺处理的样品,随变形量从 10% 增加到 50%,热变形 + Q&P 工艺处理样品的硬度从 HV408 增加到 HV448,当变形量为 70% 时,钢的维氏硬度

下降到 HV435。从图 2 所示的微观组织中可以发现,变形量为 70% 的样品发生了完全再结晶,降低了变形储能,导致硬度下降。但是由于发生形变,钢的硬度都较 Q&P 工艺处理的样品有所提高。

试验钢经 1200 °C 奥氏体化后在 750 °C 的压缩变形曲线如图 4(c)所示,属于动态再结晶型曲线,随变形量的增加,变形抗力先增加后减小,在变形量为 45% 时获得最大变形抗力。试样在 750 °C 变形过程中,加工硬化和动态软化共同作用,由图 4(c)可知,对于变形量为 10% 和 30% 的样品,钢的加工硬化效果要大于动态软化的作用,从最终微观组织观察结果来看,晶粒尺寸粗大,没有发生明显细化(图 2a,b)。随变形量的增加,动态再结晶软化效果增强,变形量为 50% 的样品发生了部分再结晶,晶粒大多呈粗大扁平状,在局部出现细小晶粒,变形量为 70% 的样品发生完全再结晶,动态在结晶软化效果要大于加工硬化的作用,晶粒呈等轴状且尺寸明显细化(图 2d)。由于热变形导致的加工硬化作用

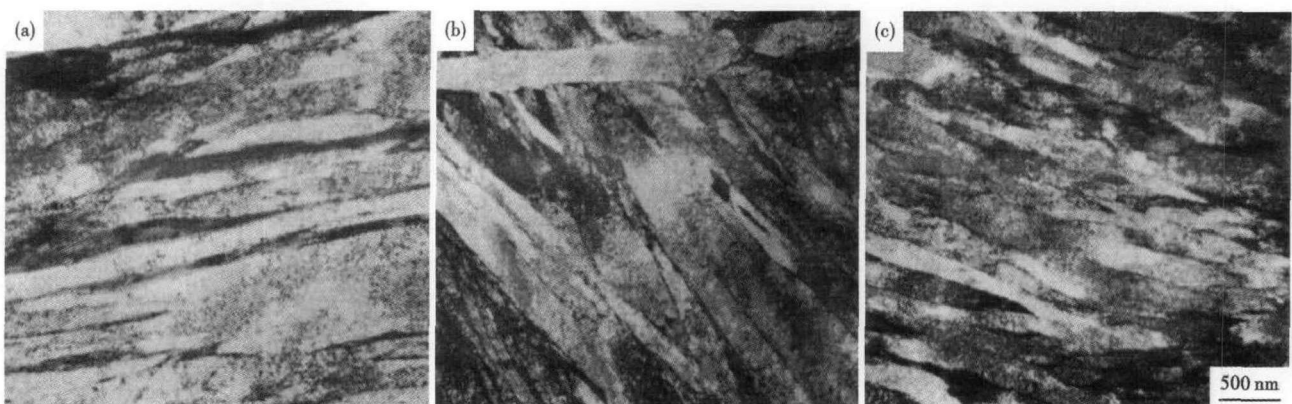


图 3 经 750 °C 10% (a)、30% (b) 和 50% (c) 变形 + Q&P 工艺处理 CrNi3Si2MoV 钢的组织形貌, TEM

Fig. 3 Morphology of structure of CrNi3Si2MoV steel with 10% (a), 30% (b) and 50% (c) deformation at 750 °C + Q&P treated process, TEM

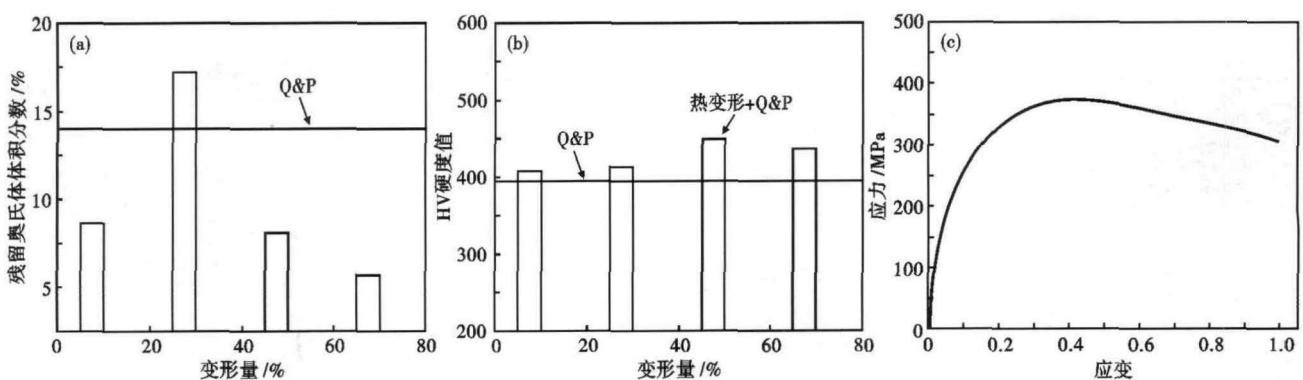


图 4 750 °C 变形对热变形 + Q&P 工艺处理的 CrNi3Si2MoV 钢的残余奥氏体含量(a) 和 HV 硬度值(b) 的影响; (c) 1200 °C 奥氏体化-750 °C 变形的 CrNi3Si2MoV 钢的应力应变曲线

Fig. 4 Effect of deformation at 750 °C on residual austenite volume fraction (a) and HV hardness value (b) of CrNi3Si2MoV steel with hot deformation + Q&P treated process; (c) stress-strain curve of CrNi3Si2MoV steel austenitized at 1200 °C and deforming at 750 °C

被继承到后续的组织演变过程,且硬化效果大于再结晶软化效果,导致随着变形量从 10% 增加到 50%,最终样品的硬度逐渐增加,而当变形量为 70% 时,由于再结晶软化作用,消耗了大量的变形储能,使最终硬度降低(图 4b)。

根据公式(1)^[13]可以计算淬火部分淬火时获得马氏体的比例,在 Q&P 工艺试验中,淬火至 330 ℃ 获得约 39% 的马氏体,通过配分处理后使未转变奥氏体富碳提高稳定性,最终获得了 14.1% 的残留奥氏体,较传统淬火回火工艺处理钢的残留奥氏体量多 10% 左右。可见控制碳的配分在最终组织控制方面起到了关键作用。

$$f_m = 1 - \exp[-0.11(M_s - QT)] \quad (1)$$

式中: f_m - 淬火至 QT 时形成的马氏体分数。

在热变形 + Q&P 工艺中,热变形对微观组织产生了以下作用:(1)晶粒尺寸的变化,在变形量较小时(如 10% 和 30%),晶粒尺寸变形不大,而变形量较大时(如 70%),再结晶导致晶粒明显细化。(2)位错密度的变化,随变形量的增加,钢的位错密度增加,而当发生再结晶后,钢的位错密度急剧下降。(3) M_s 温度的变化:当变形量较小时,利用马氏体

形核,使 M_s 降低^[14]。而大量变形时,奥氏体变形产生大量位错,母相呈现强化阻碍形核^[15],导致 M_s 随变形量的增加而下降,产生奥氏体机械稳定化^[16],主要原因是在畸变点阵中,塑性变形引入晶体缺陷破坏了母相与新相之间共格关系,造成奥氏体加工硬化,使马氏体转变时原子运动困难。

综上所述,在适当的变形条件下,热变形 + Q&P 工艺处理钢相对于 Q&P 工艺可以获得较多的残留奥氏体和较高的硬度,对于高性能钢的在线生产和组织性能调控来讲存在较大调整空间。

3 结论

(1)相对于 Q&P 工艺处理的样品,热变形 + Q&P 工艺可以获得较多的残留奥氏体和较高的硬度,可以成为高性能钢组织、性能调控的重要方法。

(2)随着变形量的增加,再结晶导致热变形 + Q&P 工艺处理钢的组织逐渐细化,钢的硬度随着再结晶程度的加大而降低。

青年科学基金项目(51101036),国家 973 项目(2010CB630803)资助

参考文献

- [1] Speer J, Matlock D K, De Cooman B C, et al. Carbon Partitioning into Austenite after Martensite Transformation[J]. Acta Material, 2003, 51(9):2611-2622.
- [2] Matlock D K, Brautigam V E, Speer J G. Application of the Quenching and Partitioning (Q&P) Process to a Medium-carbon High Si Microalloyed Bar Steel[J]. Materials Science Forum, 2003, 426(4):1089-1094.
- [3] Speer J, Streicher A M, Matlock D K, et al. Quenching and Partitioning: A Fundamentally New Process to Create High Strength Trip Sheet Microstructures[C] // Damm E B, Merwin M. Austenite Formation and Decomposition. Warrendale PA: TMS-ISS, 2003: 505-522.
- [4] 王存宇. 30GPa% 级超高强度马奥组织钢的研究[D]. 北京:钢铁研究总院, 2010.
- [5] Bohuslav M, Hana J, Daniela H, et al. The Effect of Mn and Si on the Properties of Advanced High Strength Steels Processed by Quenching and Partitioning[J]. Materials Science Forum, 2010, 654-656: 94-97.
- [6] Mullner P, Solenthaler C. On the Effect of Deformation Twinning on Defect Densities[J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 230(1-2):107-115.
- [7] Speer J G, Matlock D K. Developments in the Quenching and Partitioning Process[J]. World Iron & Steel, 2009(1):31-39.
- [8] Somani M C, Karjalainen L P, Porter D A, et al. Evaluation of the Behaviour and Properties of a High-Si Steel Processed Using Direct Quenching and Partitioning[J]. Materials Science Forum, 2012, 706-709:2824-2829.
- [9] Zhou S, Zhang K, Chen N L, et al. Investigation on High Strength Hot-rolled Plates by Quenching-Partitioning-Tempering Process Suitable for Engineering[J]. ISIJ International, 2011, 51(10):1688-1695.
- [10] Thomas G A, Speer J G, Matlock D K. Quenched and Partitioned Microstructures Produced Via Gleeble Simulations of Hot-Strip Mill Cooling Practices[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical, 2011, 42(12):3652-3659.
- [11] 张玉杰, 王存宇, 曹文全, 等. 热变形 + Q&P 工艺处理钢的微观组织和硬度[J]. 热加工工艺, 2013, 42(10):188-190.
- [12] 张玉杰, 王存宇, 刘文忠, 等. 变形温度对淬火配分钢微观组织和硬度的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(5):97-102.
- [13] Guimaraes J R C, Shyne J C. On the Effect of Plastic Deformation on Thermal Stabilization of Austenite in an Fe-Ni-C Alloy[J]. Metallurgical Transactions A, 1971, 2(8):2063-2065.
- [14] Koistinen D P, Marburger R E. A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron Carbon Alloys and Plain Carbon Steel[J]. Acta Metallurgica, 1959, 36(7):59-63.
- [15] Maxwell P C, Goldberg A, Shyne J C. Stress-Assisted and Strain-induced Martensites in Fe-Ni-C Alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1974, 5(6):1305-1338.
- [16] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体[M]. 北京:科学出版社(第二版), 1999:700-704.

付勇涛(1978-),男,博士生,高级工程师,1999年武汉科技大学(本科)毕业,高强度钢研发。

E-mail:13036116985@163.com

收稿日期:2014-03-03