

· 组织和性能 ·

Q&P(淬火和分配)工艺对25Si2Ni3钢组织和力学性能的影响

解西强^{1,2} 高文涛³ 时捷² 王存宇² 张方¹

(1 昆明理工大学机电学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081;

3 鞍山钢铁集团公司, 鞍山 114021)

摘要 对0.24C-1.72Si-2.96Ni钢进行Q&P处理:880℃ 15 min-淬火至150~260℃(QT) 5 min-300℃ 10 min油淬。结果表明,Q&P处理的钢为板条马氏体、残余奥氏体、孪晶马氏体和ε碳化物的复合组织;QT影响钢中马氏体量,随QT由150℃升高至260℃,钢的抗拉强度由1580 MPa降至1505 MPa,冲击功由45 J升至50 J。与传统淬-回火工艺相比,Q&P处理钢的抗拉强度降低25~100 MPa,冲击功提高5~8 J,伸长率没有明显变化。

关键词 Q&P工艺 力学性能 组织

Effect of Quenching and Partitioning (Q&P) Process on Structure and Mechanical Properties of Steel 25Si2Ni3

Xie Xiqiang^{1,2}, Gao Wentao³, Shi Jie², Wang Cunyu² and Zhang Fang¹

(1 Mechano-Electronic School, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 3 Anshan Iron and Steel Group Co, Anshan 114021)

Abstract The Q&P process: heating at 880℃ for 15 min - quenching to 150~260℃ (QT) for 5 min - heating to 300℃ for 10 min and oil cooling of steel 0.24C-1.72Si-2.96Ni has been carried out. Results showed that the Q&P treated steel had complicated structure consisting of lath martensite, retained austenite, twinned martensite and ε-carbides; the QT had influence on amount of martensite in steel, with increasing QT from 150℃ to 260℃, the tensile strength of steel decreased from 1580 MPa to 1505 MPa, the impact energy of steel increased from 45 J to 50 J. As compared with traditional quenching-tempering process, the tensile strength of Q&P treated steel decreased by 25~100 MPa, the impact energy of Q&P treated steel increased by 5~8 J, of which the elongation of steel hadn't obvious change.

Material Index Quenching and Partitioning Process, Mechanical Properties, Structure

Q&P工艺(Quenching and Partitioning process)是 Speer 等人提出的一个热处理新概念^[1],其实质是根据马氏体转变是变温相变和碳在铁素体、奥氏体间溶解度的差异,利用碳的扩散来实现多相组织结构。对于Q&P工艺,前人在热力学、动力学、碳的扩散^[2-5]、相界面的迁移^[6]等方面都进行了研究,对其力学性能也做了一定的探讨^[7]。本试验利用Q&P工艺对25Si2Ni3钢进行热处理,研究了淬火温度QT对微观组织和力学性能的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验用钢为25Si2Ni3钢(%:0.24C、1.72Si、2.96Ni、0.005S、0.006P),由真空感应炉冶炼,铸成50 kg的钢锭,改锻成Φ16 mm的圆棒并进行退火处理,随后加工成拉伸和冲击试样毛坯。在经过Q&P(图1)工艺处理后,将毛坯加工成标准拉伸($l_0 = 5d_0$, $d_0 = 5$ mm)和Charpy-V型冲击试样(10 mm × 10 mm × 55 mm),并进行力学性能测试。

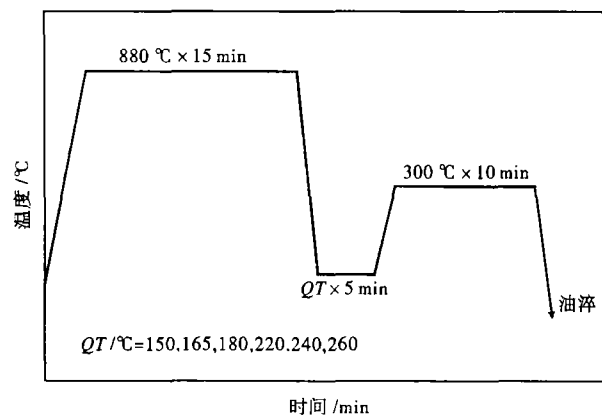


图1 25Si2Ni3钢Q&P热处理工艺

Fig. 1 Q&P heat treatment process for steel 25Si2Ni3

1.2 试验方法

由于马氏体相变属于变温相变,所以本次试验根据 $f_m = 1 - e^{-0.011 \times (M_s - QT)}$ (f_m 为马氏体的体积分数)公式^[8]计算得到不同马氏体量时对应的QT温度(表1),式中的 M_s 由公式 $M_s(℃) = 539 - 423C - 30.4Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - 7.5Mo$ ^[9]计算获得,约为385℃。

表 1 QT 对 25Si2Ni3 钢马氏体体积分数的影响
Table 1 Effect of QT on volume fraction of martensite in steel 25Si2Ni3

QT/°C	马氏体量/%
150	93
165	91
180	90
220	85
240	80
260	75

Q&P 工艺结束后, 保留金相样, 力学性能试样进行 300 °C × 2 h 回火。为与传统淬-回火工艺 (880 °C 15 min, 油淬, 300 °C × 2 h 回火) 进行对比。热处理均在盐浴炉进行。

2 试验结果及分析

2.1 力学性能

由图 2 可见, 拉伸强度随 QT 的升高呈单调下降趋势, 与传统淬-回火工艺相比 (图中标出的直线), Q&P 工艺降低了钢的强度, 但提高了冲击韧性。

2.2 微观组织

传统工艺处理后试验钢的马氏体形貌杂乱, 而经过 Q&P 工艺处理后马氏体板条头部形状较平直, 并且板条长度更长 (图 3)。

这可能与马氏体变温相变的特征有关: Q&P 工艺中, 淬火到 QT 时, 只有部分奥氏体转变为马氏体, 这部分马氏体有相对较大的长大空间, 从而使得板条长度更大, 随着 QT 升高, 淬火到 QT 时转变

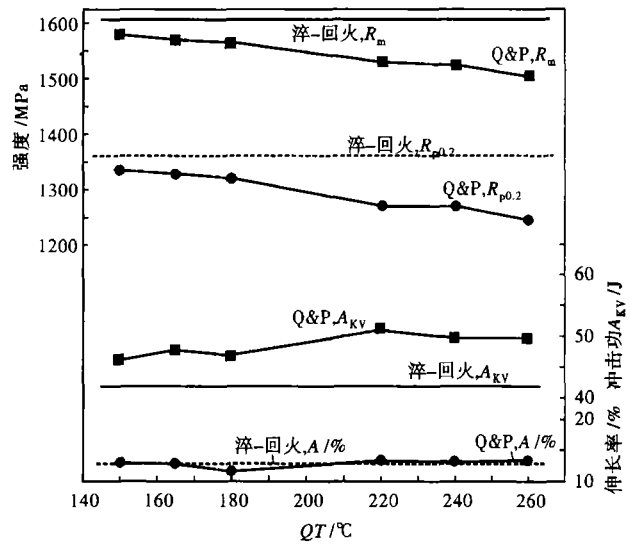


图 2 QT 对 25Si2Ni3 钢强度、冲击功和伸长率的影响
Fig. 2 Effect of QT on strength, impact energy and elongation of steel 25Si2Ni3

的马氏体量减小, 板条束之间的相互干扰碰撞减少, 板条束的形貌更加明显, 板条形貌更有条理; 而传统工艺中, 奥氏体几乎全部转变为马氏体, 大量的马氏体形核、长大, 相邻马氏体板条必然产生碰撞, 互相挤压, 从而导致了整体形貌也更加杂乱无序; 此外, 当 QT 较低时, 如图 3 (b) 所示, 淬火到 QT 180 °C, 奥氏体转变得到的马氏体量大, 预计约为 90%, 因此其组织形貌更接近于传统工艺。

此外, 扫描电镜观察中还发现, Q&P 工艺马氏体

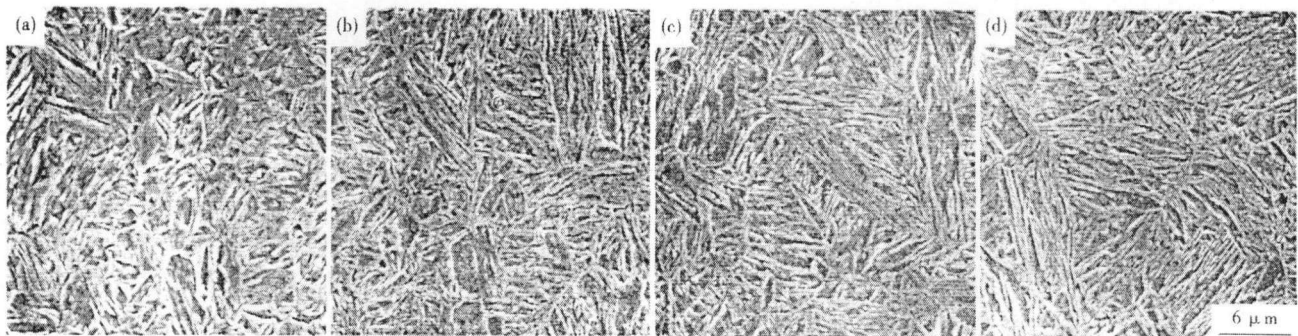


图 3 25Si2Ni3 钢马氏体形貌 SEM: 淬火 (a); Q&P 处理 QT 180 °C (b), 220 °C (c) 和 260 °C (d)

Fig. 3 Morphology of martensite in steel 25Si2Ni3: quenching (a); Q&P treated at QT 180 °C (b), 220 °C (c) and 260 °C (d)

板条内存在碳化物析出, 但是碳化物分布不均匀, 有些板条中析出明显, 而有些则析出很少, 如图 3 (b, c, d) 所示。Edmons 也观察到这种现象, 并提出这可能与碳的扩散有关^[10]。

利用透射电镜, 在试验钢中发现两种不同特征的残余奥氏体, 即马氏体板条间的残余奥氏体薄膜 (图 4a) 和宽度在 200 nm 左右的条块状残余奥氏体

(图 4b)。这两种形态的残余奥氏体可能与马氏体相变的两种形核长大方式^[11]有关 (马氏体板条分别以相邻并平行和不相邻但平行的两种方式形核长大): 淬火到 QT 的过程中, 马氏体以以上两种方式形核长大, 部分奥氏体转变为马氏体, 未转变的奥氏体以板条间薄膜和较大的条块状两种方式存在, 在以后的工艺过程中, 碳的扩散富集以及相变应力等

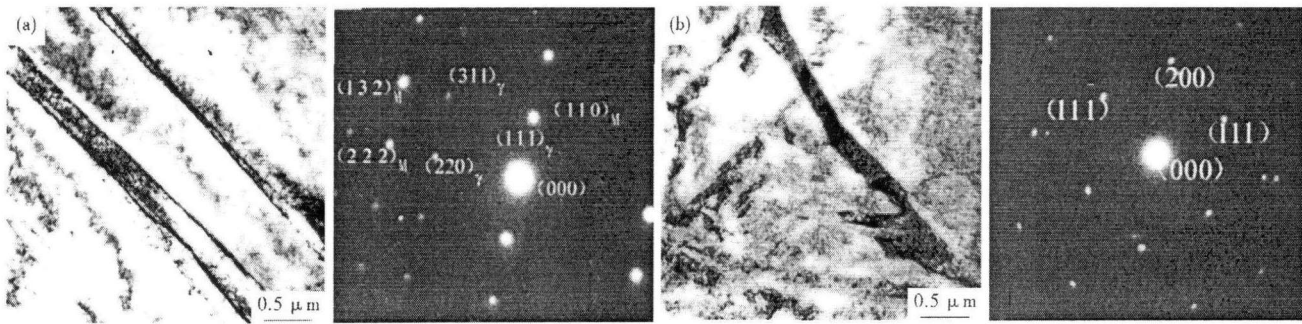


图 4 25Si2Ni3 钢残余奥氏体的形貌 (QT 260 °C), TEM: (a) 薄膜残余奥氏体; (b) 条状残余奥氏体

Fig. 4 Morphology of retained austenite in steel 25Si2Ni3, QT260 °C, TEM: (a) thin film retained austenite; (b) lath retained austenite

多种因素使奥氏体稳定化。因此,最终淬火时板条间的未转变奥氏体可能被保留下来得到图 4(a)所示的薄膜形貌;而较大的条块状未转变奥氏体也有可能得以保留,得到较大尺寸的残余奥氏体,如图 4(b)所示。在其它不同 QT 的工艺中也观察到了这两种特征残余奥氏体。

与淬-回火工艺相比,Q&P工艺韧性的提高可能与残余奥氏体密切相关:Q&P工艺存在两种不同形貌的残余奥氏体,且残余奥氏体薄膜分布较均匀,而在淬-回火的工艺试样中,则很难观察到残余奥氏体的存在。

此外在试验钢中还发现了孪晶马氏体和 ε 碳化物的存在。孪晶马氏体可能是在碳的扩散富集之后,高碳的奥氏体在最后淬火时形成,这也说明了工艺过程中存在碳的扩散。试验钢中发现了 ε 碳化物的存在,说明 Si 并没有完全抑制碳化物的析出,但是除了 ε 碳化物以外,并没有发现其它形貌的碳化物析出,说明 Si 还是起到了抑制 ε 碳化物进一步转变的作用。

QT 变化直接对应第 1 次淬火到 QT 时先形成

的马氏体量的变化,在 Ms-Mf 温度范围内,QT 升高,先形成的马氏体量减少,说明先形成马氏体的量是影响其强度变化的重要因素。但是 QT 的变化还会影响到其它的微观组织结构,比如残余奥氏体等^[7,12],因此工艺参数对微观组织结构以及力学性能的影响规律还有待于进一步的研究。

3 结论

(1) 与传统淬-回火工艺相对比,Q&P工艺降低了钢的抗拉强度,但可有效提高材料的冲击韧性,对塑性的影响不大。

(2) 淬火温度 QT 从 150 °C 上升到 260 °C,强度随 QT 的升高而下降,说明先形成马氏体的量是影响其力学性能变化的重要因素。

(3) Q&P工艺的组织有残余奥氏体、孪晶和 ε 碳化物。残余奥氏体形貌一种为板条间的奥氏体薄膜,另一种为较大条块状残余奥氏体;与淬火态相比,Q&P工艺的马氏体板条更长,更有条理,并且随着 QT 升高,马氏体板条束的形貌更加明显。

参考文献

- 1 Matlock D K, Br (a) utigam V E, Speer J G. Application of the Quenching and Partitioning (Q&P) Process to a Medium-carbon High Si Microalloyed Bar Steel. Mater Sci Forum, 2003, 426-432:1089
- 2 Hillert M, Ågren J. On the Definitions of Paraequilibrium and Orthoequilibrium. Scr Mater, 2004, 50:697
- 3 Speer J G, Matlock D K, DeCooman B C, et al. Carbon Partitioning Into Austenite After Martensite Transformation. Acta Materialia, 2003, 51:2611
- 4 Hillert M, Ågren J. Reply to Comments on "On the Definitions of Paraequilibrium and Orthoequilibrium". Scripta Materialia, 2005, 52:87
- 5 Clarke A, Speer J G, Matlock D K, et al. Microstructure and Carbon Partitioning in a 0.19C%-1.59Mn%-1.63Si% TRIP Sheet Steel Subjected to Quenching and Partitioning (Q&P). International Conference on Solid-Solid Phase Transformations in Inorganic Materials, 2005, 2:99
- 6 Zhong Ning, Wang Xiaodong. Interface Migration Between Martensite and Austenite during Quenching and Partitioning (Q&P) Process. Materials Science and Technology, 2006, 22(6):751
- 7 Gerdman F L H, Speer J G, Matlock D K. Microstructure and Hardness of Steel Grade 9260 Heat-treated by the Quenching and Partitioning (Q&P) Process. MS&T 2004 Conference Proceedings, 439
- 8 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体. 第 2 版. 北京:科学出版社,1999
- 9 Ridley N, Stuart H, Zwell L. Lattice Parameters of Fe-C Austenites at Room Temperature. Trans TMS-AIME, 1969, 245:1834
- 10 Edmonds D V, He K, Miller M K, et al. Microstructural Features of 'Quenching and Partitioning': A New Martensitic Steel Heat Treatment. Materials Science Forum, 2007, 539-543:4819
- 11 Msrder A R, Krauss G. The Formation of Low-Carbon Martensite in Fe-C Alloys. Transactions of the ASM, 1969, 62:957
- 12 Edmonds D V, He K, Rizzo F C, et al. Quenching and Partitioning Martensite-A Novel Steel Heat Treatment. Materials Science and Engineering A, 2006, 438-440(25):25

解西强 (1983-), 男, 硕士研究生, 2008 年昆明理工大学毕业, 从事马氏体钢组织性能的研究。

收稿日期:2008-03-10