

轧后冷却工艺对 V-N-Cr 微合金化 Q550E 高强钢组织性能的影响

王宝华^{1,2} 张明博² 程玉君² 胡 军³ 薛启河² 杜林秀³

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 河钢股份有限公司承德分公司, 承德 670102;

3 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819)

摘要 对低碳 V-N-Cr 微合金化钢进行了控轧控冷实验, 终冷后采用了随炉冷、保温毡缓冷、空冷 3 种冷却制度, 并对 3 种不同冷却制度钢板进行了显微组织、综合力学性能和断口形貌的分析。研究表明, 空冷钢板显微组织为细小多边形铁素体及针状铁素体复相组织, 铁素体晶粒尺寸 5~8 μm, 针状铁素体由交织的板条组成, 宽度 1~3 μm。在随炉冷及保温毡缓冷时, 由于冷却速率缓慢, 多边形铁素体及针状铁素体发生了回火, 并析出细小弥散的碳化物。3 种冷却条件下, 屈服强度均 ≥585 MPa, 抗拉强度 ≥694 MPa, 延伸率 ≥27%, 而且 1/2 试样 -60 °C 冲击功 ≥36 J, 综合力学性能优于 Q550F 级国标要求。细晶强化、析出强化、组织强化为本钢种的主要强化方式, 冲击断口均由韧窝组成, 呈现韧性断裂模式, 控轧控冷引起的晶粒细化及针状铁素体的形成有效阻碍解理裂纹的扩展, 从而增强低温韧性。

关键词 V-N-Cr 微合金化 控轧控冷 Q550E 针状铁素体 强韧性

Effect of Cooling Process After Rolling on Microstructure and Properties of V-N-Cr Microalloyed Q550E High Strength Steel

Wang Baohua^{1,2}, Zhang Mingbo², Cheng Yujun², Hu Jun³, Xue Qihe¹ and Du Linxiu³

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2 Chengde Branch, HBIS Company Limited, Chengde 670102;

3 The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract The controlled rolling and cooling test was conducted on V-N-Cr microalloyed low carbon steel. There are three cooling mode, including cooling with furnace, cooling with insulation quilt, and air cooling, and the microstructure, mechanical properties and fracture morphology of three kinds of cooling system were analyzed. The results that show the fine polygonal ferrite and acicular ferrite multiphase structure were obtained in air cooling steel plate. The grain size of ferrite is 5 to 8 μm. Acicular ferrite consists of interwoven laths with width of 1 to 3 μm. The tempering occurred in polygonal ferrite and acicular ferrite, and small dispersed carbides were precipitated due to the slow cooling rate in cooling with furnace and cooling with insulation quilt. Under three kinds of cooling conditions, the yield strength ≥585 MPa, tensile strength ≥694 MPa, elongation ≥27%, and 1/2 sample impact toughness at -60 °C ≥36 J are obtained. The comprehensive mechanical properties is better than GB requirements of Q550F grade. Fine grain strengthening, precipitation strengthening, and microstructural strengthening were the main ways to strengthen the steel. The impact fracture are composed of dimples, exhibiting toughness fracture mode. The grain refinement and acicular ferrite formation caused by controlled rolling and cooling effectively resist the propagation of cleavage cracks, enhancing the low temperature toughness.

Material Index V-N-Cr Microalloying, Controlled Rolling and Cooling, Q550E, Acicular Ferrite, Strength and Toughness

Q550E 钢为屈服强度 550 MPa 级的低合金高强度钢, 主要应用于工程机械、车辆制造等诸多领域^[1]。国标 (GB/T 1591-2008) 对 Q550E 钢的屈服强度的要求是不低于 550 MPa, 抗拉强度在 670~830 MPa, 断后延伸率在 16% 之上, -40 °C 冲击功不小于 31 J, 同时应该具备良好的焊接性能^[2]。国内钢厂生产高强钢多采用 Nb-Ti 微合金化、控轧控冷结合回火调制处理等工艺, 合金成本高、生产周期

长, 经济效益不显著^[3]。

V 与 N 复合添加在细化多边形铁素体晶粒并促进晶内针状铁素体形核的同时, 可发挥极强的析出强化作用^[4,6]。低碳成分设计可提高钢板的焊接性能, 降低焊接热影响区的焊硬性, 避免粗大渗碳体和马氏体-奥氏体岛形成, 同时避免连铸坯裂纹的发生。另外添加廉价的 Cr 元素可以细化组织, 提升钢的淬透性, 使强度得以提高。

1 实验材料与方法

以超低碳钢废钢为原料,采用 150 kg 真空电磁感应炉冶炼,配加高碳锰铁、锰铁、硅铁、铬铁、钒氮合金铝粒后保温 15 min,浇铸成钢锭(表 1),再锻造成 600 mm × 100 mm × 80 mm 的锻坯,切成 100 mm × 100 mm × 80 mm 的坯料。在实验室 Φ450 mm 热轧机上轧制出 9 mm 钢板,钢板奥氏体化温度为 1 200 °C,保温 3 h,轧制过程采用在再结晶区和未再结晶区两阶段多道次轧制,控轧控冷工艺参数如表 2 所示,第 2 阶段开轧温度约为 900 °C,终轧温度控制在 843 ~ 856 °C,随后采用 ACC 系统快速冷却至终冷温度(返红温度)557 ~ 564 °C,最后采用了空冷、保温毡缓冷及随炉冷却 3 种不同的冷却模式降至室温。

在 Q550E 钢板厚度方向切取金相试样,经研磨抛光后,采用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,在 OLYMPUS BX53M 光学显微镜下观察其显微组织。根据 ISO6892-1:2009 标准,将 9 mm 钢板沿纵向取全厚度的狗骨头形状的拉伸样进行拉伸实验,测定其屈服强度、抗拉强度及断后延伸率,试样标距为 50 mm。另外,按照 ASTM E23 标准,进行夏比缺口落锤冲击试验,试样厚度为 5 mm。并通过 FEI Quanta 600 扫描

表 1 实验钢化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of experimental steel/%

C	Si	Mn	S	P	Als	V	N	Cr
0.10	0.27	1.72	0.004	0.012	0.022	0.095	0.012	0.23

表 2 实验钢控轧控冷工艺参数

Table 2 Parameters of controlled rolling and cooling process of experimental steel

编号	开轧温度/ °C	待温温度/ °C	终轧温度/ °C	终冷温度 (返红)/°C	冷却 方式
1	1 200	906	856	561	空冷
2	1 200	902	846	564	保温毡缓冷
3	1 200	904	843	557	随炉冷

电子显微镜观察冲击断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

空冷条件下的组织主要以针状铁素体和多边形铁素体组成,晶粒尺寸较小,其中铁素体在 5 ~ 8 μm,针状铁素体由交织的板条组成,宽度在 1 ~ 3 μm,见图 1(a)。

保温毡缓冷条件下的显微组织由多边形铁素体、部分针状铁素体及渗碳体组成,与空冷时组织相比,由于冷却速率缓慢,多边形铁素体及针状铁素体

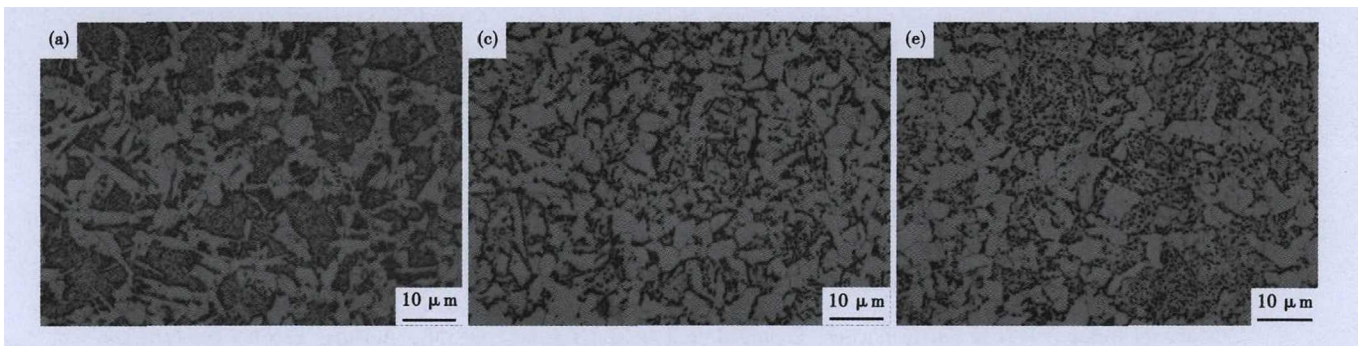


图 1 实验钢轧后不同冷却模式下 OM 显微组织:(a)空冷;(b)保温毡缓冷;(c)炉冷

Fig. 1 Optical micrographs of experimental steel with different cooling conditions after rolling: (a) air cooling; (b) insulation quilt cooling; (c) furnace cooling

发生了回火,所以出现了弥散分布的渗碳体组织,见图 1(b)。在随炉冷时,显微组织以多边形铁素体、针状铁素体及渗碳体组成,与保温毡缓冷相比,渗碳体比例增加,分布更为均匀弥散,见图 1(c)。

2.2 综合力学性能

实验结果表明,3 种不同热处理工艺钢板的屈服和抗拉均强度均满足 Q550E 钢国标要求,延伸率远超国标要求的 16%,其中通过随炉冷却方式的钢板屈服强度最大,达 625 MPa,这取决于缓慢冷却过程中形成的高体积分数的纳米尺度 VC 析出相。拉

伸实验数据及比较如表 3 和图 2 所示。

9 mm 钢板 -20 °C、-40 °C、-60 °C 冲击功数值达到国标要求,冲击功随着实验温度的降低变化不敏感,具体实验数据如表 4 所示。

表 3 实验钢拉伸性能

Table 3 Tensile properties of experimental steel

冷却方式	厚度/mm	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A /%
空冷	9	585	712	27.0
保温毡缓冷	9	592	694	27.5
随炉冷	9	625	709	29.0

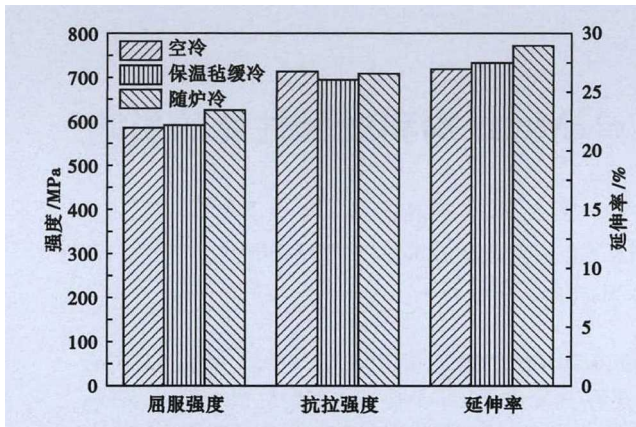


图2 拉伸实验结果比较

Fig. 2 Comparison of tensile test results

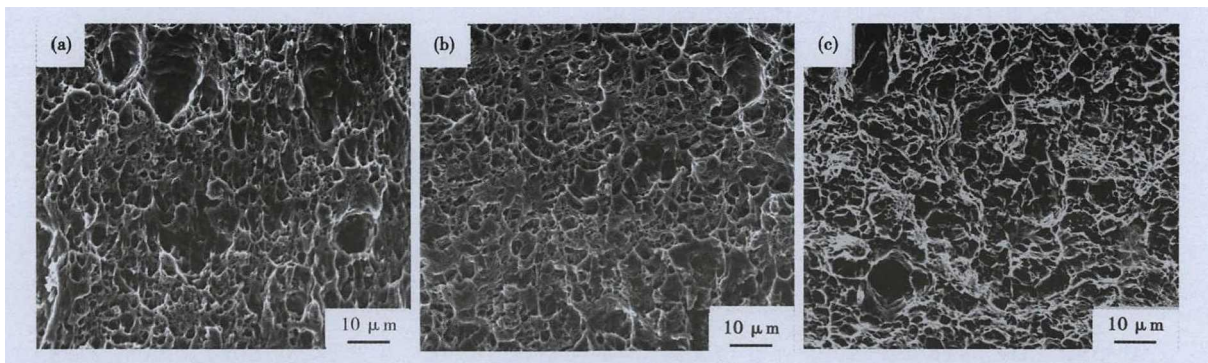
表4 实验钢低温冲击性能

Table 4 Low temperature Charpy impact energy of experimental steel

冷却模式	试样尺寸/ mm	低温冲击功/J		
		-20 °C	-40 °C	-60 °C
空冷	5	49	34	42
保温毡缓冷	5	34	42	36
随炉冷	5	37	40	39

2.3 断口显微形貌

实验钢在轧后不同冷却制度下 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冲击断口 SEM 形貌如图 3 所示。通过对 3 种冷却制度下的断口分析可知,断口形貌呈现出典型的韧性断裂特征。含有大韧窝及周围均匀的小韧窝组成,良

图3 实验钢轧后不同冷却模式条件下 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击断口形貌:(a)空冷;(b)保温毡缓冷;(c)随炉冷,SEMFig. 3 Morphology of impact fracture of experimental steel at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ with different cooling conditions after rolling: (a) air cooling; (b) slow cooling by heat retaining felt; (c) furnace cooling

好的韧性主要得益于针状铁素体的存在,因为针状铁素体板条间相互交织,而且其板条维度与解理单元相近,内部高比例的大角度晶界对于裂纹源的萌生及裂纹的扩展有很大阻碍作用^[7-8]。因此通过 V-N 微合金化成分设计结合控轧控冷工艺控制形成针状铁素体组织,改善了实验钢的冲击韧性。

3 结论

(1) 轧后 3 种冷却制度下的显微组织主要由多边形铁素体、针状铁素体组成,在随炉冷及保温毡缓冷时,由于冷却速率缓慢,多边形铁素体及针状铁素体发生了回火,并析出细小弥散的碳化物。

(2) 9 mm 厚钢板屈服强度均 $\geq 585\text{ MPa}$, 抗拉强度 $\geq 694\text{ MPa}$, 延伸率 $\geq 27\%$, 而且 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时半试样冲击功 $\geq 36\text{ J}$, 综合力学性能达到 Q550F 钢级国标要求。

(3) 实验钢细晶强化、析出强化及组织强化为主要强化机制,低碳成分设计、晶粒细化、针状铁素体组织形成为主要的韧化机制。

国家自然科学基金资助项目(51604072),中央高校

基本科研业务费(N150704003)资助。

参考文献

- [1] 张晓刚. 几年来低合金高强度钢的发展[J]. 钢铁, 2011, 46(11): 1-9.
- [2] Jiang Q L, Li Y J and Wang J, et al. Characterization on Strength and Toughness of Welded Joint for Q550 Steel[J]. Bulletin of Materials Science, 2011, 34(1): 161-167.
- [3] 王东梅, 张朋彦, 朱伏先, 等. 回火工艺对超快冷 Q550E 钢板组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(12): 103-107.
- [4] 胡军, 杜林秀, 王万慧, 等. 590 MPa 级热轧 V-N 高强车轮钢组织性能控制[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(6): 820-823.
- [5] 徐曼, 孙新军, 刘清友, 等. 低碳含钒钢组织变化及 V(C, N) 析出规律[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(2): 25-30.
- [6] 胡军. V 微合金钢晶内形核铁素体相变及微观组织纳米化[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [7] Edmonds D V and Cochrane R C. Structure-property Relationships in Bainitic Steels[J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21(6): 1527-1540.
- [8] Guo Z, Lee C S and Morris J W. On Coherent Transformations in Steel[J]. Acta Materialia, 2004, 52(19): 5511-5518.

王宝华(1973-), 男, 高级工程师, 博士研究生(北京科技大学), 1996 年河北理工大学(专科)毕业, 炼钢工艺技术研究。E-mail: 13803146375@163.com

收稿日期: 2018-04-10