

镍对 09CuPCrNi 耐候钢高温力学性能的影响

吴浩方¹ 万兰凤¹ 黄绪传¹ 张 晖²

(1 上海梅山钢铁股份有限公司技术中心, 南京 210039; 2 安徽工业大学, 马鞍山 243002)

摘 要 采用 Gleeble 3000 热模拟试验机测试和研究了 CCT 曲线以及镍含量对 09CuPCrNi 耐候钢 (% : 0.08C, 0.34~0.35Cu, 0.091~0.099P, 0.53~0.55Cr, 0.02~0.27Ni) 的 700~1300 ℃ 塑性和抗拉强度的影响。结果表明, 当钢中 Ni 含量由 0.27% 降至 0.02% 时, Ar₁、Ar₃ 分别由 670.2 ℃ 和 860.0 ℃ 升至 710.0 ℃ 和 882.5 ℃, 并且贝氏体和马氏体相变也提前发生, 800 ℃ 高温脆性温度区增宽, 950 ℃ 高温脆性区消失。0.02% Ni 耐候钢 09CuPCrNi 室温抗拉强度 475~485 MPa, 伸长率 32%~34%, 冲击功 72~84 J, 满足该耐候钢力学性能使用要求。

关键词 09CuPCrNi 耐候钢 镍 高温力学性能

Effect of Nickel on Mechanical Properties of Weathering Steel 09CuPCrNi at High Temperature

Wu Haofang¹, Wan Lanfeng¹, Huang Xuchuan¹ and Zhang Hui²

(1 Technical Center, Shanghai Meishan Iron and Steel Co Ltd, Nanjing 210039;
2 Anhui University of Technology, Maanshan 243002)

Abstract CCT curves and effect of nickel content on ductility and tensile strength of weathering steel 09CuPCrNi (% : 0.08C, 0.34~0.35Cu, 0.091~0.099P, 0.53~0.55Cr, 0.02~0.27Ni) at 700~1300 ℃ have been measured and studied by using Gleeble 3000 thermal simulator. Results show that with decreasing Ni content to 0.02% from 0.27%, the Ar₁ and Ar₃ of steel increase respectively to 710.1 ℃ and 882.5 ℃ from 670.2 ℃ and 860.0 ℃, and the bainite and martensite transformation occur earlier, while the high temperature embrittlement zone at 800 ℃ is widen and that at 950 ℃ disappears. The tensile strength of 0.02% Ni weathering steel 09CuPCrNi at ambient temperature is 475~485 MPa with elongation 32%~34% and impact energy 72~84 J to meet the application requirement of the weathering steel.

Material Index Weathering Steel 09CuPCrNi, Nickel, Mechanical Properties at High Temperature

高强度集装箱用钢 09CuPCrNi 具有良好的力学和耐大气腐蚀性能, 其耐腐蚀性能的提高主要是通过 Cu、P 元素的联合作用^[1]。但是, 该类钢在板坯高温加热过程中, 由于基体铁易被选择性氧化, 氧化铁皮下会富集一层液相铜, 这种“富铜液相”沿奥氏体晶界向内部渗透, 轧制过程中极易导致板坯表面和边部的开裂^[2]。因此, 该钢种一般通过添加镍元素抑制“铜致表面热裂纹”, 镍的加入量和铜的含量有关, 镍、铜比一般要求接近 1:1^[3]。

近年来, 随着国内外对含铜钢研究的深入和轧制技术的提高, 已有部分专利和文献提出了通过改进轧制和加热等工艺措施解决含铜钢去镍后抑制表面热裂纹产生的办法^[4-6]。因此, 降镍对 09CuPCrNi 耐候钢高温力学性能的影响, 成为该类钢降低生产成本, 节约稀缺资源急待研究的课题之一。

1 试验材料和研究方法

用 50 kg 真空感应炉熔炼 2[#]、3[#] 炉号钢 (表 1), 其中 1[#] 试样为梅钢 09CuPCrNi 耐候钢实际生产成

表 1 试验钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steels /%

炉号	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr
1 [#]	0.076	0.32	0.48	0.091	0.015	0.021	0.35	0.27	0.55
2 [#]	0.082	0.32	0.43	0.094	0.014	0.026	0.34	0.12	0.53
3 [#]	0.084	0.31	0.42	0.099	0.013	0.042	0.35	0.02	0.53

分。采用 Gleeble 3000 热模拟试验机研究降镍对试验钢 CCT 曲线和高温塑性影响的实验工艺, Gleeble 热模拟实验在真空中进行。

CCT 曲线试样尺寸为 Φ6 mm × 71 mm, 将试样以 5 ℃/s 的速度加热至 1000 ℃ 奥氏体化, 保温 180 s, 分别以 0.5~80 ℃/s 的冷却速率连续冷却至 200 ℃ 以下, 根据热膨胀曲线及相变组织绘制 CCT 曲线。

高温塑性试样尺寸为 Φ10 mm × 120 mm, 两端加工成 10 mm × 10 mm 螺纹, 将试样以 5 ℃/s 的速度加热至 1400 ℃, 保温 60 s, 以均匀成分和温度, 然后以 5 ℃/s 的冷却速率冷却至试验温度 (700~1350 ℃), 保温 60 s 后以 0.5 × 10⁻³/s 的应变速率进行拉伸试验。

2 试验结果

2.1 连续转变动力学曲线

从图 1 中可以看出,两种成分试验钢 CCT 曲线可以分为 3 个主要区域:高温转变区,相变产物主要为先共析铁素体和少量珠光体;中温转变区,相变产物主要为贝氏体;低温转变区,相变产物为马氏体。对比图 1(a)和图 1(b),无 Ni(0.02% Ni)试验钢各

相转变温度均出现提高,Ar₁、Ar₃ 分别由含 0.27% Ni 试验钢的 670.2 °C 和 860.0 °C 升高到 710.1 °C 和 882.5 °C,并且贝氏体和马氏体相变也相对提前发生。此外,当冷却速度 ≤ 5 °C/s 时,无 Ni 试验钢已发生贝氏体转变,而含 0.27% Ni 的试验钢需 > 5 °C/s 才发生贝氏体转变。

2.2 高温抗拉强度和热塑性

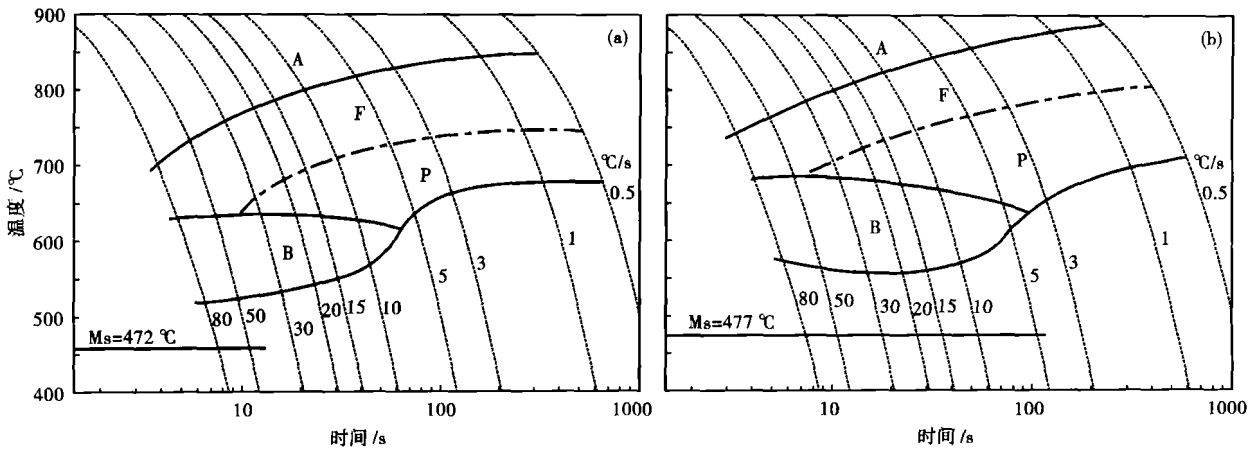


图 1 0.27% Ni(a)和 0.02% Ni(b)09CuPCrNi 耐候钢的 CCT 曲线
Fig. 1 CCT curves of 0.27% Ni (a) and 0.02% Ni (b) weathering steel 09CuPCrNi

从图 2(a)可以看出,温度明显影响了材料的高温塑性,试验钢存在 3 个热塑性变化的典型区域: I 区在 700 ~ 900 °C,该区塑性较差,800 °C 塑性低谷断面收缩率约 30%,随后随着温度的升高,材料塑性逐渐回升,但是与含 Ni 钢相比,不含 Ni 的试验钢塑性回升的速度较慢,塑性低谷的温度区间更宽; II 区在 900 ~ 1 200 °C, Ni 元素对该段热塑性影响较大,含镍试验钢塑性在 900 °C 回升到 80% 后重新下降,950 °C 出现第二个塑性低谷,并且,随着 Ni 含量

从 0.12% 增加到 0.27%,断面收缩率由 63% 下降到 51%,无镍试验钢则未出现第二个塑性低谷,950 °C 塑性达到 70%; III 区在 1 200 ~ T_m °C,该区内 3 种成分试验钢塑性均随着温度的升高而下降。

图 2(b) 试验钢的高温抗拉强度显示对应塑性波动较强的 750 ~ 950 °C,材料的高温抗拉强度背离了随温度升高而降低的一般规律,在 750 ~ 850 °C,材料的抗拉强度随温度的升高略有增加,900 °C 时含 Ni 较少和不含 Ni 的 2# 和 3# 试样抗拉强度开始下

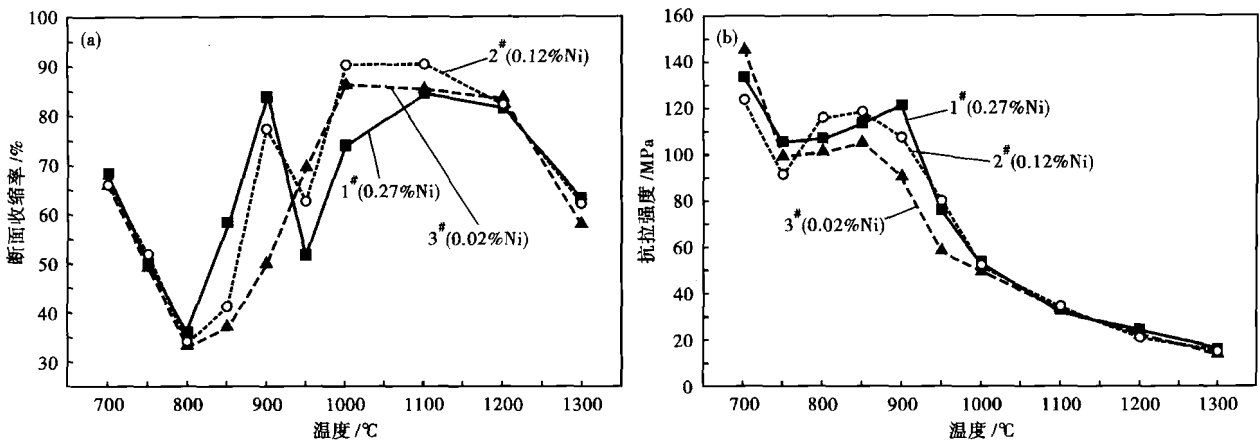


图 2 不同 Ni 含量 09CuPCrNi 耐候钢的高温塑性(a)和抗拉强度(b)
Fig. 2 Reduction of area (a) and tensile strength (b) of weathering steel 09CuPCrNi with different Ni content

降,而含 0.27% Ni 的 1[#]试样拉伸强度达到最大值。

2.3 试验钢的力学性能

从表 2 中可见,无 Ni 试验钢常温拉伸强度和屈服强度与含 0.27% Ni 试验钢相比分别下降约 5% 和 3%,对不同温度冲击功的影响也较小,虽然一

般认为镍元素有利于提高合金钢的力学性能,但是在 09CuPCrNi 耐候钢中,少量镍元素对耐候钢总体的力学性能影响较小。

3 讨论

合金钢的奥氏体化过程基本上是由碳元素扩散控制,从本试验结果看,09CuPCrNi 耐候钢中少量 Ni 元素起到了加速碳元素扩散的作用,无 Ni 耐候钢奥氏体相区略有减小,碳元素扩散速度减缓, A₃ 点和 A₁ 点温度与含 0.27% Ni 试验钢相比升高约 30 ℃。

试验钢高温塑性下降的典型区域,其中 I 区 800 ℃ 塑性低谷是位于奥氏体/铁素体两相区内,由于奥氏体晶界形成铁素体网状薄膜,初生的铁素体薄膜强度较奥氏体强度低,造成晶界强度下降,脆性增加。随后,随着试验温度进入奥氏体单相区,材料塑性逐渐回升,含 Ni 钢因为奥氏体相区较大, A₃ 点温度较低, 900 ℃ 时塑性迅速回升到 80% 以上,而无 Ni 耐候钢 A₃ 点温度较高,因此高温塑性的回升速度相对较慢, 850 ℃ 和 900 ℃ 高温塑性仅分别为 37% 和 49%,与含镍钢相比,不含镍钢 I 区塑性低谷的温度区间更宽。 III 区 (1 200 ~ T_m ℃) 的脆化原因是由于温度接近钢的熔点,沿晶界形成驻留的液相膜,导致材料的塑性随着温度的升高显著下降。

镍元素对耐候钢高温塑性的重要影响体现在 II 区, 950 ℃ 时含 Ni 钢重新出现了塑性的低谷区,而不含 Ni 的 3[#]试样则未出现。可以认为 950 ℃ 塑性下降主要与镍的含量有关:一方面镍元素的添加可能促进了硫、磷以及氧化物等杂质在奥氏体的晶间析出,提供了晶界空洞的形核源,从而导致塑性下降;另一方面由于钢中镍含量的增加,导致 Ni 的化合物在晶界沉淀析出,降低了晶界的结合力。从试验钢高温拉伸强度看,在 750 ~ 950 ℃ 塑性波动较强

表 2 不同 Ni 含量 09CuPCrNi 耐候钢的室温力学性能和低温冲击功
Table 2 Mechanical properties of weathering steel 09CuPCrNi with different Ni content at ambient temperature and impact energy at low temperature

炉号	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	冲击功/J			
				室温	0 ℃	-20 ℃	-40 ℃
1 [#] (0.27% Ni)	400 ~ 410	495	35 ~ 38	68 ~ 87	61 ~ 68	50 ~ 60	40 ~ 44
2 [#] (0.12% Ni)	405	490 ~ 500	33 ~ 35	80 ~ 90	70 ~ 77	53 ~ 59	32 ~ 37
3 [#] (0.02% Ni)	380 ~ 390	475 ~ 485	32 ~ 34	72 ~ 84	66 ~ 71	38 ~ 58	33 ~ 38

的区间,含 Ni 钢的高温拉伸性能均略高于无 Ni 试验钢,显示在该温度区,添加少量 Ni 元素导致了化合物析出量增多,从而在提高材料强度的同时造成该温度区热塑性的下降。

4 结论

(1) 09CuPCrNi 耐候钢降镍后, 800 ℃ 塑性低谷温度区间增宽, 950 ℃ 塑性低谷区消失,室温力学性能未发生明显变化,力学性能可取代现有 09CuPCrNi 耐候钢应用于实际生产。

(2) 09CuPCrNi 耐候钢降 Ni 后奥氏体相区略有减小,各相转变温度均出现升高,生产中可适当提高热轧终轧温度。

参考文献

- 1 Masato Yamashita, Hiroo Nagano, Toshihei Misawa, et al. Structure of Protective Rust Layers Formed on Weathering Steels by Long-term Exposure in the Industrial Atmospheres of Japan and North America. ISIJ International, 1998, 38(3):285
- 2 Yasumitsu Kondo. Effect of Atmospheric Conditions on Copper Behaviour during High Temperature Oxidation of a Steel Containing Copper. ISIJ International, 2007, 47(9):1309
- 3 Chen R Y, Yuen W Y D. Copper Enrichment Behaviours of Copper-containing Steel in Simulated Thin-slab Casting Processes. ISIJ International, 2005, 45(6):807
- 4 Kondo Yasumitsu, Kawasaki Kaoru, Harada Hiroshi, et al. Cu-containing Steel Material Having Superior Surface Quality, and Manufacturing Method Therefor. 日本专利, 2005-029883, 2005-11-30
- 5 Chihiro Nagasaki, Masashi Kaga, Koji Shibata, et al. Effect of Boron on Copper Induced Surface Hot Shortness of 0.1% Carbon Steel. ISIJ International, 2002, 42(Supplement):57
- 6 Seok-Jong Seo, Kentaro Asakura, Koji Shibata. Effects of 0.4% Si and 0.02% P Additions on Surface Hot Shortness in 0.1% C-0.5% Mn Steels Containing 0.5% Cu. ISIJ International, 1997, 37(3):240

吴浩方(1955-),男,高级工程师,北京科技大学毕业,钢铁冶金研究。

收稿日期:2009-05-15