

[补充信息]

两相区形变对含 Cu 低碳钢合金元素配分的影响

陈连生，李跃，田亚强[✉]，郑小平，魏英立，宋进英

华北理工大学教育部现代冶金技术重点实验室，唐山 063210

[Supplementary Information]

Effect of Intercritical Deformation on Alloy Elements Partitioning of Copper-bearing Low-carbon Steel

CHEN Liansheng, LI Yue, TIAN Yaqiang[✉], ZHENG Xiaoping, WEI Yingli,
SONG Jinying

Key Laboratory of the Ministry of Education for Modern Metallurgy Technology, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210

实验试剂与仪器

实验用含 Cu 低碳钢的化学成分(质量分数, %)为: C 0.18, Si 1.58, Mn 2.06, Cu 0.41, Ni 0.33, P 0.008, S 0.005, B 0.0017, 余量为 Fe。采用 50 kg 真空熔炼炉将实验用材料冶炼成铸锭, 铸锭经锻造制成厚度为 75 mm 的方坯, 方坯在氩气保护加热炉中加热至 1 200 °C 保温 4 h 使合金元素成分均匀化。方坯开轧温度为 1 100 °C, 经 3 道次轧制到厚度为 50 mm, 冷却至 950 °C 后再经 5 个道次轧制到厚度为 15 mm 的热模拟实验用热轧板。实验用钢的初始组织为铁素体(F)和马氏体(M), 如图 S1 所示。采用热膨胀法测得在近平衡状态下实验钢的相变点为 $A_{\text{c}3}=891$ °C, $A_{\text{c}1}=725$ °C, $M_{\text{s}}=391$ °C。

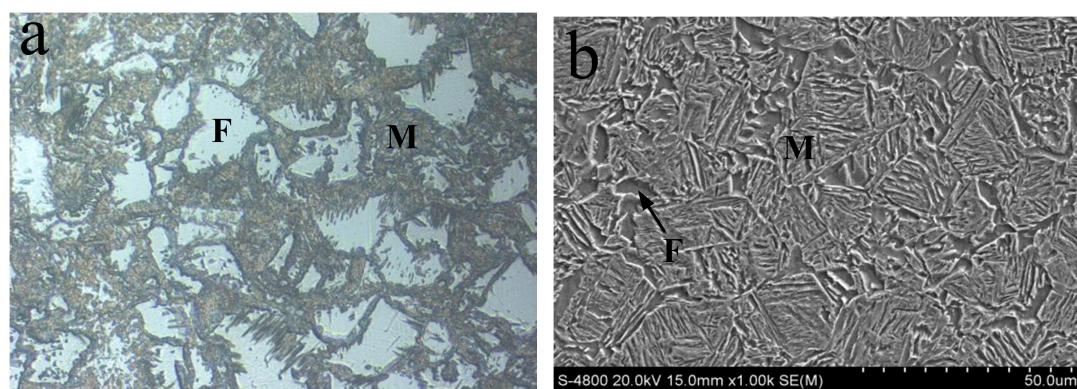


图 S1 实验钢的初始微观组织: (a) OM 照片; (b) SEM 照片

Fig.S1 The initial structure of the experimental steel: (a) OM image; (b) SEM image

对热模拟处理试样在热电偶附近沿垂直于试样轴向切开, 利用 XQ-2 型金相试样镶嵌机对其进行镶样, 经过 5 道金相砂纸研磨后进行机械抛光, 采用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀。应用日立 S-4800 型扫描电镜(SEM)观察热模拟试样的显微组织; 利用 JEM-2010 型透射电镜(TEM)及配备的 EDS 能谱分析对马氏体及铁素体形貌、位错形貌和 Mn、Cu 元素含量及分布情况进行观察, TEM 样品首先机械减薄至 50 μm, 在无水乙醇和高氯酸的腐蚀液中电解双喷减薄, 并应用 EM RES101 型多功能离

子减薄仪进一步离子减薄扩大真实薄区。

DIQ 与 IQ 工艺实验路线

使用由热轧板加工成 $\Phi 10\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱试样进行热模拟实验，采用 Gleeble-3500 热模拟实验机设计如图 S2 所示的五种热处理工艺。图 S2a 为四种不同变形量的两相区形变-保温-退火(DIQ)工艺，热模拟圆柱试样首先以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的速率加热到 $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，再以 1 s^{-1} 的应变速率分别进行 5%、10%、15%、20% 的压缩变形，保温 1800 s 后淬火至室温。图 S2b 为典型的 IQ 处理工艺。

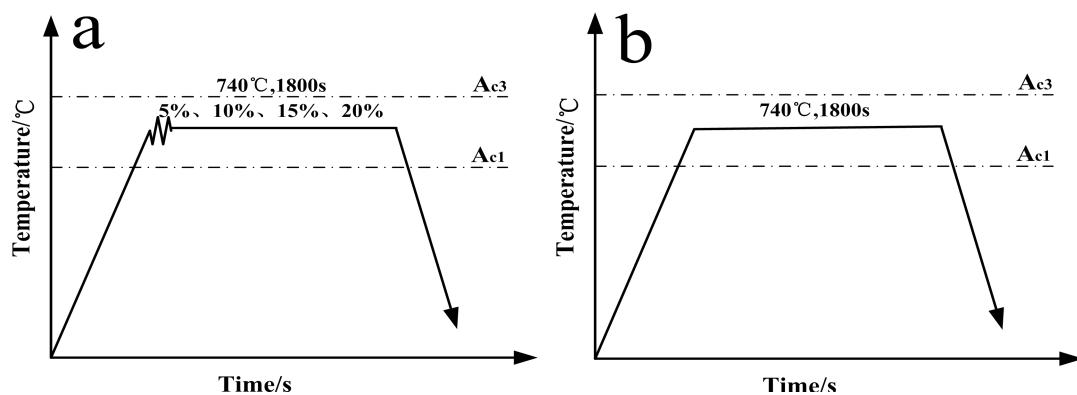


图 S2 针对含 Cu 低碳钢的两种热处理工艺 (Ac_3 为铁素体全部转变为奥氏体的温度线, Ac_1 为珠光体开始转变为奥氏体的温度线): (a) 两相区形变-保温-淬火; (b) 保温-淬火

Fig.S2 The flow diagrams of the heat treatment processes for Cu-bearing low-carbon steel involved in this study (Ac_3 —temperature for the complete transformation of ferrite to austenite, Ac_1 —starting temperature for pearlite transformation to austenite): (a) intercritical deformation-intercritical annealing-quenching (DIQ), (b) intercritical annealing-quenching (IQ)