

# 高强高韧钢 23CoNi 连续相变及奥氏体逆转变研究

## Investigation of Continuous Transformation and Austenitic Reverted Transition for 23CoNi Steel with High Strength and Fracture Toughness

王六定 (西北工业大学, 西安 710072)

WANG Liu-ding (Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[摘要] 有关高强高韧钢 23CoNi 回火后微观组织与力学性能研究已有一些报道, 但对该钢在过程中各种碳化物的形成机理与微观组织的演变规律等问题仍不甚清楚。本工作主要研究 23CoNi 钢在回火早期阶段通过调幅分解形成溶质原子的贫化区和富化区, 并进一步探讨了回火中期逆转变奥氏体的形成规律。

[关键词] 超高强度钢; 调幅分解; 逆转变奥氏体

[中图分类号] TG 142.1 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4381 (1999) 12-0028-03

**Abstract:** Although some experimental investigation of microcosmic tissue and mechanical properties for ultrahigh-strength steel 23CoNi has been reported, there are still some problems that are not clear on the formation mechanism of several kinds of carbides and the evolving law of microcosmic tissue in the course of tempering. Thus, the paper focuses mainly on the investigation of the modulated structure, i. e. the depleted and rich regions, formed through spinodal decomposition at the early stage of tempering for 23CoNi steel, and delves further into the formation law of reverted austenite in the mid-period of tempering.

**Key words:** ultrahigh-strength steel; spinodal decomposition; reverted austenite

迄今为止, 有关超高强度钢 23CoNi 的回火工艺研究一般只是停留在设定系列回火温度并保温一定时间以考察其组织形态、微观结构与力学性能间的关系<sup>[1~5]</sup>。因此, 这种实验方法难以获得回火过程中的相变规律。事实上, 时效硬化合金在回火初期阶段存在复杂的连续相变(即调幅分解与有序化)过程<sup>[6]</sup>。然而, 至今对超高强度钢 23CoNi 的调幅分解仍缺乏直接的实验证据<sup>[7,8]</sup>。既然 23CoNi 钢属典型的二次硬化马氏体时效钢, 那么它在回火初期除会发生调幅分解外, 极有可能存在有序化过程而形成一些亚稳相。实践证明: 许多亚稳相有很高的稳定性, 可以在室温下长期保持而不发生任何变化。于是, 这就促使人们设法开发和利用亚稳相变来有效地改善合金的微观组织与力学性能, 同时也表明有关亚稳相的研究在金属学理论中占有相当重要的地位。

### 1 材料与实验方法

本研究用钢的化学成分为 (wt%): Fe-13.85Co-11.73Ni-3.13Cr-1.25Mo-0.23C-0.1Mn-0.01Ti-0.01Al-0.006P-0.001S-0.0007N-0.0005O。该钢经 VIM/VAR 熔炼并锻成 60mm × 60mm 棒材, 于 875 °C × 1h 奥氏体化并于室温油中淬火, 再立即移入液氮 (-196 °C × 1h) 中深冷处理, 空气中升至室温。依实验目的的不同用钼丝线切割机加工成不同几何尺寸的试样。X 射线衍射试样为 18.0mm × 15.0mm × 1.0mm, 透射电镜衍射为 15.0mm × 15.0mm × 0.3mm。各试样在 265 °C, 482 °C 分别进行短时 15, 25, 35min 和 3, 6, 9min 回火及较长时间的回火。电镜试样空冷后研磨到厚度大约 70μm, 于乙醇和高氯酸 [w(CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH) : w(HClO<sub>4</sub>)] = 19 : 1 腐蚀液 (-40 °C) 中双喷减薄。双喷腐蚀工作电压约 45V, 电流 40~50mA。X 射线衍射在日本理学 D/max-3C 衍射仪上进行, 采用铜靶 K<sub>α</sub> 辐射加衍射束石墨晶体单色器, 扫描速度 0.1 (°)/min, 电压和电流分别为 40kV, 40mA。基体条纹对比衬度及伴有卫星的电子衍

[收稿日期] 1999-06-03

[基金项目] 航空基础科学基金项目 (96G53084)

射谱则利用 JEM-200CX 和 Hitachi H-800 TEM 于 150kV 和 200kV 下拍摄。

## 2 实验结果与讨论

由于 265 与 482 短时回火的停留时间较碳化物的孕育期为短, 回火后产生的有利于渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}$  和二

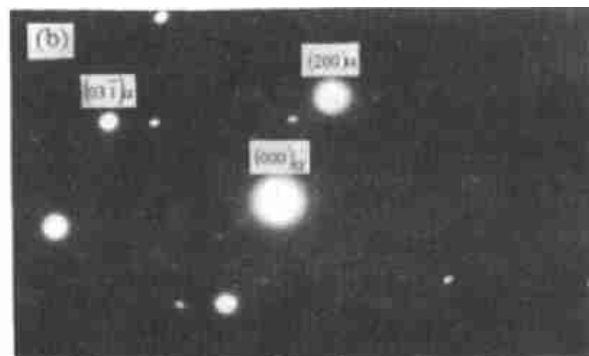
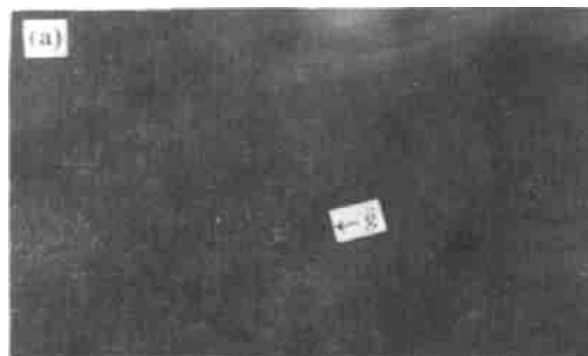


图 1 (a) 23CoNi 钢回火 (482  $\times$  9min) 后基体应变衬度条纹和 (b) 选区电子衍射 (SAD) 谱  $[013]_{\alpha}$  晶带  $\times 100000$

Fig. 1 Matrix strain contrast striation (a) and selective electron diffraction pattern  $[013]_{\alpha}$  crystal zone of 23CoNi tempered at 482 for 9 min

周围 (包括透射斑) 都存在四个漫散的卫星斑。由 Miyazaki 等人的理论<sup>[10]</sup>可知, 之所以会出现卫星斑点和周期性的衬度条纹, 其根本原因是钢中溶质原子的成分起伏引起晶格参数及晶胞散射因子发生周期性变化。该实验结果不仅表明超高强度钢 23CoNi 回火时同样会发生调幅分解, 而且也反映了钢中存在着与溶质原子贫化和富化区对应的两种不同晶格参数的体心立方相<sup>[11]</sup>, 同时还体现出周期性的成分起伏是二次硬化相  $\text{M}_2\text{C}$  形成的必要条件<sup>[8]</sup>。类似地, 23CoNi 钢于 265  $\times$  35min 回火后的 SAD 谱 (见图 2) 中每一主衍射极大附近仍伴有四个漫散的卫星斑。正是在这一回火温度渗碳体会在溶质原子的富化区形成<sup>[12]</sup>。

将 482 时的回火时间延长至 150min 而超过由线性

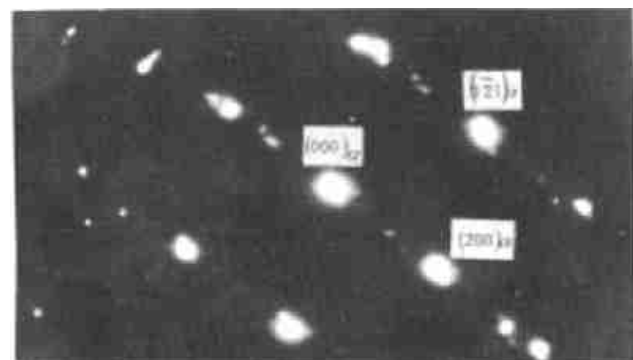


图 2 265  $\times$  35min 回火的电子衍射谱

Fig. 2 Electron diffraction pattern of 23CoNi tempered at 265 for 35 min

次硬化相  $\text{M}_2\text{C}$  形成的成分与结构起伏的体积分数如此之小, 以致于在 X 射线衍射谱  $\{200\}$  峰两侧没有出现边带。相反, 透射电镜实验却证实该钢短时回火后溶质原子的确发生了调幅分解<sup>[9]</sup>。图 1a 和 b 分别是 23CoNi 钢回火 (482  $\times$  9min) 后基体应变衬度条纹与选区电子衍射 (SAD) 谱。由图 1b 可见, 在每一主衍射极大

外推法所得逆转变奥氏体形成的临界时间 (133.8min)<sup>[13]</sup>, 便在马氏体板条间形成厚度大约为 10nm 的奥氏体膜 (见图 3), 其中的衍射谱标定结果表明马氏体与奥氏体间同时存在晶体位向的西山关系和  $K-S$  关系。特别值得强调指出的是, 这一实验结果充分地肯定了上述线性外推法的合理性及所得结论的正确性<sup>[13]</sup>。

## 3 结论

(1) 超高强度钢 23CoNi 在回火的初期阶段会发生调幅分解而形成贫、富溶质原子区, 由此为各种碳化物 (包括亚稳相) 的形成提供了有利的成分和结构起伏。

(2) 该钢于实际最佳回火温度 (482  $^{\circ}\text{C}$ ) 的停留时间超过逆转变奥氏体形成的理论临界时间时, 便在马氏体板条界面处出现奥氏体薄膜。

## 参考文献

- [1] R. Ayer and P. M. Machmeier. Transformation Electron Microscopy of Hardening and Toughening Phenomena in Aermet 100 [J]. Metall. Trans., 1993, 24A: 1943.
- [2] 凌斌, 钟平, 钟炳文, 古宝珠. Ni10Co14 钢的二次硬化过程的 TEM 观察 [J]. 金属学报, 1995, 31 (5): A 209 ~ 215.
- [3] 耿平, 曾梅光, 晁月盛, 钱存富. 新型高强高韧钢 99 的穆斯堡尔谱研究 [J]. 金属热处理学报, 1998, 19 (3):

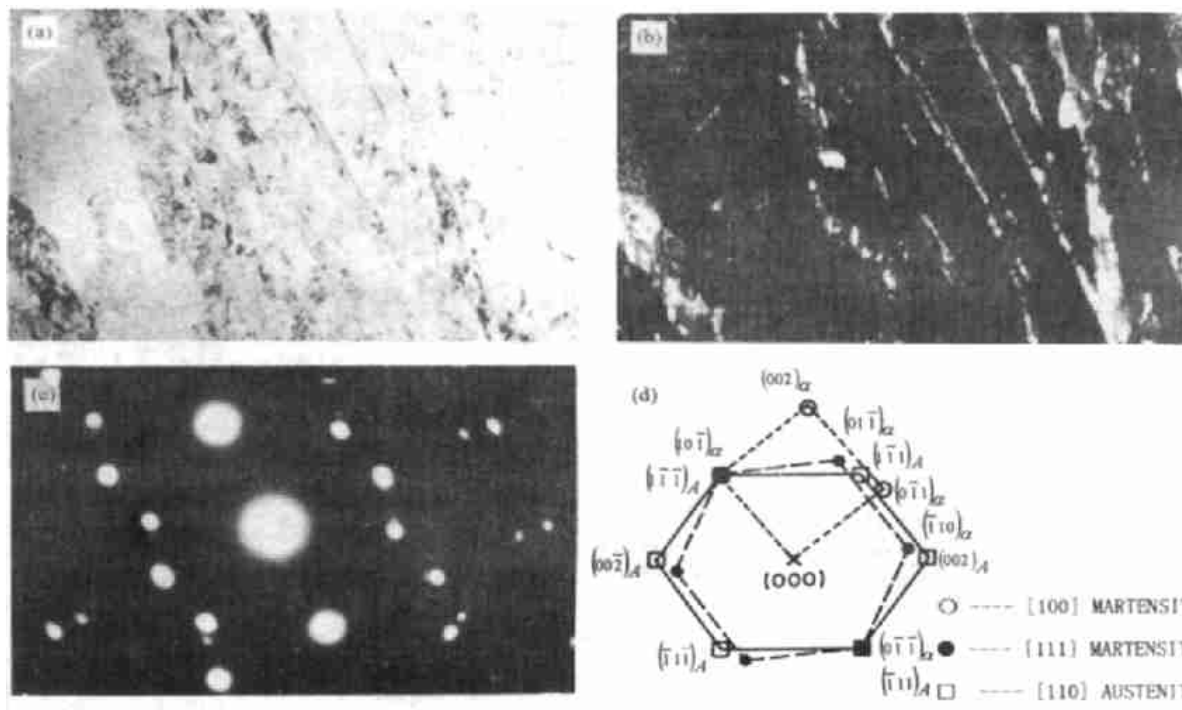


图3 马氏体与奥氏体的透射电镜衍射 (a) 明场像; (b) 暗场像; (c) 衍射谱; (d) 标定结果  $\times 30000$

Fig.3 TEM diffraction pattern of Martensite and Austenite

(a) bright field image; (b) dark field image; (c) diffraction pattern; (d) indexing  $\times 30000$

58 ~ 63.

- [ 3 ] 耿平, 曾梅光, 晁月盛, 钱存富. 新型高强高韧钢 99 的穆斯堡尔谱研究 [ J ]. 金属热处理学报, 1998, 19 ( 3 ): 58 ~ 63.
- [ 4 ] K. J. Handerhan, W. M. Garrison and N. R. Moody. A Comparison of the Fracture Behavior of Two Heats of the Secondary Hardening Steel AF 1410 [ J ]. Metall. Trans., 1989, 20A: 105.
- [ 5 ] W. M. Garrison and N. R. Moody. The Influence of Inclusion Spacing and Microstructure on the Fracture Toughness of the Secondary Hardening Steel AF 1410 [ J ]. Metall. Trans., 1987, 18A: 1257.
- [ 6 ] 卫英慧. 博士论文. 合金连续相变调幅分解与有序化规律的研究 [ J ]. 西安交通大学, 西安. 1997. 1.
- [ 7 ] 凌斌, 钟平, 钟炳文, 赵振亚, 张少卿. 新型二次硬化高 Co-Ni 超高强度钢强韧化机制研究 [ J ]. 航空学报, 1997, 18 ( 1 ): 44 ~ 49.
- [ 8 ] 凌斌. 博士论文. 高合金超高强度钢的微观组织及强韧化机制的研究 [ J ]. 航空材料研究院, 北京. 1996.
- [ 9 ] Wang Liuding et al. Spinodal Decomposition of Ultrahigh-Strength Steel 23Co14Ni12Cr3 [ J ]. J. Mater. Sci. Technol., to be published.
- [ 10 ] M. Miyazaki, S. Takagishi, H. Mori and T. Kozakai. The Phase Decomposition of Iron-Molybdenum Binary Al-
- 28: 1143.
- [ 11 ] 王六定等. 一种超高强度钢热滞回线及其异常平台研究 [ J ]. 金属热处理学报, 1998, 19 ( 4 ): 49 ~ 54.
- [ 12 ] 沈嵘. 博士论文. 贝氏体相变机制的理论及实验研究 [ J ]. 西北工业大学, 西安. 1998. 4.
- [ 13 ] 王六定. 23Co14Ni12Cr3 钢等温奥氏体形成动力学 [ J ]. 材料科学与工艺, 1998, 6 ( 2 ): 98 ~ 102.
- 
- [ 作者简介 ] 王六定 ( 1955- ), 男, 博士, 副教授. 通信地址: 西北工业大学物理系 ( 邮编 710072 )
- 
- \* \* \* \* \*
- ( 上接第 22 页 )
- [ 7 ] 蓝立文主编. 高分子物理 [ M ]. 西北工业大学出版社, 1993, 73 ~ 142.
- [ 8 ] 吴鑫森. 聚合物固体力学性质 [ M ]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1988, 34 ~ 153.
- 
- [ 作者简介 ] 李晓骏 ( 1969- ), 女, 工程师, 在北京航空材料研究院从事数据库开发、管理及复合材料老化寿命预测课题研究. 联系地址: 北京 81 信箱 23 分箱 ( 100095 )
-