

热处理对 SCR 成形 Al-1.5Mg-0.3Sc 合金线材性能的影响 *

张雪飞 李俊鹏 温景林

(东北大学材料与冶金学院 沈阳 110004)

摘 要 采用单辊搅拌冷却技术 (Shearing-Cooling-Rolling, 简称 SCR) 和在线固溶处理方法制备了 Al-1.5Mg-0.3Sc(wt%) 合金线材, 研究了不同在线固溶温度条件下时效处理对合金线材的微观组织和拉伸性能的影响. 结果表明: SCR 技术对合金线材具有剪切细化功能, 在铝基体内产生大量位错, 时效析出大量 Al₃Sc 强化相粒子, 与位错交互作用. 随着在线固溶温度下降, 合金线材时效析出沉淀相 Al₃Sc 的弥散度增加, 合金线材的抗拉强度和延伸率提高; 随着过时效时间的延长, 合金线材的抗拉强度下降, 线材的延伸率提高, 时效 8 h, 延伸率达峰值.

关键词 Al-Mg-Sc 合金, 时效处理, 单辊搅拌冷却 (SCR) 技术, 力学性能

分类号 TG355.12, TG146.2

文章编号 1005-3093(2006)03-0281-06

Effect of aging treatment on property of Al-1.5Mg-0.3Sc alloy wire formed by SCR technology

ZHANG Xuefei LI Junpeng WEN Jinglin**

(School of Material and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

* Supported by National Natural Science Foundation of China and Baoshen Steel & Iron Corporation of Shanghai No.50274020. Manuscript received September 9, 2005; in revised from February 28, 2006.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(024)83686459, E-mail: jlwen1166@sina.com

ABSTRACT Al-1.5Mg-0.3Sc alloy wires were prepared by SCR process and on-line solution, the effects of aging treatment on the microstructure, tensile property of the alloy wires formed by shearing-cooling-rolling (SCR) under different on-line solution temperature were studied. The results show that the grain of the alloy wires is very fine, Al₃Sc dispersoids precipitating from the supersaturated solid solution in the heating process can effectively pin dislocation. As the on-line solution temperature decrease, the degree of dispersion of precipitated phase (Al₃Sc) increase, while the tensile strength and elongation of the alloy increase. However, the tensile strength decrease under over-aging, but the elongation still increase with the increase of aging time. The elongation can be up to peak value at aging 8 h.

KEY WORDS Al-Mg-Sc alloy, aging treatment, shearing-cooling-rolling(SCR), mechanical property

在 Al-Mg 合金中添加微量 Sc 使合金具有较高的强度和韧性、良好的耐蚀性和可焊性^[1~7]. 高强度轻质铝镁合金有广泛的应用前景. 但是, 生产这种合金线材的熔铸-轧制-拉拔-离线固溶传统工艺, 工艺流程长、易产生裂纹且为离线固溶. 文献中未见有关这种高强度轻质铝镁合金和铝镁合金焊丝的组织与性能的报道. 国内采用传统轧制工艺制备铝镁合金板材, 研究工作尚处于研发阶段^[8~10]. SCR(Shearing

-Cooling-Rolling) 技术是一种连续浇注与连续成形一体化的高效节能半固态成形新技术, 具有短流程、净成形、产品长度不受限制, 易于在线固溶等优点, 适于运动器械用铝镁合金及铝镁合金焊丝等线材的生产^[11,12]. 本文采用 SCR 技术研究在不同在线固溶温度条件下时效处理对 Al-1.5Mg-0.3Sc(wt%) 合金线材的微观组织和拉伸性能的影响.

1 实验方法

采用 SCR 技术制备实验用合金. 合金的名义成分 (质量分数, wt%): Mg 1.5%, Sc 0.3%, 其余为 Al. 合金熔炼时 Al 和 Mg 以纯金属的形式加入, Sc 以 Al-

* 国家自然科学基金 No.50274020 与上海宝钢集团联合资助项目.
2005 年 9 月 9 日收到初稿; 2006 年 2 月 28 日收到修改稿
本文联系人: 温景林, 教授

2%Sc 中间合金的形式加入. 根据 SCR 工艺^[11,13], 线材 A 的工艺参数为: 浇注温度 755~760 ℃, 冷却强度 15~18 L/min, 在线固溶温度 540 ℃, 淬火冷却速度 50 ℃/s; 线材 B 的工艺参数为: 浇注温度 735~740 ℃, 冷却强度 16~18 L/min, 在线固溶温度 530 ℃, 淬火冷却速度 50 ℃/s; 线材 C 的工艺参数为: 浇注温度 725~740 ℃, 冷却强度 15~17 L/min, 在线固溶温度 520 ℃, 淬火冷却速度 50 ℃/s.

将线材制成标准 ($L=10d$) 拉伸试样, 进行人工时效 (表 1). 采用 INSTRON4206 型材料拉伸试验机测试合金的抗拉强度和延伸率. 采用金相显微镜和透射电镜观察分析合金不同状态下的显微组织结构. 金相样品经机械抛光后用 Keller 溶液腐蚀, 透射电镜

样品为机械预磨后双喷电解减薄制得, 电解液为 33% 硝酸甲醇溶液.

2 结果与讨论

从图 1 可以看出, 合金线材的峰值抗拉强度与在线固溶温度的高低呈现相反的趋势, 且在时效过程中合金线材的抗拉强度与时效时间呈现先升后降的趋势. 表 2 给出了各合金线材样品的峰值抗拉强度与在线固溶温度、人工时效温度以及时效时间的关系. 可以看出, 对于一定的在线固溶温度, 随着人工时效温度的降低, 出现峰值抗拉强度的时效时间延长, 峰值抗拉强度提高. 但是, 超过峰值时效时间后, 继续延长时效时间, 合金线材的抗拉强度下降. 其原因是, 在

表 1 Al-Mg-Sc 合金人工时效工艺参数
Table 1 Processing parameters of artificial aging of Al-Mg-Sc alloy

Specimens	Solution temperature/℃	Aging		Aging time/h									
		temperature/℃		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
A	540	340		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		330		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		320		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		300		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
B	530	340		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		330		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		320		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		300		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
C	520	340		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		330		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		320		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10
		300		0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	6	8	10

表 2 Al-Mg-Sc 合金线材不同热处理工艺的峰值抗拉强度
Table 2 Peak tensile strength of at different treatment Al-Mg-Sc alloy wire

Specimens	Solution temperature/℃	Aging		Peak tensile strength/MPa
		temperature/℃	time/h	
A	540	340	2	284
		330	2.5	289
		320	3	292
		300	3.5	285
B	530	340	2	289
		330	2.5	294
		320	3	299
		300	3.5	290
C	520	340	2	294
		330	2.5	299
		320	3	304
		300	3.5	292

时效过程中在 α -Al 基体中沉淀出 Al_3Sc 强化相, 对位错运动产生钉扎和阻碍作用. 当时效时间比较短时, 随着时效时间的延长, 强化相的数量逐渐增多, 抗拉强度逐渐提高, 最后出现峰值. 继续延长时效时间, Al_3Sc 强化相粗化, 密度下降, 相间距变大, 位错就可以绕过机制运动. 这导致合金的强度下降.

峰值抗拉强度与在线固溶温度呈现相反的变化

趋势的原因, 在于在线固溶温度 (挤压出口温度) 和淬火冷却速度对 α -Al 晶粒大小及其晶内位错密度及高密度位错网络形成的亚结构的影响^[12,14]. 较低的挤压出口温度弱化了合金的高温再结晶速度, 提高了亚结构的密度, 从而改变了析出相的密度, 所以出现挤压出口温度下降, 合金时效析出相密度增加, 对位错运动的阻力增加, 因而强度升高. 时效温度超

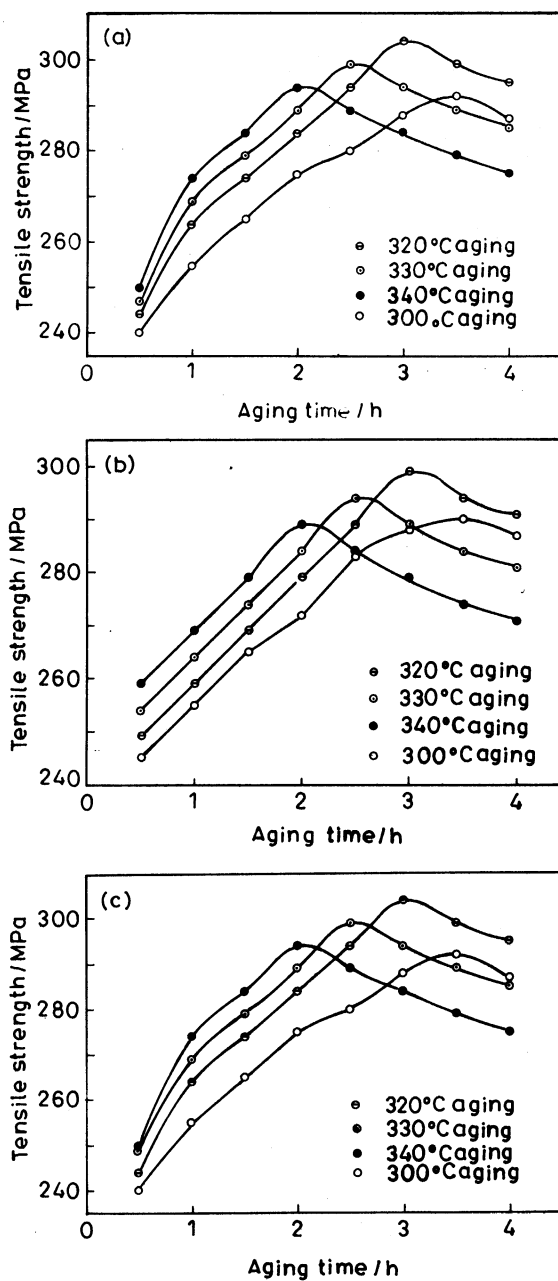


图 1 Al-Mg-Sc 合金不同在线固溶温度的抗拉强度与时效时间的关系

Fig.1 Relationship between tensile strength and aging time at different on-line solvus temperatures for Al-Mg-Sc alloy wire (a) 540 °C; (b) 530 °C; (c) 520 °C

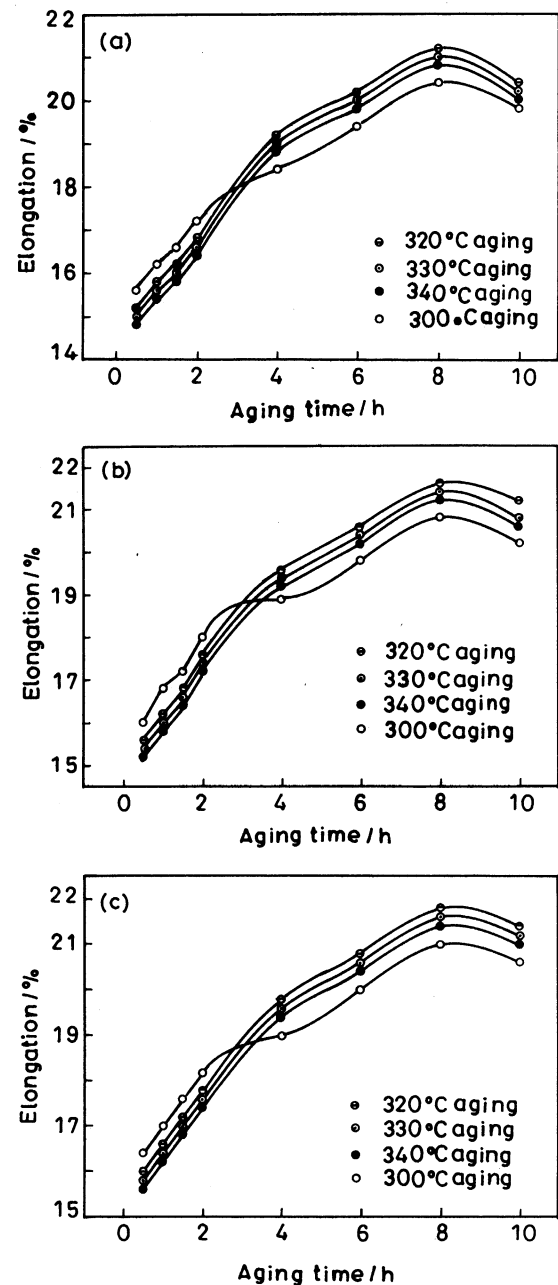


图 2 Al-Mg-Sc 合金不同在线固溶温度的延伸率与时效时间的关系

Fig.2 Relationship between elongation and aging time at different on-line solvus temperatures for Al-Mg-Sc alloy wire (a) 540 °C; (b) 530 °C; (c) 520 °C

过 320 °C, 析出相密度减小, 同时发生回复的趋势增加, 缺陷减少, 对位错运动阻力减少, 从而使线材的强度下降, 但时效温度低于 320 °C, 合金线材经高温淬火后所保留的过饱和固溶体在较低的时效温度下并不能充分溶解, 从而峰值强度相对较低。

图 2 表明, Al-Mg-Sc 合金线材的延伸率与其在线固溶温度的高低成反比, 时效时间在 8 h 之内, 合金线材的延伸率与时效时间成正比, 超过 8h, 合金线材的延伸率有下降的趋势。其原因是: 在一定的工艺条件下, 挤压出口温度的变化导致晶粒再结晶和晶粒长大的速度变化。挤压出口温度愈高, 合金的再结晶和晶粒长大越快。挤压出口温度高的材料晶粒较大, 挤压出口温度较低的合金晶粒则细小。因此, 挤压出口温度愈低, 合金线材的延伸率愈高。随着时效温度的升高, 析出相有长大的趋势, 分布密度减小, 引起铝合金晶格畸变的趋势增大, 导致延伸率下降。时效时间超过 8 h, 合金线材的延伸率有下降的趋势, 因为晶内位错缠结产生应力集中, 并且析出相长大引起铝合金晶格畸变的趋势增大, 导致延伸率有下降趋势。时效温度低于 320 °C, 合金线材时效后的最大延伸率相对较小。

SCR 成形合金线材在线固溶并水淬的显微组织非常细小 (图 3), 与传统轧制工艺制备的合金纤维状组织存在明显的不同。在 SCR 成形过程中, 液态金属在挤压型腔中发生动态结晶变形过程。在 SCR 成形机的挤压轮轴和靴子的内表面附近存在一个过冷度较大的温度区, 较大的过冷度和较小的润湿角大大降低了形核功, 并且以挤压轮轴和靴子的表面为基底形核向内不断长大。同时, 由于半固态挤压

金属处在液固相共存的紊流状态下产生内摩擦, 结晶过程难以达到稳定平衡状态, 出现不断形成又不断遭到破坏而再形成的过程, 直至最终形成细小的结晶组织。由此可见, SCR 技术的晶粒细化与传统轧制工艺的晶粒细化有本质的区别, 传统轧制工艺采用化学方法细化晶粒, 加入细化剂作为异质形核从而诱发合金晶粒细化。

A 线材在 320 °C 时效 3 h 后, 部分位错通过滑移和攀移以及位错之间的相互作用形成了位错墙和亚晶表明在时效过程中发生了动态回复现象, 位错墙和亚晶被细小的 Al_3Sc 沉淀相钉扎 (图 4a), Al_3Sc 沉淀相粒子分布在铝基体中 (图 4b)。图 4c, d, 为 C 线材在 320 °C 时效 3 h 后, 合金具有较高的位错密度 (图 4c) 且强化相 Al_3Sc 在 $\alpha-Al$ 中以细小沉淀析出, 粒子尺寸为 5~15 nm。这比传统轧制合金热处理沉淀析出的强化相粒子尺寸 (6~17 nm)^[9] 更加细小, 这些强化相粒子弥散分布于铝基体中 (图 4d)。C 线材在 320 °C 时效 4 h 后, Al_3Sc 沉淀相粒子与位错交互作用并对位错 (图 4e) 和晶界 (图 4f) 产生钉扎和阻碍。对比图 4b 与图 4d, 线材 A 中强化相粒子的分布密度比线材 C 中要小, 且强化相粒子有长大趋势。这较好的符合了合金线材的峰值抗拉强度与在线固溶温度的高低成反比的关系。随着时效时间的延长, 强化相逐渐长大, 分布密度相对减少, 位错运动的方式由峰值时效的切过机制变为绕过机制, 于是合金的强度下降。同时, 随着时间的进一步延长, 大量位错缠结, 产生应力集中, 同时强化相粒子长大, 引起合金晶格畸变的趋势增大, 从而导致合金延伸率的下降趋势。

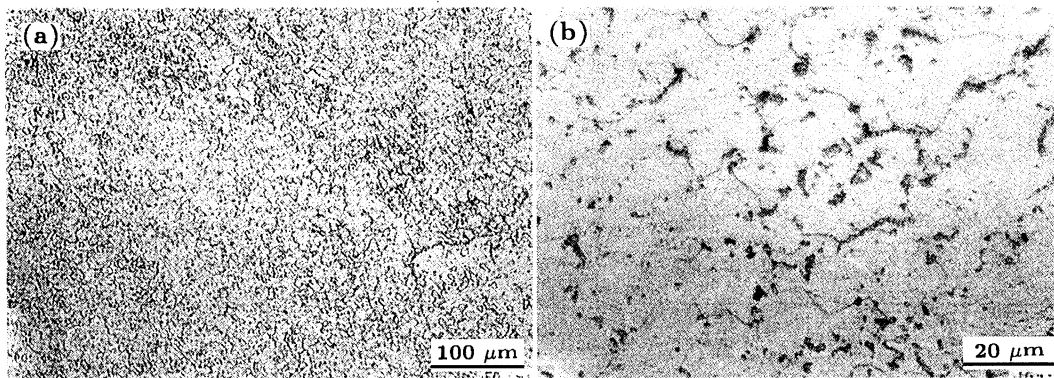


图 3 在线固溶并水淬 Al-Mg-Sc 合金线材的金相显微组织

Fig.3 Optical micrographs of Al-Mg-Sc alloy by on-line solution and water quenching (a) macrostructure of alloy, (b) microstructure of alloy

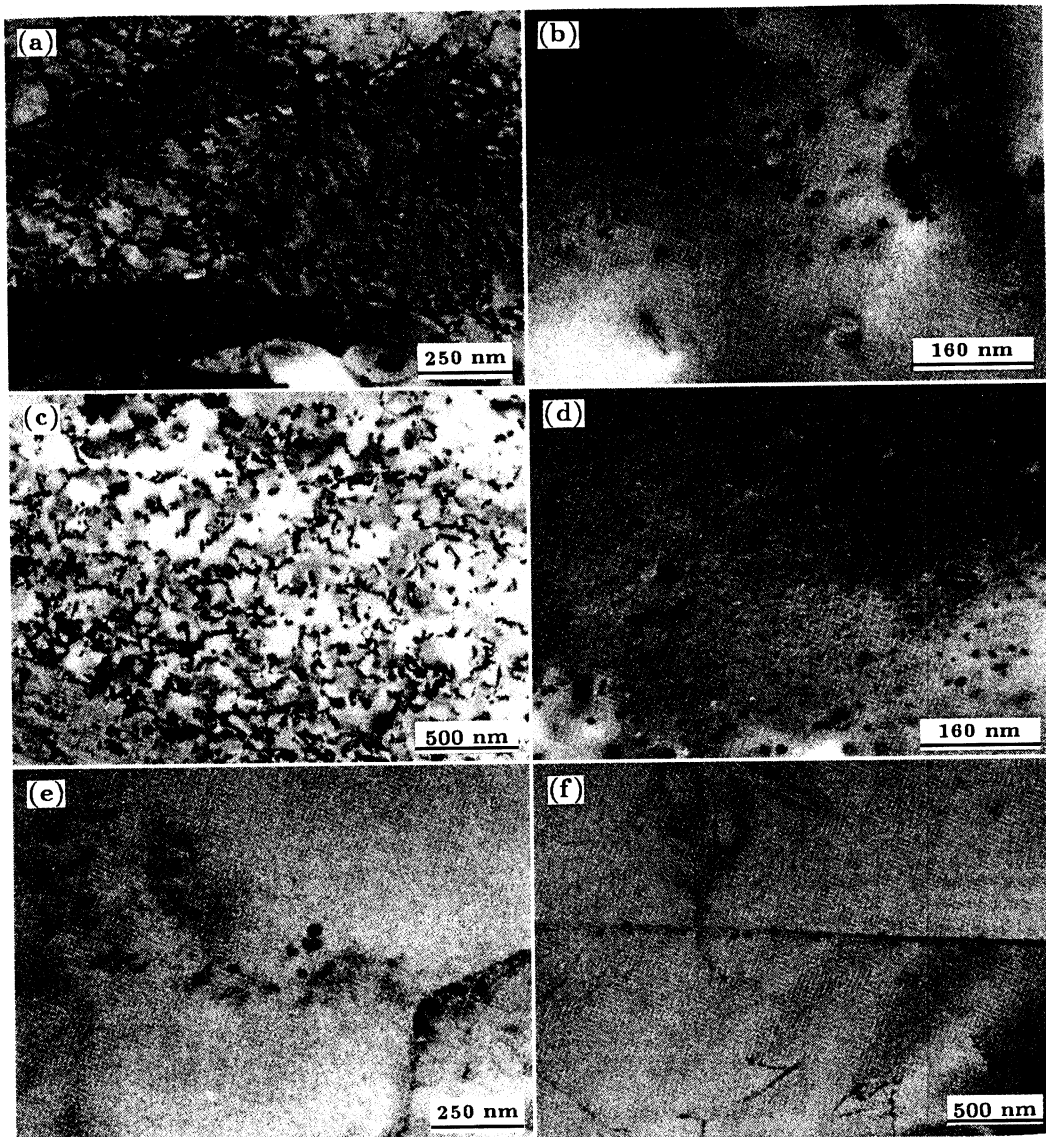


图 4 在 320 °C 时效 3 h Al-Mg-Sc 合金线材的 TEM 组织

Fig.4 TEM micrographs of aged Al-Mg-Sc alloy wire at 320 °C (a), (b) A wire aged for 3 h, (c), (d) C wire aged for 3 h, (e), (f) C wire aged for 4 h

3 结 论

SCR 技术对 Al-1.5Mg-0.3Sc 合金线材具有剪切细化功能, 铝基体内产生大量位错, 时效析出大量细小、弥散的 Al_3Sc 强化相粒子, 与位错交互作用. 合金线材时效析出沉淀相的密度与在线固溶温度成反比. 随着在线固溶温度下降, 合金线材时效析出沉淀相 Al_3Sc 的弥散度增加, 抗拉强度和延伸率呈现上升趋势; 过时效的合金线材的抗拉强度呈现下降的趋势, 而线材的延伸率仍保持上升的趋势.

参 考 文 献

- 1 A.Vinogradov, A.Washikita, Materials Science and Engineering, **349A**, 318(2003)
- 2 J.Royset, N.Ryum, International Materials Review, **50**, 19(2005)
- 3 Y.W.Riddle, T.H.Sanders, Metallurgical and Materials Transactions, **35A**(1), 341(2004)
- 4 K.B.Hude, A.F.Norman, Acta Mater., **49**, 1327(2001)
- 5 Emmanuelle A.Marquis, David N. Seidman, David C. Dunand, Acta Materialia, **51**, 4751(2003)
- 6 S.Lathabai, P.G.Lloyd, Acta Materialia, **50**, 4275(2002)
- 7 Y.W.Riddle, T.H.Sanders, Jr., Metallurgical and Materials Transactions, **35A**, 341(2004)
- 8 LIN Zhaoqi, Materials Review, **3**, 10(1992)
(林肇琦, 材料导报, **3**, 10(1992))
- 9 PAN Qinglin, YIN Zhimin, ZOU Jingxia, Acta Metallurgical Sinica, **37**(7), 750(2001)
(潘青林, 尹志民, 邹景霞, 金属学报, **37**(7), 750(2001))

- 10 ZHANG Yinghui, XIAO Yunzhen, MA Hongsheng, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, **1**(8), 85(1998)
(张迎晖, 孝云真, 马宏声, 中国有色金属学报, **1**(8), 85(1998))
- 11 ZHOU Tianguo, WEN Jinglin, CHEN Yanbo, Chinese Journal of materials Research, **19**(3), 331(2005)
(周天国, 温景林, 陈彦博, 材料研究学报, **19**(3), 331(2005))
- 12 WEN Jinglin, GUAN Renguo, LIU Xianghua, Chinese Journal of Materials Research, **17**(1), 55(2003)
(温景林, 管仁国, 刘相华, 材料研究学报, **17**(1), 55(2003))
- 13 J.L.Cavazos, R.Colas, Materials Characterization, **47**, 175(2001)
- 14 D.A.Burt, K.E.Eastering, *Phase Transformation in Metal and Alloy* [M] (Beijing, Metallurgical Industry Press, 1998) p.267
(波特 D. A., 伊斯特林 K. E., 金属和合金中的相变[M]. 李长海, 余永宁译 (北京, 冶金工业出版社, 1998)p.267)