



快速凝固奥氏体不锈钢薄带的显微结构特征

李月珠 Dr. Lars Arhberg*

(冶金部钢铁研究总院) (瑞典金属研究所)

〔摘要〕 溶液自旋含钛奥氏体不锈钢316L薄带具有典型的快速凝固结构和均匀的化学成分。显微结构由细小柱晶和等轴晶构成。测得晶胞间距约 $0.2\mu\text{m}$ 。算得其平均冷却速度为 $10^6\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。结构中有一无特征区域,说明凝固时的过冷度较高,算得其形核过冷度约200K。

快速凝固微晶材料的显微结构特征表现在具有极细小的晶粒度、分布十分均匀的合金元素和细小弥散的第二相颗粒、溶解度极限提高并形成过饱和固溶体以及可形成亚稳结构等^[1]。这些特征使材料的性能得以明显改善。例如,曾报道快速凝固不锈钢甚至在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下仍能保持其细晶结构,大大提高了材料的耐蚀性^[2]。

本文介绍了含钛316L不锈钢薄带的快速凝固微晶结构的某些特征。加钛的目的在于通过内氮化使材料弥散强化。

一、材料和试验

本研究使用的材料为316L奥氏体不锈钢,其化学成分见表1。在真空感应炉内熔化后分别添加 0.53wt\% 和 0.97wt\% 钛,制得两种不同钛含量的合金。采用快速凝固熔液自旋工艺(单辊法)制取微晶薄带。试验的工艺参数和带材尺寸列于表2。一半薄带经冷轧加工,加工率为 $18-25\%$,目的是使带材厚度均匀。

用光学显微镜观测了带材断面的显微结

表1 316L不锈钢的化学成分, wt%

Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	N	Fe
17.35	11.80	2.61	1.19	0.59	0.023	0.089	余量

表2 工艺参数和带材尺寸

含钛量 wt%	喷射压力 kPa	辊速 m/s	带宽 mm	带厚 μm	冷轧材厚 μm	压下 %
0.53	75	15	3	50-70	40-50	25
0.97	80	40	1	25-30	20-25	18

构,所用腐蚀剂为王水甘油溶剂。使用ARI SEMQ电子探针测量钛浓度沿带材截面的分布,并用纯元素标准对比法进行定量计算。透射电镜观测是在一台菲利浦301G电子显微镜上进行的,用室温电解抛光法制取电镜薄膜。电解液为 CrO_3 磷酸溶液,电压 $10-12$ 伏。

二、结果和讨论

厚度 $25-70\mu\text{m}$ 的不锈钢薄带具有典型的快速凝固显微结构(图1),由细小的柱晶和等轴晶粒组成。柱晶的取向代表了薄带凝

固时溶液的流动方向, 测得柱晶间距约为 $1.5\mu\text{m}$, 等轴晶区的凝固速度低于细小柱晶区的凝固速度。图2为透射电镜照片。奥氏体晶粒内含有细小的晶胞, 奥氏体晶粒尺寸 $0.5-3\mu\text{m}$, 细胞间距约 $0.2\mu\text{m}$ 。使用下述凝固公式可计算出带材的平均凝固速度 $\varepsilon_{\text{平均}}$ ^[3]:

$$d = B\varepsilon_{\text{平均}}^{-n} \quad (1)$$

式中B、n为常数, 查得不锈钢材料的 $B \approx$



a

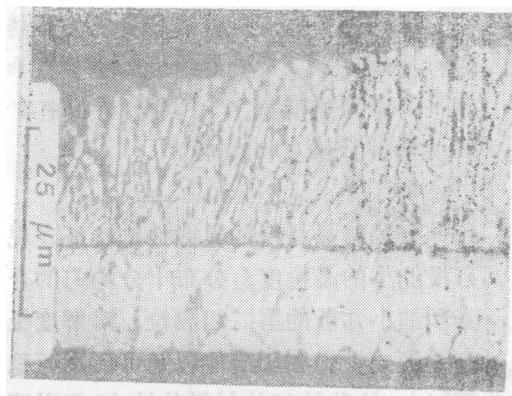
60 , $n \approx 0.41$ ^[4]; d为枝晶臂间距或晶胞间距, 在本研究中 $d \approx 0.2\mu\text{m}$ 。

由此可得

$$\varepsilon_{\text{平均}} = \left(\frac{B}{d} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{60}{0.2} \right)^{\frac{1}{0.41}} \cong 10^6 (\text{°C/s})$$

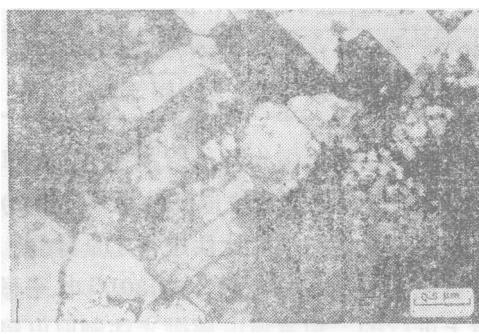
此计算值与有关溶液自旋工艺报道的类似条件下的凝固速度基本一致^[5]。

在光学显微镜下还观测到在带材的断面

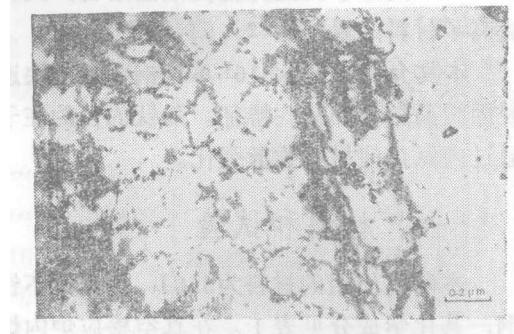


b

图1 快速凝固316L不锈钢的金相照片



a



b

图2 含钛316L不锈钢氮化前的TEM照片

上有一无特征的凝固区域(图1b)。此区域占带材厚度的 $\frac{1}{4}-\frac{1}{2}$, 表明在初始凝固时存在着无偏析凝固阶段, 其起因可归结为熔液凝固时的极高过冷度。根据凝固热平衡的牛顿模型可计算其形核过冷度 ΔT_N ^[6,7]:

$$\Delta T_N - \Delta T = x/d \cdot L/C \quad (2)$$

式中 ΔT 为冷冻温度, 一般 $10-20\text{K}$ ^[8]; x 为无特征区域的宽度, d 为带材的厚度, 测得 x/d 为 $\frac{1}{4}-\frac{1}{2}$; L 为熔化潜热, 查得 $L \approx 2.72 \times 10^5 \text{J/kg}$ ^[9]; C 为比热, 对于316L, $C \approx 700 \text{J/kg}\cdot\text{K}$ ^[10]。由以上数据算得 $\Delta T_N \approx 200\text{K}$ 。

目前还没有发现有关快速凝固不锈钢

316L过冷度的报道。但此数据与报道的Fe-Ni合金在类似条件下的过冷度相近。如此高的过冷度足以使靠近淬冷辊面处的熔液在几乎无偏析的情况下发生奥氏体形核和进行凝固。

假设某合金的成分为 C_0 (图3), 过冷到 T_N 处形核, 因为液滴和随后凝固成粉末的尺寸非常小, 所以凝固前和后的温度分布都可视为是均匀的, 这时凝固的固相成分为 C_0 , 由于释放熔化潜热, 系统的温度回升到 T_R , T_R 处于液固相区, 根据Scheil方程, 此时凝固的固相成分为 C_s^* , C_s^* 的浓度低于 C_0 , 合金因此存在偏析。如果过冷度足够大或者环境的散热能力非常强, 最高的回升温度也不能达到 T_s , 那么凝固就是无偏析的, 就形成

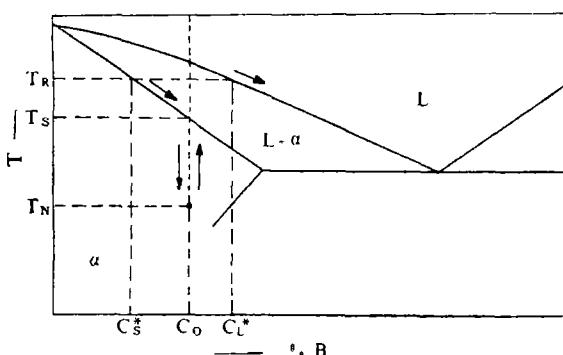


图3 凝固图示

了无特征凝固区域。

随着凝固过程的进行, 达到无特征区时, 过程转变为非牛顿凝固, 余下的熔液凝固成极细小的柱晶和等轴晶区, 直到完全凝固。两个区域间存在着明显的分界(图1b)。

在这样的快速凝固条件下, 元素在带材内的分布非常均匀。用电子探针测定了钛浓度沿薄带断面的分布, 结果示于图4。经定量计算其标准偏差只有4%(含0.53wt%Ti)和3%(含0.97wt%Ti)。定量计算的钛含量略低于化学分析的结果。考虑到测量仪器本身的误差, 可以认为, 钛在快速凝固薄带中的分布是很均匀的, 从而说明快速凝固薄带的化学成分也是均匀的。

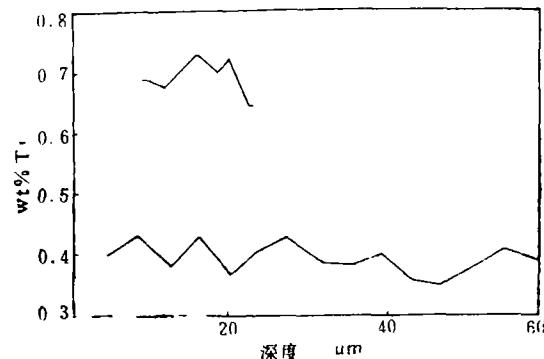


图4 钛的浓度分布

三、结论

1. 熔液自旋的含钛316L不锈钢薄带具有典型的快速凝固结构, 由细小柱晶和等轴晶构成, 柱晶间距约 $1.5\mu\text{m}$ 。尺寸为 0.5 — $3\mu\text{m}$ 的奥氏体晶粒内部含有约 $0.2\mu\text{m}$ 直径的细小晶胞。

2. 根据测得的晶胞间距, 算出本研究的平均冷却速度约 $10^6\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

3. 观测到带材内部包含一个无特征凝固区域, 其宽度占带材厚度的 $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$, 位于带

材靠近淬冷辊面的一侧。

4. 根据平面凝固的牛顿模型, 算得产生这一无特征区域的过冷度约 200K 。

5. 使用电子探针测得的数据定量计算钛浓度沿带材厚度的分布, 其标准偏差只有 3 — 4% , 说明快速凝固含钛316L不锈钢薄带具有均匀的化学成分。

本研究在瑞典国家技术发展委员会的资助下进行, 特此感谢。还感谢Bäckström, N.先生在试验中所给予的帮助。

参考文献

- [1] Loof D.J. et al, Rapid Solidification Processing Principles and Technologies, eds. Mehrabian, R., Kear B.H. et al, Claitors Publ. Div., 1, 1978,
- [2] 李月珠, 国外金属材料, 1, 52—57, 1986
- [3] Mehrabian, R., Rapid Solidification Processing Principles and Technologies, eds. Mehrabian, R., Kear B.H. et al, Claitor's Publ. Div., 9, 1978
- [4] Jones H., J. Mat. Sci., 19(4), 1043, 1984
- [5] Cohen, M., et al, Rapid Solidification Processing Principles and Technologies, II, eds, Mehrabian, R., Kear B.H. et al, Claitor's Publ. Div., 1, 1980,
- [6] Cantor, B., in Materials Research Society Vol. 8, Rapidly Solidified Amorphous and Crystalline Alloys, eds. Kear, B.H., et al, New York, 317, 1982
- [7] Samuel, F.H., Met. Trans. A., 17A(1), 127, 1986
- [8] Hayzelden, C., et al, Acta Metall., 31(3), 379, 1983
- [9] Wolf, M.M., La Metallurgia Italiana, 9, 595, 1982
- [10] Lewis, J.R., Handbook of Stainless Steels, eds. Peckner, D., et al, New York, 19—26, 1977

MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF RAPIDLY
SOLIDIFIED AUSTENITIC STAINLESS STEEL

Li Yuezhu and Dr. Lars Arnberg

(Central Steel and Iron Research Institute)(Sweden Metal Research Institute)

ABSTRACT Melt-spun Ti-modified 316L stainless steel ribbon exhibits a typical rapid solidification microstructure and homogeneous chemical composition. The microstructure consists of fine-scale columnar and equiaxed grains. The cell spacing measured is about $0.2 \mu\text{m}$. The average cooling rate calculated is $10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$. A region of featureless microstructure exists, indicating a high undercooling during solidification. The nucleation undercooling calculated is about 200 K.

·消息·

中国机械工程学会粉末冶金专业学会

成立技术咨询服务部

中国机械工程学会粉末冶金专业学会为适应经济改革形势,设立技术咨询服务部。它以促进新技术开发为宗旨,利用我会人才荟萃、知识密集、联系广泛的优势,开展技术咨询服务工作。主要任务是协助中小型企业事业和乡镇企业解决粉末冶金工艺、设备设计与改造、模具设计以及新品开发和其它方面的疑难技术问题,并接受查询搜集技术情报资料和项目可行性分析的委托。技术咨询服务部愿以良好的服务态度促进需方生产技术的发展和经济效益的提高。欢迎各界朋友来人来函联系。技术咨询服务部设在北京粉末冶金研究所学会行业室,联系人李德岐。