

高温合金中片状相的解理面

张 国 焕

迄今,在高温合金中,由于成份控制不当,或在长时间热暴露及使用过程中,会析出有害的微量的拓扑密排相(TCP相),如 σ 、 μ 、Laves等。这些相的特点是硬而脆,易破断;呈大片状析出时,裂纹易沿着这些相产生和扩展。试验表明,高温破断断口通常沿 σ 相发生裂纹。但是,对断裂形态的研究还不多。本工作是利用X射线衍射测定 σ 、 μ 相断口的解理面。

所用合金的成份及获得这些微量相的热处理条件如下:

合金成份(%)

合金	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Zr	B	Nb
A	0.16	11.6	5.0	5.1	4.4	5.7	2.75	0.1	0.03	—
B*	0.11	5.5	11.7	9.5	2.2	6.0	1.35	0.1	0.04	3.0

* 含1.6Hf

A合金在1210℃保温4小时进行固溶处理,然后在850℃作2000小时无应力热暴露,以获得 σ 相;B合金采用铸态在900℃作1000小时热暴露处理,以获得 μ 相。 σ 相、 μ 相的低倍断口照片见图1。晶粒大小可达2~3毫米。

采用常规的背反射劳埃照相法测定晶面。被测试样放置在具有六个自由度的测角头台上,调节被测定的断裂面尽可能垂直于X射线束,试样与底片间距离为30毫米。由于被测合金的元素较多及晶格畸变,存在着强烈的X射线散射,采取双层底片法等措施以降低散射的影响。

关于这些相的结构^[1]: σ 相为体心正方晶胞,每个晶胞中含有30个原子, $c/a=0.49\sim 0.54$ 。 μ 相的结构为六方晶胞, $a=4.75\text{\AA}$,

$c=25.77\text{\AA}$, $c/a=5.425$ 。利用面间夹角公式,正方晶系:

$$\cos\varphi = \frac{Hh + Kk + \frac{a^2}{c^2}Ll}{\sqrt{(H^2 + K^2 + \frac{a^2}{c^2}L^2)(h^2 + k^2 + \frac{a^2}{c^2}l^2)}}$$

六方晶系:

$$\cos\varphi = \frac{Hh + Kk + \frac{1}{2}(Hk + hK) + \frac{3a^2}{4c^2}Ll}{\sqrt{(H^2 + HK + K^2 + \frac{3a^2}{4c^2}L^2)(h^2 + hk + k^2 + \frac{3a^2}{4c^2}l^2)}}$$

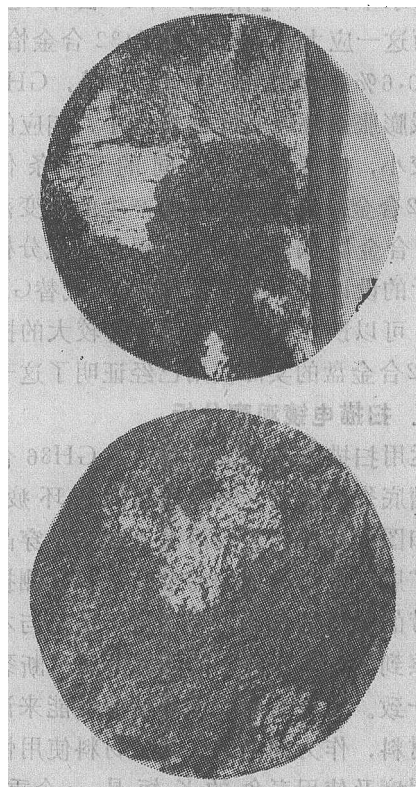


图1 片状相断口的低倍照片 $\times 8$
a— σ 相; b— μ 相。

利用上述数值代入公式求出面间夹角值或画出标准投影图。图2为 σ 相的(001)标准投影图, $c/a = 0.523$ 。表1为 μ 相面间夹角值, $a = 4.75 \text{ \AA}$, $c = 25.77 \text{ \AA}$, $c/a = 5.425$ 。

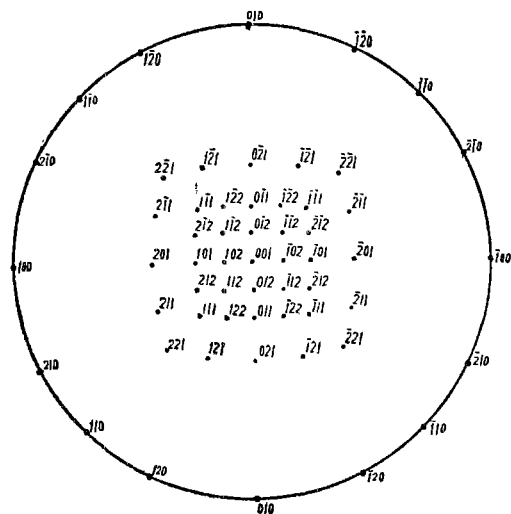


图2 Sigma相(001)标准投影图

相应于各相断口的背反射劳埃照相示意图如图3所示。由图3a可得到以下信息: A、B及B、C间角度为 $\sim 30^\circ$; A、D及C、D间角度为 $\sim 27^\circ$; B、D间角度为 $\sim 33^\circ$; A、C间角度为 $\sim 48^\circ$; B、E间角度为 $\sim 18.5^\circ$; D、E间角度为 $\sim 14.5^\circ$; A、E和E、C间角度均为 $\sim 24^\circ$; 晶带 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 均与 Z_4 相垂直。根据标准投影图, 确定出E点为(101), A点为(111), C点为(1 $\bar{1}$ 1), B点为(201), D点为(102)。(101)与照相底片中心偏离 $\sim 5^\circ$ 。

对于图3b的 μ 相, 由于 $c/a = 5.425$, 低指数衍射斑点不能出现。根据斑点分布具有六方对称的特点, 确定为 $\{0001\}$, 周围出现的衍射斑点为 $\{11\bar{2}0\}$ 。

根据拓扑密排相的特征, 在点阵中为密排层排列, 沿面心立方体基体的八面体平面排列^[3,4]形成片状相。 σ 相的 $\{101\}$ 面是体心正方形的密排面, μ 相的 $\{0001\}$ 面是六方结构的密排面, 形成这些相时所需能量是较小的。可以肯定, 镍基高温合金中片状 σ 相的解理面为 $\{101\}$ 面; 片状 μ 相的解理面为 $\{0001\}$ 面。

表1 μ 相面间夹角值*

$$a = 4.75 \text{ \AA}, c = 25.77 \text{ \AA}, \frac{c}{a} = 5.425$$

HK·L	hk·l	φ (度)	HK·L	hk·l	φ (度)
00·1	10·0	90	00·1	11·0	90
	20·1	85.47		22·1	87.36
	10·1	80.97		11·1	84.78
	10·2	72.36		11·2	79.57
	10·3	64.47		11·3	74.57
	10·4	57.45		11·4	69.82
	10·5	51.39		11·5	65.29
	10·6	46.21		11·6	61.12
	10·7	41.75		11·7	57.25
	10·8	37.91		11·8	53.63
	10·9	3 . 61		11·9	50.36
	10·10	31.79		11·10	47.31
	10·11	29.31		11·11	44.52
	10·12	27.13		11·12	42.01
	10·13	25.31		11·13	39.74
	10·14	23.65		11·14	37.63
	10·15	22.03		11·15	35.71
	10·16	20.77		11·16	33.90
	10·17	19.61		11·17	32.33
	10·18	18.38		11·18	30.80
	10·19	17.45		11·19	29.42
	10·20	16.46		11·20	28.12
	10·21	15.63		11·22	25.84
	10·22	14.98		11·24	23.79
	10·24	13.59		11·26	22.03
	10·26	12.31			
HK·L	hk·l	φ (度)	HK·L	hk·l	φ (度)
00·1	21·0	90	10·0	21·0	19.09
	21·1	86.56		11·0	30.00
	21·2	83.17			
	21·3	79.81			
	21·4	76.47			
	21·5	73.26			
	21·6	70.18			
	21·7	64.17			
	21·8	64.28			
	21·9	61.58			
	21·10	58.94			
	21·11	56.50			
	21·12	54.13			
	21·13	51.90			
	21·14	49.83			
	21·15	47.86			
	21·16	45.97			
	21·17	44.19			
	21·18	42.52			
	21·19	40.97			
	21·20	39.56			
	21·22	36.87			
	21·24	34.41			
	21·26	32.22			

* 指数表示 $(HK \cdot L) = (HKiL)$

$$i = -(H+K)$$

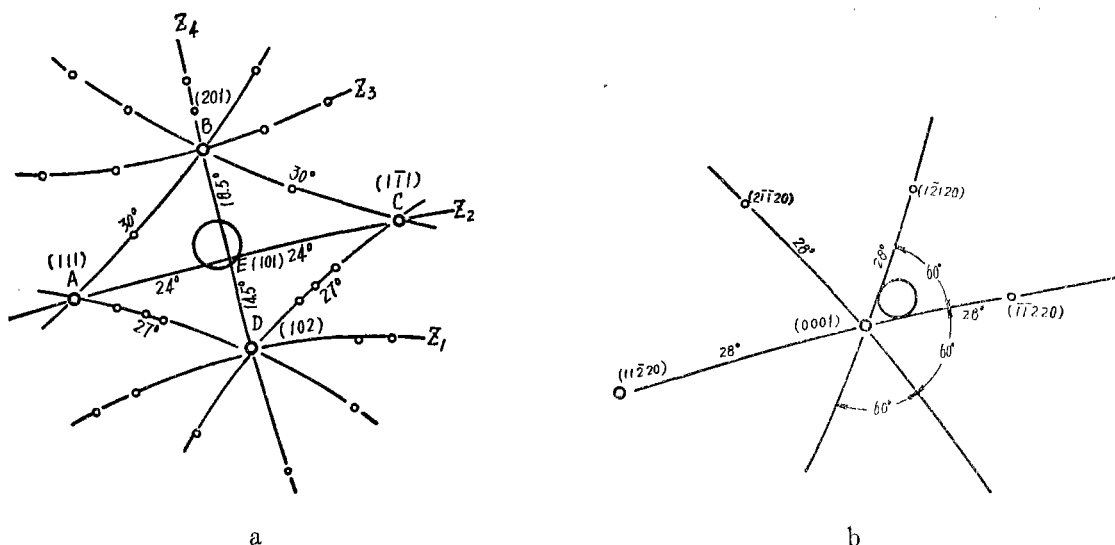


图 3 背反射劳埃照相示意图

a— σ 相; b— μ 相。

参 考 资 料

- [1] M.J.Donachie, Jr., and O.H. Kriege, Journal of Materials, Vol.7, No.3, 1972, 269—278.
- [2] A. K. Sinha, Topologically Close-packed Structures of

Transition Metal Alloys, Pergamon Press, 1972.

- [3] 冶军, 美国镍基高温合金, 科学出版社, 1978, 15.
- [4] 郭可信, 金属学报, 14卷1期, 1978, 73—95.

(上接第47页)

参 考 文 献

- [1] AGARD-R-604 1971.
- [2] G.M.McRAE, Turbine jet engine disk life limits, P. & W.Aircraft.
- [3] L.F.Coffin Jr, Fatigue at high temperature, ASTM STP520, 1973, P5—34.
- [4] 燃气涡轮发动机的循环寿命预测. 推进系统结构完整性和发动机完整性译文集, 1976.12, 国外航空编辑部.
- [5] T. V. Duggan, Predicting crack formation life, 1977 September, T.R.No.F312.
- [6] 高温合金手册, 冶金工业出版社,

1972.

- [7] 低循环疲劳机改装总结, 六二一所 YG6-9-2, 1976.9.
- [8] C. F. Harrison, M.G.Cockcroft, 循环参数对高温低循环疲劳的影响, AGARD-CP-155, 1975.
- [9] Manual on low cycle fatigue testing, ASTM STP465, 1969.
- [10] H.F.Merrick, Met.Trans. 1977.4, P891—897.
- [11] S.S.Manson, Metal fatigue-damage—Mechanism, Detection, Avoidance and Repair 1971,