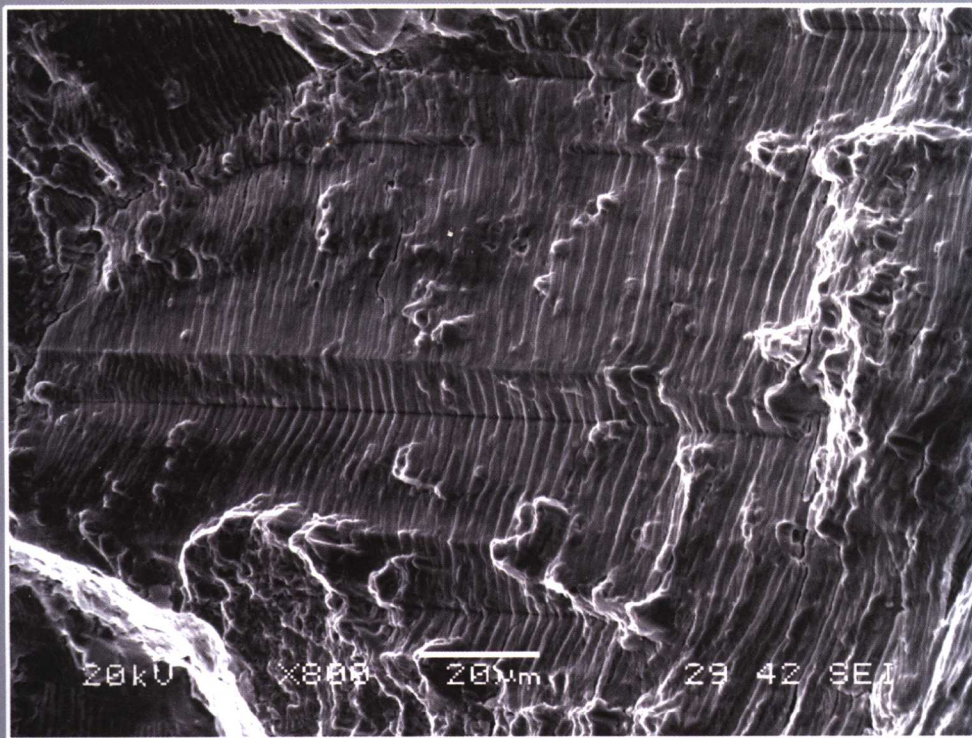


高温合金断口分析

图谱

赵明汉 张继 冯滌 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

内 容 简 介

为了系统地认识高温合金在不同的环境条件下发生断裂的机制及其所呈现出的断口形貌特征,作者收集和整理了近年来国内常用高温合金与标准力学性能检测项目相关的断口图谱,按国内高温合金分类和牌号编著了本图谱。

本图谱汇集了变形高温合金、铸造高温合金、粉末冶金高温合金、弥散强化高温合金以及金属间化合物高温材料 5 大类、36 个牌号、1046 张高温扫描电镜图片,并结合相应合金的物理和力学冶金行为对图片中断口的宏观和微观特征进行了描述和说明。

本图谱可作为航空、航天、船舶、机械制造、冶金、石油、化工、建筑等领域从事高温合金研制、生产和应用的工程技术人员、科学人员的实用参考书,也可作为高校材料科学与工程专业教师、研究生的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高温合金断口分析图谱/赵明汉等主编. —北京:冶金工业出版社,2006.8
ISBN 7-5024-4067-4

I. 高… II. 赵… III. 高温合金—断口扫描电镜—图谱
IV. TG132.3-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 079654 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
责任编辑 张 卫(联系电话:010-64027930;电子信箱:bull2820@sina.com)
王雪涛(联系电话:010-64062877;电子信箱:zbs@cnmip.com.cn)
美术编辑 王耀忠 责任校对 杨 力 李文彦 责任印制 牛晓波
北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2006 年 8 月第 1 版,2006 年 8 月第 1 次印刷
210mm×285mm;18.25 印张;550 千字;282 页;1—3000 册
118.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893
冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081
(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《高温合金断口分析图谱》

编辑委员会

(按姓氏笔画排序)

王延庆 田 耘 杜金辉 李俊涛 张义文 张建伟
骆合力 赵光普 柳光祖 陶 宇 韩光炜 燕 平

审 定

李世琼 陈惠霞 袁 英

参加编写的人员名单

(按姓氏笔画排序)

马惠萍 王延庆 王新英 邓 波 邓 群 田 耘
冯 滌 乔雪璎 杜金辉 李世琼 李尚平 李俊涛
杨 峥 张 莹 张 继 张义文 张建伟 邵 冲
陈 卓 陈惠霞 周志华 骆合力 赵光普 赵明汉
赵京晨 柳光祖 胥国华 秦鹤勇 袁 英 高 玲
陶 宇 韩凤奎 韩光炜 程云君 焦兰英 颜晓峰
燕 平 蒙肇斌

前 言

高温合金是制造航空和航天发动机部件的关键材料,也是制造机车和舰船燃气机高温热端部件不可替代的材料,在能源动力、石油化工、交通运输、医疗器械、环境保护等多个工业领域得到广泛应用,是国防和国民经济建设中必不可缺的一类重要材料。高温合金材料的研制和生产水平是国家工业现代化的重要标志之一。

1956年,我国生产出第一炉高温合金。50年来,中国高温合金的发展取得了显著的成绩,合金从无到有,品种由少到多,建立起了自己的高温合金体系。特别是近10年来,中国高温合金在航空、航天、石化、能源等工业需求的牵引下更是得到了迅速的发展。

鉴于高温合金用途的重要性,对高温合金的质量要求也极为严格,因此对高温合金力学性能的检测包括了多种类型:拉伸性能、冲击性能、持久性能、蠕变性能、疲劳性能、蠕变和疲劳交互作用下的力学性能以及高温长期时效后合金组织的稳定性与相关力学性能的评价等等。合金的性能与其组织结构之间有着密切的内在联系,高温合金的力学性能也主要取决于对合金显微组织结构的控制,因此了解合金的显微组织结构十分重要。

为了满足从事高温合金生产、使用和研发等部门的需求,在20世纪70年代末期和80年代中期,钢铁研究总院作为主编单位,归纳和整理了在高温合金长期研究、开发、生产和应用过程中积累的知识和经验,分别编写和出版了《高温合金金相图谱》(1979年,冶金工业出版社出版)和《高温合金低倍图谱》(1986年,冶金工业出版社出版)。其中《高温合金金相图谱》比较系统和全面地介绍了高温合金的分类、合金元素的作用,显微组织的特征以及第二相的形成规律和基本控制因素,收集了43个牌号合金的显微组织照片;《高温合金低倍图谱》分为冶炼加工、铸造和使用故障三个部分,收集了68个图例,500余张图片,详细地介绍了缺陷的低倍特征,简单阐明了冶金缺陷产生的原因,扼要地介绍了缺陷改善和消除的方法。

高温合金部件通常是在高温、高氧化腐蚀性气氛和高应力下工作,最主要的失效形式是断裂。从工程应用角度讲,断裂也是最基本的研究课题。要了解断裂的起因,寻求防止部件发生意外断裂的事故,就必须研究断裂与合金的力学性能、显微组织结构、工作应力状态以及工作环境之间的复杂关系。断口分析正是研究这些与断裂相关的基本

问题的最重要手段和方法之一。断口分析主要是通过对断口表面形态特征的观察来分析断裂起因、断裂性质、断裂方式、断裂机制等。

为了较系统地认识高温合金在不同的环境条件下发生断裂的机制及其所呈现出的断口形貌特征,我们收集和整理了近年来钢铁研究总院高温材料研究所参与研制的国内常用高温合金与标准力学性能检测项目相关的断口图谱,按国内高温合金分类和牌号编著了《高温合金断口分析图谱》一书。本图谱汇集了变形高温合金、铸造高温合金、粉末冶金高温合金、弥散强化高温合金以及金属间化合物高温材料5大类、36个牌号、1046张高温合金的扫描电镜图片,并结合相应合金的物理和力学冶金行为对图片中断口的宏观和微观特征进行了描述和说明。本图谱仅供相关领域科技工作者参考。鉴于材料断裂失效行为和过程的复杂性以及断口形貌的多样性,编著者在对断口特征的描述和说明中定会存在一些不妥之处,恳请读者批评指正。

本书谨献给中国高温合金50周年!

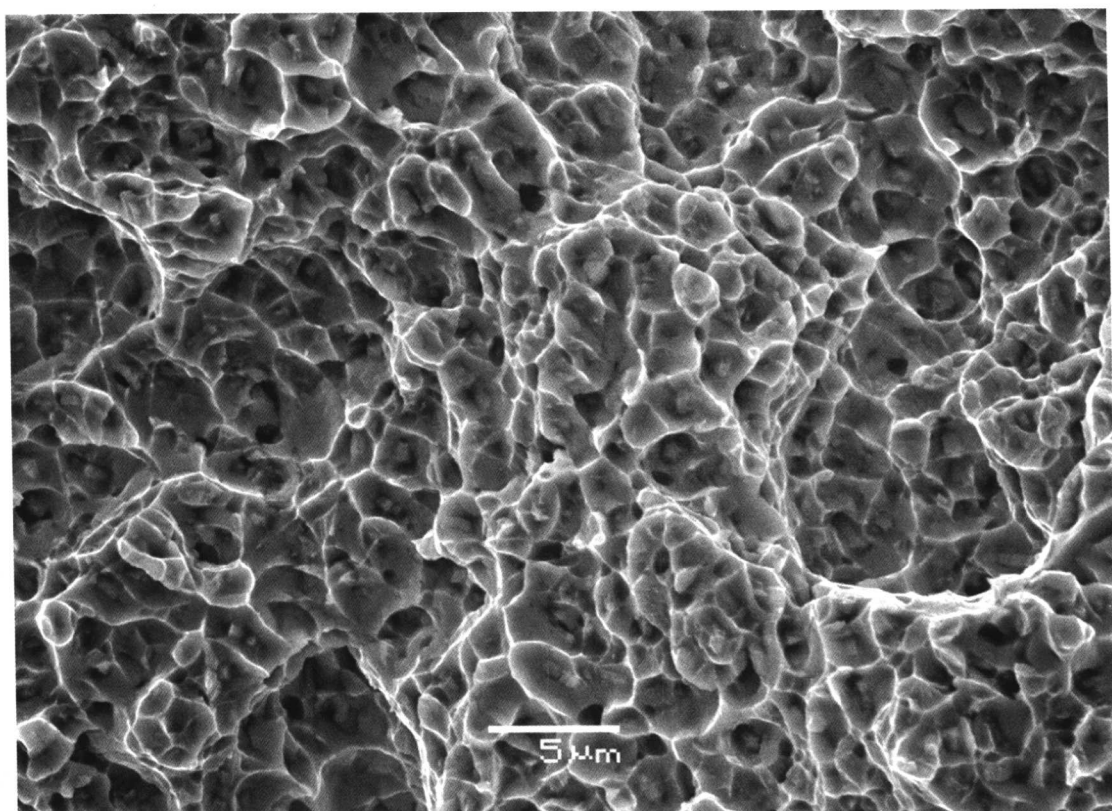
编著者
2006年6月

目 录

1 变形高温合金	1
1.1 GH1139 合金	2
1.2 GH2150 合金	7
1.3 GH2747 合金	12
1.4 GH2901 合金	17
1.5 GH2907 合金	21
1.6 GH2909 合金	26
1.7 GH4141 合金	39
1.8 GH4169 合金	44
1.9 GH4199 合金	53
1.10 GH4202 合金	64
1.11 GH4586 合金	69
1.12 GH4648 合金	76
1.13 GH4698 合金	80
1.14 GH4708 合金	85
1.15 GH4742 合金	94
1.16 GH4742y 合金	98
1.17 GH6783 合金	104
2 铸造高温合金	119
2.1 K213 合金	120
2.2 K418 合金	126
2.3 K423A 合金	130
2.4 K424 合金	133
2.5 K4169 合金	144
2.6 K4202 合金	154
2.7 K4537 合金	163

2.8	K4648 合金	168
2.9	DD402 合金	177
3	粉末冶金高温合金	195
3.1	FGH4095 合金	196
3.2	FGH4096 合金	203
3.3	FGH4097 合金	213
4	金属间化合物高温材料	221
4.1	JG1101 合金	222
4.2	JG1201 合金	232
4.3	JG1302 合金	242
4.4	JG4246A 合金	251
5	弥散强化高温合金	261
5.1	MGH2756 合金	262
5.2	MGH4754 合金	271
5.3	MGH4755 合金	278

1 变形高温合金



1.1 GH1139 合金

GH1139 是铁基固溶强化变形高温合金。合金中加入 Cr、Mn、N 元素强化并稳定奥氏体,加入 B 元素强化晶界。合金有较好的抗氧化性能,易于焊接成形。主要产品有冷轧薄板、棒材和锻件,可制成安装座、管接头、轮箍、盖子和角块等零件。

合金的主要化学成分(质量分数,%)为: $w(\text{C}) \leq 0.12$, $w(\text{Si}) \leq 1$, $w(\text{Mn}) 5 \sim 7$, $w(\text{Ni}) 15 \sim 18$, $w(\text{Cr}) 23 \sim 26$, $w(\text{N}) 0.3 \sim 0.45$, $w(\text{Fe})$ 余。合金热处理状态后的组织由 γ 基体和 M_{23}C_6 组成。 M_{23}C_6 主要沿晶界析出。

合金的热处理制度:(1050~1150) $^{\circ}\text{C} \times (30 \sim 60)\text{min}$ /水冷或空冷。

1.1.1 拉伸断口

1.1.1.1 室温拉伸

试样: $\phi 16$ mm 热轧棒,经 $1100^{\circ}\text{C} \times 45 \text{ min}$ /空冷 处理

试验条件: 室温

试验结果: $\sigma_b = 810 \text{ MPa}$, $\sigma_{p0.2} = 410 \text{ MPa}$, $\delta_5 = 54\%$, $\psi = 75\%$

断口特征:

宏观断口为杯锥状断口,由纤维区和剪切唇区组成,剪切唇所占比例较大。断口表面呈暗灰色(图 1-1-1)。

微观断口显示,纤维区和剪切唇均为韧窝断裂(图 1-1-2、图 1-1-3 和图 1-1-4)。纤维区的韧窝较大、较深,韧窝壁上有明显的蛇形滑移特征。

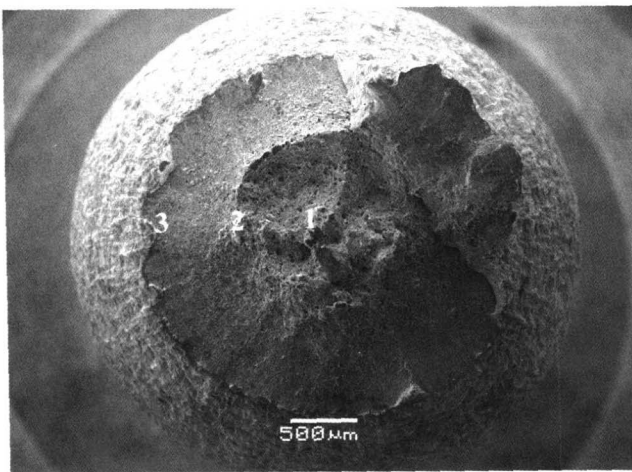


图 1-1-1 宏观断口形貌

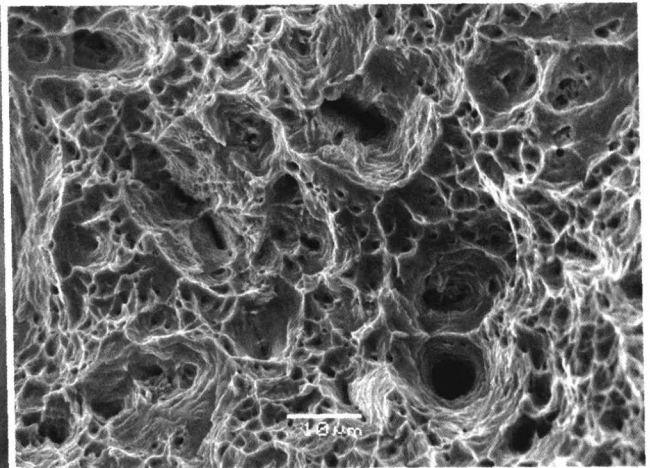


图 1-1-2 纤维区中心韧窝断裂特征(图 1-1-1 中 1 区)

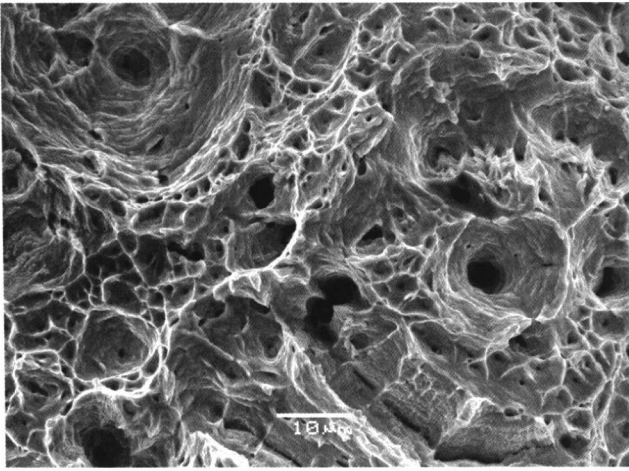


图 1-1-3 纤维区边缘韧窝断裂特征(图 1-1-1 中 2 区)

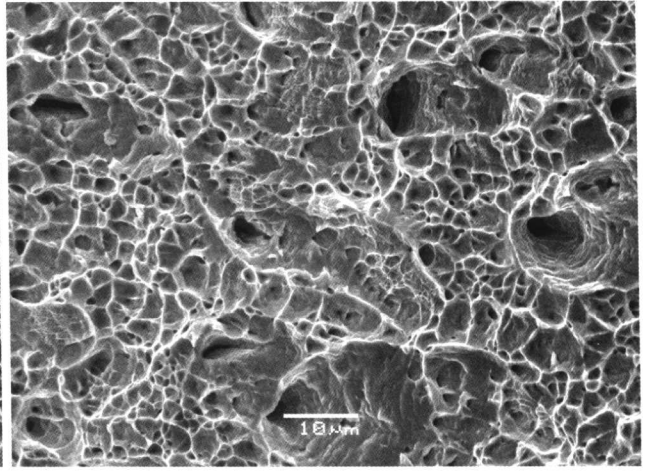


图 1-1-4 剪切唇区韧窝断裂特征(图 1-1-1 中 3 区)

1.1.1.2 高温拉伸

试样: $\phi 16$ mm 热轧棒, 经 $1100^{\circ}\text{C} \times 45$ min/空冷 处理

试验条件: 900°C

试验结果: $\sigma_b = 210$ MPa, $\sigma_{p0.2} = 166$ MPa, $\delta_5 = 39\%$, $\psi = 34\%$

断口特征:

宏观断口表面凹凸不平, 呈颗粒状。断口表面呈黑色(图 1-1-5)。

微观断口显示, 图 1-1-5 中的 1 区(图 1-1-6 和图 1-1-7)、2 区(图 1-1-8 和图 1-1-9)和 3 区(图 1-1-10 和图 1-1-11)均为韧性沿晶断裂, 并有沿晶二次裂纹。

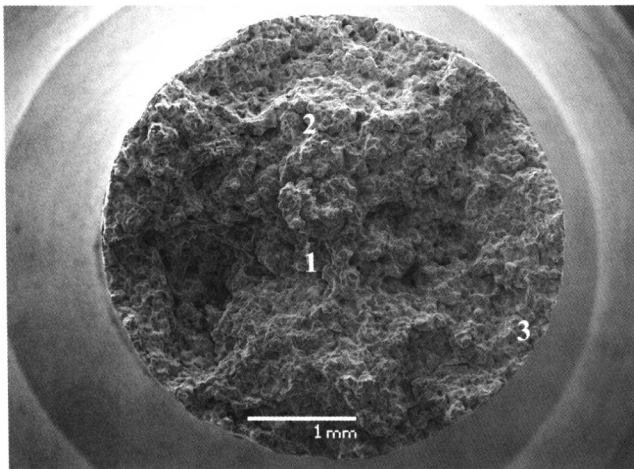


图 1-1-5 宏观断口形貌

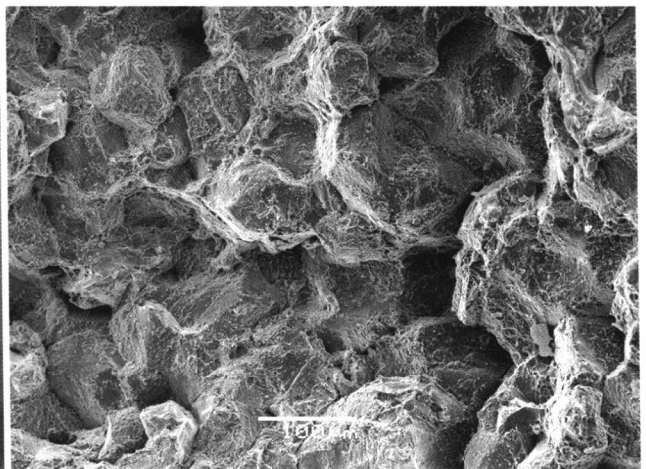


图 1-1-6 韧性沿晶断裂特征(图 1-1-5 中 1 区)

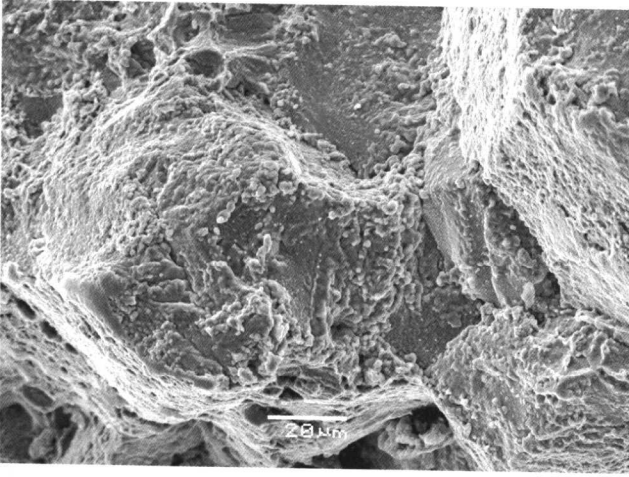


图 1-1-7 图 1-1-5 中 1 区局部放大图像

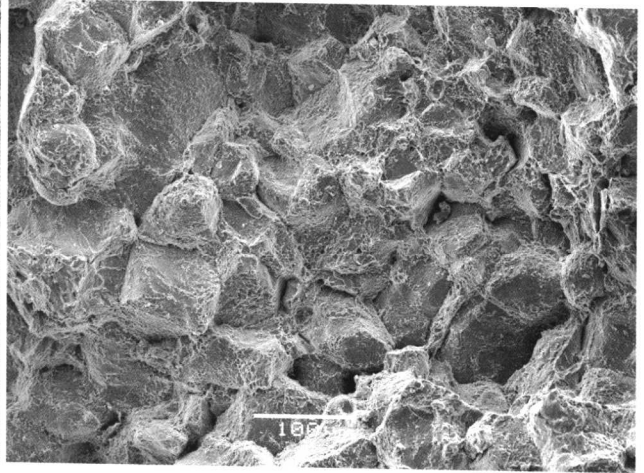


图 1-1-8 韧性沿晶断裂特征(图 1-1-5 中 2 区)

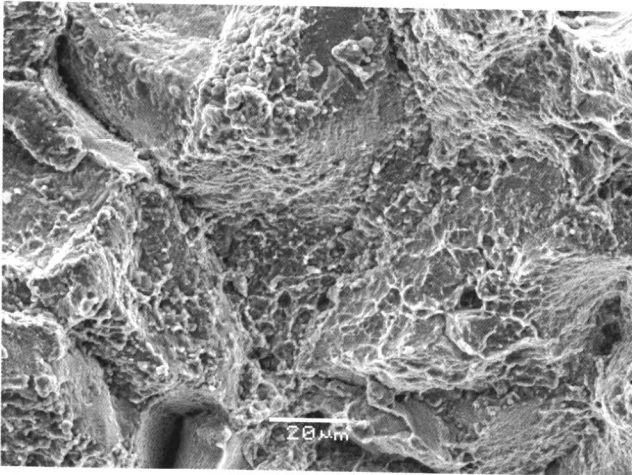


图 1-1-9 图 1-1-5 中 2 区局部放大图像

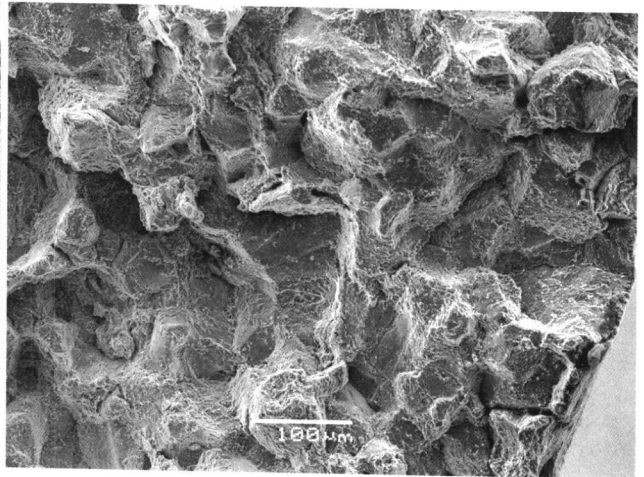


图 1-1-10 韧性沿晶断裂特征(图 1-1-5 中 3 区)

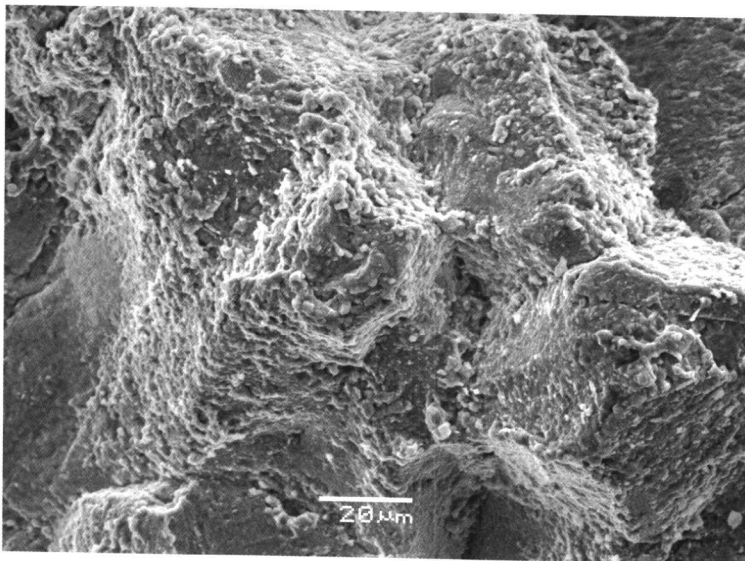


图 1-1-11 图 1-1-5 中 3 区局部放大图像

1.1.2 持久断口

试样： $\phi 16$ mm 热轧棒，经 $1100^{\circ}\text{C} \times 45$ min/空冷 处理

试验条件： 700°C ； $\sigma = 160$ MPa

试验结果： $\tau = 1198.75$ h, $\delta_5 = 14\%$

断口特征：

宏观断口面倾斜，高低不平，为颗粒状，呈浅黄色(图 1-1-12)。

微观断口显示，图 1-1-12 中的 1 区(图 1-1-13 和图 1-1-14)、2 区(图 1-1-15 和图 1-1-16)和 3 区(图 1-1-17 和图 1-1-18)均为韧性沿晶断裂，并有沿晶二次裂纹。

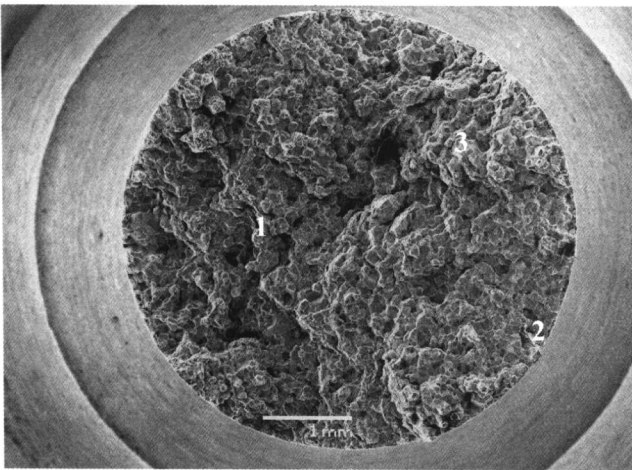


图 1-1-12 宏观断口形貌

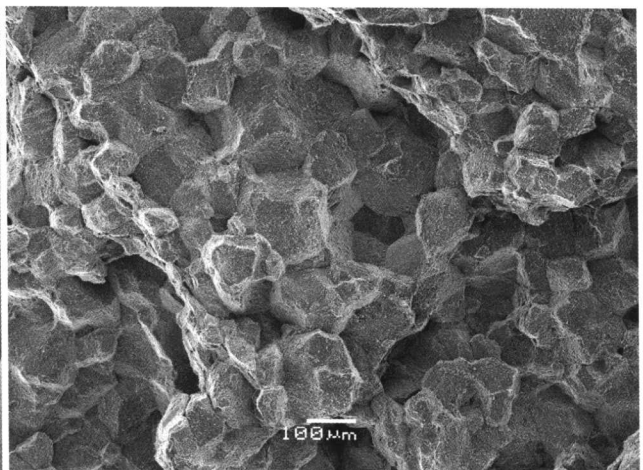


图 1-1-13 韧性沿晶断裂特征(图 1-1-12 中 1 区)

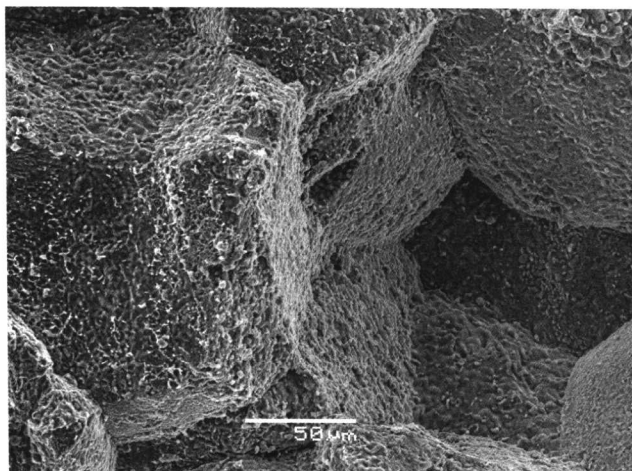


图 1-1-14 图 1-1-12 中 1 区局部放大图像

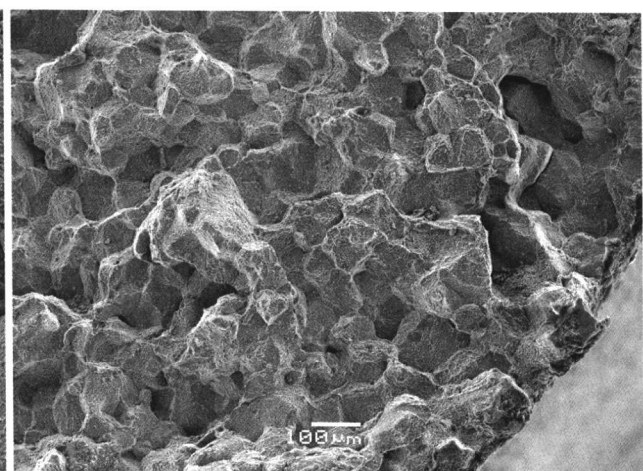


图 1-1-15 韧性沿晶断裂特征(图 1-1-12 中 2 区)

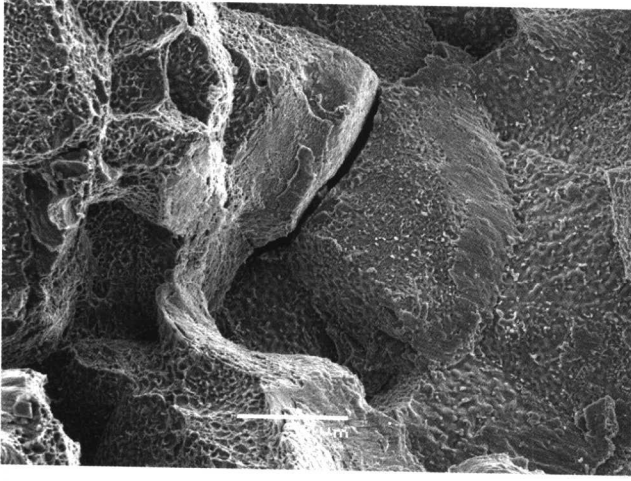


图 1-1-16 图 1-1-12 中 2 区局部放大图像

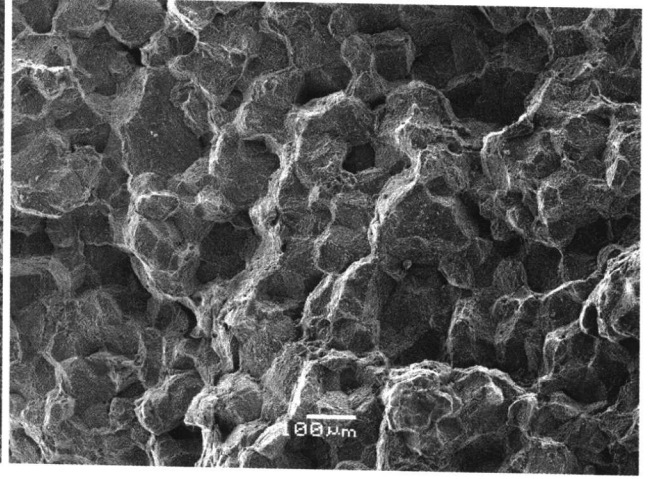


图 1-1-17 韧性沿晶断裂特征(图 1-1-12 中 3 区)

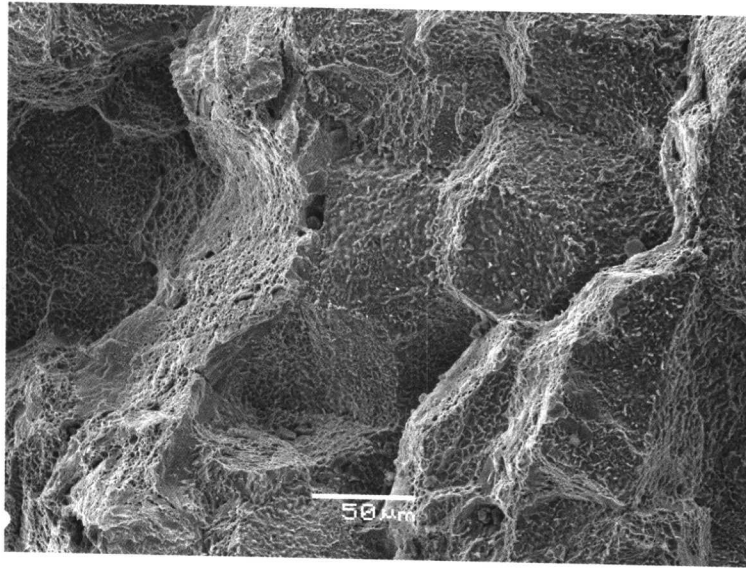


图 1-1-18 图 1-1-12 中 3 区局部放大图像

1.2 GH2150 合金

GH2150 是以铁-镍为基的时效强化变形高温合金。合金在 700℃ 以下长期使用,具有组织稳定、强度高、塑性好等优良性能。合金的热加工塑性好,并具有良好的冷成形、焊接及切削加工性能。用于制造航空发动机叶片等热端部件。

合金的主要化学成分(质量分数,%)为: $w(\text{C}) \leq 0.1$, $w(\text{Cr})$ 14~16, $w(\text{Ni})$ 45~50, $w(\text{W})$ 2.5~3.5, $w(\text{Mo})$ 4.5~6, $w(\text{Al})$ 0.8~1.3, $w(\text{Ti})$ 1.8~2.4, $w(\text{Nb})$ 0.9~1.4, $w(\text{B}) \leq 0.008$, $w(\text{Ce}) \leq 0.1$, $w(\text{Zr}) \leq 0.02$, $w(\text{Fe})$ 余。合金的主要强化相为 γ' 相,经标准热处理后占合金总重量的 17% (质量分数)。还有少量的 TiC、NbN、 M_6C 及极少量的硼化物。合金的晶粒尺寸均匀,析出的 γ' 相与碳化物等第二相较为细小,且弥散分布。

合金的热处理制度为:1100℃ × 2.5 h/油淬 + 800℃ × 5 h/空冷 + 690℃ × 16 h/空冷。

1.2.1 拉伸断口

1.2.1.1 室温拉伸

试样: $\phi 24$ mm 棒材,经热处理

试验条件: 室温

试验结果: $\sigma_b = 1300$ MPa, $\sigma_{p0.2} = 765$ MPa, $\delta_5 = 21\%$, $\psi = 29\%$

断口特征:

宏观断口无明显缩颈,断面呈颗粒状,在断口周边有多处面积较小的剪切唇区(图 1-2-1 中 3 区和 4 区)。从放射棱线和剪切唇区的位置分布可见,裂纹从左下方向右上方扩展。大部分区域为沿晶断裂形貌(图 1-2-1)。

微观断口显示,大部分区域为沿晶断裂特征,并存在二次沿晶裂纹(图 1-2-2)。高倍下可见沿晶断面上有滑移痕迹和大量浅韧窝(图 1-2-3 和图 1-2-4)。剪切唇区主要为拉长的浅韧窝(图 1-2-5)。

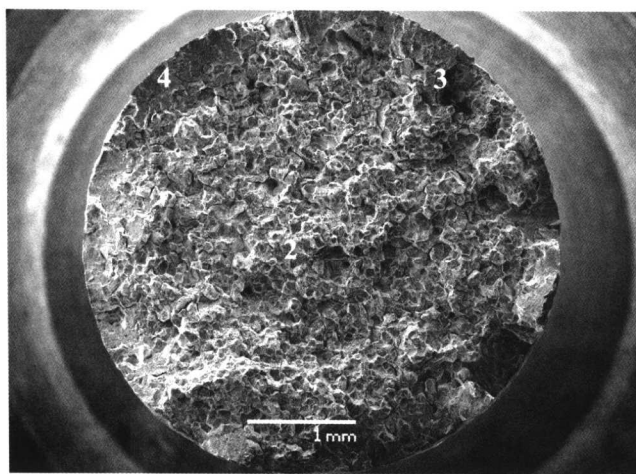


图 1-2-1 宏观断口形貌

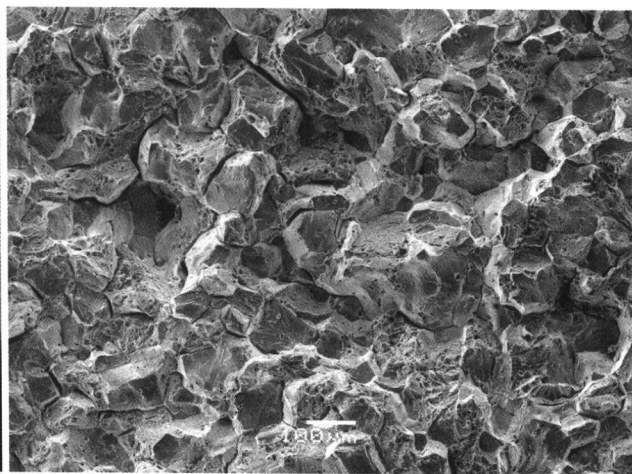


图 1-2-2 沿晶断裂及沿晶二次裂纹形貌(图 1-2-1 中 1 区)

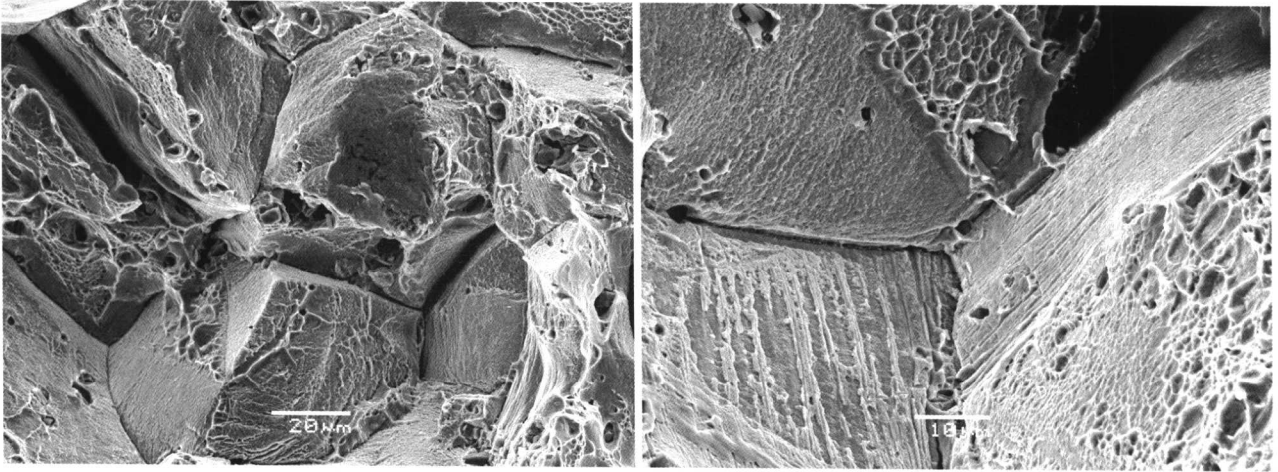


图 1-2-3 沿晶断裂面滑移痕迹和浅韧窝特征(图 1-2-1 中 2 区) 图 1-2-4 沿晶断裂面滑移痕迹和韧窝特征(图 1-2-1 中 2 区)

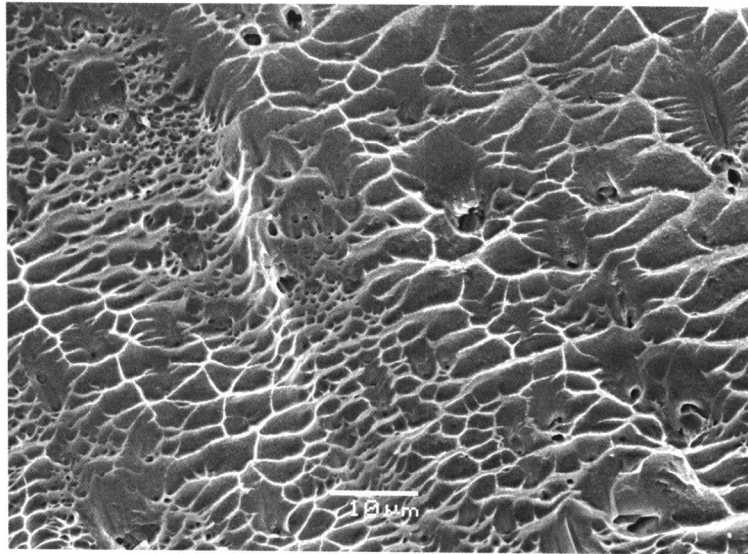


图 1-2-5 剪切唇区韧窝形貌(图 1-2-1 中 3、4 区)

1.2.1.2 高温拉伸

试 样： $\phi 24$ mm 棒材，经热处理

试验条件：600℃

试验结果： $\sigma_b = 1145$ MPa, $\sigma_{p0.2} = 763$ MPa, $\delta_5 = 16\%$, $\psi = 26\%$

断口特征：

宏观断口无明显缩颈，边缘呈锯齿状，断面粗糙，呈黄褐色。如图 1-2-6 所示，裂纹从 1 区起源，1 区周围(2 区和 3 区)为剪切唇区，约占断口面积的 1/2。

微观断口显示，图 1-2-6 中 1 区为等轴韧窝形貌(图 1-2-7)。剪切唇区为较浅的网状或抛物线形韧窝形貌(图 1-2-8 和图 1-2-9)。

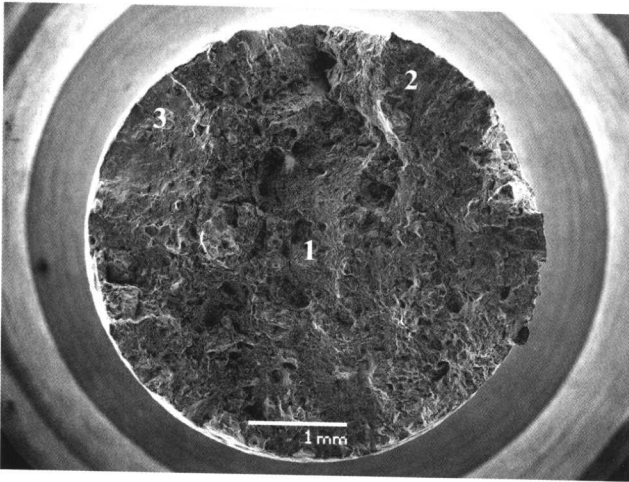


图 1-2-6 宏观断口形貌

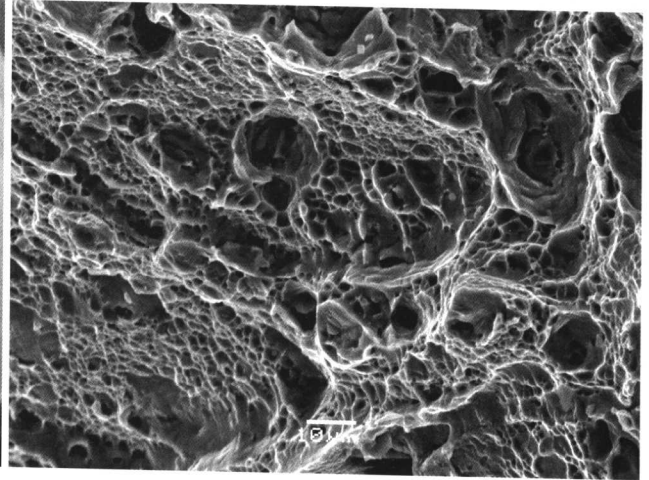


图 1-2-7 扩展区的等轴韧窝形貌(图 1-2-6 中 1 区)

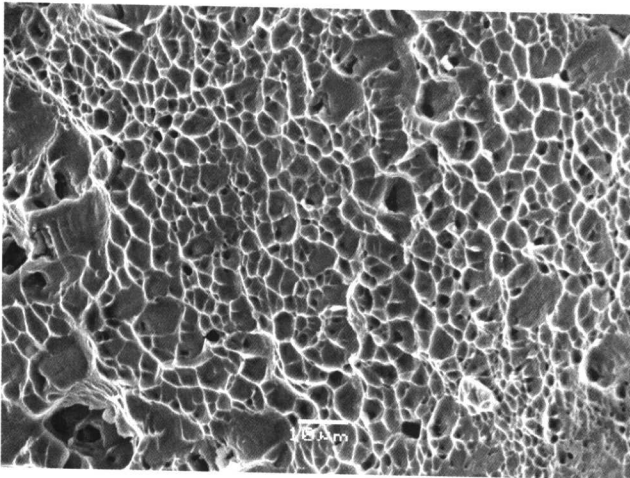


图 1-2-8 剪切唇区的韧窝形貌(图 1-2-6 中 2 区)

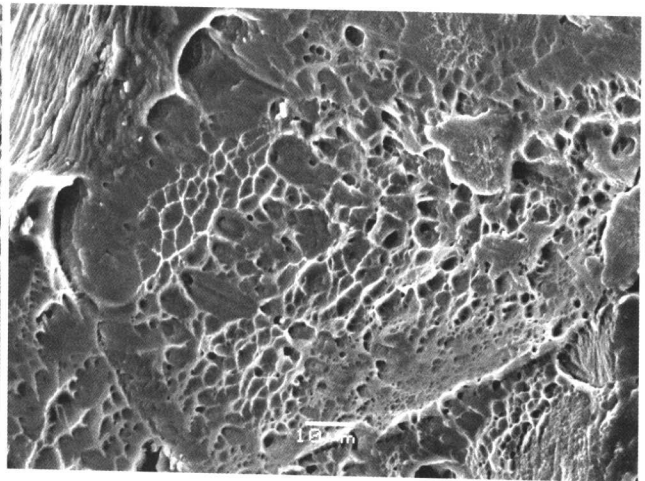


图 1-2-9 剪切唇区的韧窝形貌(图 1-2-6 中 3 区)

1.2.2 持久断口

试样: $\phi 24$ mm 棒材, 经热处理

试验条件: 600°C ; $\sigma = 785$ MPa

试验结果: $\tau = 150.2$ h, $\delta_5 = 12\%$, $\psi = 17\%$

断口特征:

宏观断口呈杯锥状, 断面呈红褐色。裂纹由中心起源(图 1-2-10 中 1 区), 无明显放射区。四周为剪切唇区(图 1-2-10 中 2 区), 约占断口面积的 1/2。断面中部有一些大小不等的孔洞(图 1-2-10)。

微观断口显示, 1 区为等轴韧窝形貌(图 1-2-11)。剪切唇区为网状浅韧窝形貌(图 1-2-12)。

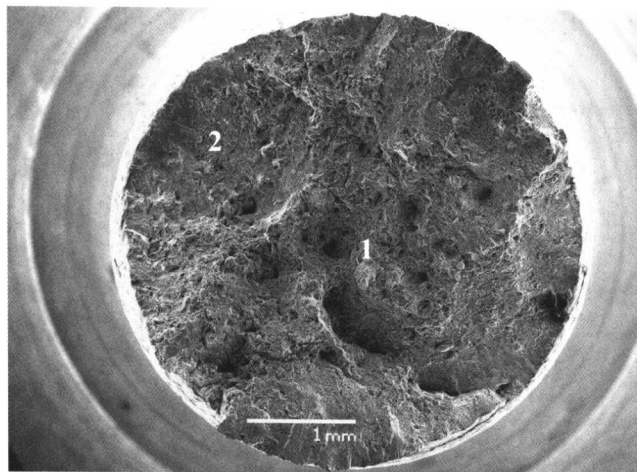


图 1-2-10 宏观断口形貌

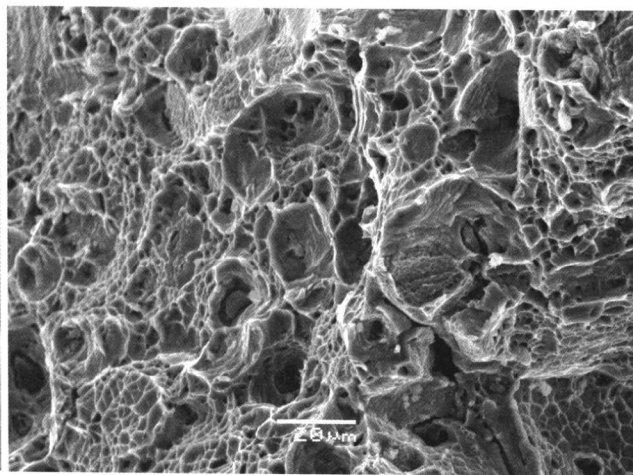


图 1-2-11 等轴韧窝形貌(图 1-2-10 中 1 区)

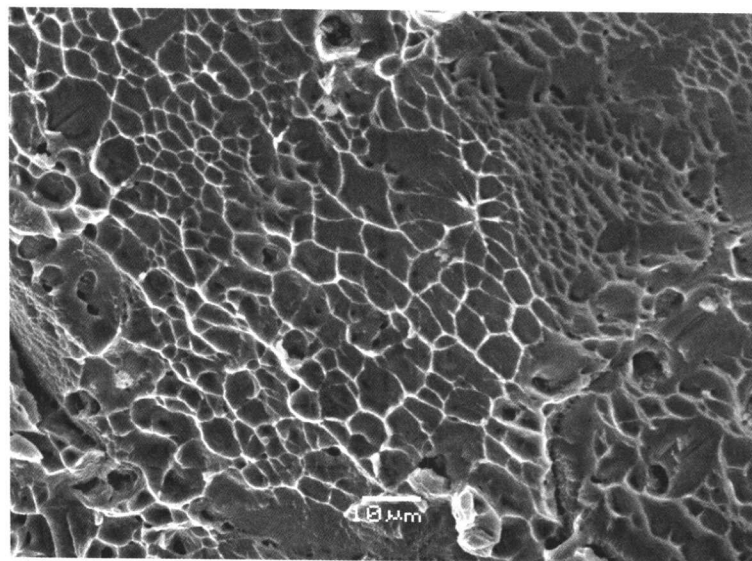


图 1-2-12 剪切唇区韧窝形貌(图 1-2-10 中 2 区)

1.2.3 冲击断口

试样： $\phi 24$ mm 棒材，经热处理

试验条件：室温，标准 U 形缺口试样

试验结果： $A_{KU2} = 62$ J

断口特征：

宏观断口显示，裂纹从缺口近根部起源(图 1-2-13 中 1 区)，放射区很大，断口无明显剪切唇区(图 1-2-13)。

微观断口显示，断口以沿晶断裂为主，但晶面上分布有大量浅韧窝，沿晶断裂之间有大量撕裂带(图 1-2-14)。在最后断裂区观察到大量撕裂带、韧窝和部分沿晶断裂形貌(图 1-2-15 和图 1-2-16)。