上海交通大學
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

DIC方法研究
双相钢的应变与断裂

沈耀

许以阳 邓洁 葛涵清

材料科学与工程学院

上海交通大学

2014/8/24

提纲

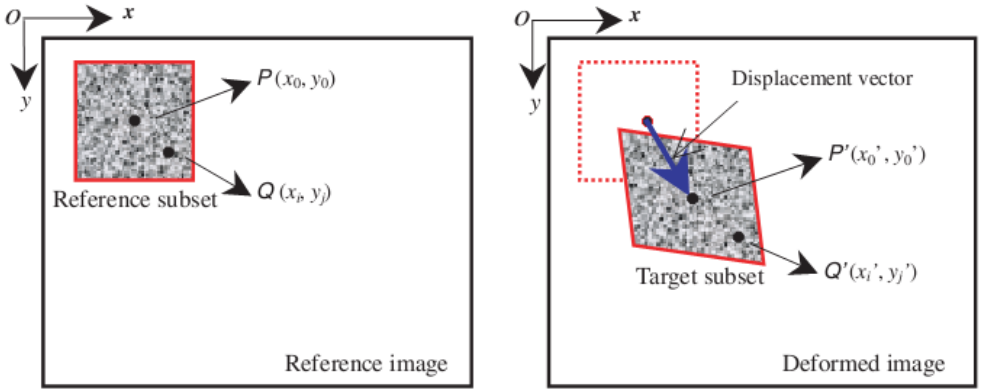
- DIC方法
- 热处理双相钢的应变分配行为
- 热处理双相钢的断裂行为

一、DIC（数字图像相关）方法

DIC方法的基本原理

基本原理

- 依据微区的衬度特征，确定变形前后像素点的对应关系。



方法

奇数个像素为边长的子区

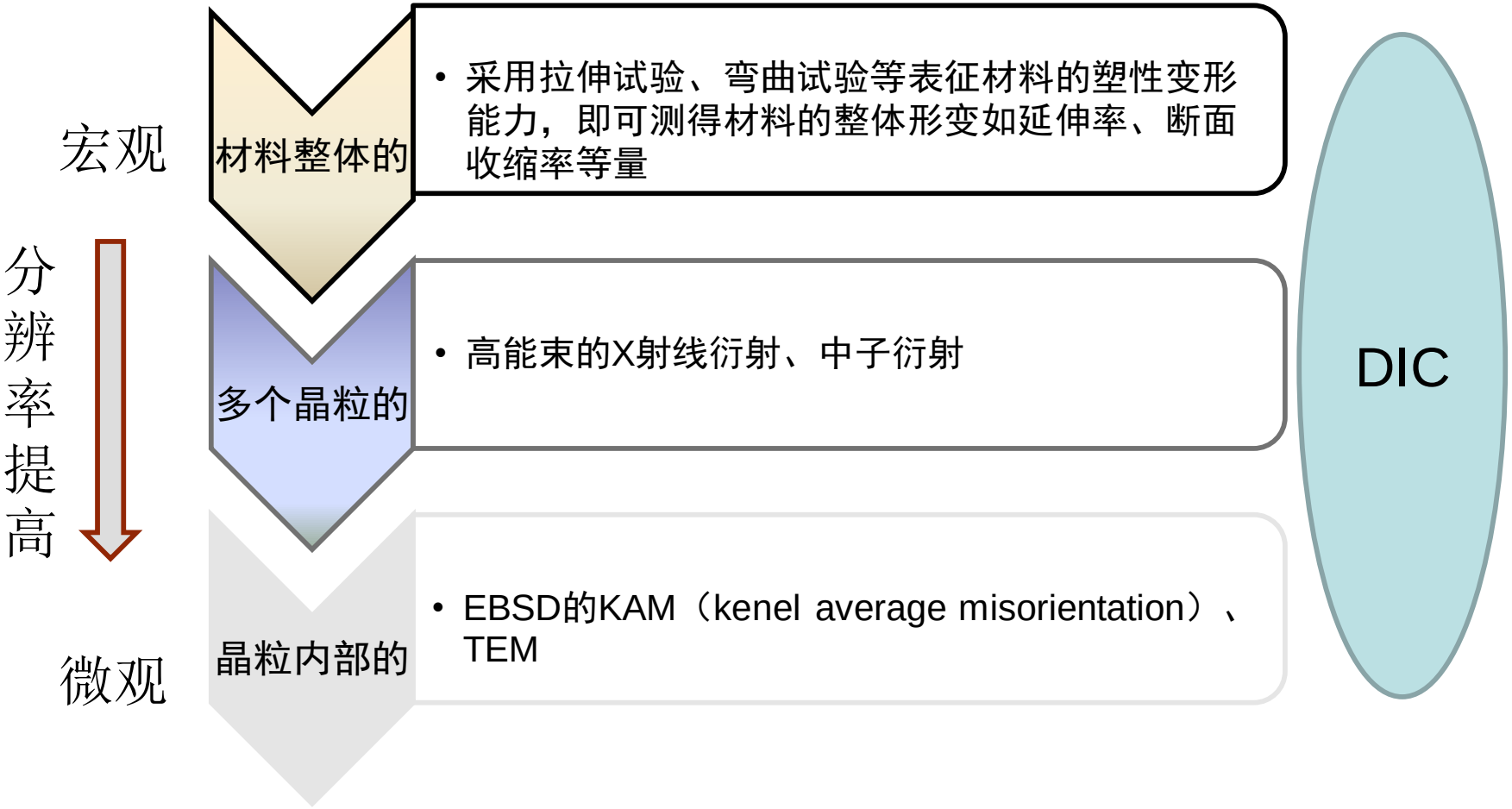
衬度特征相符 →

搜索到对应子区，获得中心像素点位移

Before

After

材料宏微观变形的不同表征手段



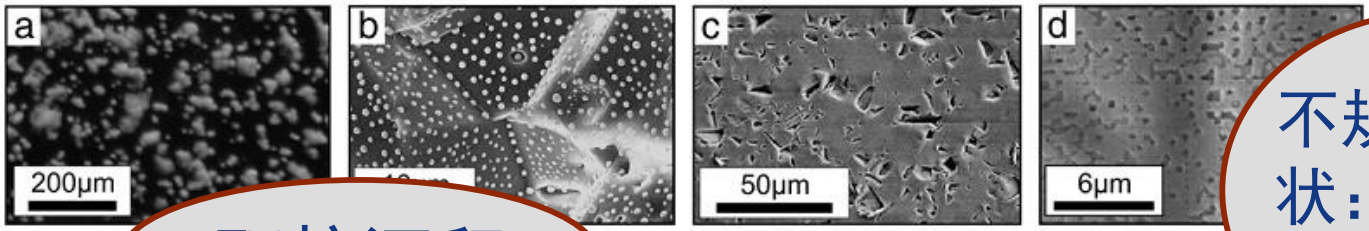
DIC技术通过改变标记物（mark）的大小及获取图像的尺寸，可以完成对材料宏微观变形的测量。

DIC标记物

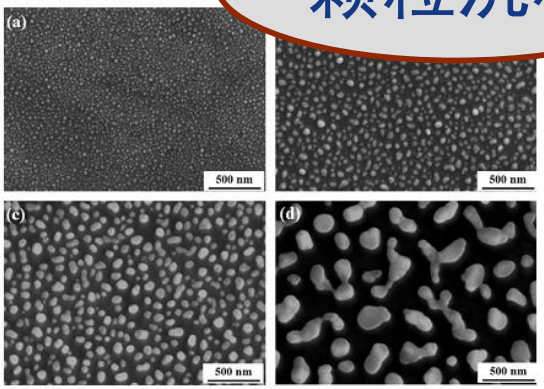
- 对材料进行表面加工获得衬度特征的方法：

  - 颗粒标记
    应用最广，种类最多：喷涂料、石墨粉、微米/纳米级颗粒沉积
  - 网格标记
    显微光刻，FIB栅格
  - 不规则形状标记
    压印，腐蚀

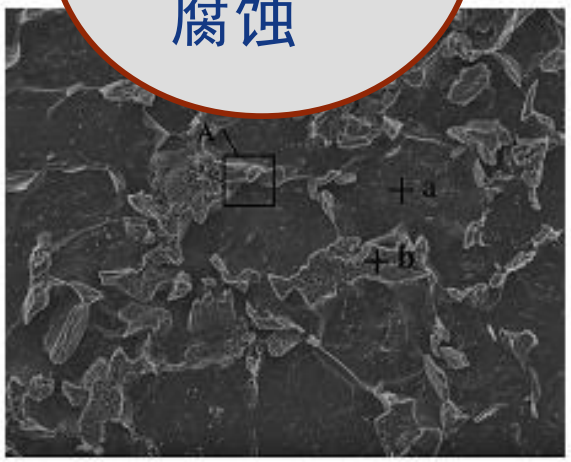
文献中的DIC标记物



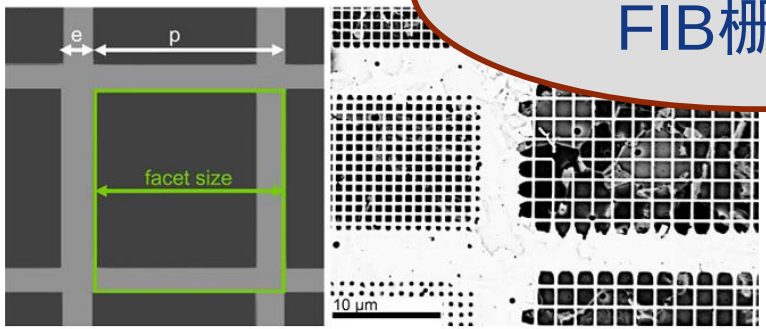
颗粒沉积

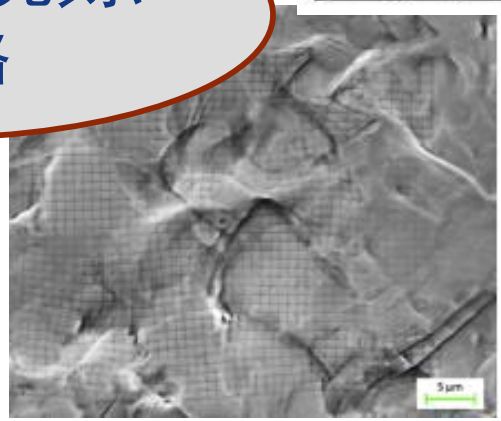


不规则形状：压印、腐蚀



网格：显微光刻、FIB栅格

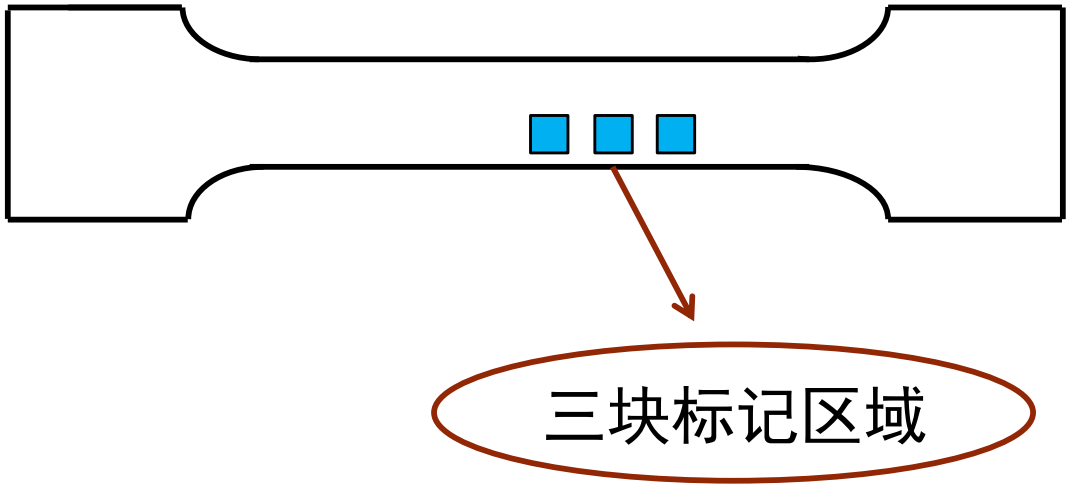




二、热处理双相钢的应变分配行为

问题及思路

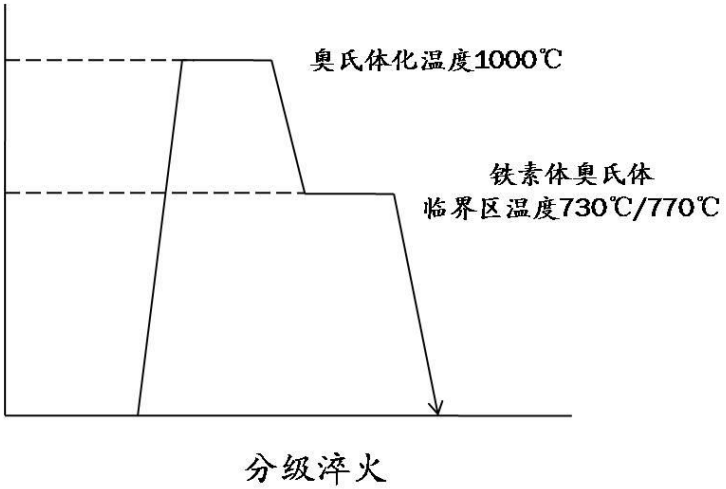
- 分析两种热处理双相钢在**不同变形量**时的应变分配情况



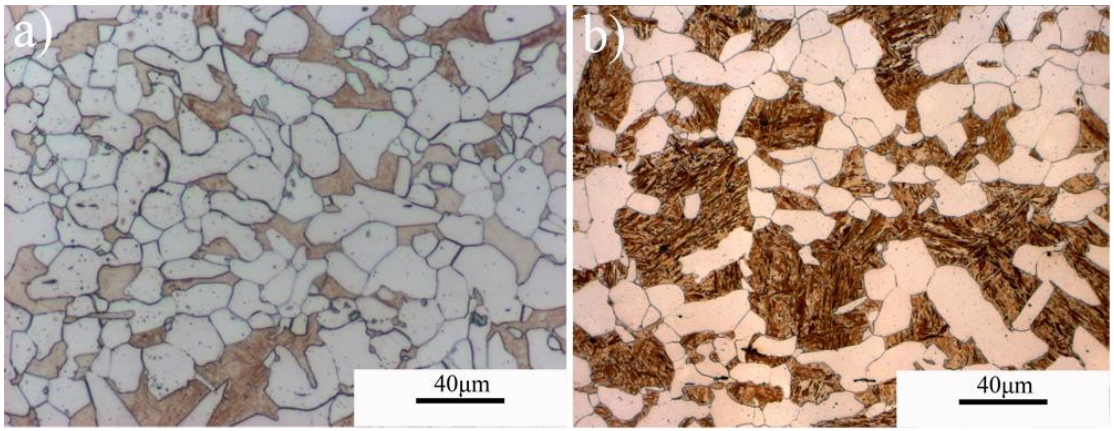
变形前 SEM → **拉伸 变形量1** → SEM → **拉伸 变形量2** → SEM

分级淬火热处理工艺

原材料：20#钢



分级淬火（SQ）热处理



a) 730SQ-30%M　　b) 770SQ-60%M

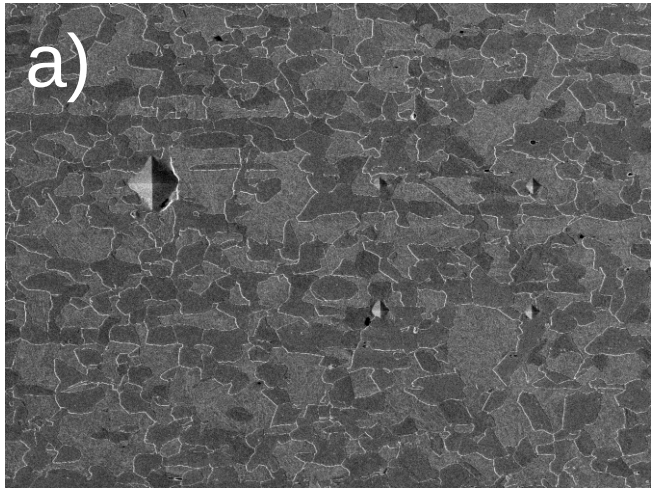
应变分析实验方法

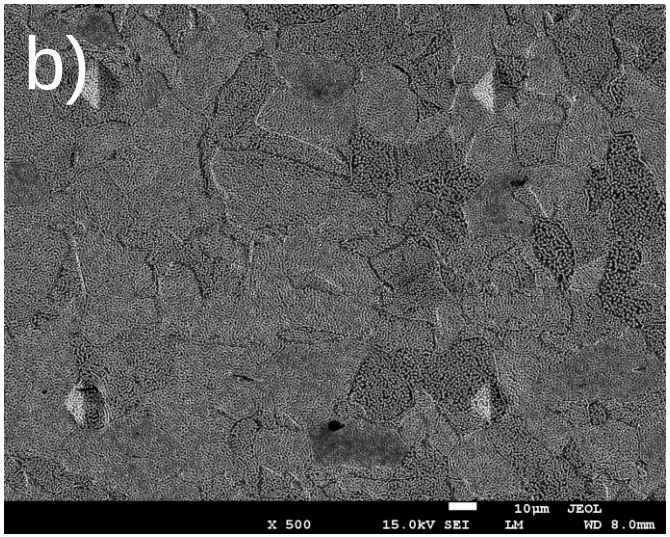
材料准备 → 热处理、抛磨、压痕标记

表面形貌获得 → SEM

拉伸试验 → 电镀、SEM、拉伸

DIC分析



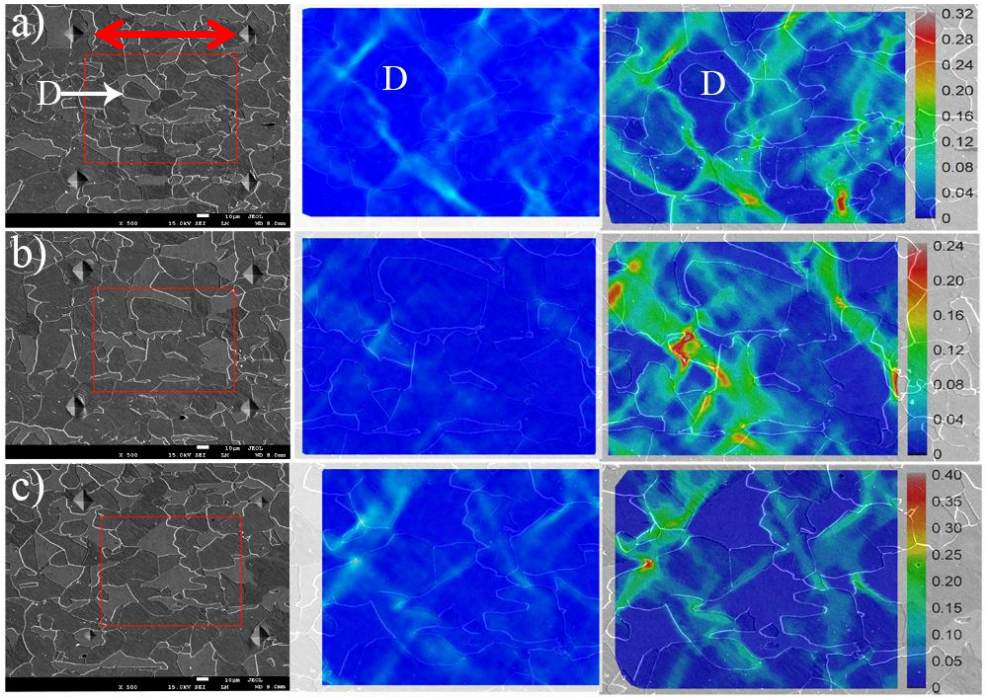


应变可靠性分析

- SEM内部环境不稳定——0.5%误差
  - 未变形试样多次拍照DIC分析得到的变形量
- 标记物获取的数据可靠性
  - 压痕分析与标记物分析的对比
  - 检验典型区域的应变特征与微观结构特征的一致性

应变可靠性分析

- 四个压痕中心点水平距离的变化测量出矩形区域总应变，与矩形区域水平应变平均值进行比较



显微形貌　　1.5%　　5.0%

730SQ-30%M

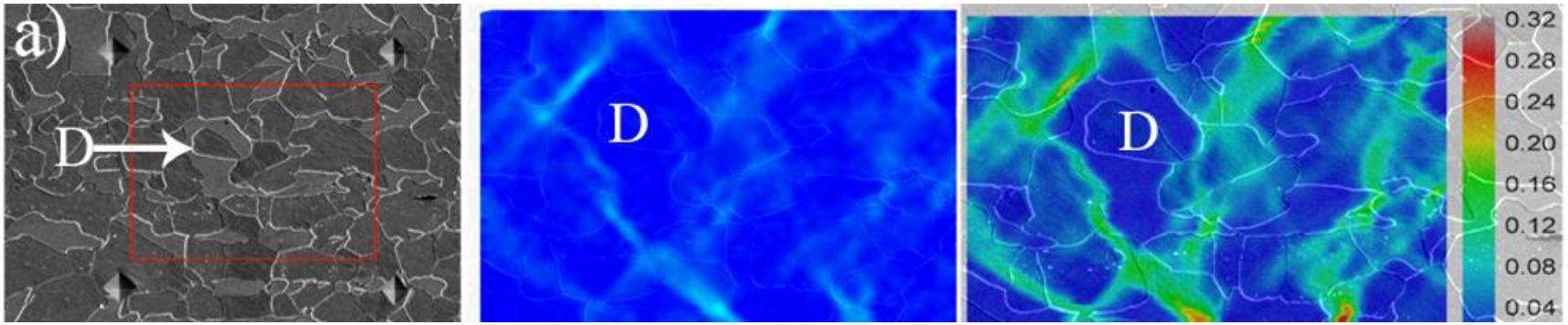
应变可靠性分析

730SQ双相钢试样矩形区域a、b、c的水平方向应变平均值和压痕法测得的总应变

	1.5%			5.0%		
	水平应变平均值	总应变	差值	水平应变平均值	总应变	差值
矩形区域a	1.55%	1.43%	0.12%	4.93%	5.06%	0.13%
矩形区域b	1.50%	1.66%	0.16%	4.72%	4.60%	0.12%
矩形区域c	1.57%	1.53%	0.04%	4.66%	4.98%	0.32%

应变可靠性分析

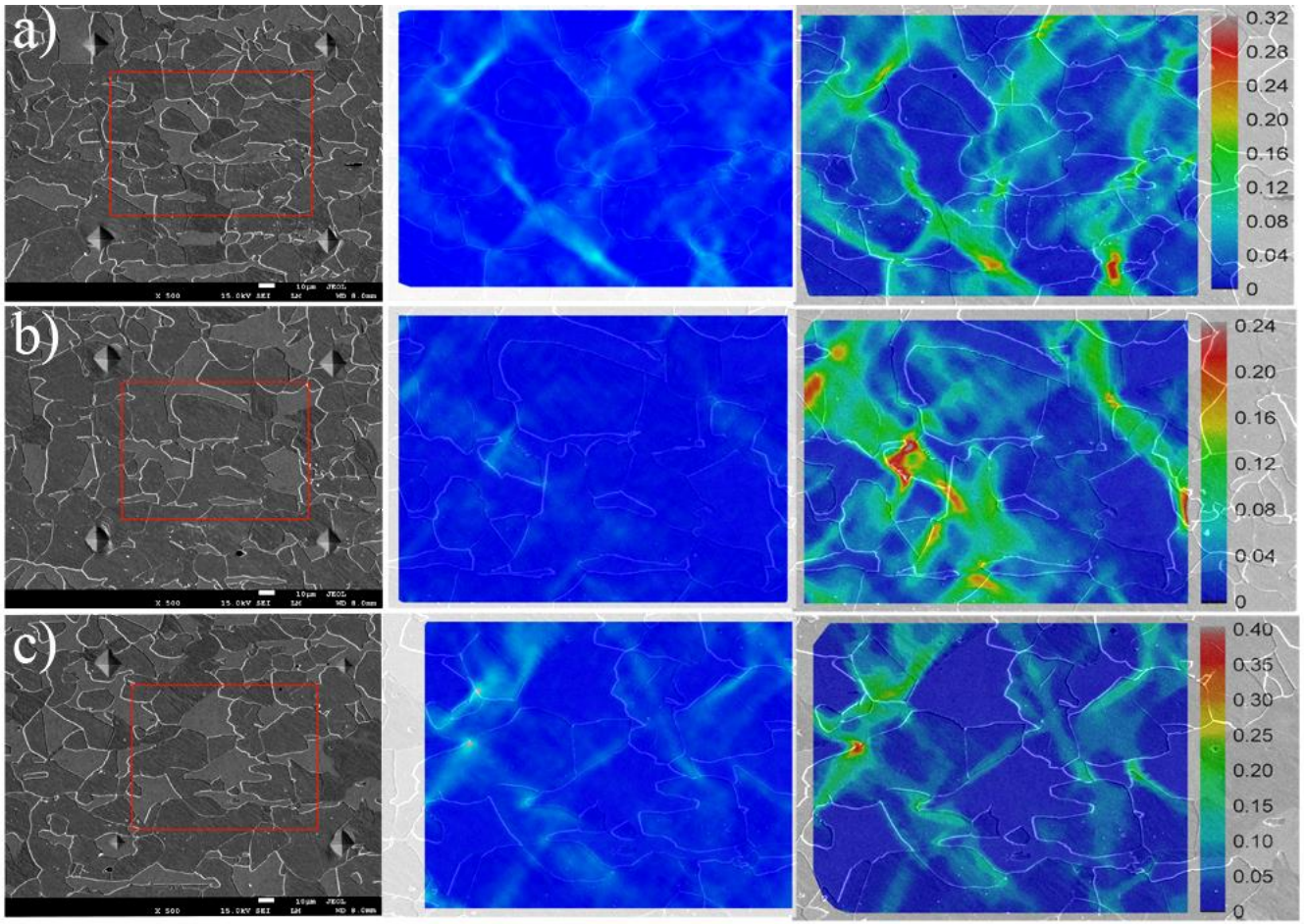
- 检验典型区域的应变特征与微观结构特征的一致性
  - 1.5%时D的等效应变平均值仅为0.66%，远小于铁素体区域的1.68%，而D连同其周围马氏体的平均应变为0.62%



显微形貌　　1.5%　　5.0%

730SQ-30%M

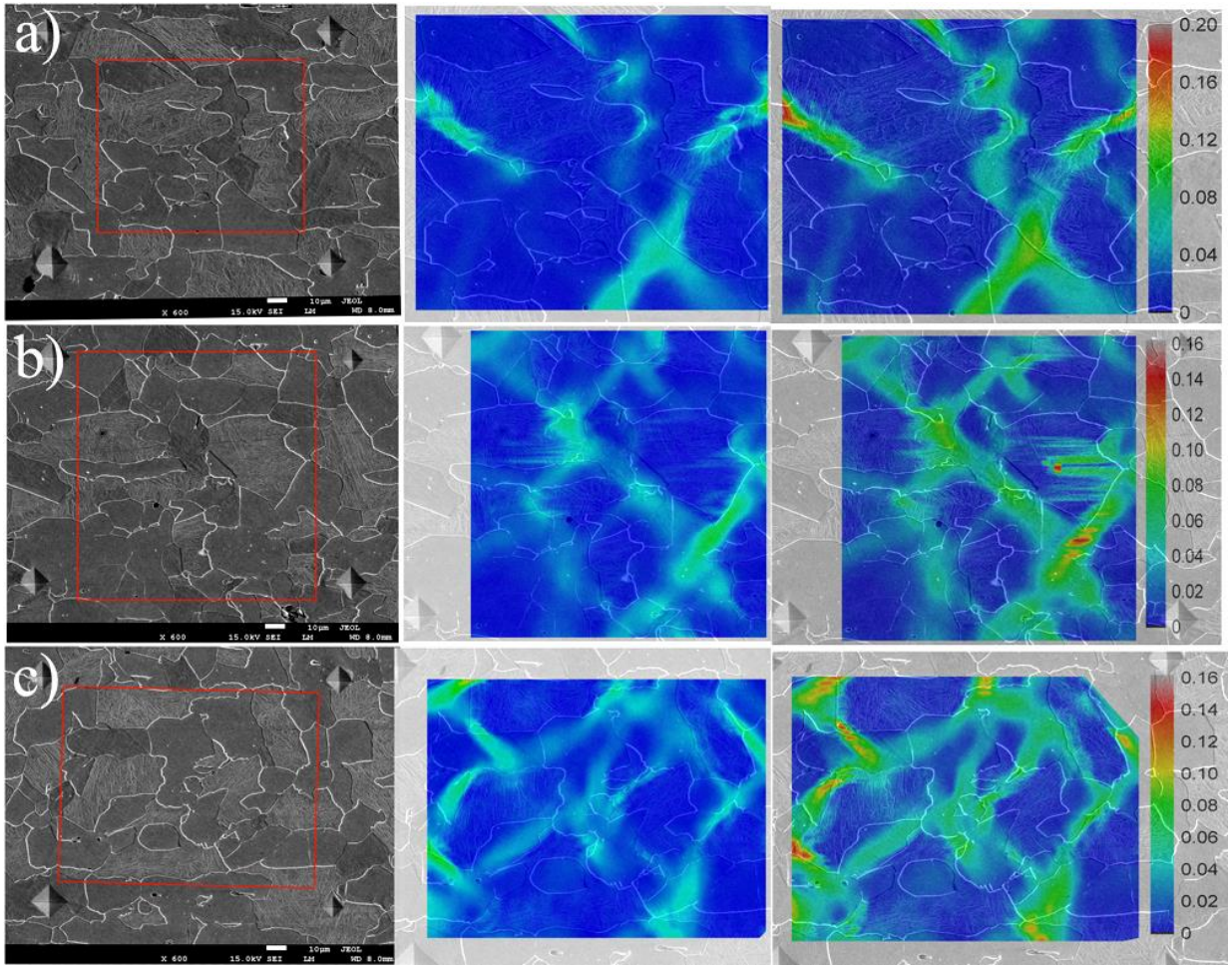
DIC分析：730SQ（30%M）等效应变分布图



显微形貌　　1.5%　　5.0%

应变的微观分布很不均匀

DIC分析：770SQ（60%M）等效应变分布图

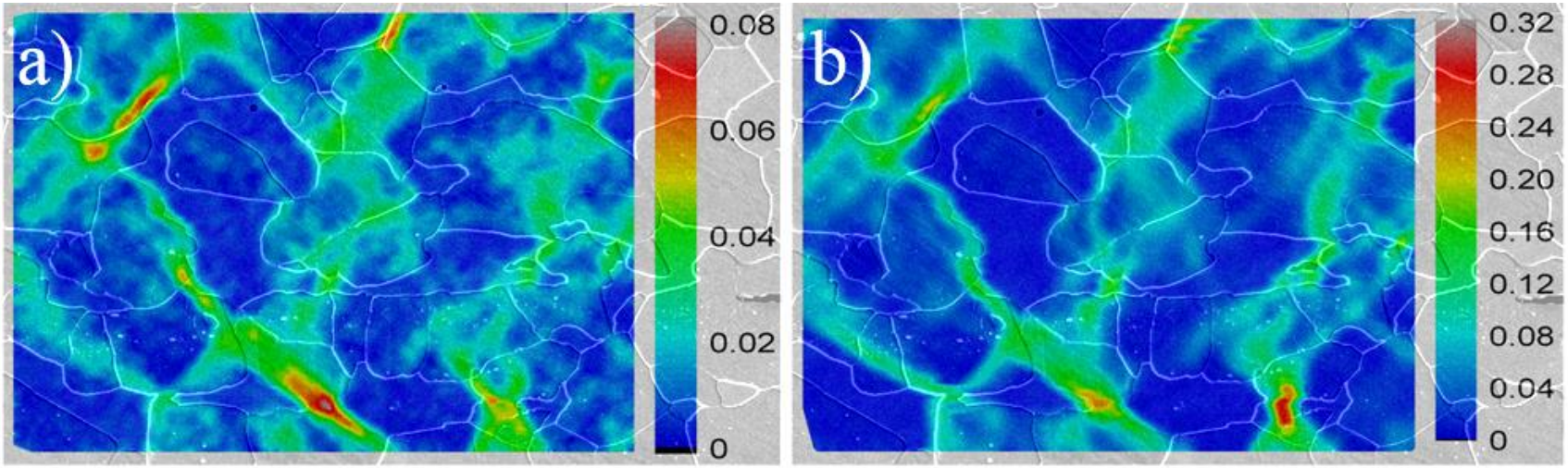


显微形貌　　1.7%　　2.8%

应变的微观分布很不均匀

DIC分析：变形量对分配的影响

- 减小730SQ a区域1.5%应变时的标尺最大值：突出特征

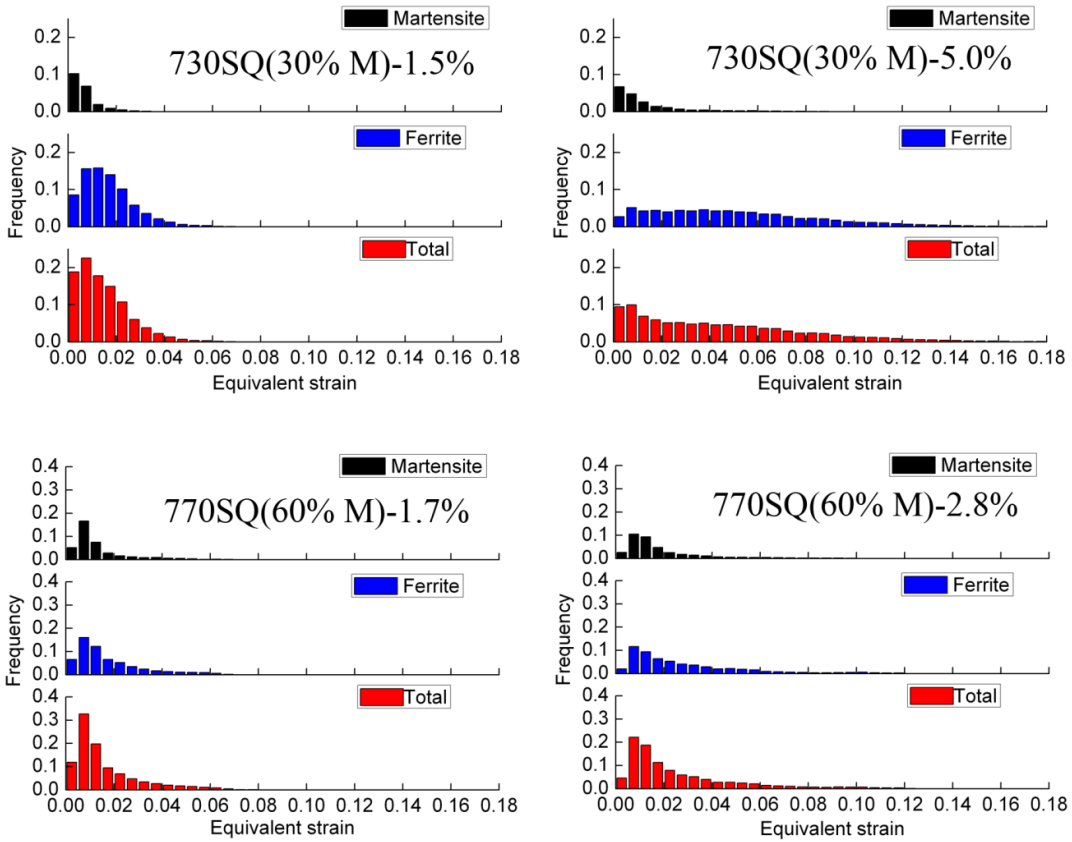


a) 1.5%　　b) 5.0%

变形量↑，微区应变集中的变形带分布规律相似，即应变分配规律相似

DIC分析：不同变形量的应变分布统计

统计不同变形量在F、M和整体区域的出现几率：



1、F、M、整体区域，变形量↑，应变不均匀性↑。

2、30%M试样中：F与整体区域分布相似；变形量↑，M中的应变分布趋势变化不明显；而F及整体的分布图由陡变缓，范围明显增大，不均匀性显著提高。

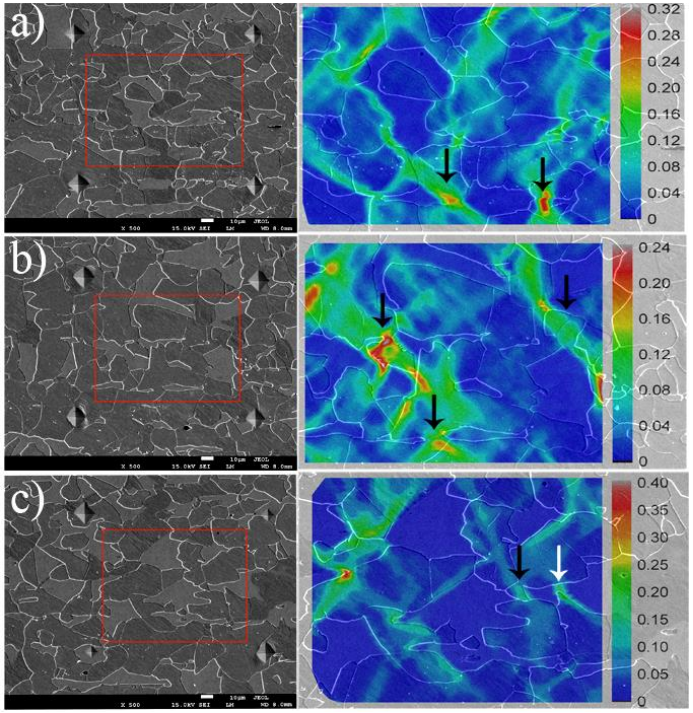
3、60%M试样中：M和F及整体区域的应变分布趋势一致，M与F差异不明显。

DIC分析：不同变形量的应变分布统计

马氏体体积分数	变形量	相	等效应变平均值	应变相对值	标准差
30%	1.5%	铁素体区域F	0.0168	F/T=1.14	0.010856
		马氏体区域M	0.0072	M/T=0.49	0.006378
		矩形区域T	0.0147	F/M=2.33	0.010853
	5.0%	铁素体区域F	0.0530	F/T=1.16	0.038023
		马氏体区域M	0.0187	M/T=0.41	0.02605
		矩形区域T	0.0456	F/M=2.83	0.038514
60%	1.7%	铁素体区域F	0.0178	F/T=1.09	0.014346
		马氏体区域M	0.0142	M/T=0.87	0.013512
		矩形区域T	0.0163	***F/M=1.25***	0.014142
	2.8%	铁素体区域F	0.0291	F/T=1.11	0.025220
		马氏体区域M	0.0219	M/T=0.84	0.022988
		矩形区域T	0.0262	***F/M=1.33***	0.024854

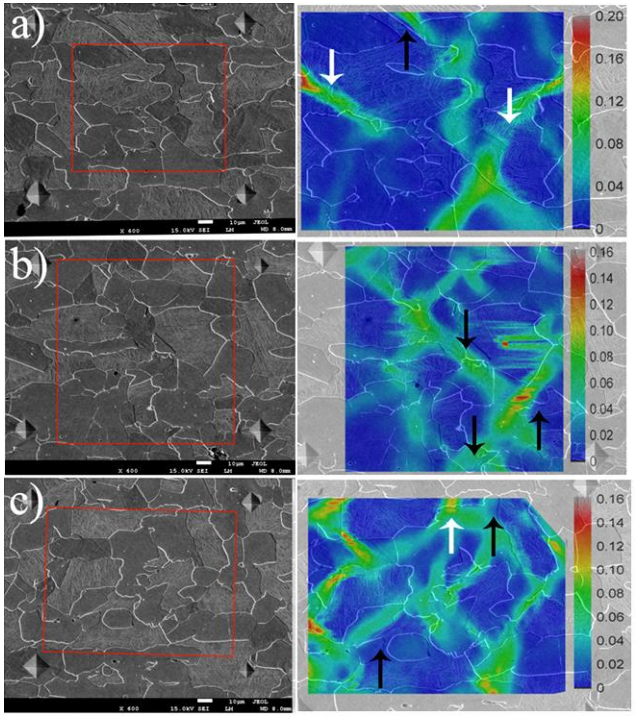
1. 从标准差来看，变形量↑，F、M和整体的应变分布不均匀性↑，铁素体区域和矩形区域值相近，尤其在30%M中，比马氏体区域更不均匀；
2. 从应变分配来看，变形量↑，应变在F和M间的分配不均匀性↑；
3. 30%M中，F/M比值大，说明应变集中在F中，而M的应变很小。60%M中，F/M***比值接近1***，说明应变在F、M中分配比较均匀。

DIC分析：变形带在F和M上的分布规律



显微形貌　　5.0%

730SQ-30%M



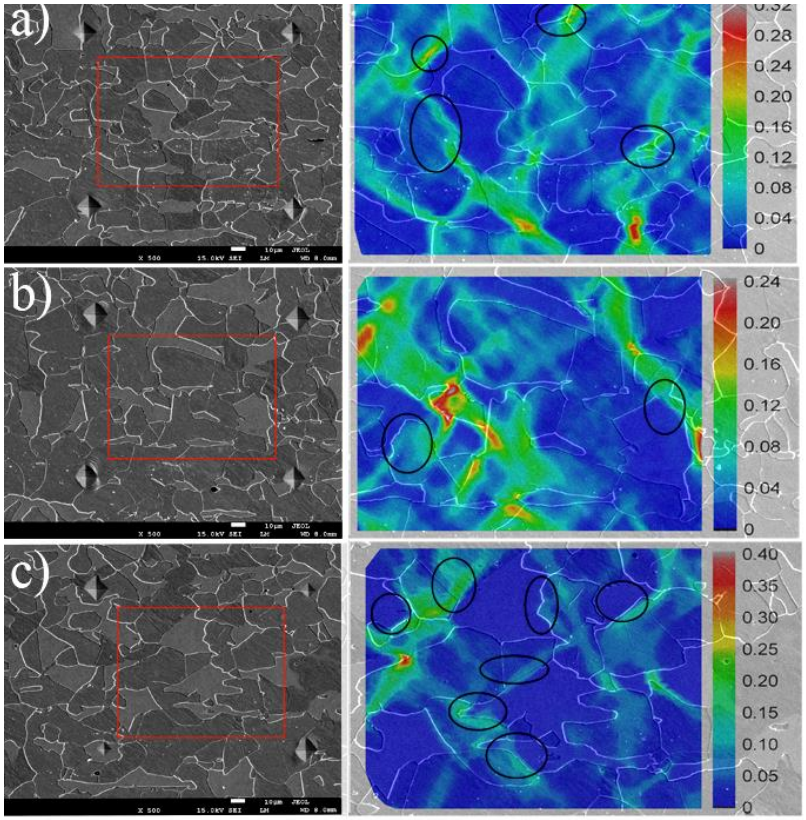
显微形貌　　2.8%

770SQ-60%M

相同点：变形带主要分布在铁素体上，尤其是在块状马氏体之间的较窄铁素体区域出现（黑色箭头）的概率比较大。

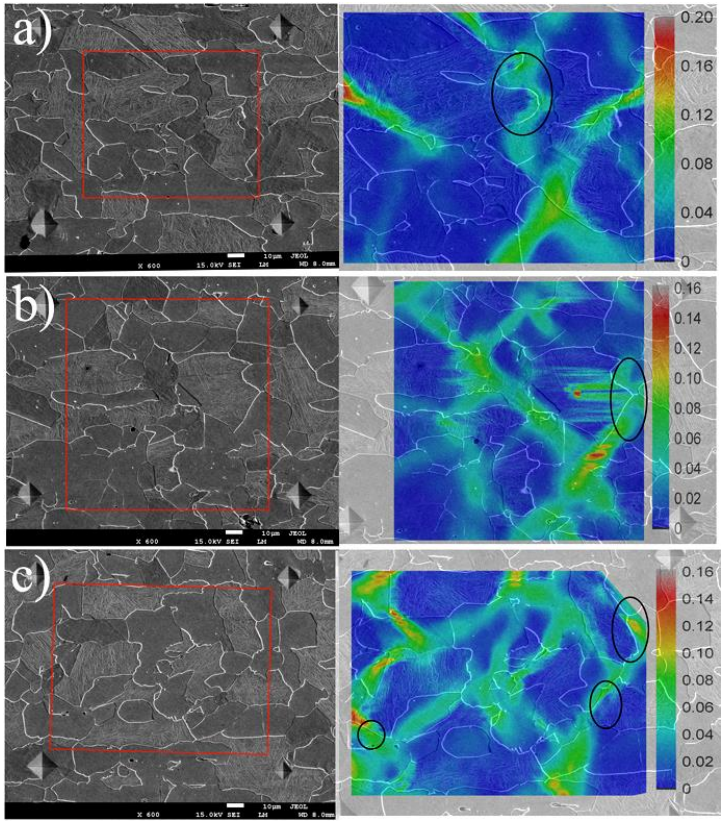
不同点：马氏体体积分数较大，变形带不能完全避过马氏体，会有更多变形带穿过，且马氏体被穿过的部分厚度更大（白色箭头）。

DIC分析：变形带在相界面的分布规律



显微形貌　　5.0%

730SQ-30%M



显微形貌　　2.8%

770SQ-60%M

不同点：马氏体体积分数较小时沿相界面（黑色椭圆）扩展的变形带数量较多

小结

应变分配

- 变形量↑，应变不均匀性↑，应变分配规律相似；
- 马氏体体积分数↓，或变形量↑，应变在F和M间的分配不均匀性↑。
- 60%M中F/M接近1，应变在F、M中分配较均匀。

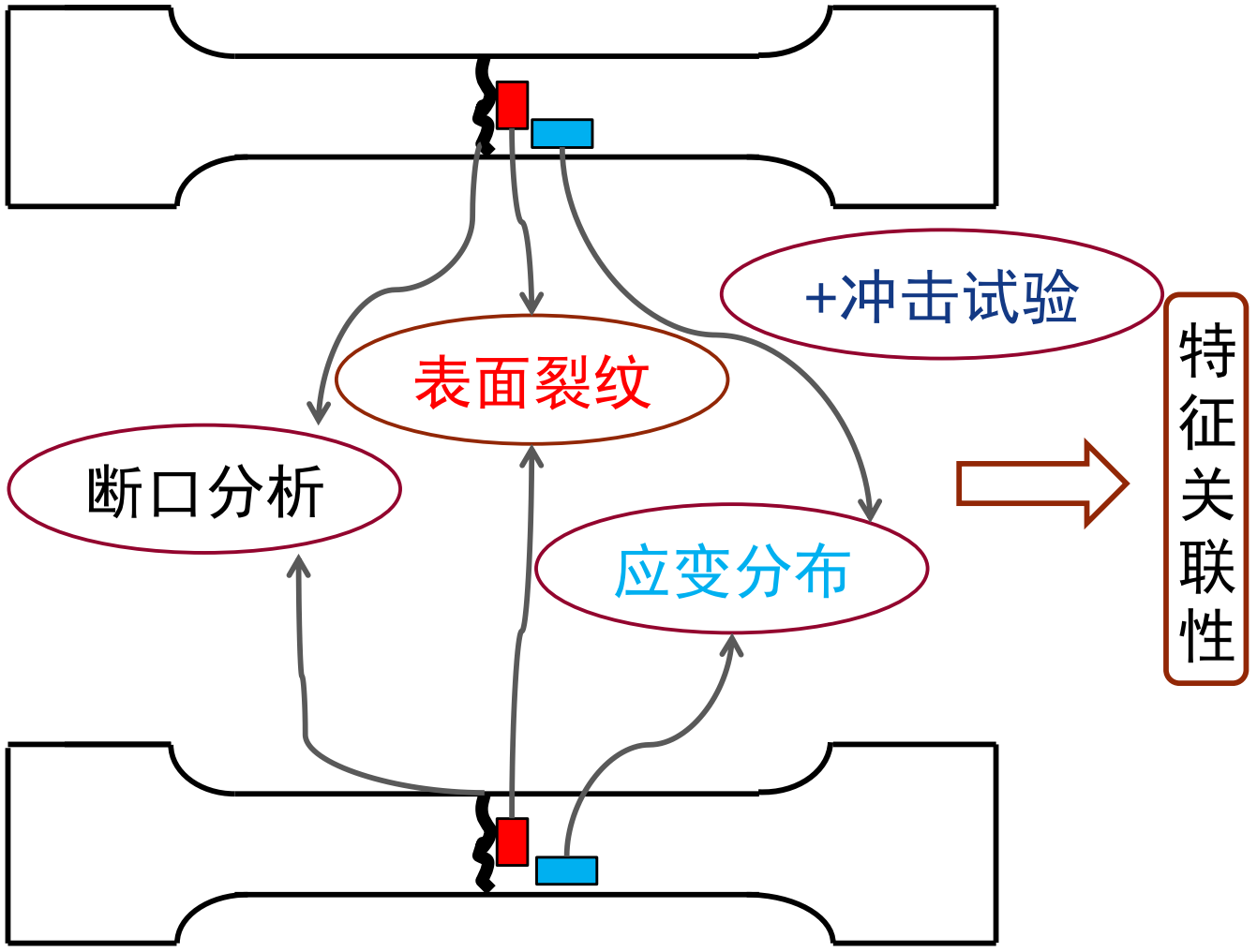
变形带

- 主要分布在铁素体上，块状M间的较窄F区域；
- M体积分数较小时沿相界面扩展的变形带较多；
- M体积分数较大时变形带穿过M的概率更大。

三、双相钢的断裂行为

问题及思路

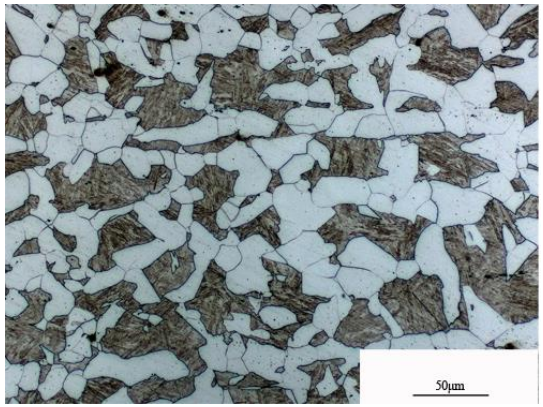
分级淬火双相钢



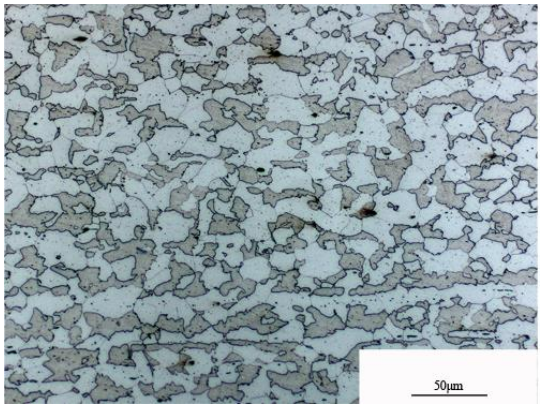
临界区退火双相钢

分级淬火与临界区退火热处理工艺

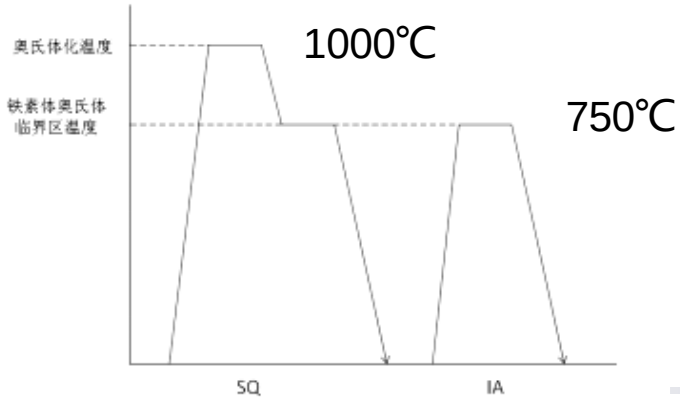
- 热处理工艺：分级淬火（SQ）和临界区退火（IA）



SQ~43%M

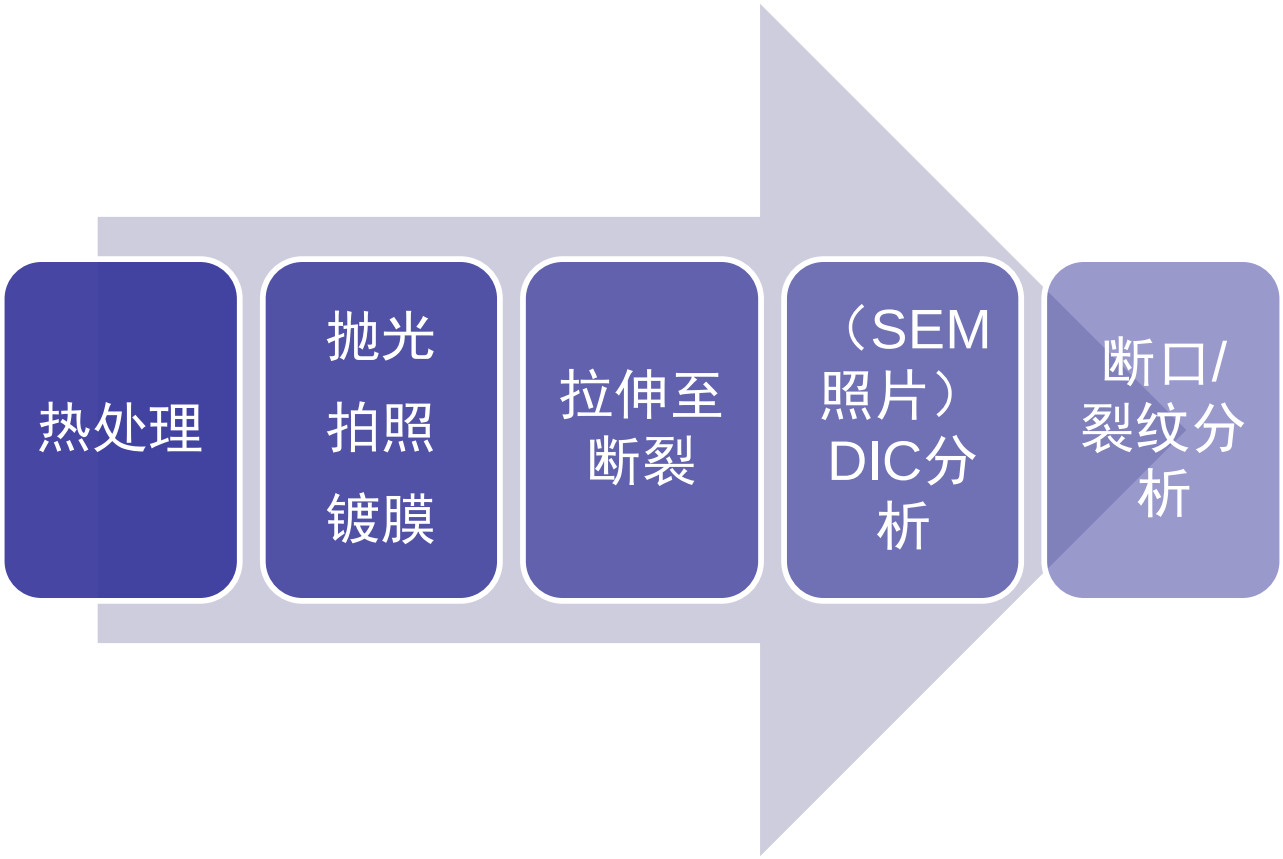


IA~42%M

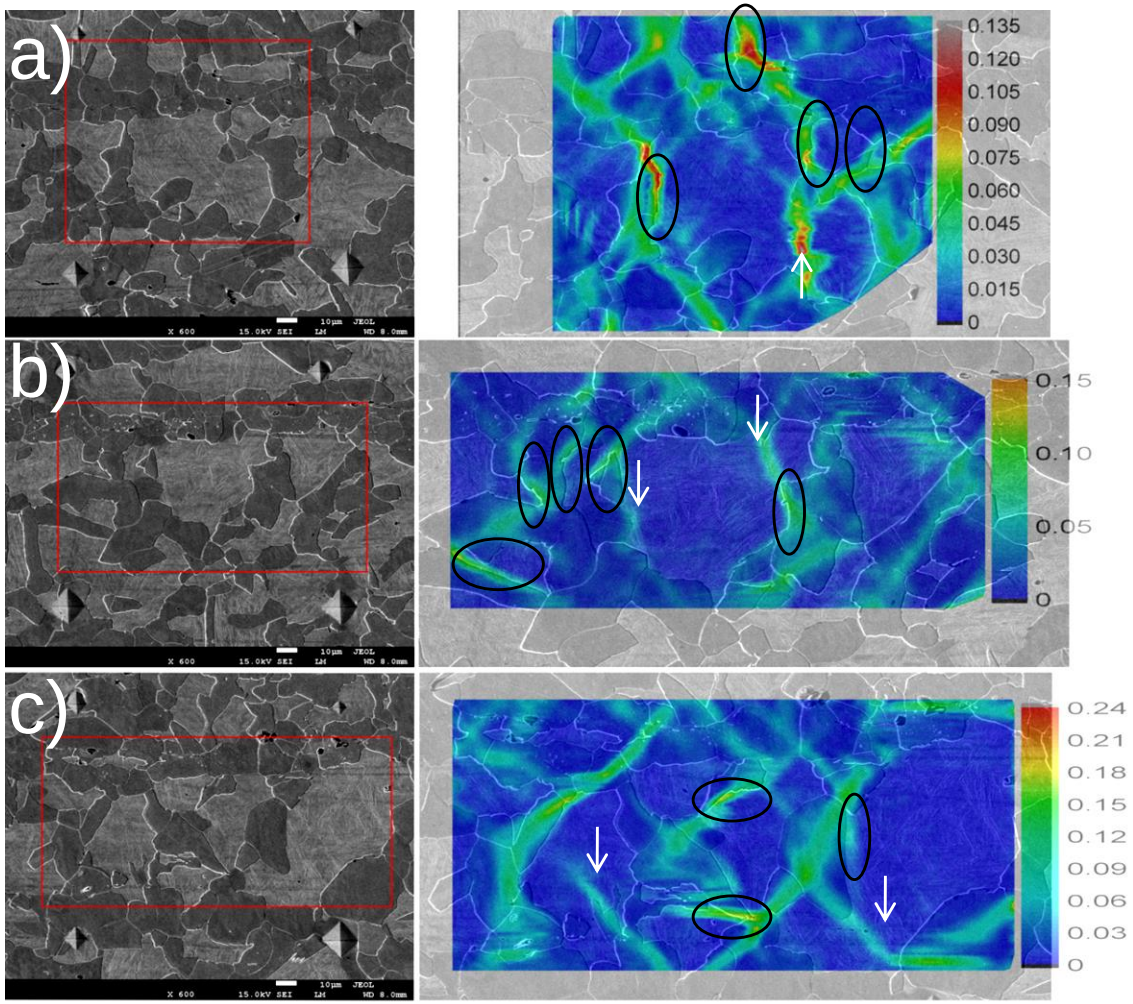


工艺示意图

实验方法



DIC分析SQ样品(大块状M)

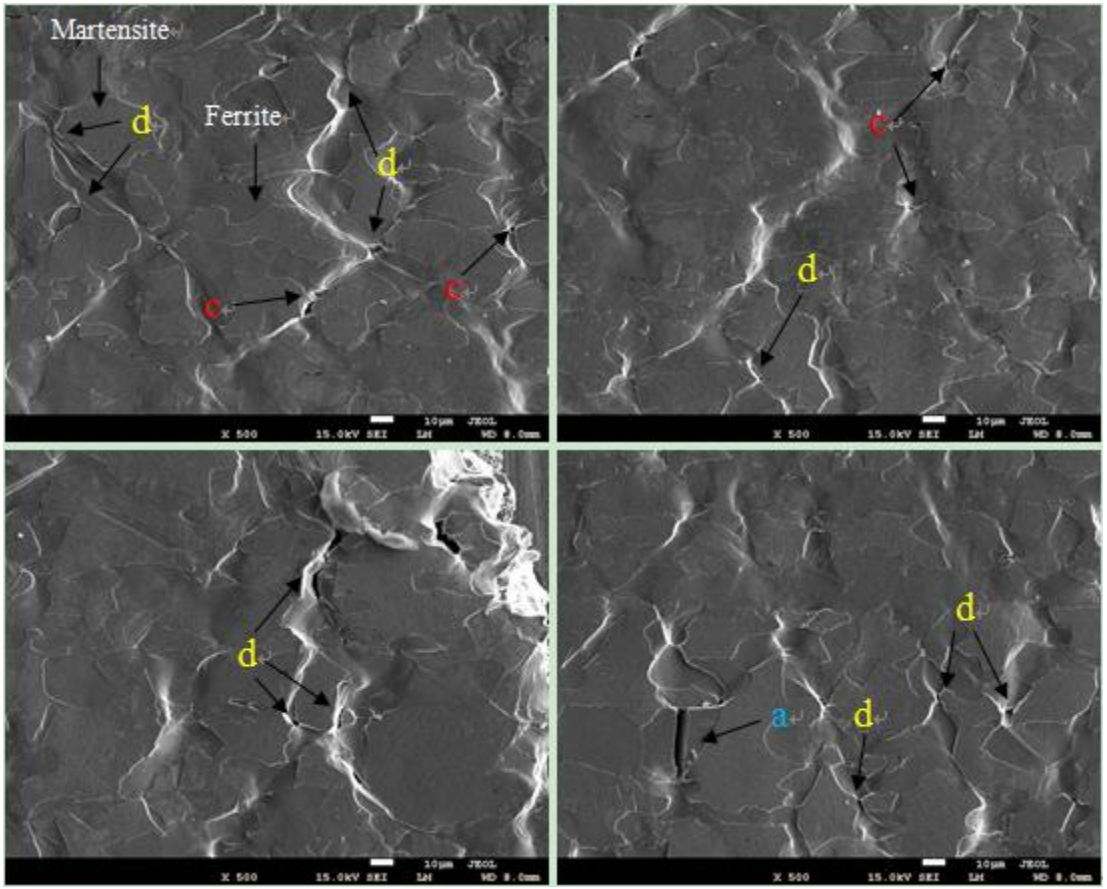


SQ样品的显微形貌和应变分布

应变分布极不均匀，靠近相界面处（黑色椭圆）应变集中显著，有变形带穿过马氏体（白色箭头）

观测到穿过马氏体内部和沿相界面扩展的变形带，推测变形时这些地方易成为裂纹源

SQ样品断口附近表面的裂纹(大块状M)



双相钢的孔洞形核机制一般可以分为四类：

a: 铁素体内部的孔洞

b:铁素体晶界处的孔洞

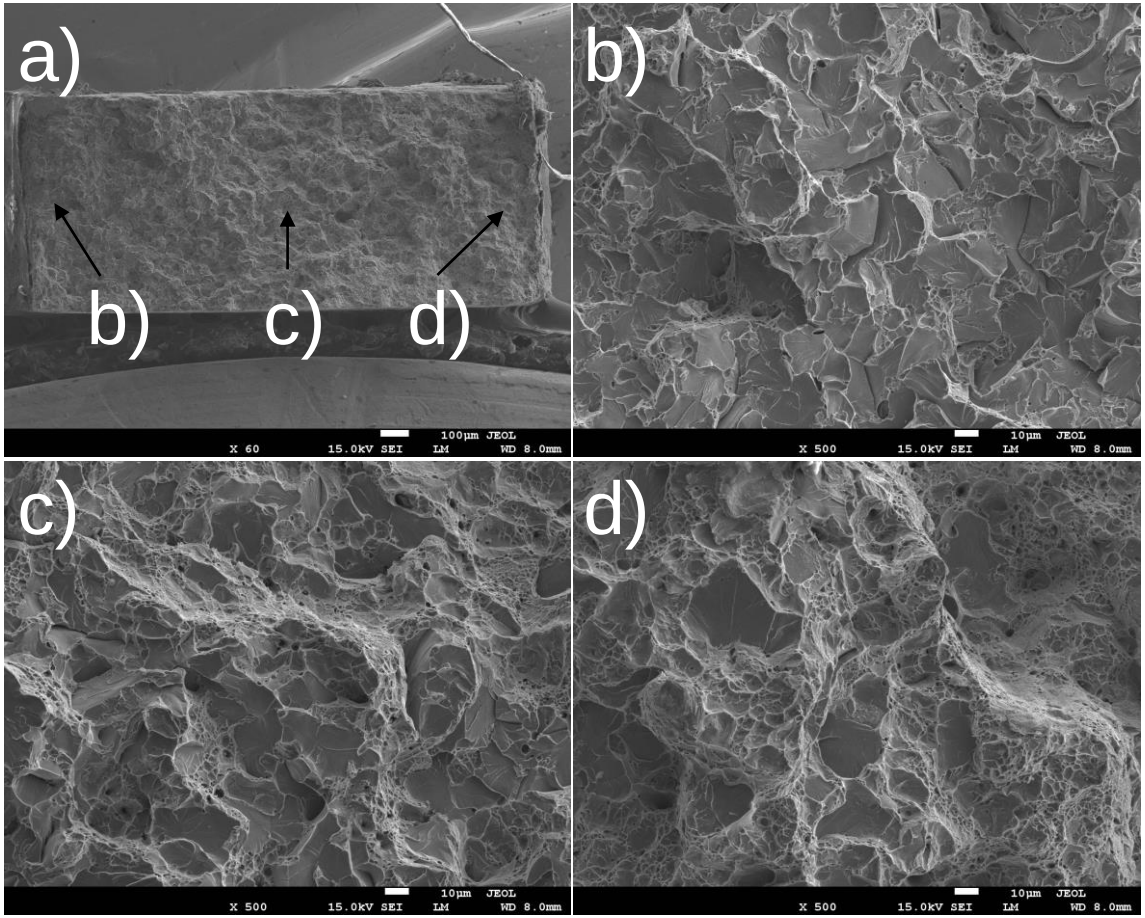
c:相界面处的孔洞

d:马氏体岛的破坏

SQ样品：d、c为主

应变图中的应变集中的相界和马氏体岛易成为破坏起始的源头

SQ样品的断口形貌(大块状M)



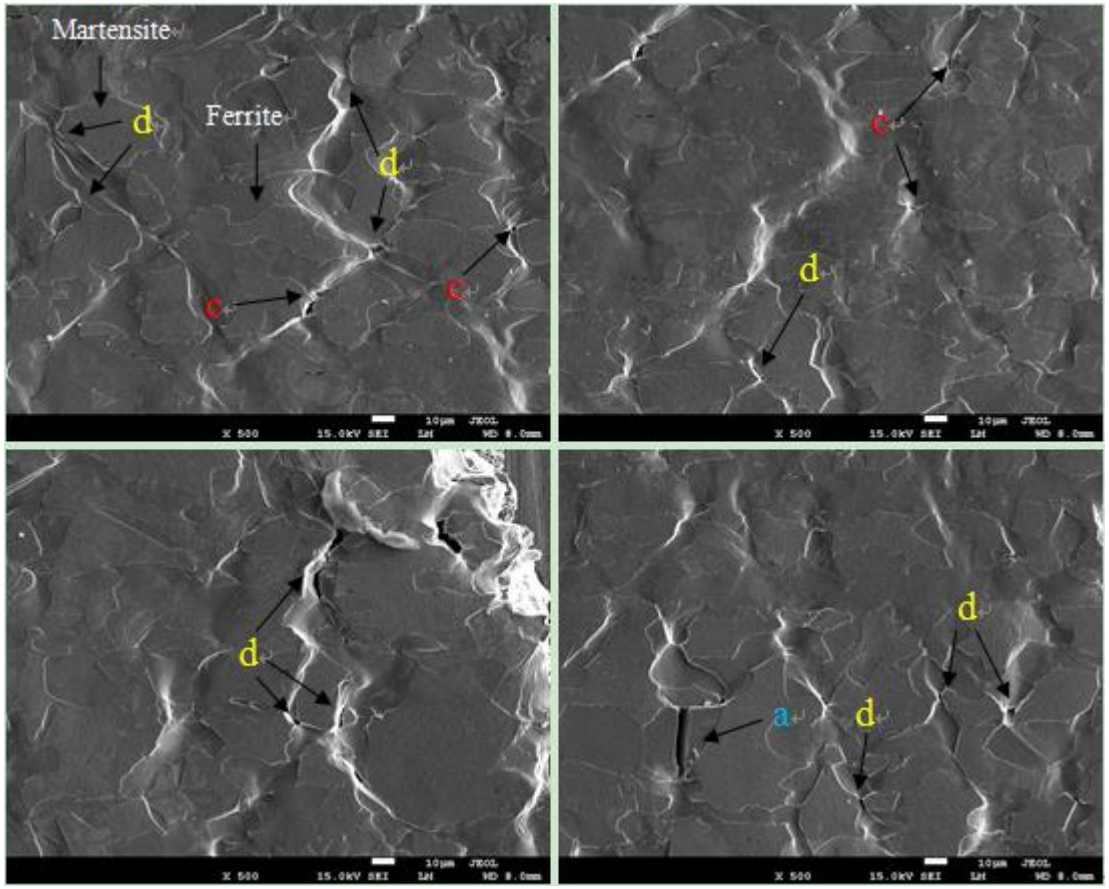
- 解理刻面为主，断口中间和右侧都有一定数量的韧窝

SQ的样品有相对较多数量的韧窝

与冲击试验的结果相对应

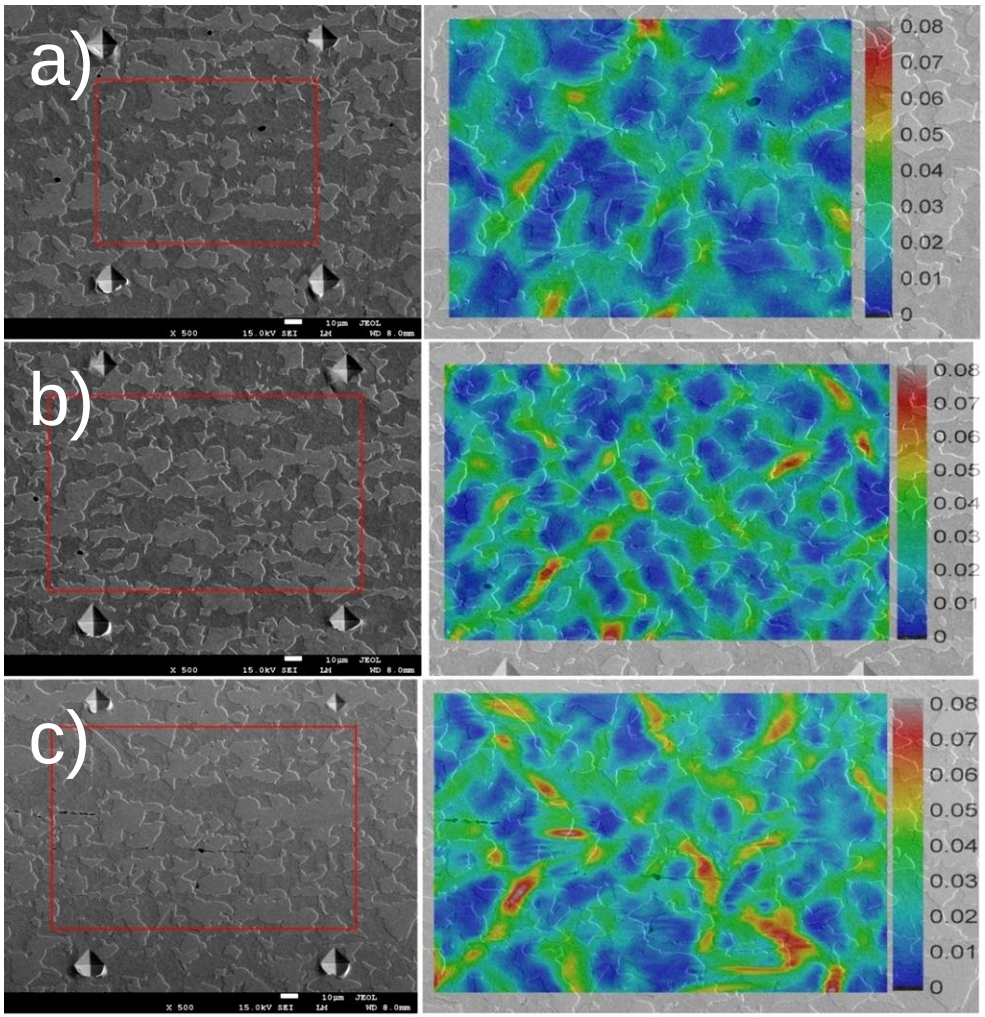
a) 为整体断口形状，b)、c)、d）分别对应a）上的相应位置

SQ样品断裂机理分析（大块状M）



- SQ样品，部分相界面或马氏体上的孔洞或裂纹向铁素体扩展时，遭遇强塑性变形区（图中白亮的带状区域）发生钝化，以微孔聚集型的方式发生断裂，因此韧性更好，断口上的韧窝也更多

DIC分析IA样品（小岛状M）

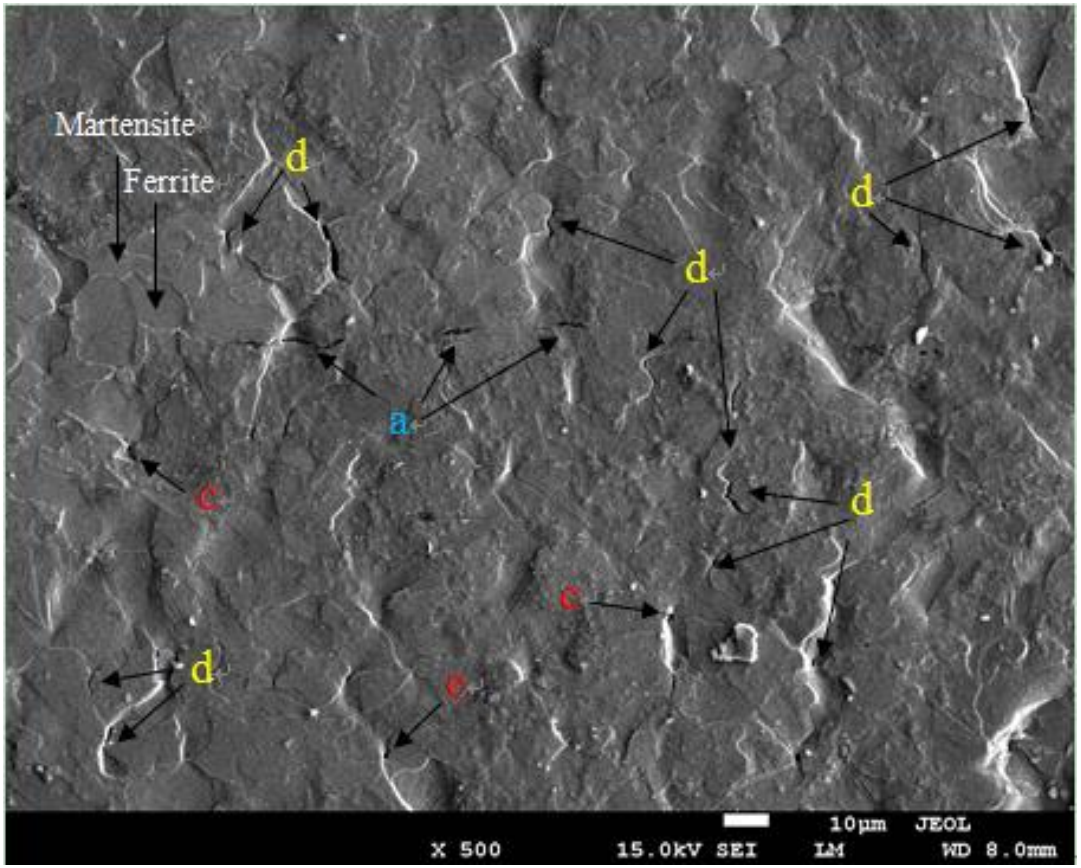


IA样品的显微形貌和应变分布

应变分布相对较均匀，相界面处无明显的应变集中

马氏体的塑性比铁素体差，推测破坏时裂纹可能率先发生在马氏体岛上

IA样品断口附近表面的裂纹（小岛状M）



双相钢的孔洞形核机制一般可以分为四类：

a: 铁素体内部的孔洞

b:铁素体晶界处的孔洞

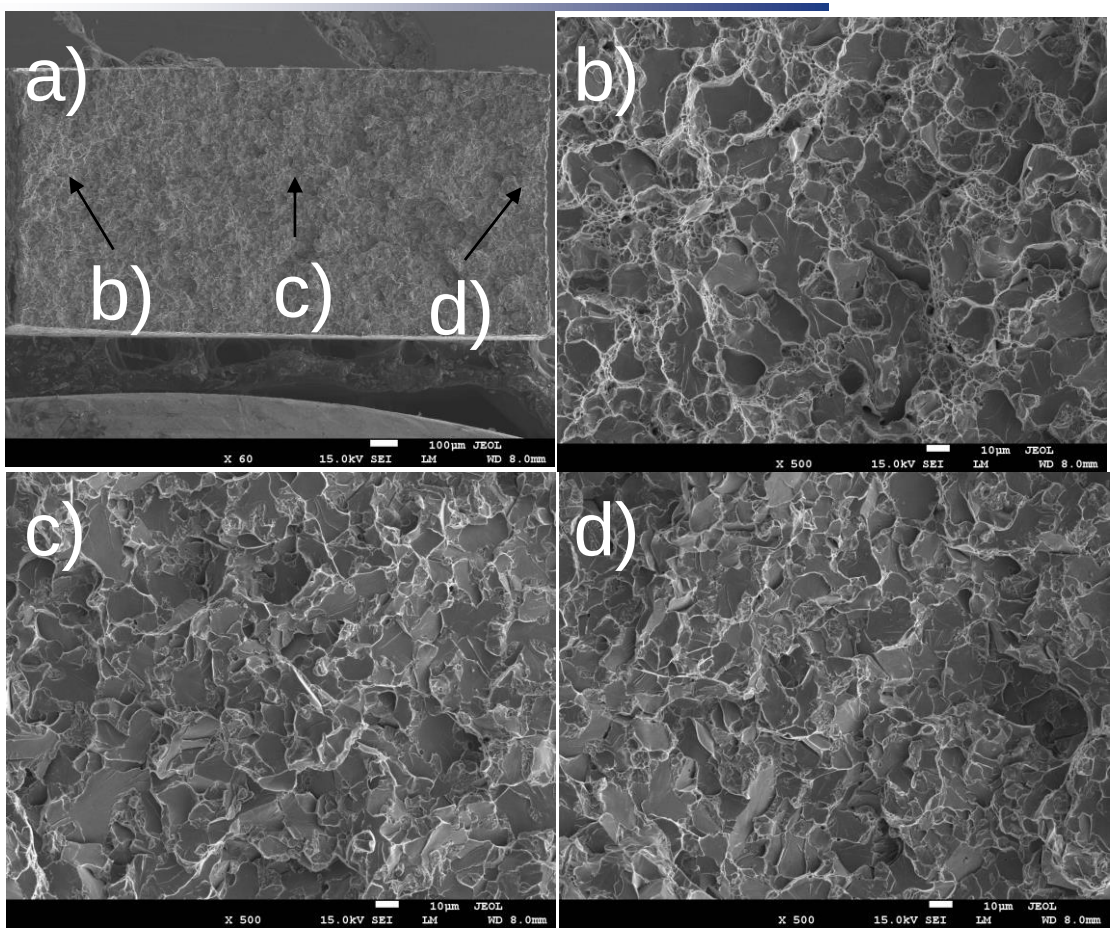
c:相界面处的孔洞

d:马氏体岛的破坏

IA样品：d为主

这与应变图所反映的应变分布情况相符

IA样品的断口形貌（小岛状M）



- 解理刻面为主，断口最左侧b) 处有些许韧窝，中间和右侧几乎全是解理刻面

a) 为整体断口形状，b)、c)、d）分别对应a）上的相应位置

裂纹在马氏体岛上起始，向铁素体内扩展，因铁素体内的应变也较小，不能阻止裂纹的扩展（使裂纹钝化），以解理的方式穿过铁素体，引发材料的解理断裂

小结

热处理	分级淬火（SQ）	临界区退火（IA）
显微组织	43%M, 马氏体呈**大块状**分布	42%M，马氏体呈**小岛状**分布
应变分布	不均匀，靠近相界面处应变集中显著	相对均匀
裂纹	马氏体内部、相界面为主	马氏体内部
断口	拉伸断口以解理面为主，但有一定数量的韧窝	韧性差，拉伸断口绝大部分为解理面，韧窝极少
冲击功	28.04J	18.04J

展望

- 改善标记物形貌，提高测量精度。

- 扩展微观应变的统计分析内容：应变梯度的分布，其他统计特征的挖掘等。

- 将微观应变统计分析与其他实验和计算方法相结合分析材料变形与破坏的微观（介观）机制：

  原位拉伸，EBSD，微柱（Micro Pillar)实验，

  微观力学计算（晶体塑性有限元、位错动力学模拟）等。

最终目标：微观结构 <=> 力学性能　定量理解

谢谢！