

高氮奥氏体钢低温断裂途径与断口形貌*

刘世程 刘德义 戴雅康

(大连铁道学院材料科学与工程系, 大连 116028)

摘要 用扫描电子显微镜对 18Cr-18Mn-0.7N 高氮奥氏体钢低温断裂途径进行了观察, 证实该钢低温脆断中裂纹既可穿晶扩展又可沿晶界和退火孪晶界扩展. 仔细观察发现裂纹更容易在晶界和退火孪晶界形成并沿这些晶界扩展. 对断面与侧面组织的双面观察表明, 退火孪晶界断裂、沿晶断裂和穿晶断裂分别形成光滑平面状断裂刻面、光滑曲面状断裂刻面和粗糙不平的断裂刻面.

关键词 高氮奥氏体钢, 低温脆断, 断裂途径, 断口形貌

中图法分类号 TG111.91

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2002)10-1042-05

LOW TEMPERATURE FRACTURE PATH AND FRACTOGRAPHY OF A HIGH NITROGEN BEARING AUSTENITIC STEEL

LIU Shicheng, LIU Deyi, DAI Yakang

Department of Materials Science and Engineering, Dalian Railway Institute, Dalian 116028

Correspondent: LIU Shicheng, professor, Tel: (0411)4106863, Fax: (0411)4606139,

E-mail: ymlsc@online.ln.cn

Manuscript received 2001-12-30, in revised form 2002-03-29

ABSTRACT Fracture paths in low temperature brittle fracture of an 18Cr-18Mn-0.7N high nitrogen bearing austenitic steel were studied by means of scanning electronic microscopy. It is shown that the fracture propagates by either cracking through grain or along grain boundary and annealing twin boundary. Detailed investigation reveals that it is easier for cracks to initiate at grain boundaries and annealing twin boundaries and propagate along these boundaries. The dual-plane observations of fracture surface and adjacent side surface microstructures show that annealing twin boundary fracture, intergranular and transgranular cracking result in smooth planar facet, smoothly curved facet and rough facet, respectively.

KEY WORDS high nitrogen bearing austenitic steel, low temperature brittle fracture, fracture path, fractography

用氮强化奥氏体钢既可大幅度提高强度, 又不降低室温韧性. 因此, 高氮奥氏体钢的研究与开发日益受到关注. 作为第二代护环材料的 18Cr-18Mn-0.5N 钢^[1] 及 654SMO 超级奥氏体不锈钢^[2] 等高氮奥氏体钢已得到广泛应用. 与此同时, 在高氮奥氏体钢中也遇到了许多难以解释的现象, 低温脆断及其断口就是其中之一^[3].

一般认为, 面心立方结构的奥氏体钢中不存在韧脆转变现象. 但高氮奥氏体钢却在低温下发生脆性断裂. 为弄清其低温脆断机制, Tobler 等^[4] 对 18Cr-3Ni-13Mn-0.37N 钢在 4K 的脆断行为进行了研究, 并在断口上观

察到一种沿 {111} 面发生的结晶状断面, 定义为穿晶类解理型断裂小刻面 (transgranular cleavage-like fracture facet), 但却无法解释断面上为什么没有解理台阶和河流花样, 因为这是体心立方金属解理断裂的最典型特征. 之后, 日本学者^[5,6] 与中国学者^[7] 均报道了高氮奥氏体钢的低温脆断行为及类解理断裂刻面, 但对其断裂机制与断口形貌特征尚有不清楚之处.

本文使用扫描电子显微镜对 18Cr-18Mn-0.7N 高氮奥氏体钢低温断裂途径进行了观察, 证实该钢低温脆断中裂纹既可穿晶扩展, 又可沿晶界与退火孪晶界扩展. 在此基础上, 对低温断面与侧面组织进行了双面观察, 建立了断裂途径与断面形貌的对应关系. 所得结果为高氮奥氏体钢及其它面心立方结构材料断口形貌和断裂机制的分析提供了依据.

* 收到初稿日期: 2001-12-30, 收到修改稿日期: 2002-03-29

作者简介: 刘世程, 男, 1948 年生, 教授, 博士

1 实验方法

试验用钢的化学成分(质量分数, %)为: C 0.048, Cr 19.33, Mn 19.64, N 0.70, Si 0.42, P 0.029, S 0.008, Ni 0.27.

钢锭经热锻、热轧成为 2 mm 与 10 mm 厚的板材. 从板材上沿轧制方向切取截面 2 mm×5 mm、标距 30 mm 的拉伸试样及 V 型缺口冲击试样. 在氩气保护下对试样进行了 1323 K 加热后水冷的固溶处理. 在 4, 77 与 293 K 进行了拉伸试验, 应变速率为 10^{-4} s^{-1} . 在 77—293 K 的温度区间进行了冲击试验. 用扫描电镜 (SEM) 和光学金相显微镜观察了裂纹扩展途径、断口形貌和组织.

2 实验结果与分析

2.1 韧脆转变行为

拉伸试验的应力-应变曲线示于图 1a, 冲击能-温度曲线示于图 1b. 在 293 K, 本实验用钢具有优异的强度与韧性的配合. 随温度降低, 强度迅速提高, 而塑性、韧性急剧下降. 作为对比, 图 1b 中同时示出了文献 [6] 中报道的 18Mn-18Cr-0.5N、18Mn-18Cr-0.8N 及 18Mn-5Cr-0.5C 奥氏体钢的冲击能-温度曲线. 18Mn-5Cr-0.5C 钢为典型奥氏体钢, 其冲击能-温度曲线表明该钢中不存在韧脆转变现象. 与之相比, 高氮奥氏体钢则表现出明显的韧脆转变行为.

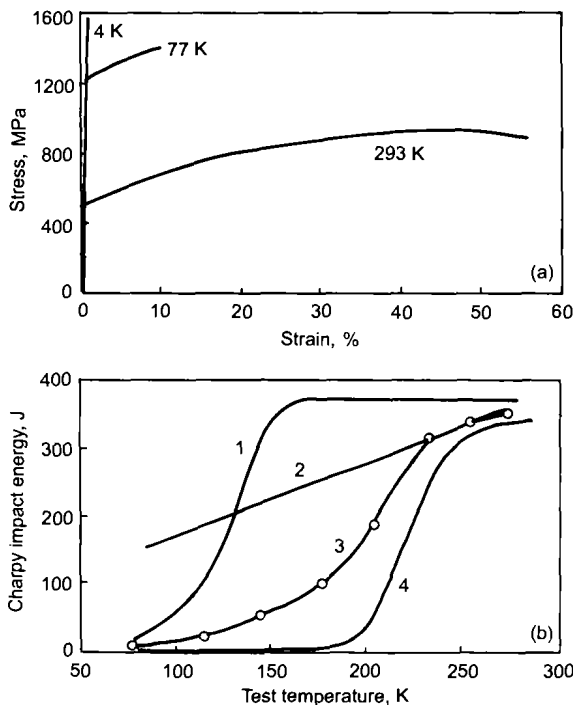


图 1 高氮奥氏体钢的应力-应变曲线与冲击能-温度曲线
Fig.1 Stress-strain curves (a) and impact energy-temperature curves (b) of high nitrogen austenitic steels (1. Fe-18Mn-18Cr-0.5N^[6] 2. Fe-18Mn-5Cr-0.5C^[6] 3. Fe-18Mn-18Cr-0.7N in the work 4. Fe-18Mn-18Cr-0.8N^[6])

韧脆转变行为在断口形貌上亦十分明显. 在 293 K, 断口呈韧窝状(图 2a). 随温度降低, 断口上出现与奥氏体晶粒尺寸相当的脆性断裂刻面(图 2b, c). 图 2b 中 F_{TB} 所示的断裂刻面, 为光滑的平面状断裂刻面, 其上有相交

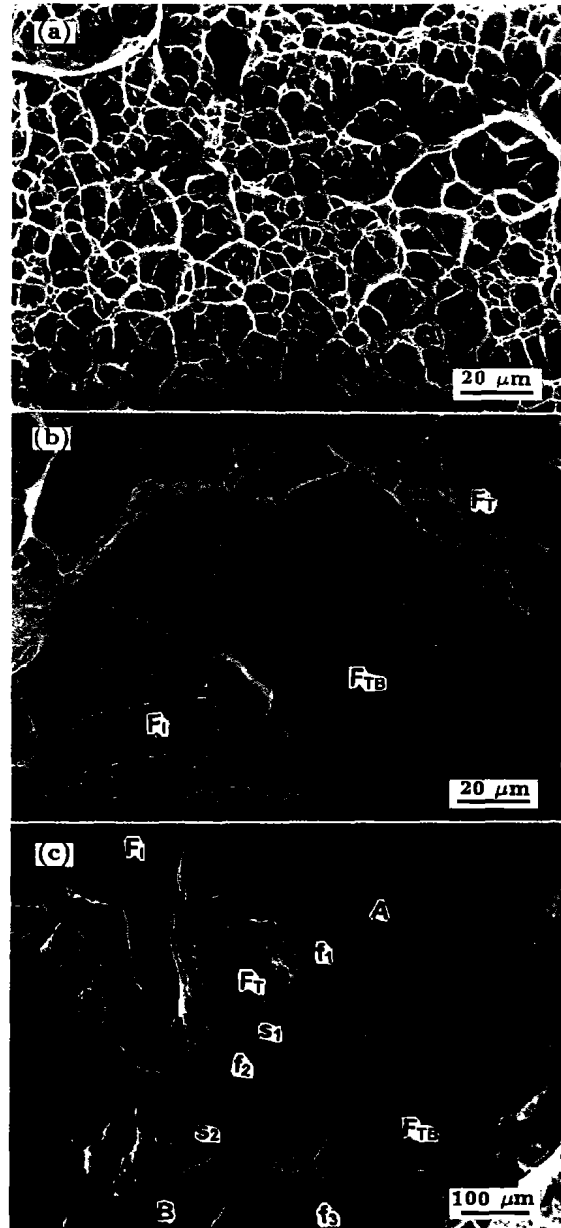


图 2 不同温度下断裂试样的 SEM 断口照片
Fig.2 SEM fractographs for specimens

(a) impact fractured at 293 K (b) impact fractured at 77 K (c) tensile fractured at 4 K (F_T — transgranular fracture facet, F_I — intergranular fracture facet, F_{TB} — annealing twin boundary fracture facet. f_1 , f_2 and f_3 — sub facets, s_1 and s_2 — large steps. AB — the line along which the specimen was sectioned for dual-plane observation in Fig.5. the area within the dashed line represents a fracture facet whose size is comparable to an austenitic grain)

成约 60° 角的直线状平行花样. 图 2c 中虚线所围的断裂刻面 F_{TB} , 由三个亚刻面 f_1, f_2, f_3 组成, 亚刻面由两个大台阶 s_1, s_2 连接. 亚刻面上也有相交成约 60° 角的直线状花样. 它们均具有以往文献 [4—6] 中报道的穿晶类解理型断裂小刻面的特征, 其上没有台阶和河流花样. 此外, 低温断口上还有两种形貌与此不同的断裂刻面, 如图 2b、c 中 F_I 所示的光滑曲面状断裂刻面及 F_T 所示的粗糙断裂刻面, 说明断口是十分复杂的. F_T 形貌粗糙, 与 F_{TB} 的截然不同. F_I 也很光滑, 上面也有平行线状花样, 但刻面呈曲面, 且线状花样的交角与 60° 相差甚远, 显然与 F_{TB} 不同. 这两种断裂刻面在以往的文献中报道甚少.

2.2 断裂途径

为弄清断裂途径, 一些研究者 [5-7] 曾对完全断裂试样的侧面进行了观察. 本文则采用了部分断裂试样侧面观察的方法, 因为在这种方法中裂纹扩展途径与两侧组织的对应关系更加明确.

在 77 K, 用小载荷将冲击试样部分断裂, 然后对试样侧面研磨、抛光和腐蚀. 在光学显微镜下对裂纹尖端附近的组织及裂纹扩展途径进行了观察, 所得结果见图 3. 图 3a 所示的是在部分断裂试样中主裂纹前方观察到的一个微裂纹, 其左端是沿晶界形成的, 而右端是沿退火孪晶界形成的. 在图 3b 中所示的试样中, 裂纹由左向右扩展至 C 处, 其中 AB 段为穿晶裂纹, 而 BC 段是沿晶裂纹. 值得注意的是, BC 段裂纹很宽, 而 AB 段裂纹很窄, 说明 BC 段的沿晶裂纹是在 AB 段的穿晶裂纹之前形成的.

上述结果表明, 在本实验用钢的低温断裂中, 不但有穿晶断裂, 同时还有沿晶断裂和退火孪晶界断裂发生, 且沿晶裂纹和退火孪晶界裂纹比穿晶裂纹更容易形成. 由此提出该钢低温断裂过程见图 3c: 在裂纹扩展中, 首先在主裂纹 AB 前方的晶界或退火孪晶界处形成微裂纹 CD; 主裂纹 AB 与微裂纹合并使 B, C 间穿晶连接同时使裂纹扩展.

2.3 断口形貌与断裂途径的关系

由于裂纹扩展途径有晶界、退火孪晶界和晶内三种, 断口形貌又很复杂, 因此有必要建立断裂途径与断口形貌的对应关系. 为此, 使用双面观察法对断裂试样的断面与侧面组织同时进行了观察.

按照上述方法, 对 77 K 部分断裂试样的侧面进行了观察, 结果之一见图 4a. 由图可知, 上半试样中的裂纹棱边 AB、BC 与 DE 分别对应下半试样中的 A'B'、B'C' 与 D'E'. 组织观察表明, AB(A'B') 为弯曲的晶界, BC(B'C') 为平直的退火孪晶界, DE(D'E') 则为穿晶部分. 也就是说, 裂纹在 AB 段沿晶界扩展, 在 BC 段沿退火孪晶界扩展, 在 DE 段穿晶扩展. 用显微硬度压痕对观察部位作标记, 再在 77 K 使试样完全断裂. 然后找出标记的部位, 在扫描电镜倾斜照明的条件下对断面与

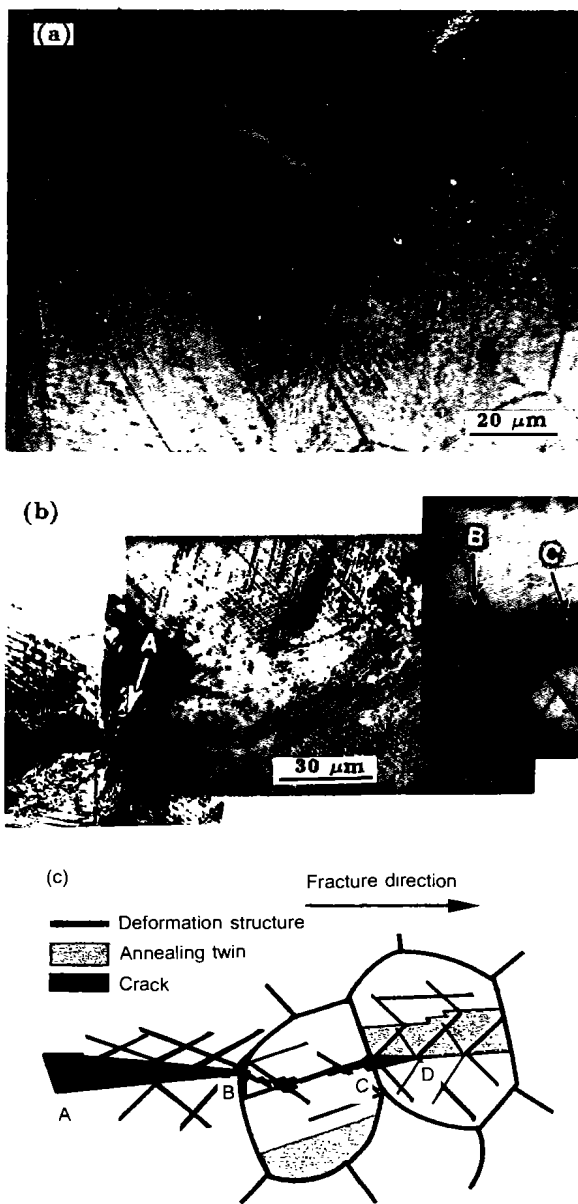


图 3 低温断裂途径

Fig.3 Fracture path at low temperature

(a) microcrack ahead of main crack in partially ruptured specimen (b) crack along grain boundary and through grain in partially ruptured specimen (c) schematic illustration of the crack propagation process at low temperature (in Fig.3b: AB — transgranular crack, BC — microcrack along grain boundary. in Fig.3c: AB — main crack, BC — transgranular crack, CD — microcrack along grain boundary or annealing twin boundary)

侧面组织同时观察. 结果表明, 退火孪晶界断裂对应光滑平面状断裂刻面, 沿晶断裂对应光滑曲面状断裂刻面, 而穿晶断裂形成粗糙不平的断裂刻面 (图 4b, c).

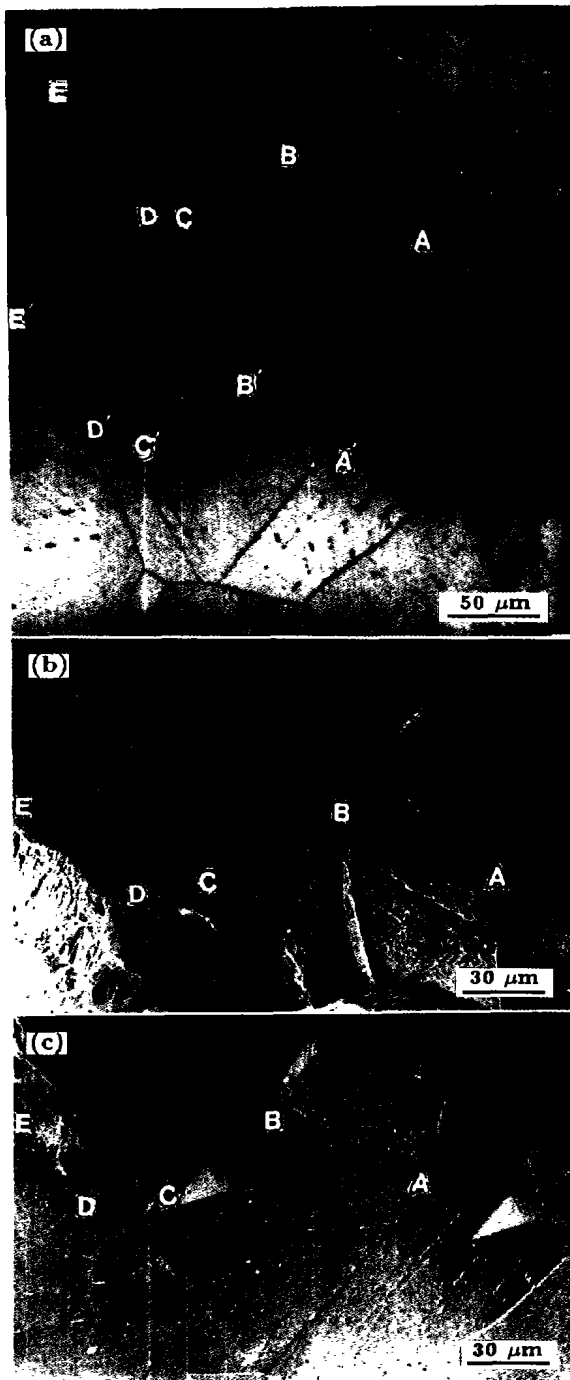


图 4 断裂途径与断裂刻面的关系

Fig.4 Relationship of cracking paths and fracture facets
 (a) crack and microstructure on the side surface for specimen partially ruptured at 77 K (b) and (c) fracture facets and microstructures on the side surface for the same location as in (a)
 (AB, BC and DE — edges of cracks along grain boundary, annealing twin boundary and through a grain in the upper part of the specimen; A'B', B'C' and D'E'— edges in the lower part of the specimen matching AB, BC and DE, respectively)

对 4 K 断裂试样,进行了下述观察:将与图 2c 所示试样相对应的另一半试样,沿直线 AB 垂直于宏观断面切开;用树脂镶嵌保护断面;将其侧面研磨、抛光后,进行腐蚀以显示组织;去除树脂,在扫描电镜下进行双面观察,结果示于图 5. 图 5 中的折线 A'B' 与图 2c 中的直线 AB 相对应. 图 5 中 A'B' 以上部分为断面,断面上的 f_1', f_2' 分别与图 2c 中的 f_1, f_2 对应, s_1', s_2' 分别与图 2c 中的 s_1, s_2 对应. A'B' 以下部分为侧面组织,其上示出退火孪晶. 由此得出,光滑平面状断面(即图 2c 中的亚刻面)是退火孪晶界断裂形成的,而粗糙断面(即图 2c 中的大台阶)是穿晶断裂形成的.

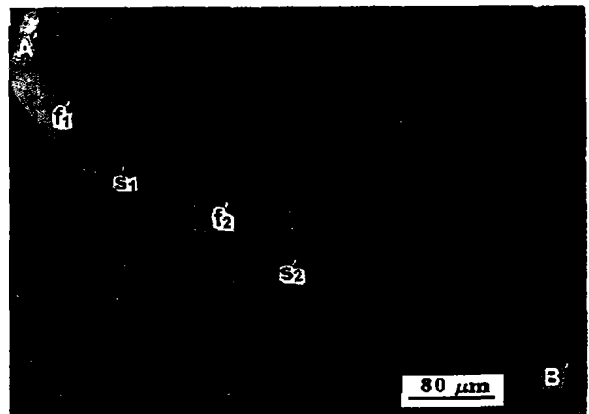


图 5 4 K 温度下断裂试样的断口与侧面组织双面观察的 SEM 照片

Fig.5 SEM micrograph of dual-plane observation of fracture surface and microstructure on the side surface for specimen fractured at 4 K
 (f_1', f_2' — facets matching the left part of f_1, f_2 in Fig.2c, s_1', s_2' — steps matching the left part of s_1, s_2 in Fig.2c, A'B'— dashed line corresponds to AB in Fig.2c)

通过上述双面观察,建立了裂纹扩展途径与断裂刻面的对应关系:退火孪晶界断裂形成光滑平面状断面(图 2 中的 F_{TB}),沿晶断裂形成光滑曲面状断面(图 2 中的 F_I),而穿晶断裂形成粗糙的断面(图 2 中的 F_T).

在 fcc 晶体中,有四组 $\{111\}$ 面,而每三组 $\{111\}$ 面在另一组 $\{111\}$ 面上的迹线相交成 60° 角. 研究表明,在高氮奥氏体钢的低温断裂中,沿 $\{111\}$ 面形成大量平面状变形组织 [8]. 由于退火孪晶界本身即为一 $\{111\}$ 面,其它三组 $\{111\}$ 面上的变形组织将在退火孪晶界断裂刻面上留下相交成 60° 角的三组平行的直线状花样. 显然,退火孪晶界断裂刻面具有文献 [4—6] 所叙述的类解理断裂刻面的特征. 退火孪晶界断裂不会形成河流花样,其断口特征取决于退火孪晶界的空间形貌. 而在穿晶解理断裂中,在高度不同的平行解理面上形成的裂纹,在扩展过程

中将汇集形成解理台阶或河流花样^[9].

3 结论

(1) 断裂途径观察表明, 在 18Cr-18Mn-0.7N 高氮奥氏体钢的低温脆性断裂中, 裂纹既可穿戴晶扩展, 又可沿晶界和退火孪晶界扩展.

(2) 在低温断裂中, 首先在主裂纹前方沿晶界或退火孪晶界形成微裂纹, 然后通过主裂纹和微裂纹间的穿晶连接使裂纹扩展.

(3) 退火孪晶界断裂形成平行于 $\{111\}$ 面的光滑平面状断裂刻面, 其上有三组平行的、交角为 60° 的直线状花样. 沿晶断裂形成光滑曲面状断裂刻面. 穿晶断裂形成粗糙不平的断裂刻面.

参考文献

- [1] Ishizaka J, Orita K, Terao K. *Tetsu-to-Hagané*, 1992; 78(12): 1846
- [2] Lang Y P, Kang X F. *Journal of Iron and Steel Research*, 2001; 13(1): 30
(郎宇平, 康喜范. 钢铁研究学报, 2001; 13(1): 30)
- [3] Tomota Y. *Tetsu-to-Hagané*, 1994; 80(10): N538
- [4] Tobler R L, Meyn D. *Metall Trans A*, 1988; 19A(6): 1626
- [5] Tomota Y, Endo S. *Iron Steel Inst Jpn Int*, 1990; 30(8): 656
- [6] Tomota Y, Xia Y, Inoue K. *Acta Mater*, 1998; 46(5): 1577
- [7] Chen K M, Dai Q X. *Journal of Iron and Steel Research*, 1998; 10(1): 38
(陈康敏, 戴起勋. 钢铁研究学报, 1998; 10(1): 38)
- [8] Kubota S, Xia Y, Tomota Y. *Iron Steel Inst Jpn Int*, 1998; 38(5): 474
- [9] ASM Handbook Committee, *ASM Handbook Vol.12, Fractography*, ASM International, USA, 1987: 12