

# Ti-5553 合金在轻气炮冲击下的变形行为

代华湘<sup>1,2</sup>, 王琳<sup>1,2</sup>, 徐欣<sup>3</sup>, 王丁<sup>1,2</sup>

(1. 北京理工大学, 北京 100081)

(2. 冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081)

(3. 北京航天微系统研究所, 北京 100094)

**摘要:** 利用一级轻气炮装置, 以不同速度的飞片对 Ti-5553 合金进行冲击加载; 采用光学显微镜和透射电子显微镜观察并分析微观组织和变形行为; 结合 XRD 和定量金相研究方法进行分析和计算。结果表明, Ti-5553 合金在轻气炮冲击下会发生位错滑移、形变孪生和应力诱发马氏体相变 (stress-induced martensite, SIM), 形成  $\alpha''$  相。 $\alpha''$  相的生成量受轻气炮冲击速度的影响, 随着冲击速度的增大, 形成的  $\alpha''$  含量呈明显上升趋势, 当轻气炮冲击速度由 380 m/s 上升到 560 m/s 时, 单位面积  $\alpha''$  线的长度  $L_A$  由 39.18 mm/mm<sup>2</sup> 上升到 52.65 mm/mm<sup>2</sup>。

**关键词:** 钛合金; 轻气炮; 变形; 应力诱发马氏体; 定量金相

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0657-05

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性能好等优良特性, 在航空航天、武器装备、机械加工等领域得到广泛的应用。在服役过程中难免受到高速冲击载荷的作用<sup>[1]</sup>。钛合金在高速载荷作用下会发生微结构变化, 主要包括形成绝热剪切带 (adiabatic shear band, ASB) 和发生高应变率下的相变, 即冲击相变<sup>[2,3]</sup>。研究人员对钛合金的绝热剪切行为进行了大量研究, 对于绝热剪切带中微观结构演化的研究也日渐趋于成熟; 对于亚稳定  $\beta$  钛合金的冲击相变行为仍在探索。在高应变率载荷作用下亚稳定  $\beta$  钛合金发生的微结构变化会影响材料的使用效能, 因此, 开展高应变率下钛合金变形行为的研究具有重要的学术研究意义和工程应用价值。

Ti-5553(Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr) 合金是由俄罗斯 VT22 合金发展而来的一种新型近  $\beta$  钛合金, 具有很高的强度和韧性匹配, 其大型锻件的强度可达 1300 MPa 以上, 同时其延伸率不低于 6%, 使其在航空航天领域作为飞机结构部件和起落架材料得到广泛的应用<sup>[4-6]</sup>。该合金中  $\beta$  稳定元素处于临界水平, 所以在高应变率载荷作用下容易发生相变<sup>[7]</sup>。本实验利用一级轻气炮装置, 以不同速度的飞片对 Ti-5553 合金进行冲击加载, 研究其高应变率下的微观变形行为, 并结合定量金相分析方法, 研究冲击速度与其组织演变之间的关系。

## 1 实验

本实验所用的 Ti-5553 合金成分如表 1 所示。利用差示扫描量热仪 (DSC) 测得合金相变点为 840 °C。采用表 2 所示热处理制度对合金进行热处理。

采用不同速度的飞片对靶板进行撞击。为了消除层裂对靶板的影响, 实验采用“面板+靶板+背板”的结构, 其中, 飞片、靶板、面板和背板材料均为经上述热处理后所得的 Ti-5553 合金材料, 飞片和靶板的尺寸为  $\Phi 45$  mm $\times$ 6 mm, 面板和背板的尺寸为  $\Phi 45$  mm $\times$ 3 mm, 撞击速度范围在 300~600 m/s 之间。

回收靶板试样后, 利用 XRD 对 6 mm 靶板进行物相分析, 并用 MDI Jade 软件对所得图谱进行物相检索。同时沿着靶板中心轴向剖开, 截取制备金相和透射电子显微镜试样。金相试样经 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=4:6:90

表 1 Ti-5553 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti-5553 alloy ( $\omega/\%$ )					
Al	Mo	V	Cr	Fe	Ti
5.0	5.0	5.0	3	1	Bal.

表 2 热处理制度及组织状态

Table 2 Heat treatment and microstructures of Ti-5553 alloy		
Sample	Heat treatment procedure	Microstructure
R1	870 °C/2 h/AC	$\beta$ phase

收稿日期: 2017-02-21

基金项目: 冲击环境材料技术国家级重点实验室项目基金

作者简介: 代华湘, 女, 1992 年生, 硕士生, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, 电话: 010-68912709, E-mail: daihuaxiang9199@163.com

溶液腐蚀后,在 ProgRes C5 光学显微镜下进行金相组织观察与分析。然后利用 Image-Pro Plus 图像处理软件对原金相图片进行噪声消除、失真校正等处理,根据每张照片的分辨率对图像进行空间校准,再结合定量金相分析方法,对生成相的含量进行测量和估算<sup>[8,9]</sup>。透射电镜薄片试样经机械研磨至 30~50 μm 后,利用离子减薄仪穿孔减薄,在 JEM-2100LaB6 透射电镜下进行显微组织观察与分析,电压为 200 kV。

## 2 结果与分析

### 2.1 微观结构观察

图 1 为 Ti-5553 合金经上述热处理后光镜下的形貌。可以看出,合金的组织为晶粒粗大的 β 单相,各晶粒之间的界面清晰可见,测得其平均晶粒尺寸约为 300 μm。相关研究<sup>[10,11]</sup>表明,β 钛合金在经固溶时效处理后会形成少量针状 α'' 相,但 Ti-5553 合金经本文所述热处理制度处理未观察到该相。

图 2 为 Ti-5553 合金经轻气炮不同速度加载后的光镜形貌。可以看出,几乎每个晶粒中都形成了针状马氏体 α'' 相。α'' 相是一种经过无扩散型相变形成的斜方马氏体相,Ti-10V-2Fe-3Al、Ti-6Al-4V 等合金在受到冲击加载时也会形成 α'' 相<sup>[12-14]</sup>。因不同取向的晶粒在冲击加载时所处的应力状态不同,所以每个晶粒中 α'' 相的含量也不同。对比图 2 中各图可以发现,α'' 相含量随着轻气炮冲击速度增大而增多。

除此之外,冷压变形、高速热变形和 SHPB (split Hopkinson pressure bar) 变形过程也会使材料发生应

力诱发马氏体相变<sup>[15,16]</sup>。SHPB 加载会使材料发生绝热剪切变形,形成绝热剪切带 (ASB),但在本实验中并未出现 ASB,所以轻气炮加载过程能量耗散的主要方式为发生应力诱发马氏体相变。

图 3 为 Ti-5553 合金经 430 m/s 轻气炮加载后的 TEM 明场像、暗场像和对应的选区电子衍射花样。从图 3a 中可看到,宽度约为 200 nm 的孪晶条带,孪晶周围深色衬度为位错塞积。此外,从图 3a 和 3b 中可明显看见平行排列的细小孪晶。图 3c 为孪晶条带处的暗场像,对图中 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 处所得的衍射斑点进行标定,结果如图 3d, 3e, 3f 所示,P<sub>1</sub> 处为斜方马氏体 α'' 相<sup>[17]</sup>;P<sub>2</sub> 处的衍射斑点由斜方马氏体 α'' 相和体心立方 β 相的衍射斑点混合构成。由此表明,孪晶条带中含有斜方马氏体 α'' 相和体心立方 β 相。

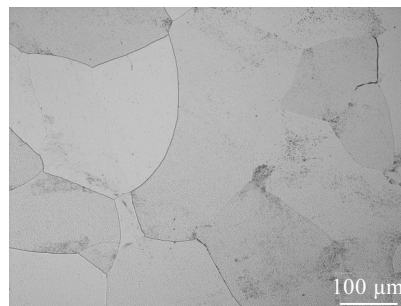


图 1 Ti-5553 合金经热处理后光镜下的形貌

Fig.1 Optical microstructure of Ti-5553 alloy after heat treatment

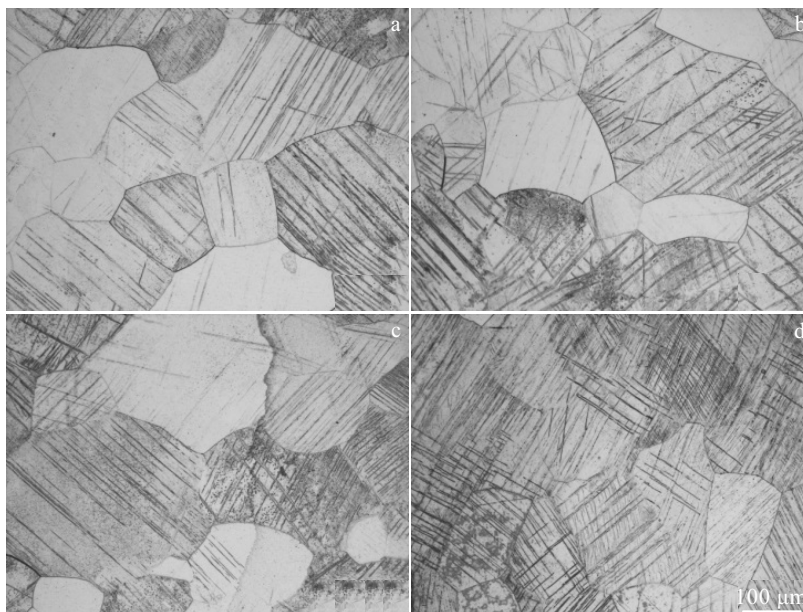


图 2 Ti-5553 合金经轻气炮不同速度加载后的光镜形貌

Fig.2 Microstructures of Ti-5553 alloy impacted by flyer plates under velocities of 380 m/s (a), 430 m/s (b), 480 m/s (c), and 560 m/s (d)

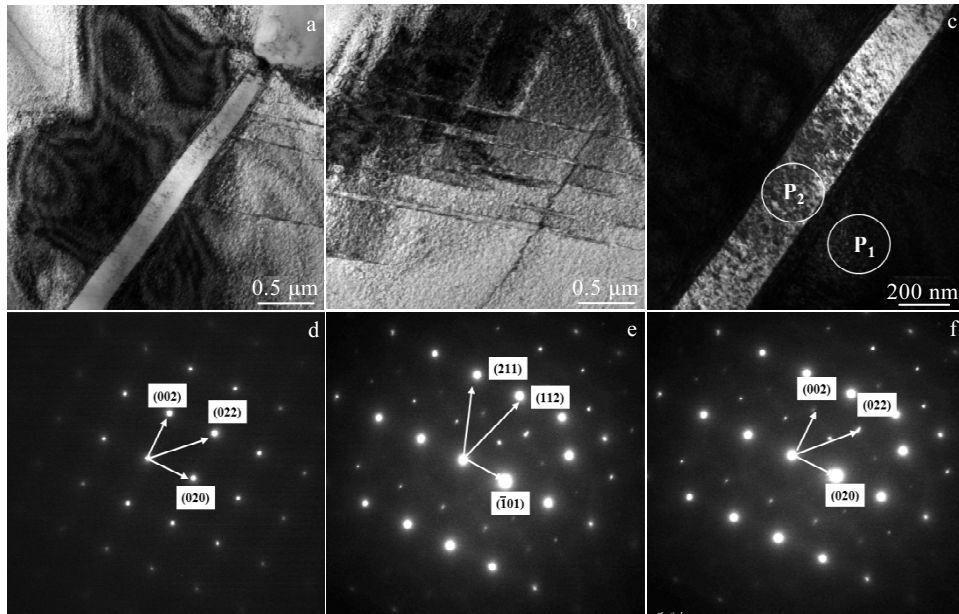


图 3 经 430 m/s 轻气炮加载后 Ti-5553 合金的 TEM 形貌及选区电子衍射花样

Fig.3 TEM images of Ti-5553 alloy impacted by flyer plate with the velocity of 430 m/s, including bright-field images (a, b), dark-field image (c), SAED patterns of  $\alpha''$ -phase coming from P<sub>1</sub> (d), SAED patterns of  $\beta$ -phase (e), and  $\alpha''$ -phase coming from P<sub>2</sub> (f)

图 4 为 Ti-5553 合金经 560 m/s 轻气炮加载后的 TEM 形貌及电子衍射花样。从图中可以看出，细长的孪晶平行排列，经测量得到细小孪晶的平均宽度约为 50 nm。对比图 3b 中的细小孪晶可发现，更高速度的冲击使孪晶变得更细长。

综上所述，经轻气炮冲击加载后，Ti-5553 合金会发生位错滑移、孪生变形和形成应力诱发马氏体  $\alpha''$  相。本实验中发现了大量存在的细小孪晶，正如相关文献[18,19]所述，孪晶是应力诱发马氏体内部亚结构的主要形式之一。

### 2.2 物相分析

对 R1 及 2 种不同冲击速度轻气炮加载后的 Ti-5553 合金进行 XRD 物相扫描并利用 MDI Jade 软件进行检索获得图 5 所示结果。可以看出，R1 在 39° 和 57° 分别出现了一强一弱的  $\beta$  相衍射峰，并且只含有  $\beta$  相；而经轻气炮冲击后的试样除了出现  $\beta$  相的衍射峰以外，在 2 $\theta$  角为 84° 时出现了  $\alpha''$  相的衍射峰<sup>[20]</sup>。由此可以看出，经轻气炮冲击后，合金试样中产生了新相  $\alpha''$ 。由此证明，Ti-5553 合金经轻气炮加载后发生应力诱发马氏体相变，形成了斜方马氏体  $\alpha''$ 。

### 2.3 相变含量测试

如上所述，由于不同冲击速度下各晶粒中形成的  $\alpha''$  量受晶粒取向的影响，所以不能直接说明冲击速度对  $\alpha''$  生成量的影响。结合对定量金相分析的相关研究成果<sup>[21,22]</sup>及定量金相分析原理和方法，采用定量金相

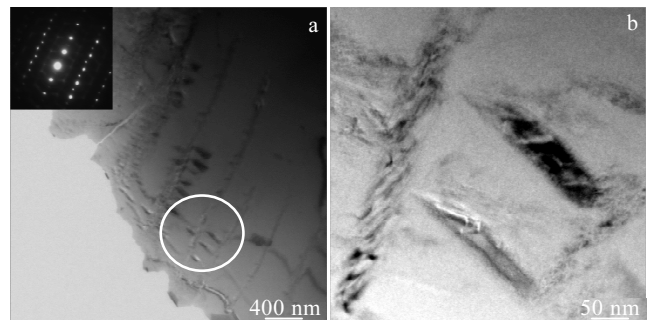


图 4 经 560 m/s 轻气炮加载后 Ti-5553 合金 TEM 形貌及选区电子衍射花样

Fig.4 TEM image of Ti-5553 alloy impacted by flyer plate under velocity of 560 m/s, including bright-field image of tiny twins with corresponding SAED patterns (a) and the amplified image (b)

分析方法，通过 Image-Pro Plus 软件对不同冲击速度下形成的  $\alpha''$  量进行估算，并以单位面积上的  $\alpha''$  线长度  $L_A$  进行表征。计算方法如式(1)所示：

$$L_A = \bar{L} / S \tag{1}$$

其中， $\bar{L}$  表示选取多张图片计算条状物的总长度后所求得平均值， $S$  表示每张图片的实际面积。

为了使测量值准确度更高，本实验对同一冲击速度的金相试样随机选取 20 个视场处放大倍数为 200

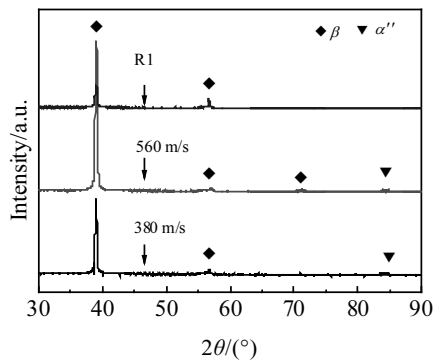


图 5 3 种试样 XRD 图谱及检索结果

Fig.5 XRD patterns of three samples impacted by flyer plates with different velocities

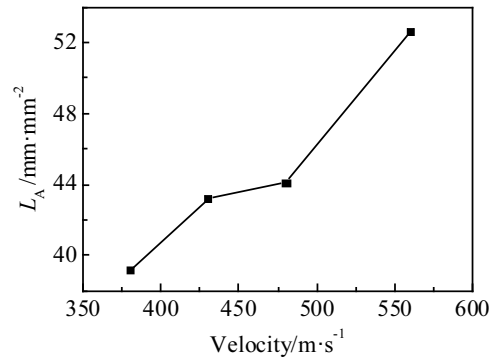


图 7 4 种冲击速度对应的 LA 值

Fig.7 Value of LA varied with impact velocity

倍的金相图片进行计算。首先利用 Image-Pro Plus 软件测量得到每张图片中所有 α'' 线长度 (如图 6), 然后将测量数据导入 Excel 表格, 计算得到总长度值, 将处理完 20 张图片后得到的总长度求平均值即得到  $\bar{L}$ 。

通过测量和计算得到每张图片对应的实际面积为 0.3476 mm<sup>2</sup>, 不同速度下  $\bar{L}$  和 LA 的值如表 3 所示。可以看出, LA 随着冲击速度的增大而增大, 当轻气炮冲击速度由 380 m/s 上升到 560 m/s 时, 单位面积 α'' 线长度由 39.18 mm/mm<sup>2</sup> 上升到 52.65 mm/mm<sup>2</sup>。

图 7 为 LA 随着冲击速度的变化曲线。可以看出, LA 随着冲击速度的增加呈明显上升趋势。随着冲击速度的增加, 更多的位错来不及滑移, 变形只能通过发生孪生变形或应力诱发马氏体相变进行, 所以 α'' 生成量随着冲击速度的增加而明显增大。

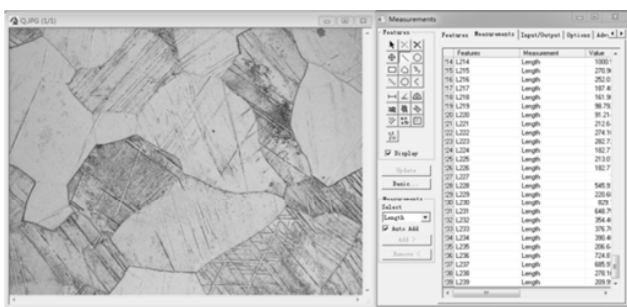


图 6 条状 α'' 长度的测量过程

Fig.6 Measurement process of α'' wires

表 3 计算所得  $\bar{L}$  和 LA 的值

Table 3 Calculating values of  $\bar{L}$  and LA

v/m·s <sup>-1</sup>	380	430	480	560
$\bar{L}/\text{mm}$	13.62	15.01	15.33	18.31
LA/mm·mm <sup>-2</sup>	39.18	43.19	44.10	52.65

### 3 结 论

1) Ti-5553 合金在轻气炮冲击加载下主要通过位错滑移、形变孪生和应力诱发马氏体相变发生变形, 形成大量斜方马氏体 α'' 相。

2) α'' 相的生成量受轻气炮冲击速度的影响。随着冲击速度的增大, 生成的 α'' 量呈明显上升趋势; 当轻气炮冲击速度由 380 m/s 上升到 560 m/s 时, 单位面积 α'' 线的长度 LA 由 39.18 mm/mm<sup>2</sup> 上升到 52.65 mm/mm<sup>2</sup>。

#### 参考文献 References

- [1] Zhao Shuping(赵树萍), Lv Shuangkun(吕双坤). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2002, 19(6): 18
- [2] Xu Yibo(徐以波), Bai Yilong(白以龙). *Advances in Mechanics*(力学进展)[J], 2007, 37(4): 496
- [3] Tang Zhiping(唐志平). *Shock-induced Phase Transition*(冲击相变)[M]. Beijing: Science Press, 2008: 156
- [4] Nyakana S L, Fanning J C, Boyer R R. *Journal of Materials Engineering & Performance*[J], 2005, 14(6): 799
- [5] Fanning J C. *Journal of Materials Engineering & Performance*[J], 2005, 14(6): 788
- [6] Jones N G, Dashwood R J, Jackson M *et al.* *Acta Materialia* [J], 2009, 57(13): 3830
- [7] Xu Xin(徐欣). *Research on Dynamic Response of Meta-Stable β Ti-5553 Alloy under Shock Wave Loading*(冲击加载近 β Ti-5553 合金动态响应行为研究)[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015
- [8] Ren Huailiang(任怀亮). *Metallurgical Test Technology*(金相实验技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986
- [9] Zhang Jiru(张季如), Zhu Jie(祝杰), Huang Li(黄丽) *et al.* *Journal of Wuhan University of Technology*(武汉理工大学学

- 报)[J], 2008, 30(4): 90
- [10] James Coakley. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2015, 646: 946
- [11] Aeby-Gautier E, Settefrati A, Bruneseaux F *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2012, 577(S1): 439
- [12] Akanuma T, Matsumoto H, Sato S *et al. Scripta Materialia*[J], 2012, 67(1): 21
- [13] Ren Y, Wang F, Wang S *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2013, 562: 137
- [14] Atroshenko S A. *Materials Science & Engineering A*[J], 2004, 378(1): 293
- [15] Yang Y, Li G P, Cheng G M *et al. Scripta Materialia*[J], 2008, 58(1): 9
- [16] You Zhenping(尤振平), Hui Songxiao(惠松晓), Ye Wenjun(叶文君) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2011, 35(2): 202
- [17] BopHcona E A. Translated by Chen Shiqing(陈石卿). *Titanium Alloy Metallography*(钛合金金相)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986
- [18] Ouyang Delai(欧阳德来), Lu Shiqiang(鲁世强), Cui Xia(崔霞) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(12): 2307
- [19] Li Yongsen(李永森). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1986, 22(5): 121
- [20] Ren Yu(任宇). *Research on Microstructure Evolution and Its Influences on Spall Fracture Behavior of Titanium Alloys under Shock Wave Loading*(冲击波作用下钛合金微结构演化及其对层裂行为的影响规律研究)[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014
- [21] Wang Kaixuan(王凯旋), Zeng Weidong(曾卫东), Shao Yitao(邵一涛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2009, 38(3): 398
- [22] Wang Yang(王 杨), Zeng Weidong(曾卫东), Ma Xiong(马雄) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2013, 23(7): 1861

## Deformation Behavior of Near- $\beta$ Ti-5553 Alloy Under the Impact of Light Gas Gun

Dai Huaxiang<sup>1,2</sup>, Wang Lin<sup>1,2</sup>, Xu Xin<sup>3</sup>, Wang Ding<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. National Key Laboratory of Science and Technology on Materials in Impact Environment, Beijing 100081, China)

(3. Beijing Aerospace Research Institute of Micro Systems, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The deformation behavior of near- $\beta$  Ti-5553 alloy under the impact of light gas gun has been studied by optical microscopy (OM) combined with quantitative metallographic analysis, transmission electron microscope (TEM) and X-ray Diffraction (XRD). The results demonstrate that Ti-5553 alloy deforms via dislocation slipping, deformation twinning and stress-induced martensite (SIM) phase transformation. Meanwhile, the amount of SIM is influenced by the velocity of flyer plates by which Ti-5553 alloy is impacted. The amount of SIM increases obviously as the impact velocity increases. Particularly, when the velocity increases from 380 m/s to 560 m/s, the length of the SIM wire per unit area ( $L_A$ ) increases from 39.18 mm/mm<sup>2</sup> to 52.65 mm/mm<sup>2</sup>.

**Key words:** titanium alloy; light gas gun; deformation; stress-induced martensite; quantitative metallography

Corresponding author: Wang Lin, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68912709, E-mail: linwang@bit.edu.cn