

文章编号: 1006-2467(2010)05-0635-05+0644

回火对非调质 SG 钢组织和性能的影响

汪宏斌, 薛 厂, 彭金明, 罗 毅, 吴晓春

(上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘 要: 采用低频力学谱仪、扫描电子显微镜和透射电子显微镜并结合 JMatPro 软件分析了贝氏体型非调质 SG 钢在 350 °C 回火后的组织及强韧化机制, 分析其内耗与温度的关系曲线中 Snoek 峰、SKK 峰及其微观形貌, 探讨了贝氏体中铁素体的碳原子分布及析出行为、粒状贝氏体中岛状马氏体/奥氏体的分解规律. 结果表明: 未回火 SG 钢的 Snoek 峰强度极低, 且贝氏体中铁素体的固溶碳原子含量较低; 经 350 °C 回火 2 h 后, SG 钢的屈服强度最高. 这是由于析出强化和位错强化共同作用的结果, 其中分解出现的弥散碳化物 Cr_7C_3 起到了主要作用.

关键词: 贝氏体型非调质 SG 钢; 内耗; 岛状马氏体/奥氏体; 回火; 贝氏体

中图分类号: TG 113.226

文献标志码: A

Effects of Tempering on Microstructure and Mechanical Properties of Non-quenched and Tempered Bainite SG Steel

WANG Hong-bin, XUE Chang, PENG Jin-ming, LUO Yi, WU Xiao-chun

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The strengthening and toughening mechanism of non-quenched and tempered bainitic SG steel with tempered at 350 °C was studied by low frequency mechanical spectrum apparatus, scanning electronic microscope, transmission electronic microscope and JMatPro software. By the Snoek and SKK peaks in the internal friction depended on temperature and microstructure analysis, the distribution and precipitation behavior of carbon atoms in the bainitic ferrite and decomposition law of island-like martensite/austenite were discussed. The results show that the intensity of Snoek in SG steel is very low and bainitic ferrite contains a few solid solution content of carbon atoms; and the yield strength of SG steel with tempered at 350 °C for 2 h is the highest, which is due to the precipitation strengthening from Cr_7C_3 and dislocation strengthening.

Key words: non-quenched and tempered bainitic SG steel; internal friction; island-like martensite/austenite; temper; bainite

目前, 由于对汽车零部件等各种机械曲轴的韧性要求不断提高, 以及对环保、高效、安全和节能材料的需要, 贝氏体型^[1-3]非调质钢已成为当今研究的热点. 但未经回火处理的连续冷却贝氏体钢的屈服

强度较低, 若经一定温度回火后, 其宏观性能可望得到提高^[4].

内耗测量方法已用于研究钢铁等金属材料热处理过程的原子扩散及组织结构的变化, 如对碳和氮

收稿日期: 2009-03-10

基金项目: 先进钢铁材料技术国家工程研究中心资助项目

作者简介: 汪宏斌(1970), 男, 湖北武汉市人, 副研究员, 电话(Tel.): 021-56334465; E-mail: whb@staff.shu.edu.cn.

的扩散、脱溶、沉淀及其组织分解所引起的内耗峰探究^[5-7]. 彭金明等^[8]研究发现, 贝氏体型非调制 SG 钢经过 200~600 °C 不同时间下保温、350 °C 回火 2 h 热处理后的屈服强度、延展性和韧性均有所提高. 在此基础上, 本文通过分析 SG 钢内耗与温度的关系曲线, 探讨回火热处理条件对其组织的影响规律, 以期 SG 钢的工业应用提供依据.

1 试验部分

1.1 材料制备

试验所用 SG 钢的化学成分(质量分数计, 全文同)为 0.200% C, 1.920% Mn, 0.570% Si, 0.950% Cr, 0.180% Mo, 0.036% V, 0.036% Ti, 0.015% P, 0.005% S, 采用感应熔炼制得. 将所得 240 mm 方坯经退火后连轧, 轧至 $\varnothing 120$ mm 的圆棒. 轧制时始轧温度为 1 080 °C, 终轧温度为 950 °C, 轧后空冷至 600 °C 左右再堆冷至室温, 并作为试验用基材, 其微观组织为粒状贝氏体及残留小于 10% 的奥氏体组织^[8]. 内耗试样由基材上截取并通过线切割、粗磨后所得, 尺寸为 1 mm × 2 mm × 50 mm; 另外, 部分内耗试样再分别经 240, 350, 600 °C 回火 2 h 的热处理.

1.2 试验方法

SG 钢的微观分析借助 HITACHI S-570 型扫描电子显微镜(SEM)和 HITACHI 800 型透射电子显微镜(TEM)完成, 并运用 JMatPro 4.1 软件^[9]对其热处理工艺进行模拟.

SG 钢的内耗测量模式为自由衰减法, 采用 LMA-1 型低频力学谱仪完成. 若振动的总能量为 E , 一个振动周期损耗的能量为 ΔE , 根据内耗定义,

该振动系统的内耗可表达为

$$Q^{-1} = \frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (1)$$

在相邻 2 次振动的振幅 A_n 和 A_{n+1} (n 为振动次数)处, 系统总能量分别等于势能 $\frac{1}{2}KA_n^2$ 和 $\frac{1}{2}KA_{n+1}^2$ (K 为试样的刚度), 则

$$\Delta E = \frac{1}{2}KA_n^2 - \frac{1}{2}KA_{n+1}^2 \quad (2)$$

将式(2)代入(1)得

$$\left. \begin{aligned} Q^{-1} &= \frac{1 - e^{-2\delta}}{2\pi} \\ \delta &= \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, δ 为对数减缩量, 若在内耗与振幅无关的条件下即线性内耗下, 根据叠加原理得

$$\delta = \frac{1}{\pi(n-m)} \ln \frac{A_m}{A_n}$$

其中, A_m 为第 m 次的振动振幅.

2 结果与分析

2.1 内耗与温度的关系

2.1.1 未回火试样 图 1(a) 所示为未回火试样在升温过程中的内耗与温度的关系曲线. 可见, 该曲线由一个极微弱的 Snoek 峰、处于 238.4 °C 的内耗峰以及背景峰组成. 图 1(b) 所示为同一试样连续 3 次升温过程中所测内耗与温度的关系曲线. 可见, 处于 238.4 °C 的内耗峰逐渐降低. 图 2 所示为频率一定而改变应变振幅 σ 时的内耗与温度的关系曲线. 可见, 当扣除背景内耗后, 处于 238.4 °C 的内耗峰强度基本相同.

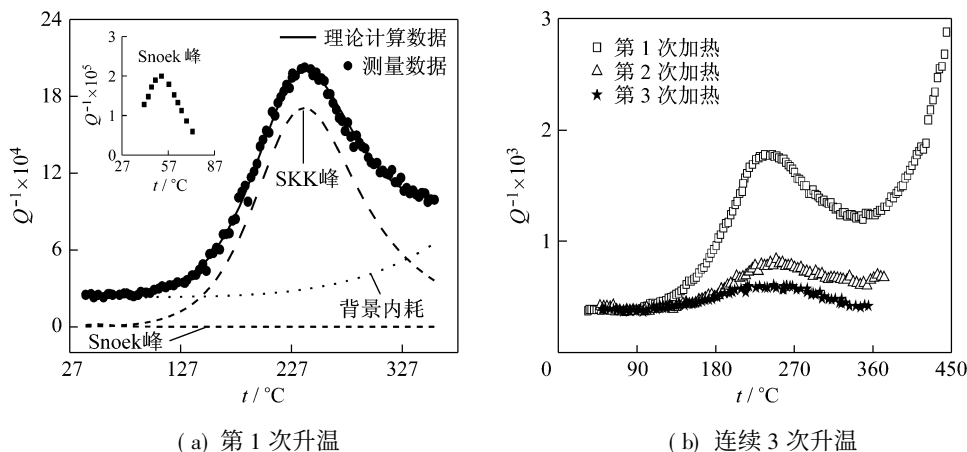


图 1 SG 钢升温过程中的内耗随温度变化的关系曲线

Fig. 1 Temperature dependent internal friction spectrum of SG steel during heating

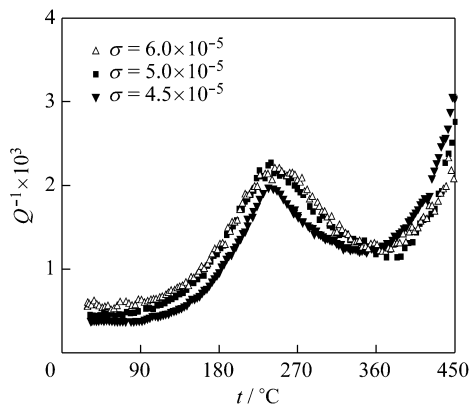


图 2 不同应变振幅下 SG 钢升温过程中内耗与温度的关系(未扣除背景内耗)

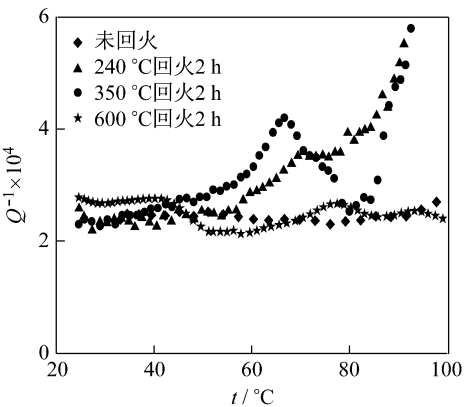


图 3 不同状态下 SG 钢在 20~ 100 °C 的内耗与温度的关系曲线

Fig. 2 The temperature dependent internal friction spectrum of SG steel at different amplitude during heating (including the background)

Fig. 3 The temperature dependent internal friction spectrum of SG steel from 20 °C to 100 °C at different tempered temperature

根据 Debye 模型和 Arrhenius 方程, 弛豫时间可表示为

$$\tau^{-1} = \tau_{\infty}^{-1} \exp \left[- \frac{E_a}{k_B T} \right] \tag{4}$$

式中: E_a 为激活能; k_B 为玻尔兹曼常数; τ_{∞} 为 $t \rightarrow \infty$ 时的弛豫时间. 由式 (4) 算出, 退火态时, 试样在 238.4 °C 处出现的内耗峰的激活能和弛豫时间分别为 1.28 eV 和 4.548×10^{-15} s.

在加热过程中, 由于位错密度不断降低, 并伴随少量碳化物析出、间隙碳原子减少, 使位错处间隙原子与位错间交互作用形成的 Cottrell 气团钉扎效果减弱, 且 238.4 °C 处的内耗峰强度不随振幅而变化, 在通过改变试样尺寸而改变其固有频率时, 该内耗峰随频率的变化而改变. 同时, 结合材料的激活能和弛豫时间, 可判定其为 SKK 峰.

2.1.2 回火试样 经不同温度回火的试样在室温至 100 °C 时内耗与温度的关系曲线如图 3 所示. 可见: 其 Snoek 峰的高度随回火温度的升高而增加, 在 350 °C 回火 2 h 时 Snoek 最高; 当回火温度升至 600 °C 时, Snoek 峰几乎消失. 同时, 未回火试样的 Snoek 峰强度很低. 而在固溶体 α Fe 中, 溶质碳原子含量与 Snoek 峰高度 $Q_{\max}^{-1}$ 呈线性关系^[10], 即

$$w = K_a Q_{\max}^{-1} \tag{5}$$

式中: w 为在 α Fe 中间隙碳原子含量(质量分数); K_a 为比例系数或金属的变换因子. 因此, 可根据 Snoek 峰的强度得出待测体心立方(bcc)结构中的间隙碳原子. Bhadeshia 等^[11]认为, 贝氏体铁素体中存在高密度位错, 在贝氏体铁素体形成后, 其内部的碳将重新分布, 位错附近的大量碳原子将向位错偏聚而形成稳定的 Cottrell 气团, 气团的平均碳含量

高于附近基体, 使得贝氏体铁素体中含有过饱和的碳. 而本文则发现, 未回火试样的 Snoek 峰强度较低, 即固溶于贝氏体铁素体的碳含量较少.

在低温回火时, 马氏体/奥氏体岛(简称 M/A 岛)中的马氏体开始分解, 部分马氏体由体心正方(bct)结构转变为 bcc 结构. 传统的观点认为^[12-13], 发生粒状贝氏体相变时, 冷却过程中形成的 M/A 岛由外围富碳的残余奥氏体和心部贫碳的马氏体组成, 小岛内的马氏体为孪晶马氏体和板条马氏体, 而孪晶马氏体中富碳. 由于回火温度较低, 孪晶马氏体中部分过饱和碳原子析出, 其仍为碳在 α Fe 中的过饱和固溶体, 在升温过程中亦形成 Snoek 峰. 随着回火温度增加, 位错密度降低, 部分偏聚于位错处的碳原子回到基体中, 从而使得 Snoek 峰强度增加; 在 350 °C 回火时, 马氏体继续分解, 晶格畸变消失, 马氏体大部分转变为铁素体而只析出一些弥散的碳化物, 在 α Fe 中固溶的间隙碳原子最多, Snoek 峰强度最高; 随着回火温度不断升高, 合金元素会争夺 bcc 晶体结构中的间隙碳原子而以碳化物的形式析出, 使得 Snoek 峰强度降低, 直至 600 °C 回火时几乎消失.

图 4 所示为在 150~ 450 °C, 经不同温度回火后试样的内耗与温度的关系曲线. 可以看出, 在 240 °C 回火时 SKK 峰强度明显降低, 这是由于回火温度相对较低而没有较多碳化物析出, 位错回复和减少的量不多的缘故.

当 350 °C 回火时, 位错回复和减少的速率加快, 但整体来说位错密度依然很大; 另外, 合金元素与碳原子形成的细小碳化物弥散析出而起到了钉扎作用, 造成位错段变短、弛豫时间减小及内耗峰变窄,

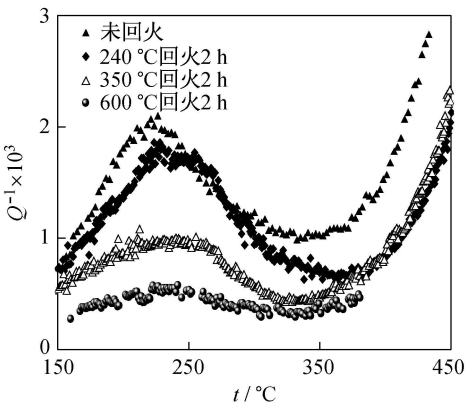


图 4 不同状态下 SG 钢在 150~ 450 °C 时内耗与温度的关系曲线

Fig. 4 The temperature dependent internal friction spectrum of SG steel from 150 °C to 450 °C at different tempered temperature

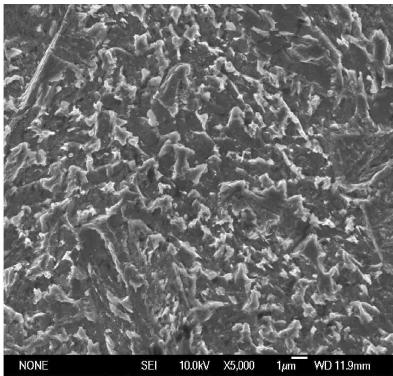
因此,SKK 峰虽有所减弱但依然较强.此时,材料的强化机制由堆冷态单一的位错强化转变为析出强化 + 位错强化,从而实现了屈服强度的提高.当 600 °C 回火时,其位错大量回复、减少,并析出大量碳化物而造成间隙碳原子减小,使得 SKK 峰明显减弱.

2. 2 材料组织及其微观形貌

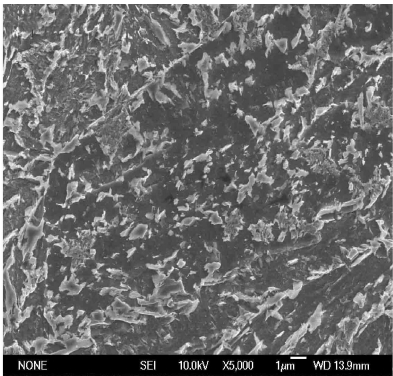
图 5 所示为 350 °C 回火 2 h 前后 SG 钢组织及其微观形貌的 SEM 照片.可以看出:SG 钢中岛状物优先沿原始奥氏体晶界形核,并向晶内生长;在回火后,较大的岛状物变小、分解和细化.研究表明:M/A 岛心部的马氏体由于过饱和度较高而部分分解,使得原本完整的 M/A 岛从心部分开,并实现了 M/A 岛的细化,从而提高了其综合韧性;另外,M/A 岛中部分强化相马氏体的分解,也使其韧性得到了提高.

图 6 所示为 350 °C 回火 2 h 前后 SG 钢微观形貌的 TEM 照片.可以看出,SG 钢堆冷态的 M/A 岛中存在着大块孪晶马氏体和密度较高的位错(见图 6(a) 和(b));而回火后,M/A 岛中的孪晶马氏体岛分解(见图 6(d) 中箭头所指区域)并细化,图像明显比未回火时的清澈,说明其位错密度比未回火时低(见图 6(c) 和(d)).

图 7 所示为 350 °C 回火 2 h 时 SG 钢明场、暗场及衍射斑点的标定结果.可见,在 SG 钢贝氏体铁素体基体上,沿一定方向析出长 10~ 20 nm、宽 50~



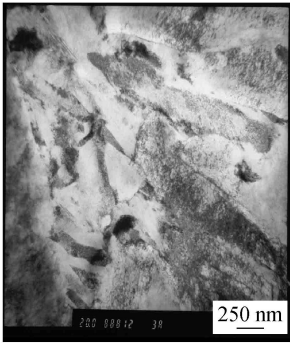
(a) 未回火



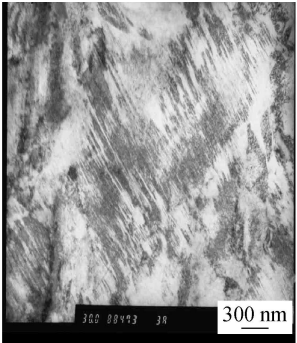
(b) 350 °C 回火 2 h

图 5 回火前后 SG 钢组织及其微观形貌的 SEM 照片

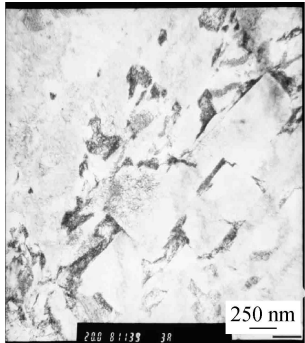
Fig. 5 SEM of nonr tempered and tempered SG steel



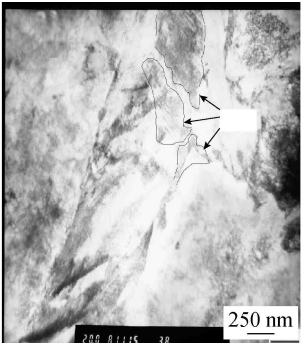
(a) 未回火的岛状物



(b) 未回火的孪晶马氏体



(c) 回火后的岛状物



(d) 回火后的孪晶马氏体

图 6 SG 钢微观形貌的 TEM 照片

Fig. 6 TEM of the SG steel

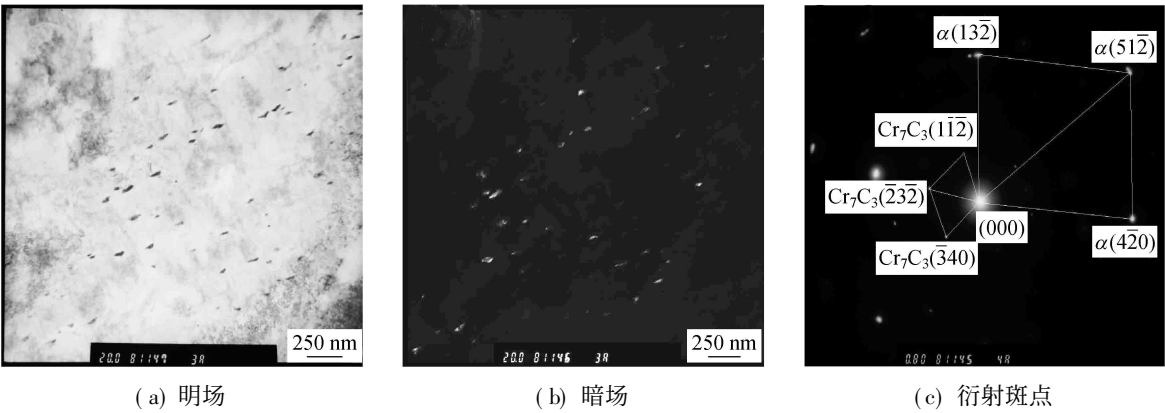


图 7 350 °C回火 2 h 时 SG 钢微观形貌的 TEM 照片
Fig. 7 TEM of the SG steel with 350 °C× 2 h tempered

80 nm 的长条状碳化物颗粒, 通过衍射斑点标定发现, 该析出相为 Cr_7C_3 .
由前所知, 350 °C回火时, 在 SG 钢位错处会析出细小弥散的碳化物并起到钉扎强化作用. 通过 JMatPro 软件计算发现 (见图 8), 该析出相为 M_{23}C_6 、 M_7C_3 和 $\text{M}(\text{C}, \text{N})$ 等碳化物, 并随着温度升高, M_7C_3 增多, 从而验证了图 7 的结果.

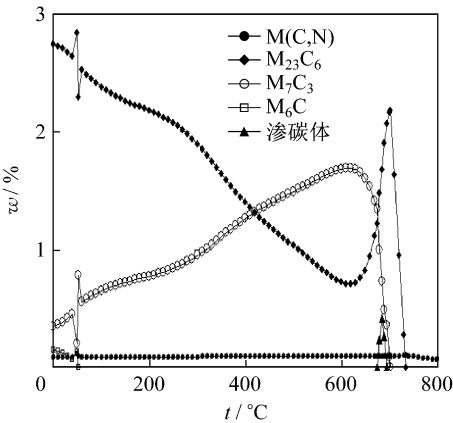


图 8 JMatPro 软件的计算结果
Fig. 8 The results by using of JMatPro software

3 结 论

- (1) 未回火贝氏体型非调质 SG 钢中的 Snoek 峰强度极低, 且贝氏体中铁素体的固溶碳原子含量较低.
- (2) 经 350 °C回火 2 h 后的 SG 钢的屈服强度最高, 这是由于析出强化和位错强化共同作用的结果, 其中分解的弥散碳化物 Cr_7C_3 相起到了主要作用.

参考文献:

[1] 王 勇, 何光楚, 揭晓华. 非调质钢的性能与发展及在汽车上的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2000(1): 16 20.

WANG Yong, HE Guang chu, JIE Xiao hua. Properties, development and automotive application of microalloyed steel [J]. **Automobile Technology & Material**, 2000(1): 16 20.

[2] 孙德勤, 吴春京, 谢建新. 贝氏体钢的研究开发现状与发展前景探讨[J]. 机械工程材料, 2003, 27(6): 4 7.

SUN De qin, WU Chun jing, XIE Jiar xin. Research and development of bainitic steels [J]. **Materials for Mechanical Engineering**, 2003, 27(6): 4 7.

[3] 徐佐仁, 董 青. 轴承钢的下贝氏体形成温度对显微组织参量与屈服强度的影响[J]. 上海交通大学学报, 1991, 23(5): 50 57.

XU Zu o ren, DONG qing. Influence of transformation temperature of lower bainite on the structural parameters and mechanical properties of bearing steel[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 1991, 23(5): 50 57.

[4] Liu Dong yu, Bai Bing zhe, Fang Hong sheng, et al. Effect of tempering temperature and carbide free bainite on the mechanical characteristics of a high strength low alloy steel[J]. **Materials Science and Engineering**, 2004, A 371: 40 44.

[5] 马应良, 葛庭燧. 高碳和低碳马氏体回火分解产物的共格性所引起的内耗峰[J]. 物理学报, 1964, 13 (1): 72 82.

MA Ying liang, GE Ting sui. Internal friction peaks associated with the coherency of the decomposition products of high carbon and low carbon martensite [J]. **Acta Physica Sinica**, 1964, 13(1): 72 82.

[6] 葛庭燧, 容保粹, 王业宁. 钢铁中碳氮的扩散、脱溶和沉淀[J]. 物理学报, 1955, 4(1): 9 106.

GE Ting sui, RONG Bao cui, WANG Ye ning. Diffusion and precipitation of carbon and nitrogen from solid solution in iron and steel [J]. **Acta Physica Sinica**, 1955, 4(1): 9 106. (下转第 644 页)

- 性质(第3卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] Zener C. Elasticity and anelasticity in metals[M]. 孔庆平, 周本谦译. 北京: 科学出版社, 1965.
- [3] Nowick A S, Berry B S. Anelastic relaxation in crystalline solids [M]. New York: Academic Press, 1972.
- [4] 马应良, 葛庭燧. 高碳和低碳马氏体回火分解产物的共格性所引起的内耗峰[J]. 物理学报, 1964, 13(1): 72-82.
MA Ying-liang, GE Ting-sui. Internal friction peaks associated with the coherency of the decomposition products of high carbon and low carbon martensite [J]. **Acta Physica Sinica**, 1964, 13(1): 72-82.
- [5] Hoyos J J, Ghilarducci A A, Salva H R. Internal friction in martensitic carbon steels[J]. **Materials Science & Engineering**, 2008(4): 1-11.
- [6] Schoeck G. On the mechanism of the Snoek-Koester relaxation[J]. **Scripta Metallurgica**, 1988, 22(3): 389-394.
- [7] Wang Y N, Gu M, Sun L H, *et al.* Proceedings of the national academy of sciences[J]. **Phys Rev**, 1994, 50B(6): 3525-3531.
- [8] Kopf H, Beissner K, Biller E. High temperature internal friction on plastically deformed copper single Crystals[J]. **Acta Metal**, 1981, 15: 925-927.
- [9] 葛庭燧, 马应良. 碳在低碳合金马氏体中微扩散所引起的内耗峰[J]. 物理学报, 1957, 6(1): 69-77.
GE Ting-sui, MA Ying-liang. Internal friction peak associated with the stress-induced diffusion of carbon in low carbon alloy martensite [J]. **Acta Physica Sinica**, 1957, 6(1): 69-77.
- [10] 潘晓华, 朱祖昌. H13 热作模具钢的化学成分及其改进和发展的研究[J]. 模具制造, 2006(4): 78-85.
PAN Xiao-hua, ZHU Zu-chang. The study of the chemical composition and improvement and development for the H13 hot work die and mold steel [J]. **Die and Mould Manufacture**, 2006(4): 78-85.
- [11] Gremaud G. Dislocation point defect interactions [C]// **Mechanical Spectroscopy Q¹ 2001 with Applications to Materials Science**. Zurich: Uetikon, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2001: 178.
- [12] Morito S, Nishikawa J, Maki T. Dislocation density within lath martensite in Fe-C and Fe-Ni alloys [J]. **ISIJ International**, 2003, 43(9): 1475-1477.

(上接第 639 页)

- [7] 葛庭燧, 马应良. 碳在低碳合金马氏体中微扩散所引起的内耗峰[J]. 物理学报, 1957, 6(1): 69-77.
GE Ting-sui, MA Ying-liang. Internal friction peak associated with the stress-induced diffusion of carbon in low carbon alloy martensite [J]. **Acta Physica Sinica**, 1957, 6(1): 69-77.
- [8] 彭金明, 罗毅, 汪宏斌, 等. 回火温度和时间对贝氏体型非调制钢力学性能的影响[J]. 上海金属, 2009(3): 16-19.
PENG Jin-ming, LUO Yi, WANG Hong-bin, *et al.* Effect of tempering temperature and time on mechanical property of non-quenched and tempered bainitic steel [J]. **Shanghai Metals**, 2009(3): 16-19.
- [9] Saunders N, Guo U, Midownik A P, *et al.* Using JmatPro to model materials properties and behavior [J]. **Industrial Insight**, 2003, 55(12): 60-65.
- [10] 冯端, 王业宁, 沈慧敏, 等. 金属物理学: 金属力学性质(第3卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] Bhadeshia H K D H. Bainite in steels: Transformations, microstructure and properties [M]. London: The Institute of Materials, 2001.
- [12] 杨殿魁, 梅敦, 李志芳. 12Cr3Ni 钢粒状贝氏体的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(5): 18-20, 33.
YANG Dian-kui, MEI Dun, LI Zhi-fang. Research on granular bainite of 12Cr3Ni steel [J]. **Ordinance Material Science and Engineering**, 2002, 25(5): 18-20, 33.
- [13] 王福明, 李景慧. 粒状贝氏体的形貌分析[J]. 金属热处理, 1991, 12(3): 23-29.
WANG Fu-ming, LI Jing-hui. Analysis on morphology of granular bainite [J]. **Transactions of Metal Heat Treatment**, 1991, 12(3): 23-29.