

Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni 形状记忆合金管接头性能分析

Behavior Analysis of Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni Alloy Pipe-joints

林成新^{1,2}, 谷南驹¹, 赵连城²

(1 河北工业大学, 天津 300130; 2 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

LIN Cheng-xin^{1,2}, GU Nan-jun¹, ZHAO Lian-cheng²

(1 Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2 Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 对 Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni 合金管接头的形状记忆效应和连接性能进行了系统地分析, 结果表明: 形状恢复率随着预变形量的增加而降低; 最大可恢复应变出现在 4% ~ 6% 之间; 预变形量为 4.5% ~ 8% 时管接头的紧固力较大, 耐压密封性较好。热—机械训练可显著提高管接头的形状记忆效应、连接的紧固力和耐压密封性。管接头的形状记忆效应随着其壁厚的增大而降低; 管接头壁厚有一个合理的取值范围, 可使其连接的紧固力较大、耐压密封性较好。管接头连接长度越长, 管接头的紧固力越小而耐压密封性越好。管接头结构对管接头连接的耐压密封性影响很大, 随结构的不同耐压密封性可有几倍的差异。

关键词: 形状记忆合金; 管接头; 形状记忆效应; 紧固力; 耐压密封性

中图分类号: TG139.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 11-0021-04

Abstract: The shape memory effect and connecting behaviors of pipe-joint made from Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni shape memory alloy were studied systematically. The results show that the recovery ratio reduces with increasing pre-strain and the maximal recovery strain appears when pre-strain is 4% ~ 6%. When pre-strain is 4.5% ~ 8%, the connecting of pipe-joint shows bigger tight force and higher pressure-resistance sealing ability. The shape memory effect, tight force and pressure-resistance sealing ability of the pipe-joint can improve remarkably with thermal-mechanical training. The recovery ratio and recovery strain reduces with increasing thickness of pipe-joint. With a reasonable range in thickness of pipe-joint, the tight force and pressure-resistance sealing ability in connecting of pipe-joint are higher. With increasing length of jointing, in the connecting of pipe-joint the tight force reduces and the pressure-resistance sealing ability increases. Pipe-joint structure can change the pressure-resistance sealing ability greatly and with the different structure there is severalfold diversity of pressure-resistance sealing ability in connecting of pipe-joint.

Key words: shape memory alloy; pipe-joint; shape memory effect; tight force; pressure-resistance sealing ability

形状记忆合金管接头是靠其在不同温度下呈现出不同直径的性能达到联接目的^[1-4], 具有联接方便、耐腐蚀性好等优点。目前, 研究较为成熟的是 TiNi 形状记忆合金管接头, 但 TiNi 合金价格昂贵, 除了在航天、军工等特殊领域内有应用外, 在一般领域内的应用受到限制^[1]。FeMnSi 系形状记忆合金是一种单程记忆效应的合金, 特别适合作管接头用, 它具有成本低、强度高、适合大批量生产的特点, 有广阔的应用前景^[1,2]。目前, 对 FeMnSi 形状记忆合金管接头的研究还很不成熟, 为此本文对 Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni

形状记忆合金管接头的性能进行了系统的分析, 得出了一些有用的结果。

1 试验材料及设备

本文所用的试验材料 Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni (wt%), 在真空中频熔炼炉熔炼, 铸锭经脱模后, 先经过 1200 均匀化处理, 热锻成截面尺寸为 35mm 的棒料, 以备管坯成型用。锻造后的棒料再经 800 × 24h 的去应力退火。管接头管坯的制造采用 700 ~ 900 挤压成型工艺, 管坯的内径为 22.5mm, 再将

管坯机加工成内径为 23mm 不同壁厚和长度的管接头半成品并进行 $1000 \times 1\text{h}$ 的固溶处理, 然后在室温下用材料试验机扩孔即可得到管接头成品。加热前装配时管接头和被接管间的配合为间隙配合 (H7/h6), 配合面的表面粗糙度 R_a 值为 $6.3 \mu\text{m}$, 管接头连接加热是在电阻炉中进行, 加热温度为 500°C ; 管接头联接组件拉脱力和耐压密封性的测量分别在材料试验机 and 数字显示式压力计上进行。

2 试验结果及讨论

2.1 管接头的形状记忆效应

设管接头扩孔前的内径为 D_0 (mm), 扩孔后的内径为 D_1 (mm), 管接头加热恢复后的内径为 D_2 (mm), 则预变形量为 $\rho = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \times 100\%$; 可恢复应变为 $R = \frac{D_1 - D_2}{D_0} \times 100\%$; 形状恢复率为 $R = \frac{D_1 - D_2}{D_1 - D_0} \times 100\%$ 。

图 1 表示试验合金未经训练管接头 (其壁厚 $t = 1\text{mm}$) 不同预变形量对其形状恢复率和可恢复应变的影响曲线。由图 1 可以看出, 管接头的形状记忆特性和单向拉伸测试的结果相似, 即形状恢复率随着预变形量的增加而降低; 最大可恢复应变出现在 $4\% \sim 6\%$ 之间。从管接头扩孔时的受力分析可知, 管接头的受力主要是圆周方向上的拉应力。因此研究 FeMnSi 系形状记忆合金管接头的形状记忆合效应时, 可近似地把管接头的受力看成单向拉伸, 这样就可以把单向拉伸试样的测试结果移植到管接头上来使用, 从而使管接头形状记忆特性的分析大大简化。

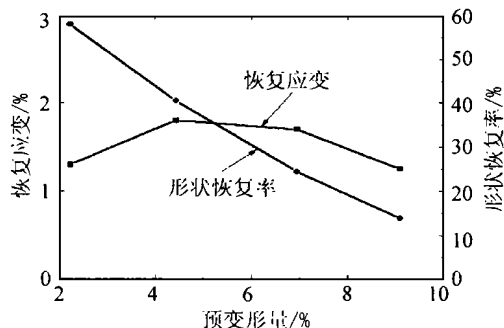


图 1 预变形量对管接头形状记忆效应的影响

Fig. 1 Effect of pre-strains on SME of pipe-joint

图 2 为热-机械训练对 2[#] 合金管接头 (其壁厚 $t = 1\text{mm}$) 形状恢复率和可恢复应变的影响曲线。第 1、2、3 次热-机械训练变形量分别为: 6.2%、5.1% 和 4.7%, 最后测量形状记忆效应的预变形量约为

4.5%。由图 2 可看出训练可显著提高管接头的形状记忆效应, 且只经 2 次训练就可以达到较满意结果。

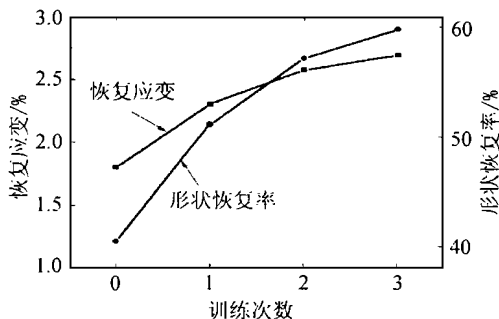


图 2 热-机械训练对管接头形状记忆效应的影响

Fig. 2 Effect of thermal-mechanical training on SME of pipe-joint

图 3 表示试验合金未经训练管接头不同壁厚 t 对其形状恢复率和可恢复应变的影响曲线, 管接头预变形量约为 4.5%。由图 3 可以看出, 管接头的形状恢复率和可恢复应变随着其壁厚的增大而降低, 其原因是: 管接头在扩孔时, 管接头壳体在周向受到拉应力的作用, 而沿着管接头壳体壁厚方向其应力和应变是不均匀的, 显然, 管接头的壁厚越大, 应力应变的不均匀性越大, 这种应力应变的不均匀导致了管接头在扩孔时应力诱发 -M 相变的不均匀, 进而使管接头的形状记忆效应下降。

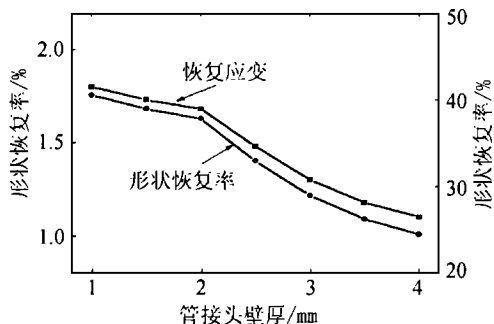


图 3 壁厚对管接头形状记忆特性的影响

Fig. 3 Effect of thickness on SME of pipe-joint

2.2 管接头的紧固力

为了考察管接头的紧固力, 可以用管接头连接组件的拉脱力来近似计算, 设 F_p 为拉脱力, 可用材料试验机测出; τ 为紧固力, 单位为 MPa; μ 是管接头和被接管之间的摩擦系数 (钢-钢的摩擦系数约为 0.15); d 为被接管的外径, l_e 为管接头的连接长度 (实际应用时 l_e 约为管长的一半), 则紧固力可计算^[5]:

$$\tau = \frac{F_p}{dl_e}$$

图4表示试验合金未经训练管接头不同预变形量对其紧固力的影响曲线, 试验用管接头的规格尺寸为 $23\text{mm} \times 35\text{mm} \times 2\text{mm}$ (内径 \times 管长 \times 壁厚)。由图4可以看出预变形量为 $4.5\% \sim 8\%$ 时管接头的紧固力较大, 这和拉伸变形所测恢复力的结论一致。管接头的紧固力实际上反应的是合金的恢复力, FeMnSi系形状记忆合金的恢复力除了和可恢复应变有关外, 还和合金的强度(弹性模量)有关, 可恢复应变越大强度越高, 恢复力越大。虽然合金在预变形量为 $4\% \sim 6\%$ 时的可恢复应变较好(见图1), 但当预变形量较小时, 合金强度较预变形量大时要小(形变强化小), 因此, 预变形量对管接头紧固力的影响和对管接头可恢复应变的影响有一定的差异; 另一方面, 预变形量较大时, 合金的强度虽高但可恢复应变小, 这样恢复力也不能太大。

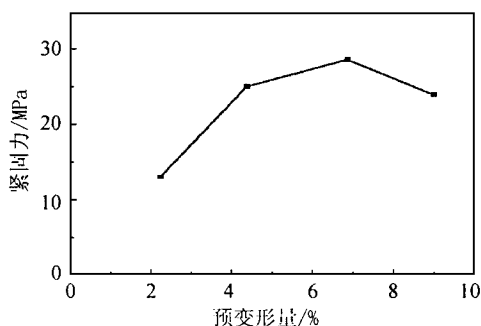


图4 预变形量对管接头紧固力的影响

Fig. 4 Effect of pre-strain on tight-force in pipe-joint

图5表示试验合金未经训练管接头壁厚对其紧固力的影响曲线, 试验用管接头的规格尺寸为 $23\text{mm} \times 35\text{mm}$ (内径 \times 管长), 预变形量为 4.52% 。由图5

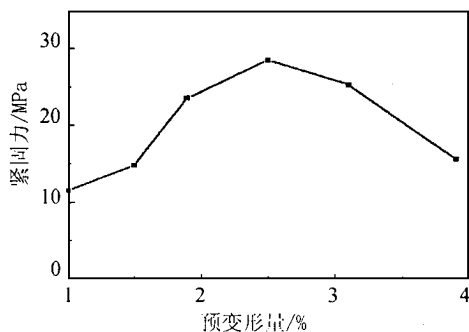


图5 壁厚对管接头紧固力的影响

Fig. 5 Effect of thickness on tight-force in pipe-joint

可以看出, 管接头的壁厚太小或太大时, 其紧固力都较小, 这是因为壁厚太小, 管接头强度低, 恢复力小的缘故; 而管接头壁厚较大时, 管接头扩孔时的应力

应变在其厚度方向不均匀性增大, 从而造成可恢复应变降低所致。因此管接头壁厚有一个合理的取值范围, 可使管接头的紧固力较大。对于所测规格尺寸的管接头, 壁厚在 $t = 2 \sim 3\text{mm}$ 时的紧固力较大。

图6表示试验合金未经训练管接头连接长度对其紧固力的影响曲线, 管接头的规格尺寸为 $23\text{mm} \times 35\text{mm} \times 2\text{mm}$ (内径 \times 管长 \times 壁厚), 预变形量为 4.52% 。从图6可以看出, 管接头的紧固力随着连接长度的增加呈下降趋势, 这是因为管接头连接长度增加时, 管接头各处恢复不均匀所致。

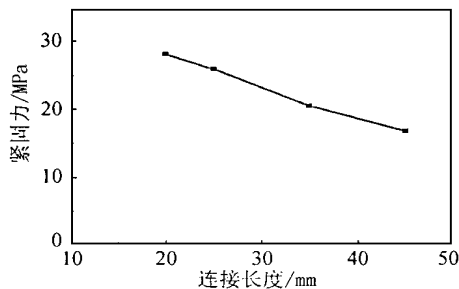


图6 连接长度对管接头紧固力的影响

Fig. 6 Effect of length of jointing on tight-force in pipe-joint

图7表示热-机械训练对管接头紧固力的影响曲线, 管接头的规格尺寸为 $23\text{mm} \times 35\text{mm} \times 2\text{mm}$ (内径 \times 管长 \times 壁厚), 预变形量为 4.52% 。从图7可以看出训练可显著提高管接头连接时的紧固力。

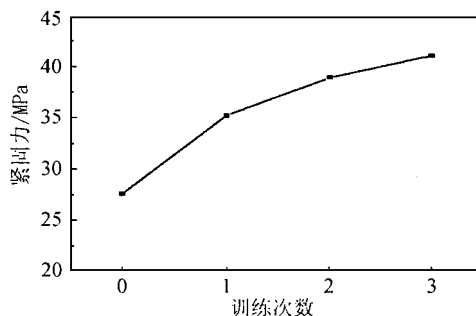


图7 热-机械训练对管接头紧固力的影响

Fig. 7 Effect of thermal-mechanical train for tight-force in pipe-joint

2.3 管接头的耐压密封性

将管接头连接组件在液压压力机上打压, 可测其耐压密封性, 测量结果见表1~4。

表1给出了试验合金不同规格尺寸管接头联接组件的耐压密封性。由表1可以看出, 管接头的壁厚和管长(实际上是连接长度)对管接头连接组件的耐压密封性有较大的影响: 管接头的管长越长, 管接头

连接组件的耐压密封性越好, 这和连接长度对管接头连接组件紧固力的影响规律相反; 管接头壁厚对管接头连接组件耐压密封性的影响规律和管接头壁厚对管接头紧固力的影响规律相似, 对于所测规格尺寸的管接头, 壁厚在 $t = 2 \sim 3.1\text{mm}$ 时管接头连接组件的耐压密封性较好。

表 1 不同规格尺寸管接头联接组件的耐压密封性

Table 1 The pressure-resistance sealing ability in connecting of pipe-joint with different dimension specification

No.	管接头规格 (内径×管长×壁厚) / mm	$p / \%$	不泄露压力 / MPa	泄露压力 / MPa
1	23×50×2.5	4.52	20	—
2	23×35×2.5	4.54	12	15
3	23×20×2.5	4.50	6	7.0
4	23×15×2.5	4.52	3	4.0
5	23×26×2.0	4.52	8	9.0
6	23×26×2.5	4.52	8	9.0
7	23×26×2.8	4.50	10	12
8	23×26×3.1	4.52	8	9.0
9	23×26×3.5	4.52	6	7.0

表 2 给出了试验合金管接头联接组件不同预变形量的耐压密封性。由表 2 可以看出管接头的预变形量对管接头连接组件耐压密封性的影响规律同管接头壁厚对管接头紧固力的影响规律相似, 对于所测规格尺寸的管接头, 预变形量在 4.5% ~ 7% 时管接头连接组件的耐压密封性较好。

表 3 给出了热-机械训练对试验合金管接头耐压密封性的影响。由表 3 可以看出, 热-机械训练可以显著提高管接头的耐压密封性, 且只需 2 次训练可以达到较为满意的结果。

表 2 管接头联接组件不同预变形量的耐压密封性

Table 2 The pressure-resistance sealing ability in connecting of pipe-joint with different pre-strain

No.	管接头规格 (内径×管长×壁厚) / mm	$p / \%$	不泄露压力 / MPa	泄露压力 / MPa
1	23×35×2.5	2.35	6	8
2	23×35×2.5	4.52	12	15
3	23×35×2.5	6.94	16	17
4	23×35×2.5	8.05	13	14
5	23×35×2.5	9.04	6	8

表 4 给出了试验合金不同结构管接头连接组件

的耐压密封性。由表 4 可以看出, 管接头的结构对管接头连接组件的耐压密封性影响很大, 管接头的结构不同, 耐压密封性可以有几倍的差异。

表 3 热-机械训练对试验合金管接头耐压密封性的影响

Table 3 The effect of thermal-mechanical training on pressure-resistance sealing ability in connecting of pipe-joint

No.	管接头规格 (内径×管长×壁厚) / mm	训练 次数	$p / \%$	不泄露压力 / MPa	泄露压力 / MPa
1	23×35×2.5	0	4.5	12	15
2	23×35×2.5	1	4.5	16	17
3	23×35×2.5	2	4.5	18	20
4	23×35×2.5	3	4.5	18	20

注: 第 1、2、3 次热-机械训练变形量分别为: 6.2%、5.1% 和 4.7%。

表 4 试验合金不同结构管接头连接组件的耐压密封性

Table 4 The pressure-resistance sealing ability in connecting of pipe-joint with different structure

No.	管接头规格 (内径×管长×壁厚) / mm	管接头 结构	$p / \%$	不泄露压力 / MPa	泄露压力 / MPa
1	23×35×2.5	一般	4.52	12	15
2	23×35×2.5	密封槽 1	4.54	18	20
3	23×35×2.5	密封槽 2	4.5	45	—

3 结论

(1) 形状恢复率随着预变形量的增加而降低, 最大可恢复应变出现在 4% ~ 6% 之间, 和单向拉伸试样的测试一致; 热-机械训练可显著提高管接头的形状记忆合效应, 且只经 2 次训练就可以达到较满意的结果; 管接头的壁厚可显著影响其形状记忆合效应, 管接头的形状恢复率和可恢复应变随着其壁厚的增大而降低。

(2) 预变形量为 4.5% ~ 8% 时管接头的紧固力较大; 管接头壁厚对管接头紧固力的影响是有一个合理的取值范围, 可使管接头的紧固力较大; 管接头的紧固力随着连接长度的增加呈下降趋势; 热-机械训练可显著提高管接头连接时的紧固力。

(3) 管接头的连接长度越长, 管接头连接组件的耐压密封性越好; 管接头的壁厚对管接头连接组件耐压密封性的影响规律同管接头壁厚对管接头紧固力的影响规律相似, 有一个合理的取值范围; 对于所测规格尺寸的管接头, 预变形量在 4.5% ~ 8% 时管接头连接组件的耐压密封性较好; 热-机械训练可以显著提高管接头的耐压密封性, 且只需一次训练可以达到较为满意的结果; 管接头的结构对管接头连接组件的耐压密封性影响很大, 管接头的结构不同, 耐压密封性可以有几倍的差异。

度几乎完全消失。这主要是合金中存在大量含 Fe 金属间化合物的作用,但是试验温度太高,这些含 Fe 金属间化合物也会发生粗化或溶解,失去了对合金的强化作用,因此温度较高时合金强度有一定程度下降,特别是在温度超过 300 时,合金的强度下降到一个很低的水平,比如 T6 处理合金在 350 抗拉强度仅为 50MPa 左右。

3 结论

(1) X 射线相分析表明,快凝 Al-17Si-6Fe-4.5Cu-0.5Mg 合金的挤压态和 T6 态组织主要由 Al, Si, Al₃FeSi, Al₇Cu₂Fe, Al₄Cu₂Mg₈Si₇ 等相组成,相对于铸态合金,基体衍射峰有一定程度宽化,经 T6 处理衍射峰宽化程度有所减弱。

(2) 在扫描电镜下对合金组织进行观察发现,两种状态快凝合金组织特点为基体上分布有大量细小弥散第二相颗粒,经 T6 处理态后这些第二相颗粒有所粗化;在透射电镜下观察,这些颗粒相表现出块状、棒状、鹅卵石状及大小不同的颗粒状等形态特征;相对于挤压态, T6 处理后合金组织除了第二相颗粒有所长大外,还沉淀析出一种在基体上呈一定方向性分布细小针状相,从它的这种分布特征判断这种相与基体保持一定共格或半共格位向关系。

(3) 两种状态快凝合金都具有较高的强度水平,但延伸率并不占优势;相对于挤压态, T6 处理后,合金强度有一定程度升高;随着温度的升高,两状态合金强度都有下降趋势,但在不低于 300 的温度时,合金仍就保持一定的强度水平。

参考文献

- [1] N Amano, Y Odani and Y Takeda. MPR, 1985, 11: 642.
- [2] I Yamauchi, I Ohnaka, S Kawamoto and T Fukusako. Mater Trans JIM, 1986, 27: 187.
- [3] I Yamauchi, I Ohnaka, S Kawamoto and T Fukusako. Mater Trans JIM, 1986, 27: 195.
- [4] N Amano, Y Odani, Y Takeda and K Akechi. MPR, 1989, 3: 186.
- [5] J Zhou, J Duszczyk and M Korevaar. J Mater Sci, 1990, 8: 91.
- [6] P Todeschini, G Champier and F H Samuel. J Mater Sci, 1992, 27: 3539.
- [7] J L Estrada and J Duszczyk. J Mater Sci, 1990, 25: 886.
- [8] J Zhou, J Duszczyk and M Korevaar. J Mater Sci, 1991, 26: 824.
- [9] J Zhou, J Duszczyk and M Korevaar. J Mater Sci, 1991, 26: 3041.
- [10] J Zhou, J Duszczyk and M Korevaar. J Mater Sci, 1992, 27: 3856.
- [11] R M Gomes, T Satot, H Tezuka and A Kamio. Mater Trans JIM, 1998, 39: 357.

- [12] R M Gomes, T Satot and A Kamio. Light Metal, 1997, 47: 90.
- [13] T S Kim, S J Hong, W T Kim and C W Won. 1998 PM World Congress Light Alloys, 1998: 319.
- [14] T S Kim, S J Hong, W T Kim and C W Won etc. Mater Trans JIM, 1998, 39: 1214.

基金项目: 哈尔滨工业大学“百名英才”杰出青年学术带头人基金项目

收稿日期: 2000-09-13; 修订日期: 2001-04-15

作者简介: 孙剑飞 (1962-), 男, 博士, 副教授, 目前主要从事快速凝固微晶及非晶材料方面的研究工作, 联系地址: 哈尔滨工业大学 434 信箱 (150001)

* * * * *

(上接第 24 页)

参考文献

- [1] S Kajiwar. Characteristic feature of shape memory effect and related transformation behavior in Fe-based alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1999, A 273-275: 67-68.
- [2] T W Duering. Application of shape memory [J]. Materials Science Forum, 1990, 156-58: 679-692.
- [3] H Tanahashi, T Maruyama and H Kubo. Applications of Fe-Mn-Si Alloy for Pipe Joints [J]. Trans Mat Res Soc Jpn, 1994, 18B: 1149-1154.
- [4] 王四根, 王绪, 花礼先. Fe-Mn-Si 形状记忆合金管接头研究 [J]. 金属热处理, 1997, (8): 8-9.
- [5] K Nagaya, Y Hirata. Analysis of a Coupling Made of Shape Memory Alloy and Its Dynamic Response Due to Impacts [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1992, 114: 297-304.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59801005)

收稿日期: 2000-10-28; 修订日期: 2001-06-26

作者简介: 林成新 (1963-), 男, 副教授 (博士生), 主要研究方向为机械设计、形状记忆合金及应用。已发表论文 20 余篇, 出版书籍 10 部, 获河北省科技进步一等奖一项、专利 2 项、鉴定成果 2 项, 联系地址: 天津市河北工业大学 56[#] (300130)

* * * * *

(上接第 34 页)

- [9] C Wolden, S Mitra, K K Gleason. J Appl Phys, 1992, 72 (8): 375-3758: 3750-3758.
- [10] 崔景彪, 马玉蓉, 方容川. 高压物理学报, 1996, 10 (2): 151-156.
- [11] 周灵平, 靳九成, 李绍禄等. 人工晶体学报, 1998, 27 (2): 126-131.
- [12] Ju J H, Mo Y W, Huang X Q, Xia Y B. Journal of Shanghai University, 1998, 2 (4): 337-341.
- [13] J Yu, R F Huang, L Sh Wen, Ch X Shi, Mater Sci Eng (B), 1999, 57: 255-258.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59976038)。

收稿日期: 2000-11-28; 修订日期: 2001-03-09

作者简介: 戚学贵 (1976-), 男, 博士研究生, 联系地址: 安徽合肥中国科学技术大学 323-135 室 (230026)。