

文章编号: 1001-3806(2005)01-0052-04

温度对扭转光纤环性能的影响

许 玲, 姚寿铨

(上海大学 光纤研究所, 上海 201800)

摘要: 从理论上和实验上研究了温度对扭转光纤环性能的影响。结果发现, 当注入线偏振光时, 扭转光纤环内存在一个弱主轴, 并且其方向会随着温度的变化而偏移; 而注入圆偏振光时, 输出光仍然是一个比较好的圆偏振光, 在同样的温度范围内, 椭圆度变化很小。为进一步提高光纤大电流传感器的稳定性研究提供了一个有益的参考。

关键词: 扭转光纤; 双折射光纤; 保偏光纤; 光纤电流传感器

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A

Effects of temperature on the performance of twisted optic fiber loop

XU Ling, YAO Shou-quan

(Institute of Optic Fiber Shanghai University, Shanghai 201800, China)

Abstract The effects of temperature on the performance of the twisted fiber loop are analyzed both theoretically and experimentally. The results reveal that there exists something like a pair of weak principal axes in the fiber whose location may drift because of temperature change. It is found in the experiment that this drift may be significant when linear polarized light is used. The experiment also shows that SOP is little deteriorated when circular polarized light is used in a twisted fiber loop.

Key words twisted fiber; birefringent fiber; SOP maintenance fiber; optic fiber current sensor

引 言

光纤除了广泛应用于通信领域以外, 还因其良好绝缘性、没有磁滞饱和现象、体积小成本低等特点, 被大量地用于传感领域。由于制作工艺的限制, 常规单模光纤内部不可避免地存在一定程度的无规的弱线性双折射。在进行较长距离传输时这种弱双折射的积累不容忽视。随着光纤技术的不断发展, 20 世纪 80 年代通过在光纤中引入应力单元诞生了高线性双折射光纤, 并且在陀螺应用上取得了很大的成功。然而, 对于利用法拉第效应来测量远端大电流的光纤电流传感器, 高线性双折射光纤并不适用^[1, 2]。有些学者提出利用超低双折射光纤^[3~5]来实现电流传感, 但是这种光纤也极易受到外界干扰和自身弯曲的影响而使系统不稳定; 也有一些学者提出通过扭转引入圆双折射来克服常规单模光纤里线双折射, 达到检测电流的目的, 并取得了一定的成功。后者相对于前者而言, 具有制作工艺简单、成本低的优点, 因而也被广泛地运用于实验研究。由于光纤电流传感器的传感部分通常工作在室外, 外界温度会随着气候和季节的变化而变化, 对系

统的稳定性和可靠性也就产生一定的影响。因此, 有必要研究温度对扭转光纤环性的影响机制, 以便于进一步深入研究光纤电流传感器的稳定性。作者将分别讨论温度对光纤内的双折射、弱主轴偏移及传输特性的影响, 并利用实验对理论分析结果进行验证。

1 理论分析

1.1 光纤环内线性双折射及温度的影响

光纤弯曲后光纤内的总线性双折射可由下式表示:

$$\Delta\beta = \beta_g + \beta_s + \beta_b \quad (1)$$

式中,

$$\beta_g = 0.125(e^2/a)(2\Delta)^{3/2} \quad (2)$$

$$\beta_s = \frac{C_s}{(1-\nu)} \Delta\alpha \Delta T \frac{A-B}{A+B} \quad (3)$$

$$\beta_b = 0.25kn_1^3(p_{11}-p_{12})(1+\nu)(b/R)^2 = (0.85/\lambda)(b/R)^2 \quad (4)$$

β_g ^[6]是指光纤弯曲使得纤芯变形引入的几何线性双折射。式中, e 为光纤变形后的纤芯椭圆度, $e = \nu a R$ ^[6], ν 为光纤的泊松比 (对于熔融石英 $\nu = 0.17$), R 为光纤弯曲半径, a 为光纤纤芯半径 (常规单模光纤 $2a \approx 9\mu\text{m}$), Δ 为光纤纤芯与包层的折射率差 ($\Delta \approx 0.003$)。将各数值代入表达式中得 $\beta_g = 10^{-12} R^{-2} \text{ rad/m}$ 。

β_s ^[6~8]是由于纤芯与包层的掺杂热膨胀系数不同引入的线性双折射。式中, $C_s = 0.5k_0 n_{\text{eff}}^3 (p_{11} - p_{12}) \times (1 + \nu)$, n_{eff} 为光纤的有效折射系数, k_0 为真空中的波数, p_{11} 与 p_{12} 是光纤的光弹性系数, $\Delta\alpha$ 是包层与纤芯的

作者简介: 许 玲 (1978-), 女, 硕士, 主要研究方向为特种光纤及其在光纤电流传感上的应用。

Email: ling_xu@sinens.com

收稿日期: 2003-12-18 收到修改稿日期: 2004-06-08

热膨胀系数之差, 常规单模光纤纤芯与包层热膨胀系数差约为 10^{-7} , ΔT 是室温与光纤周围环境温度之差, A 与 B 是光纤椭圆包层的长轴与短轴, 由前面分析可知弯曲引起的椭圆度很小, $(A - B)/(A + B) \rightarrow 10^{-5}$ 。因此, 因温度的变化产生的线性双折射为 $\beta_s/\Delta T$, 约等于 $1.6 \times 10^{-6} \text{ rad}/^\circ\text{C}$ 。

$\beta_b^{[6,9,10]}$ 是由于光纤弯曲时, 外侧受到拉力, 而内侧受到的是压力, 内外侧合力引入的线性双折射。 λ 为光纤的工作波长, b 为光纤半径, 常规单模光纤的纤径 $2b \approx 125 \mu\text{m}$ 。当 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 时, $\beta_b = 2.53 \times 10^{-3} \times R^{-2} \text{ rad}/\text{m}$ 。

温度对 $\Delta\beta$ 的影响即可由下式表示:

$$\frac{\Delta(\Delta\beta)}{\Delta T} = \frac{\Delta\beta_g}{\Delta T} + \frac{\Delta\beta_s}{\Delta T} + \frac{\Delta\beta_b}{\Delta T} \quad (5)$$

由于 β_g 是由几何变形引起的, 温度的变化对其影响可以忽略。由 (3) 式可以发现, 温度变化对于 β_s 的影响主要来自于膨胀系数的不同, 而不是因温度引起参数变化引起的, $\frac{\Delta\beta_s}{\Delta T}$ 也可忽略。 $\frac{\Delta\beta_b}{\Delta T}$ 则可由下式表达:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\beta_b}{\Delta T} = & 0.25k[3n_1^2(p_{11} - p_{12})(1 + \nu)\left(\frac{b}{R}\right)^2 \frac{\Delta n_1}{\Delta T} + \\ & n_1^3(1 + \nu)\left(\frac{b}{R}\right)^2 \frac{\Delta(p_{11} - p_{12})}{\Delta T} + \\ & n_1^3(1 + \nu)(p_{11} - p_{12})\left(\frac{1}{R}\right)^2 \frac{2b\Delta b}{\Delta T} \end{aligned} \quad (6)$$

石英线胀系数 $\Delta b/\Delta T \approx 5 \times 10^{-7}$, 经计算, (1) 式中最末两项相对于第 1 项来说很小, 因此可将 (6) 式简化为:

$$\frac{\Delta(\Delta\beta_b)}{\Delta T} = 5.4 \times 10^{-8} R^2 (\text{rad}/^\circ\text{C}) \quad (7)$$

(5) 式即可简化为 $\frac{\Delta(\Delta\beta)}{\Delta T} \approx \frac{\Delta\beta_b}{\Delta T}$ 。实验中采用康宁公司生产的标准常规单模光纤, 长约为 4m, 弯曲半径为 7.5m, 根据 (2) 式可以计算得 $\beta_b = 0.45 \text{ rad}/\text{m}$, 由 (7) 式得 $\frac{\Delta\beta_b}{\Delta T} = 9.6 \times 10^{-6} \text{ rad}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

1.2 扭转引入的圆双折射及其与温度的关系

对单模光纤进行扭转, 就在光纤中产生扭应力, 由弹光效应得知这种扭应力使左旋光和右旋光的折射率不同, 它们的传输常数也就不同, 这就形成了圆双折射。扭转常规单模光纤引入的圆双折射通常可写为^[6,11]:

$$\beta_c = 2\pi \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} (p_{11} - p_{12}) \tau (\text{rad}/\text{m}) \quad (8)$$

令 $g = n_{\text{eff}}^2(p_{11} - p_{12})/4$, 式中, β_c 即右旋光传输常数与左旋光传输常数之差, τ 为光纤扭转率。由 (8) 式可得:

$$\frac{d\beta_c}{dT} = \pi[2n_1(p_{11} - p_{12}) \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} +$$

$$n_1^2 \cdot \frac{d(p_{11} - p_{12})}{dT}] \tau \quad (9)$$

式中, T 为温度。根据物理手册, $\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} = 10^{-5} /^\circ\text{C}$ 。光弹性系数随着温度变化相对于折射率变化而言可以忽略, 将各部分值代入式中, 计算可得:

$$\frac{d\beta_c}{dT} = 1.358 \times 10^{-5} \tau (\text{rad}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (10)$$

由 (10) 式可知, 扭转率越大, 对于温度将越敏感。因此在实际应用中, 扭转光纤就陷入了两难境地, 一方面要求高扭转来引入较高的圆双折射克服线性双折射的影响, 另一方面却增加了对温度的敏感性。

由于常规光纤不可避免地存在着线性双折射, 作者认为在光纤内即存在着弱主轴, 但当温度升高时, 光纤发生膨胀, 熔融石英的线胀系数为 $5 \times 10^{-7} \text{ m}/^\circ\text{C}$, 则扭转光纤受热部分的主轴旋转角度 φ 为:

$$\frac{d\varphi}{dT} = 360\tau \frac{dz}{dT} z (^\circ)/^\circ\text{C} \quad (11)$$

可见, 扭转率越大, 偏移角度越大。对于 70r/m 的扭转光纤环, 40m 长的扭转光纤, 当外界温度变化 100°C , 由 (11) 式可知主轴的角度偏移 5° ; 而对于 50 r/m 的扭转光纤环, 温度变化 100°C , 理论偏移 3.6° , 同理 0r/m 的光纤基本不变。根据上述讨论结果, 可以预测温度对于传统偏振型光纤电流传感器精度和稳定性的影响。当光纤长度 $z=L$ 时, 根据公式^[12]:

$$\begin{cases} S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \approx \\ \cos 2(\theta_1 - \theta_2 - \nu L) \cos(2\Omega_F + 2\varphi) + \\ \sin 2(\theta_1 - \theta_2 - \nu L) \sin(2\Omega_F + 2\varphi) \\ \nu = \frac{1}{2} (\Delta\beta^2 + 4\alpha^2)^{1/2} \\ \alpha = 0.07\tau \end{cases} \quad (12)$$

式中, S 为输出信号, I_1, I_2 是 Wollaston 棱镜分光后两束正交光束的光强, θ_1 是入射光的方位角, θ_2 是 Wollaston 棱镜主轴与输出端光纤主轴的夹角, φ 为温度引起的相移量, $\Delta\beta$ 为光纤内的线双折射, Ω_F 为法拉第旋转角。当未加电流时调节元件使得 $\sin 2(\varphi_1 - \varphi_2 - \Omega_F) = 1$ 即 $S = 0$ 。设待测电流为 2kA, 实验中光纤环绕圈数约为 9 圈, 根据 $\Omega_F = \nu N I$, 可以计算得理论上法拉第旋转角度为 4.8° , 同时根据 (11) 式分析可知, 理论上温度每变化 10°C 光纤主轴偏移 0.5° , 由 (12) 式可知输出信号经过 10°C 后输出信号变化了 21%, 当待测电流增加到 4kA 时, 输出信号变化 9%。因此, 可以通过增加法拉第效应来增加系统的稳定性, 或增加温度补偿装置来减少温度所引起的相移影响。

1.3 温度对输出端偏振态的影响

对于扭转光纤, 因扭转光纤环内部的线性双折射

与圆双折射及其温度对它们的影响都不易直接测量, 将从输出偏振态的角度来探讨温度对于扭转光纤环性能的影响。根据耦合模理论, 可以得到光纤内两个正交偏振模式场的解析方程是光纤长度的函数。利用 Jones 矩阵来分析扭转光纤输出端光偏振态。通常扭转会引起常规单模光纤的主轴旋转一定的角度 $\theta = \alpha L$, 原来的本地坐标系 (x, y) 在 $z = L$ 处变为旋转坐标系 (x', y') , 当输入圆偏振光时, 得到旋转坐标系下的输出端的消光比表达式为^[13, 14]:

$$R(L) = \left[\frac{A_r(L)}{A_l(L)} \right]^2 = \frac{\frac{\rho^2}{1 + \rho^2} \sin^2 \alpha L}{\cos^2 \alpha L + \frac{1}{1 + \rho^2} \sin^2 \alpha L} \quad (13)$$

式中, $A_r(L)$ 表示输出端右旋圆偏振分量, $A_l(L)$ 表示输出端左旋圆偏振分量, $\rho = \frac{-\Delta\beta}{2\alpha}$ 。由 (13) 式可以发现, $R(L)$ 是一个关于光纤长度的振荡函数, 其最小值为 0, 最大值为 $(\Delta\beta/2\alpha)^2$ 。

若将偏振光的消光比用 dB 表示, 则有:

$$\begin{cases} \eta = -10 \log R(L) = 20 \log 2\alpha - 20 \log \Delta\beta \\ \frac{d\eta}{dT} = -20 \frac{1}{\Delta\beta} \frac{d\Delta\beta}{dT} \end{cases} \quad (14)$$

对于文中所用光纤, 由 (7) 式可以计算得到消光比随温度的变化量为 4.27×10^{-4} dB。由以上理论分析可以发现温度对于输出消光比本身影响很小。

2 实验测量

实验用光纤为截止波长小于 $1.3 \mu\text{m}$ 常规单模光纤, 光纤长约 4m, 绕于弯曲直径为 15cm 的木轮子上, 经偏振棱镜起偏后, 再由 $\lambda/2$ 波片调节偏振方向后聚焦注入放在温度箱里的光纤环, 输出光仍由透镜变成平行光经检偏棱镜后由大面积光功率计接收。其中为了消除从温度箱内引到外面进行测量的尾纤的影响, 也对这两段尾纤进行与箱内光纤相同扭转率相同方向的扭转。实验装置如图 1 所示。

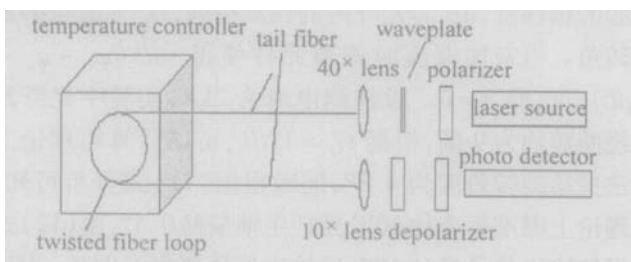


Fig 1 Temperature test configuration

利用上述装置, 调节温度箱温度范围从 $-20^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$, 可以发现输出端弱主轴方位角发生变化, 如图 2 所示。

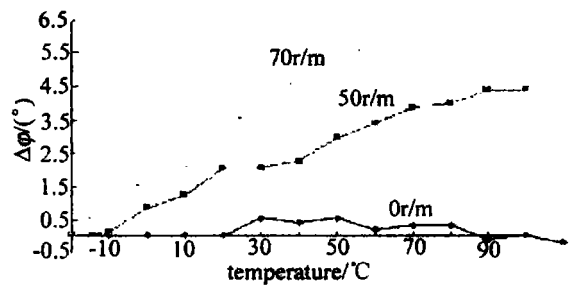


Fig 2 Effects of temperature on the phase drift of the weak principal axes in the twisted fiber loop with different twist rates

实验测量得到 $-20^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$, 70r/m 光纤输出方位角偏移了 7° , 50r/m 的输出方位角偏移 4.3° , 与理论计算值基本相符。由于实验过程中不可避免的测量误差以及温度箱置冷时干扰, 输出测量值有些波动。

实验测量温度对保偏能力的影响结果见图 3。

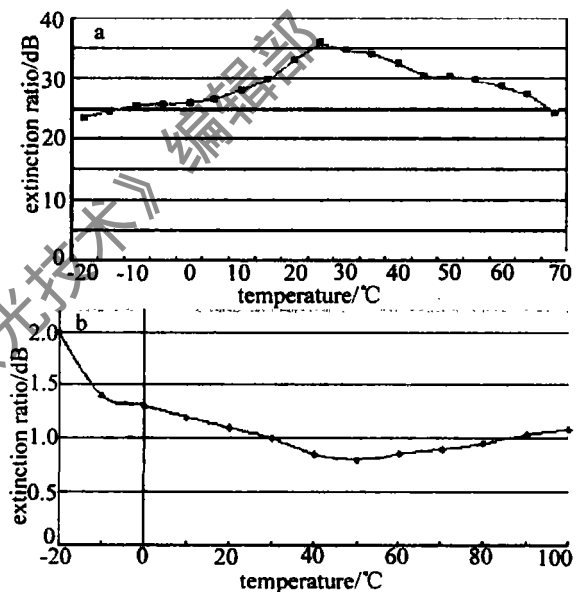


Fig 3 a— effects of temperature on output SOP when inputting linear polarized light b— effects of temperature on output SOP when inputting circular polarized light

当沿弱主轴方向输入 37.4dB 线偏振光时, 在 $-20^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内, 输出最大消光比为 36dB, 最小消光比为 24.6dB, 即输出光保持良好的线偏振特性; 当输入椭圆度为 0.38dB 的圆偏振光时, 在 $-20^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内, 输出最大椭圆度为 2dB, 最小为 0.8dB, 椭圆度变化很小, 由此可以看出温度对扭转光纤环的保偏性能影响很小。

3 结论

通过理论分析与实验结果, 由于温度对双折射的影响, 以及线性双折射主轴方向的偏移, 使得输出相位发生偏移, 因此, 当扭转光纤环应用于传统偏振型电流传感器时, 温度效应会降低系统的灵敏度和精确度。此外, 由以上分析可以看出, 当输入圆偏振光时, 由于温度引起的圆偏振光的相位偏移无法测出, 但当它运

用于 Sagnac 环中时, 因其温度效应是互易的, 而且扭转光纤环的保偏能力是稳定的, 所以将扭转光纤环运用于 Sagnac 干涉型电流传感器时, 系统的稳定性会提高^[15]。如果能够增加实验仪器的稳定性, 以及周围噪声及振动的影响, 实现结果会更理想一些。

参 考 文 献

- [1] SMITH A M. Optical fibres for current measurement applications [J]. *Opt & Laser Technol* 1980, 12: 25.
- [2] RASHLEIGH S C, ULRICH R. Magneto-optic current sensing with birefringent fibers [J]. *Appl Opt*, 1979(34): 768.
- [3] HUANG H C, HE Y C. Polarization behavior of spun fiber versus conventional fiber under strong slight twisting [J]. *Microwave and Optical Technology Letters* 1995, 9(1): 37~41.
- [4] DONG X P. Phase drift compensation for electric current sensor employing a twisted fiber or a spun highly birefringent fiber [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2000, 6(5): 803~809.
- [5] LIANG R I, PAYNE D N. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers [J]. *J Lightwave Technol* 1989, 7(12): 2084~2092.
- [6] SMITH A M. Birefringence induced by bends and twists in single-

- mode optical fiber [J]. *Appl Opt* 1980, 19(15): 2606~2611.
- [7] CHU P L. Thermal stress induced birefringence in single mode elliptical optical fiber [J]. *Electron Lett* 1982, 18(1): 45~47.
- [8] ECKHOFF W. Stress induced single polarization single mode fiber [J]. *Opt Lett* 1982, 7: 629~631.
- [9] SCHNEIDER H, HARMS H, PAPP A *et al*. Low-birefringence in single mode optical fibres: preparation and polarization characteristics [J]. *Appl Opt* 1978, 17: 3035~3037.
- [10] ULRICH R, RASHLEIGH S C, ECKHOFF W. Bending-induced birefringence in single mode fibres [J]. *Opt Lett* 1980, 5: 273~275.
- [11] ULRICH R, SMON A M. Polarization optics of twisted single mode fibres [J]. *Appl Opt* 1979, 18: 2241~2251.
- [12] DONG X P, CHU B C, BACHANG K S. An electric current sensor employing twisted fiber with compensation for temperature and polarization fluctuations [J]. *Meas Sci Technol* 1997, 8: 606~610.
- [13] BORN M, WOLF E. *Principals of optics* [M]. 2nd ed. New York: Pergamon, 1970.
- [14] BARLOW A J, PAYNE D N. Polarisation maintenance in circular birefringent fibers [J]. *Electron Lett* 1981, 17: 388~389.
- [15] BLAKE J, TANTASWADIB, de CARVALHO R T. In-line Sagnac interferometer current sensor [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(1): 116~121.

(上接第 39 页)

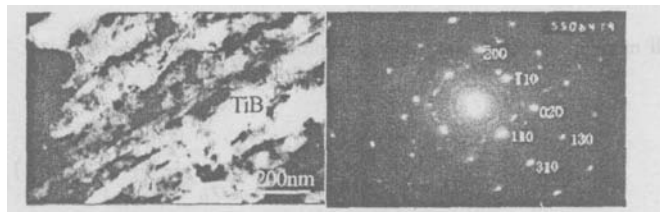


Fig 6 TEM morphology and the selected area electronic diffraction patterns (SAED) of TiB

共同参与衍射。衍射斑均有呈现环状的趋势, 说明枝晶间的硬质颗粒非常细小均匀, 在进行选区时多个晶粒参与了衍射。

3 结 论

(1) 45# 钢表面激光熔覆 TiB、Ni 元素粉末, 原位生成了 γ -Fe/ γ -Ni 固溶体和 TiB_2 、TiB 以及 Ni_4B_3 等硬质颗粒, 涂覆层与基体冶金结合, 表现为 1 条白亮带, 涂层组织均匀、细小, 没有裂纹和孔洞等宏观缺陷。熔覆层枝晶生长具有方向性, 与基体结合界面处垂直于界面生长。

(2) B 和 Ti 所生成的 TiB 和 TiB_2 陶瓷颗粒弥散分布在熔区中, B 和 Ti 有相同的空间分布。激光熔覆复合合金涂层的微观组织为典型的树枝晶, TiB_2 、TiB 分布在枝晶内和枝晶间。

参 考 文 献

- [1] LI Q, LEI T Q, MENG Q Ch. Transmission electron microscopy for microstructural characterization of the laser clad NiCrBSiC alloy [J]. *Chinese Lasers* 1999, A26(4): 372~378.
- [2] 武晓雷, 陈光南. 原位 TiC/金属基激光熔覆涂层的微结构特征 [J]. *材料热处理学报*, 1998, 12(4): 1~8.
- [3] OUYANG J H, PEI Y T, LEI T Q *et al*. Tribological behaviour of laser clad TiCp composite coating [J]. *Chinese Lasers* 1995, A22: 144.
- [4] 张 松, 张春华, 吴维文 *et al*. Ti6Al4V 表面激光熔覆原位自生 TiC 增强钛基复合材料及磨擦磨损性能 [J]. *金属学报*, 2001, 37(3): 315~320.
- [5] 查 莹, 周昌炽, 唐西南 *et al*. 改善激光熔覆镍基合金和陶瓷硬质相复合涂层性能的研究 [J]. *中国激光*, 1999, A26(10): 947~950.
- [6] ZHU X K. Research on synthesis of in situ composite AlTiB₂ by combustion synthesis [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 1995, 13(4): 249~251.
- [7] 魏 仑, 陈庆华, 龙晋明 *et al*. 激光熔覆原位自生复相陶瓷颗粒增强涂层 [J]. *激光技术*, 2002, 26(4): 246~249.
- [8] 何代华, 付正义, 王 皓 *et al*. 自蔓延高温合成技术焊接制备 (TiB₂+Fe)/Fe 结构材料 [J]. *陶瓷学报*, 2001, 22(3): 147~151.
- [9] LEWIS D III, SINGH M, FISHMAN S G. In site composites [J]. *Advanced Material & Processes* 1995, 7: 29~31.
- [10] 储双杰, 吴人洁. 凝固速度对金属基复合材料组织和力学性能的影响 [J]. *稀有金属*, 1997, 21(1): 58~63.