

45 钢高温拉伸峰值应力和变形储能与 Z 参数的关系函数研究

Functions Correlating Tensile Peak Stress and Deformation
Stored Energy of 45 Steel at Elevated Temperature
with Zener-Hollomon Parameter

黄光杰, 钱宝华, 游 红

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

HUANG Guang-jie, QIAN Bao-hua, YOU Hong

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

摘要: 通过 Gleeble-1500D 热模拟试验机进行高温拉伸实验, 变形温度范围 1123~1273K, 初始应变速率范围 $0.01 \sim 5 \text{ s}^{-1}$, 并采用双曲正弦模型, 研究了 45 钢在高温拉伸条件下的峰值应力、变形储能与 Zener-Hollomon 参数的关系函数。结果表明: 峰值应力与 Z 参数之间能较好地满足双曲正弦关系, 其激活能为 336.0 kJ/mol ; 同时, 变形储能与 Z 参数满足 $\Delta G_D = 0.1269(\ln Z)^2 - 6.8262(\ln Z) + 93.873$ 函数关系, 且随着应变速率的增加和变形温度的下降而上升, 其值在 $2 \sim 20 \text{ J/mol}$ 之间波动。

关键词: 峰值应力; 关系函数; Zener-Hollomon 参数; 变形储能

中图分类号: TG142 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)12-0021-05

Abstract: In order to research on correlative functions of peak stress and deformation stored energy with Zener-Hollomon parameter, the elevated temperature tensile test of 45 steel was carried out at Gleeble-1500D thermal-mechanical simulator, in the range of deformation temperature 1123-1273K and initial strain rate $0.01 \sim 5 \text{ s}^{-1}$. And a hyperbolic sine model was also introduced. The results indicate that the hyperbolic sine relationship can satisfactorily describe the correlation between peak stress and Zener-Hollomon parameter with the activation energy of 336.0 kJ/mol , while the constitutive relationship of deformation stored energy with Zener-Hollomon parameter can be represented by an equation of $\Delta G_D = 0.1269(\ln Z)^2 - 6.8262(\ln Z) + 93.873$. Furthermore, the value of deformation stored energy increases with the decreasing of deformation temperature as well as the increasing of strain rate and fluctuates within the range of $2 \sim 20 \text{ J/mol}$.

Key words: peak stress; correlative function; Zener-Hollomon parameter; deformation stored energy

按照经典理论, 材料在热变形过程中的流变应力是组织状态(S)和变形参数($\dot{\epsilon}, T$)的函数, 组织状态的演变可认为是材料对外界能量输入的动态响应, 即 $S = S(\dot{\epsilon})$ 。在粘塑性理论的研究基础上, 人们通过进行热加工过程的物理模拟和实验数据分析, 得到了诸多关于流变应力与材料组织状态、变形参数之间的解析函数关系。大体上可以分为两类: 一类是包含应变项的流变应力本构模型, 有适用于大变形、高温高应变速率条件的 Johnson-Cook 模型^[1]; 另有 Zuzin 等人提出的含温度项的定量半经验幂指数关系模型^[2]及简化模型等。第二类是不包含应变项的流变应力物理模型, 包括适用于低应力水平的幂指数模型、高应力水平的

指数模型以及由 Garofalo 建议而统一的双曲正弦模型^[3-5], 使之适用于峰值应力或稳态应力状态。双曲正弦模型并不考虑应变项, 然而可以方便地用于求解材料在高温变形过程中的相关常数。

峰值应力和变形储能作为材料在热加工过程中的两个重要参量, 一定程度上决定了热加工过程中力能参数的设置以及材料形变组织的演变。与此同时, 变形储能的存在还影响形变奥氏体向铁素体转变的温度, 即所谓的形变诱导铁素体相变(Deformation Induced Ferrite Transformation, DIFT)^[6]。本工作采用双曲正弦模型并引入 Zener-Hollomon 参数(即温度补偿应变速率因子), 以研究变形条件即 Z 参数对 45

钢高温拉伸峰值应力、变形储能的影响规律并对相应的关系函数进行了拟合。其研究结果对 45 钢热加工工艺制度的优化具有一定的参考价值。

1 实验材料与方法

实验材料采用 45 钢热轧态棒材(化学成分,质量分数/%: 0.42~0.50 C, 0.17~0.37 Si, 0.50~0.80 Mn, Cr ≤0.25, Ni ≤0.30, Cu ≤0.25, 余量为 Fe 及少量杂质元素), 终轧温度 850 ℃(1123K)。经退火处理后将其车削加工成高温拉伸试样, 具体尺寸如图 1 所示。然后在 Gleeble 1500D 热模拟试验机上进行完

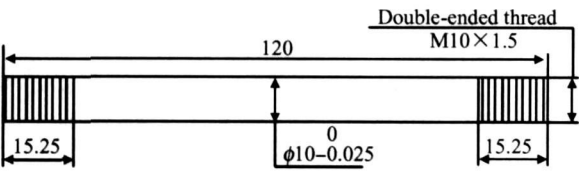


图 1 高温拉伸试样加工尺寸要求

Fig 1 The machining requirement for dimensions of specimen applied in tensile test at elevated temperature

全奥氏体区的高温拉伸实验, 拉伸段长度设定为 50mm, 变形温度 1123, 1173, 1223, 1273K, 初始应变速率 0.01, 0.1, 1, 5 s⁻¹。高温变形过程中采用真空保护以减少试样表面氧化。拉伸直至断裂后采用空冷方式将试样冷却至室温状态, 整个过程由计算机全程控制并自动采集相关数据。

2 实验结果

45 钢在不同变形温度和初始应变速率条件下的高温拉伸曲线如图 2 所示。考虑到高温拉伸过程中存在缩颈现象, 势必导致后续阶段的真应力-真应变曲线严重失真。故截取从原点至略超过峰值应力对应应变段的拉伸曲线, 视为真应力-真应变曲线。

由图 2 可见, 45 钢在不同变形条件下的高温拉伸曲线即流变曲线均呈现出峰值特征。且随着变形温度的升高, 材料的真应力水平下降; 随着初始应变速率的增加, 真应力水平上升。同时, 在相同变形温度条件下, 随着初始应变速率的增加, 出现峰值应力所需应变

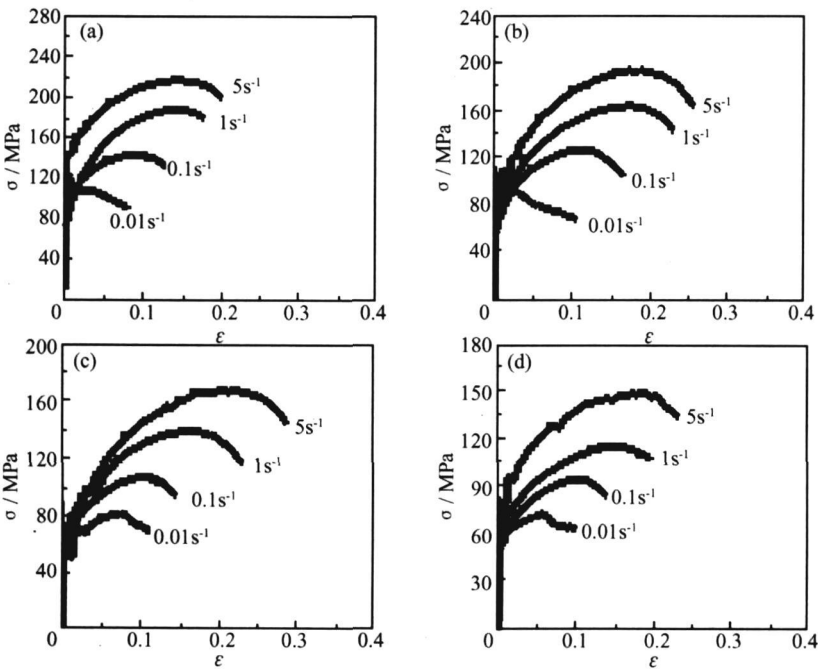


图 2 45 钢在不同变形温度和初始应变速率条件下的高温拉伸曲线

(a) 1123K; (b) 1173K; (c) 1223K; (d) 1273K

Fig 2 The elevated temperature tensile curves for 45 steel at variable deformation temperatures and initial strain rates

(a) 1123K; (b) 1173K; (c) 1223K; (d) 1273K

量增加。这是由于随着应变速率的增加, 材料中螺位错的交滑移和刃位错的攀移不能充分进行, 交滑移和

攀移所提供的软化程度较小, 故出现峰值应力相对滞后后即所需的应变增量增加。

3 分析与讨论

3.1 峰值应力对应瞬时应变速率值对初始应变速率值的修正

容易导出应变速率与变形速度之间具有 $\dot{\epsilon} = v/l$ 的关系。实际控制试验机液压轴行进速度即试样变形速度 v 值不变。随着拉伸过程的进行, 试样长度 l 值增大, 应变速率 $\dot{\epsilon}$ 降低^[7]。图 2 所截取曲线段的应变量均在 0.3 以内, l 值变化并不显著。由图 3 可以看出, 应变量小于 0.3 时, ϵ_t 曲线的斜率即应变速率基本保持不变, 故采用初始应变速率来表征所截取曲线段的应变速率水平是恰当的。

但在下文的关系函数拟合过程中, 为精确起见, 采用 $\dot{\epsilon}_p = v/l_p$ 计算峰值应力对应的瞬时应变速率, 从而

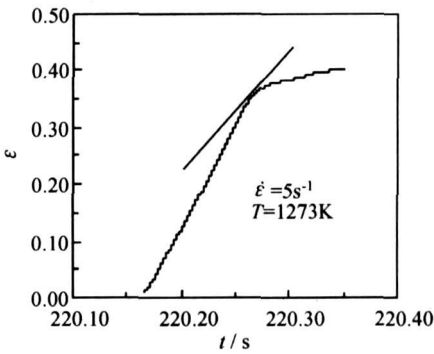


图 3 瞬时应变速率

Fig. 3 The instantaneous strain rate

对初始应变速率 $\dot{\epsilon}$ 进行修正。其中 $l_p = l_0 \exp(\Phi)$, l_0 为拉伸段长度, 取 50mm; Φ 为峰值应力对应的应变量。不同变形条件下的 $\dot{\epsilon}_p$, σ_p 值如表 1 所示。

表 1 不同变形条件下的峰值应力及其对应的瞬时应变速率

Table 1 Peak stress and its instantaneous strain rate under different deformation conditions

| T/K | $\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | $\dot{\epsilon}_p/s^{-1}$ | σ_p/MPa | T/K | $\dot{\epsilon}/s^{-1}$ | $\dot{\epsilon}_p/s^{-1}$ | σ_p/MPa |
|-------|-------------------------|---------------------------|----------------|-------|-------------------------|---------------------------|----------------|
| 1123 | 0.01 | 0.00997 | 122.06 | 1223 | 0.01 | 0.00928 | 81.83 |
| | 0.1 | 0.0921 | 143.62 | | 0.1 | 0.0899 | 107.75 |
| | 1 | 0.868 | 187.90 | | 1 | 0.851 | 139.39 |
| | 5 | 4.352 | 217.48 | | 5 | 4.012 | 168.00 |
| 1173 | 0.01 | 0.00998 | 103.45 | 1273 | 0.01 | 0.00947 | 71.59 |
| | 0.1 | 0.0893 | 125.39 | | 0.1 | 0.0904 | 94.18 |
| | 1 | 0.843 | 162.16 | | 1 | 0.865 | 114.75 |
| | 5 | 4.138 | 192.19 | | 5 | 4.151 | 148.49 |

3.2 峰值应力与 Z 参数的关系函数研究

文献资料^[3-5] 和大量研究表明, 在稳态流变或峰值应力状态下, 金属或合金材料的变形温度 T 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与流变应力 σ 之间满足双曲正弦关系:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \tag{1}$$

式中: A , α , n 为材料常数; R 为气体常数, 取 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; Q 为变形激活能。引入 Zener-Hollomon 参数, 可得:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{2}$$

由式 $\alpha = \beta/n'$ 可以确定 α 的值, 其中 β 与 n' 分别是指数关系 $\dot{\epsilon} = A_1 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT)^*$ 和幂指数关系 $\dot{\epsilon} = A_2 \sigma^{n'} \exp(-Q/RT)^{**}$ 中的参数。分别对 $*$ 和 $**$ 等式两边取自然对数并进行线性拟合, 可得 β 与 n' 的值分别为 0.0694 和 9.191, 从而得到 $\alpha = 0.0694/9.191 = 0.00755 \text{ MPa}^{-1}$ 。

同理, 对式(1)等号两边取自然对数, 可得式(3)。代入 α 值进行线性拟合, 其结果如图 4 所示。采用各温度下直线斜率取算术平均值的方法, 得到 $n = 6.895$ 。

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - Q/RT \tag{3}$$

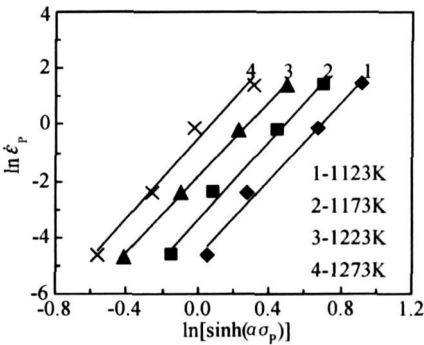


图 4 峰值应力与瞬时应变速率的关系

Fig. 4 The relation between peak stress and instantaneous strain rate

由式(3)变换可得式(4)。在相同初始应变速率下, 视峰值应力对应的瞬时应变速率处于同一应变速率水平, 并以初始应变速率表征其应变速率水平。

$$\ln [\sinh(\alpha\sigma)] = Q/nRT + (\ln \dot{\epsilon} - \ln A)/n \tag{4}$$

由此, 对式(4)等号两边求偏导并进行变换即得:

$$Q = -nR \left\{ \partial [\ln [\sinh(\alpha\sigma)]] / \partial (1000/T) \right\}_{\dot{\epsilon}} \tag{5}$$

此时, 变形激活能 Q 的单位为 kJ/mol 。由式(3)

可以得到, $n = \{ \partial(\ln \dot{\sigma}) / \partial[\ln \sinh(\alpha \sigma_p)] \} \tau = 6.895$ 。通过线性拟合, 如图 5 所示, 并对各应变速率水平下直线斜率取算术平均值得: $\{ \partial[\ln \sinh(\alpha \sigma)] / \partial(1000/T) \}_{\varepsilon} = 5.861$ 。将以上各值代入式(5)得 $Q = 6.895 \times 8.314 \times 5.861 = 336.0 \text{ kJ/mol}$ 。

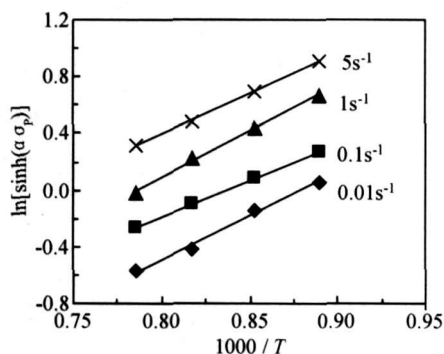


图 5 变形温度对峰值应力的影响

Fig. 5 The influence of deformation temperature on peak stress

对式(2)等号两边取自然对数得到式(6)。作 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ 散点图并进行线性拟合, 如图 6 所示, 得到直线的截距 31.218 即为 $\ln A$ 值, 故 $A = 3.612 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 。

$$\ln Z = n \ln[\sinh(\alpha \sigma)] + \ln A \quad (6)$$

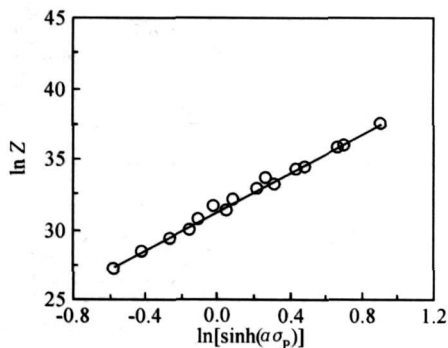


图 6 Z 参数对峰值应力的影响

Fig. 6 The influence of Z parameter on peak stress

综上可得峰值应力与 Z 参数的关系函数 $Z = \dot{\sigma} \exp(336.0 \times 10^3 / RT) = 3.612 \times 10^{13} [\sinh(0.00755 \sigma_p)]^{6.895}$ 。结合式(2)以及双曲正弦函数的定义可得:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (7)$$

从而得到峰值应力与 Z 参数的解析函数:

$$\sigma_p = \frac{1}{0.00755} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{3.612 \times 10^{13}} \right)^{1/6.895} + \left[\left(\frac{Z}{3.612 \times 10^{13}} \right)^{2/6.895} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (8)$$

拟合所得曲线与实验值之间的相互关系如图 7 所

示。可以看出, 峰值应力与 Z 参数之间能较好地满足双曲正弦关系。

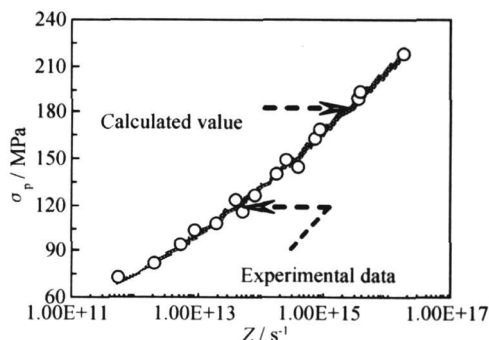


图 7 计算值与实验值之间的相互关系

Fig. 7 The comparison of calculated value and experimental data

3.3 变形储能与 Z 参数的关系函数研究

材料在热变形过程中, 部分形变能不能转化为热能或存在热弛豫, 主要以位错的形式储存下来, 即为变形储能。变形储能的存在将引起体系自由能的变化, 并转变为相变驱动力^[6,8]。故形变能的存在将促进变形奥氏体向铁素体转变温度的升高, 即形变诱导铁素体相变(DIFT)。从而, 进行变形储能的研究具有重要价值。由位错理论可知, 单位体积内的位错能为:

$$\Delta G_{ds} = \mu b^2 \quad (9)$$

而流变应力与位错密度的关系为:

$$\sigma = M k \mu b \rho^{1/2} \quad (10)$$

式中: μ 为剪切弹性模量; ρ 为位错密度; b 为柏氏矢量; M 为 Taylor 因子; k 为材料常数。则摩尔体积内的变形储能为:

$$\Delta G_D = V \sigma^2 / (M^2 k^2 \mu) \quad (11)$$

此处, V 为奥氏体的摩尔体积, 忽略温度的影响, 取 $V = 7.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ^[6]。对于面心立方金属 M 取 3.11, 而奥氏体的剪切弹性模量 μ 为 79 GPa, k 取 0.15^[8]。代入峰值应力并对 Z 参数进行非线性拟合, 得到的结果如图 8 所示。

$$\Delta G_D = 0.1269(\ln Z)^2 - 6.8262(\ln Z) + 93.873 \quad (12)$$

式(12)即为 45 钢在峰值应力下变形储能与 Z 参数的关系函数, 其值在 2~20 J/mol 之间。由图 8 可知, 在一定条件下, 变形储能随着 Z 参数值的增加而上升, 即随着应变速率的增大和变形温度的降低, 45 钢形变组织中储存的位错能增加。

由图 8 可以看出, 45 钢在完全奥氏体区变形时, 位错能较低, 尤其是变形温度较高、应变速率较低时, ΔG_D 小于 10 J。在高温变形条件下, 奥氏体组织容易通过动态回复或动态再结晶而耗散变形储能。

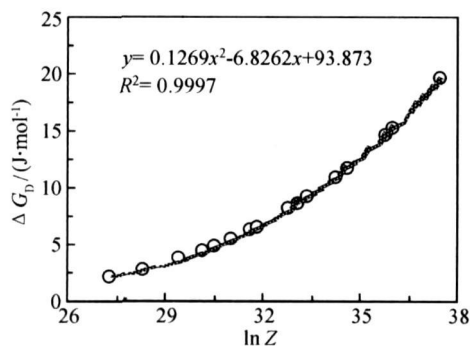
图 8 45 钢变形储能与 Z 参数之间的关系

Fig. 8 Deformation stored energy of 45 steel as a function of Z parameter

4 结论

(1) 利用双曲正弦模型,可以得到 45 钢高温拉伸峰值应力与 Z 参数的解析函数关系:

$$\sigma_p = \frac{1}{0.00755} \ln \left(\left(\frac{Z}{3.612 \times 10^{13}} \right)^{1/6.895} + \left[\left(\frac{Z}{3.612 \times 10^{13}} \right)^{2/6.895} + 1 \right]^{1/2} \right)$$

其中, $Z = \exp(336.0 \times 10^3 / RT)$, 变形激活能 $Q = 336.0 \text{ kJ/mol}$ 。

(2) 45 钢变形储能与 Z 参数之间满足 $\Delta G_D = 0.1269(\ln Z)^2 - 6.8262(\ln Z) + 93.873$ 函数关系,并且随着应变速率的增加和变形温度的下降而上升, ΔG_D 值在 2~20 J/mol 之间波动。

参考文献

- [1] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures[A]. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics[C]. The Hague, Netherlands: International Ballistics Committee, 1983. 541- 547.
- [2] ZUZIN W I, BROWMAN M YA, MELIKOV A F. Flow resistance of steel at hot forming[M]. Moscow: Metallurgy, 1964.
- [3] MCQUEEN H J, YUES, RYAN N D, et al. Hot working characteristics of steels in austenitic state[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 53 (1- 2): 293- 310.
- [4] AKHTAR S K, LIANG R Q. Behaviors of three BCC metal over a wide range of strain rates and temperatures: experiments and modeling[J]. International Journal of Plasticity, 1999, (15): 1089- 1109.
- [5] TAKUDA H, FUJIMOTO H, HATTA N. Modelling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, (80- 81): 513- 516.
- [6] 翁宇庆 等著. 超细晶钢- 钢的组织细化理论与控制技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003. 118- 133.
- [7] 王瑜, 林栋梁, CHIC LAW. TiAl 合金高温拉伸流变应力与 Zener-Hollomon 因子的关系函数[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34 (3): 338- 341, 346.
- [8] 董瀚, 孙新军, 刘清友, 等. 变形诱导铁素体相变- 现象与理论[J]. 钢铁, 2003, 38 (10): 56- 67, 55.

收稿日期: 2007-01-16; 修订日期: 2007-06-18

作者简介: 黄光杰(1964-),男,博士,副教授,主要从事金属结构材料微观组织及加工工艺的研究,联系地址:重庆大学材料科学与工程学院材料加工系(400045)。

《材料工程》杂志诚征广告

《材料工程》创刊于 1956 年,是经国家科委和国家新闻出版署批准并向国内外公开发行的全国性出版物,是综合性的材料科学与技术刊物,内容以先进性、实用性见长,同时也是全国材料专业核心期刊和全国科技论文统计用刊,是美国著名检索刊物“工程索引(EI)”、“金属文摘(MA)”及国内多家检索刊物收录用刊。多次在全国、国防科工委系统、航空工业系统获奖。

《材料工程》为月刊,发行遍及全国各个省市(包括港、澳、台地区)和欧美一些国家。主要发行范围包括我国航空航天工业、冶金工业、石化工业、机械电子工业、轻工业、建材工业等系统,空军、海军,以及全国各大院校和研究机构。读者群包括领导干部、管理人员、经贸人员、科研人员、工程技术人员及教学人员等。

除印刷版外,《材料工程》还被中国学术期刊社选用出版光盘版,并入选其专用数据库。同时,《材料工程》已经加入万方数据(Chinainfo)系统科技期刊群,上网为各界读者服务。

《材料工程》专业面宽,发行量大,在国内外材料、工艺界领域及其相关领域具有较大影响。愿本刊成为企事业单位科研、生产与技术推广的窗口,为国内外广告客户与企业间架起一座信息桥梁。

地址:北京 81 信箱 62 分箱《材料工程》编辑部

邮编:100095

电话:(010)62496276