

碳纤维增强混凝土的拉敏特性及梁构件的机敏监测

Study on Pulling Sensitivity Character of CFRC and Smart Monitoring of Beam Specimens

黄龙男¹, 张东兴¹, 吴思刚², 赵景海¹

(1 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2 哈尔滨工业大学交通学院, 哈尔滨 150006)

HUANG Long-nan¹, ZHANG Dong-xing¹, WU Si-gang², ZHAO Jing-hai¹

(1 School of Material Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2 School of Communication, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

摘要: 碳纤维具有良好的导电性, 电阻率变化率与所处应力场具有稳定的对应关系, 在混凝土结构中构造一定厚度的碳纤维增强混凝土机敏层, 并通过实时监测电阻率变化率, 可对结构的实时荷载和变形程度进行预报。本工作研究了碳纤维增强混凝土本征拉敏特性规律, 并将其应用于钢筋混凝土梁构件中, 实现了对构件实时荷载和变形的在线监测。

关键词: 碳纤维增强混凝土; 拉敏特性; 实时监测

中图分类号: TU528 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2005) 02-0026-04

Abstract: The electrical resistivity variation of fiber with good electric conductivity has stable corresponding relationship with its stress field. Through the conformation of carbon fiber reinforced concrete (CFRC) smart layer with definite height in concrete structure and real-time monitoring of electrical resistivity variation, the structure real-time loading and the degree of damage could be forecasted. The intrinsic pulling sensitivity regularity of CFRC was studied, and the regularity was used in reinforced concrete beam specimens, which realized the online monitoring of real-time loading and deformation.

Key words: carbon fiber reinforced concrete; character of pulling sensitivity; real-time monitoring

随着科学技术的进步, 现代工业的发展及未来的人类需求, 混凝土结构正向着大型化、复杂化方向发展。如高层建筑, 离岸结构, 新型桥梁等在复杂的服役环境中将受到设计荷载的作用, 结构不可避免的产生损伤累积, 甚至出现突发事件。因此, 未来的建筑结构迫切需要采用有效的手段来进行监测及损伤预报。各种突发性外在因素的影响使结构面临损伤、损伤积累等问题, 结构的安全受到威胁, 没有被探测到的结构损伤将改变结构的强度和刚度, 引发更大的结构损伤积累, 最终将导致结构的突发性失效。为了保证结构的安全, 需要建立探测结构损伤的方法, 进而能够快速准确地探测到损伤的出现和损伤的位置, 这可以帮助人们对结构进行及时修补或改变结构的操作使用方法, 以降低结构损伤积累的程度, 延长结构的使用寿命。

利用碳纤维增强混凝土 (CFRC) 具有本征的机敏

特性, 可以实现结构、材料、功能一体化。在混凝土结构中复合 CFRC 机敏层, 可对混凝土结构的损伤和各种突发性外在因素的影响进行自诊断、实现损伤及损伤积累的早期预报, 无疑具有重要的意义。本工作通过实验来研究 CFRC 的机敏特性, 并应用于梁构件, 实现对结构荷载和变形的实时监测, 并给出预警值。

1 CFRC 的拉敏特性

短切碳纤维增强混凝土作为一种本征传感器具有其他传感器无法比拟的优点。由于碳纤维具有高强、高模量及耐腐蚀特性, 结构中的 CFRC 层不仅不会影响混凝土结构性能, 而且还可提高混凝土结构的抗弯强度、抗弯刚度, 降低其收缩率和阻止裂纹扩展。其次, 碳纤维具有良好的导电性, 且其电阻率变化率

与应力、应变场有稳定的对应变化规律, 混凝土中加入少量的碳纤维, 即可赋予 CFRC 的导电特性和对应力、应变的敏感特性。通过实时监测其电阻率变化率, 可实现对结构物力学状态和损伤程度的监测。

基于目前国内外对于碳纤维增强水泥压敏性研究^[1-6], 根据特定构件的实际受力状态, 本研究设计了层合型混凝土试件, 即在混凝土的结构的受拉区设置较薄的 CFRC 机敏监测层, 构成混凝土层+ CFRC 层的层合构造, 根据梁截面下缘主要受拉伸应力作用特点, 研究 CFRC 的电阻率变化率与结构实时力学状态间的内在联系, 对应于 CFRC 的压敏特性, CFRC 受拉区电阻变化与受力状态间的关系特性定义为拉敏特性。

1.1 试件的设计与制作

实验用混凝土的配合比为水泥 砂 碎石 CMC 水= 1 1.52 2.96 0.01 0.48, 水灰比为 $W/C = 0.48$, 混凝土强度等级为 C30; 碳纤维采用 T700 SC-12K, 纤维长度为 5mm, 纤维掺量为水泥质量的 0.5%。

本实验设计了如图 1 所示层合型试件, 掺有碳纤维的 CFRC 底层和纯混凝土层一次性成型, 以减小 CFRC 层与纯混凝土层间界面缺陷。CFRC 层的厚度为 20mm。各组试件标准养护 28 天, 并在室温自然环境下放置 30 天以后进行测试。测试时在试件的跨中下缘设置电极和粘贴应变片。试件截面尺寸为 100mm × 100mm。

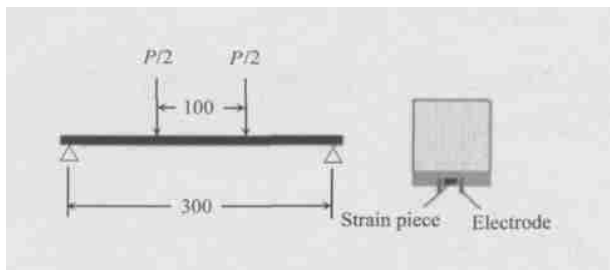


图 1 三点弯曲试件示意图

Fig. 1 Schematic sketch of tri-devision point bending specimens

1.2 CFRC 拉敏特性实验研究

图 2 为实验测得的下缘电阻率变化率与荷载关系曲线。

由图 2 可以看出 CFRC 层在拉应力作用下, 电阻发生明显变化, 并且随着荷载的增大, 电阻率变化率逐渐增加, 表现出 CFRC 的拉敏特性。拉敏规律可以解释为随着荷载的增大, CFRC 试件下缘的应变不断增大, 进而引发 CFRC 层内微裂纹的产生与扩展, 绝缘位阻增加, 表现为电阻变化随荷载的增加而增大的

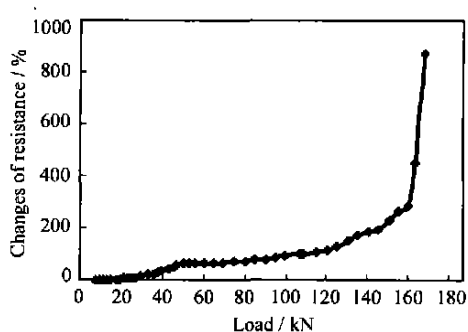


图 2 电阻率变化-荷载关系曲线

Fig. 2 The electrical resistivity variation-load curve

变化规律。观察电阻变化规律, 小荷载区域, 混凝土没有开裂时, 电阻变化较小, 曲线较平缓, 电阻随着荷载增大而缓慢增大; 当荷载增大时 CFRC 层所受应力达到混凝土开裂应力时出现第一个拐点, 电阻率变化率随裂纹的开展增速加快; 荷载继续增大, 进入裂纹稳定增长区域, 电阻率变化率也随之进入稳定增长时期, 直至大量裂纹间形成贯通性裂缝电阻率变化率也急剧增长, 这个阶段大约在 10% ~ 80% 极限应变范围内, 实际的混凝土结构主要就在这个范围内工作, 这个阶段的电阻率变化较大, 适于测量。

图 3 为下缘电阻率变化率与下缘应变关系曲线。该曲线体现出了 CFRC 内在的拉敏特性规律, 而设置在结构中的 CFRC 层的应变, 又能反映结构的力学状态。因此, 合理归纳 CFRC 的电阻率变化率与拉伸应变的关系规律, 将对结构实时机敏监测有重要意义。

图 3 所示, 在下缘应变 600μ 处出现明显的拐点, 以此拐点为分界对 CFRC 层下缘电阻率变化率与应变关系进行分段拟合, 两阶段的拟合方程统一由以下拟合公式表示:

$$y = (a + c\epsilon_x) / (1 + b\epsilon_x) \quad (1)$$

式中: y 为电阻率变化率, 取百分数; ϵ_x 为下缘平均应变, 取测试应变 $\times 10^6$; a, b, c 为拟合系数, 在拐点前后取不同的系数, 即

拐点前段拟合系数:

$$a = 0 \quad b = -9.95 \times 10^{-4} \quad c = 5.86 \times 10^{-2};$$

拐点后段拟合系数:

$$a = 50.64 \quad b = -2.32 \times 10^{-4} \quad c = -6.89 \times 10^{-4};$$

相关系数分别为 $R^2 = 0.995$ 和 $R^2 = 0.990$ 。

由式 (1) 可得由电阻率变化率表示的下缘 CFRC 的应变为:

$$\epsilon_x = \frac{a - y}{by - c} \quad (2)$$

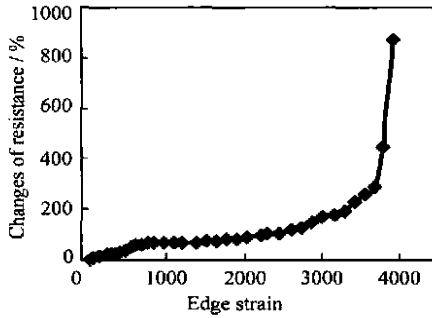


图3 电阻率变化-下缘应变关系曲线

Fig. 3 The electrical resistivity variation-lower limb strain curve

2 梁构件的安全自诊断

在梁构件中,构造CFRC机敏层,并利用CFRC的拉敏特性,可对梁构件的实时荷载和变形状态进行监测。由于弹性阶段和弹塑性阶段电阻率变化率-应变变化规律不同,以下分两个阶段建立机敏监测体系。

2.1 弹性阶段的CFRC层合梁构件的实时监测体系

若混凝土梁构件所受跨中最大弯矩为 M_{\max} ,根据经典层合理论,跨中底部发生的最大拉伸应力为:

$$\sigma_{cx} = \frac{M_{\max} E_c (h - \Delta)}{EJ} \quad (3)$$

式中: h 为梁截面高度; Δ 为上缘到中性轴的距离; EJ 为梁截面对中性轴的抗弯刚度; E_c 为CFRC的拉伸弹性模量,乱向短纤维增强复合材料在弹性阶段可由下式计算^[7]:

$$E_c = CE_f V_f + E_m V_m \quad (4)$$

式中: C 为乱向短纤维强度贡献系数,可采用体视学分析方法^[8]计算; E_f, E_m 分别为纤维和基体的弹性模量; V_f, V_m 分别为纤维和基体的体积分数。

根据虎克定律及式(2)、式(3)可得梁构件跨中弯曲承载力与电阻率变化率的关系为:

$$M_{\max} = \frac{\overline{EJ}(a - y)}{(h - \Delta)(by - c)} \quad (5)$$

如图1所示三分点弯曲简支梁,跨中弯矩与竖向荷载关系为:

$$M_{\max} = \frac{1}{6} PL \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得实时竖向荷载与电阻率变化率之间的关系为:

$$P = \frac{6 \overline{EJ}(a - y)}{L(h - \Delta)(by - c)} \quad (7)$$

三分点弯曲简支梁的跨中挠度为:

$$w_{\max} = \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EJ} \quad (8)$$

将式(7)代入上式可得实时跨中挠度与电阻率变化率之间的关系:

$$w_{\max} = \frac{23L^2(a - y)}{216(h - \Delta)(by - c)} \quad (9)$$

将实时监测到的跨中下缘应变-电阻率变化率关系式(2)与混凝土开裂应变 ϵ_{mu} 比较,当实时应变超过混凝土开裂应变时,混凝土开裂。因此开裂判据可写为:

$$y \geq \frac{a + c\epsilon_{mu}}{1 + b\epsilon_{mu}} \quad (10)$$

若实时监测到的跨中下缘应变 $\epsilon_{cx} > \epsilon_{mu}$,考虑开裂后主体应变从 ϵ_{mu} 减小到 $\epsilon_{mu}/2$ ^[7],当电极间距为 S 时,两电极间产生的裂纹宽度可写为:

$$W_f = S \left(\frac{a - y}{by - c} - \frac{\epsilon_{mu}}{2} \right) \quad (11)$$

2.2 极限状态的梁构件的实时监测体系

2.2.1 极限弯曲承载力监测

按混凝土结构设计规范规定,梁构件的跨中上缘受压区混凝土应变达到 ϵ_u 、受拉区钢筋达到屈服应变 ϵ_y 时对应的弯矩为极限弯曲承载力。根据平截面假设,极限状态时跨中下缘应变为:

$$\epsilon_{cmx} = \frac{(h - h_0)\epsilon_u + h\epsilon_y}{h_0} \quad (12)$$

将上式代入式(2)可得极限状态的预警电阻率变化率,即:

$$y_{\max} = \frac{k_1 c + a}{k_1 b + 1} \quad (13)$$

式中, $k_1 = [(h - h_0)\epsilon_u + h\epsilon_y]/h_0$ 。

2.2.2 刚度监测

CFRC层合梁构件弹塑阶段的挠度计算时,假定CFRC层合梁构件弹塑阶段的挠度曲线沿轴向按正弦波分布,变形仍满足平截面假定。若跨中挠度用 w_{\max} 表示,则满足两端简支边界条件的梁轴挠度曲线方程可写做:

$$w = w_{\max} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (14)$$

此时梁轴在跨中的曲率半径为:

$$R_m = \frac{L^2}{\pi^2 w_{\max}} \quad (15)$$

若跨中微段的上、下缘应变的绝对值分别为 ϵ^- 、 ϵ^+ 时,梁轴在跨中的曲率半径还可表示为:

$$R_m = \frac{h(2 + \frac{\epsilon^+}{\epsilon^-} - \frac{\epsilon^-}{\epsilon^+})}{2(\epsilon^+ + \epsilon^-)} \tag{16}$$

根据平截面假定，上、下缘应变之间有如下几何关系可写做：

$$\bar{\epsilon} = k_2 \epsilon^+ \tag{17}$$

式中： $k_2 = \epsilon_{cu} / k_1$ ， ϵ_{cu} 和 ϵ_y 分别表示混凝土的压缩极限应变和钢筋的屈服应变。

式（17）代入式（16）整理得曲率半径与下缘应变间的关系：

$$R_m = \frac{h[2 + (1 - k_2)\epsilon^+]}{2(1 + k_2)\epsilon^+} \tag{18}$$

比较式（15）和式（18），并考虑式（2）可得跨中挠度与电阻率变化率的关系：

$$w_{max} = \frac{2L^2(1 + k_2)(a - \gamma)}{h\pi^2[2(by - c) + (1 - k_2)(a - \gamma)]} \tag{19}$$

根据公路钢筋混凝土和预应力混凝土桥涵设计规范，钢筋混凝土桥梁，以汽车荷载（不计冲击力）计算的梁构件竖向挠度的允许值为 $[w] = L / 600\text{mm}$ ，将其代入式（19）可得刚度预警电阻率变化率，即：

$$\gamma_m = \frac{k_3c - k_4a}{bk_3 - k_4} \tag{20}$$

式中： $k_3 = 2[w]h\pi^2 \times 10^6$
 $k_4 = [w]h\pi^2(1 - k_2) - 2L^2(1 + k_2)。$

3 钢筋混凝土梁的实时监测实例

图 4 为在钢筋混凝土简支梁的下部复合 CFRC 机敏层的实验构件。

试件中混凝土采用 C30、钢筋采用热轧带筋 HRB400，为保证钢筋间的绝缘，纵筋、箍筋均预涂三

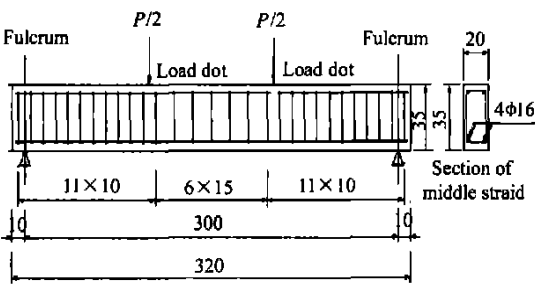


图 4 CFRC 层合构件构造示意图
Fig. 4 Schematic diagram of CFRC laminated specimens texture
遍绝缘漆；CFRC 机敏层厚度设计为 90mm，其碳纤维

采用 T 700 短切纤维，掺量为水泥质量的 0.5%，折合碳纤维在 CFRC 中的体积掺量为 0.15%，纤维长度为 5mm。梁构件的几何尺寸（图中尺寸以 cm 计）、配筋及加载情况如图 4 所示，所用材料性能参数如表 1。

表 1 材料性能参数
Table 1 Material property parameters

Material	Concrete		Reinforcing steel bar	
	Intensity design / MPa	Elastic modulus / GPa	Intensity design / MPa	Elastic modulus / GPa
Extend capability	14.3	30	300	200
Compress capability	1.43	25		

层含有 CFRC 的混凝土梁构件，由图 4 所示几何尺寸和表 1 所列数据计算得截面中性轴位置、抗弯刚度分别为：

$\Delta = 0181\text{m}$ ， $\overline{EJ} = 23.23 \times 10^6 \text{Nm}^2$ ，将其代入式（7），并考虑式（2）得弹性阶段用电阻率变化率监测的实时荷载可由下式计算：

$$P = \frac{2.75 \times 10^6(3 - \gamma)}{8.66\gamma - 539} \tag{21}$$

将表 1 数据和几何尺寸代入式（13）和式（20）可得对应极限设计荷载的电阻率变化率预警值和对应设计刚度的电阻率变化率预警值。

表 2 列出了理论预测的预警电阻率变化率与实验值，由表 2 可见理论预警点和实测预警值相近，说明采用 CFRC 机敏层监测梁构件的实时荷载和变形状态具有可行性。

表 2 预警电阻率变化率理论值与实验值比较
Table 2 The electrical resistivity variation comparison between the theoretical and experimental values

Prewarning clicking	Fracture	Limit load	Rigidity
Theoretical value	6.51	534.80	65.30
Experimental value	7.53	565.32	69.51

4 结论

（1）从 CFRC 在拉应力作用下荷载-电阻率变化的规律特性，表明 CFRC 具有拉敏特性，并通过电阻率变化率-应变关系规律可定量地表示出 CFRC 自身固有的拉敏规律。

（2）在钢筋混凝土梁构件中设置 CFRC 机敏监测层，并通过监测 CFRC 层的电阻率变化率可以实现（下转第 33 页）

位; $\bar{\mu}_a$ 为离子的力学-电化学活度。

由于金属的电化学位是由金属离子电化学位和自由电子电化学位组成的, 虽然金属在形变过程中自由电子会从压缩变形区向拉伸变形区流动^[4], 产生电子电化学位差, 但这种能量变化只占金属电化学位的一小部分, 因此, 金属的电化学位主要取决于金属离子化学位。由公式 (1) - (3) 可知, 电化学反应的活化能的减小与拉应力的增加呈线性关系, 即力学-电化学反应速率随拉应力的增加而增大, 这就从能量的观点说明了为什么外加应力会在一定程度上加速应力腐蚀裂纹的扩展。

总之, 7075 铝合金的电化学作用和力学作用是交互的, 彼此促进的, 因为电化学-力学效应在分层溶解过程中, 表面的不均匀溶解会形成单原子台阶这种新位错源, 这种新的位错将使合金的力学-电化学活性增大, 而力学-电化学溶解速率的增加又使电化学-力学活性得到加强, 这种在腐蚀介质中电化学-力学破坏的自催化机理, 取决于两种效应交互作用的程度。

3 结论

(1) 外加阳极极化和阴极极化都将增加 7075 铝合金的应力腐蚀敏感性, 即使在弱极化情况下也能显著增加合金的应力腐蚀敏感性, 因此, 采用外加极化的方法保护合金免遭应力腐蚀是危险的。这种通过极化而改变铝合金表面电化学反应从而影响断裂应力的现象是一种电化学-力学效应。

(2) 外加极化对于不同热处理状态 7075 铝合金应力腐蚀的影响规律基本相同, 即极化电位正向移动时应力腐蚀敏感性增加, 但是, 不同热处理状态的 7075 铝合金, 其应力腐蚀敏感性增加的程度不同。电极极化对 T6 状态合金的 SCC 敏感性的影响显著, 而对 RRA 和 T7351 状态合金的影响较轻微。

(3) 随着拉伸应力的增加, 7075-RRA 铝合金的阳极极化曲线略向正移, 滞后环面积扩大, 但并不显著。这种拉伸应力对极化曲线的影响是一种力学-电化学效应, 有利于应力腐蚀裂纹的扩展。力学-电化学效应在铝合金的缺陷及裂纹等各种应力集中区域会得到加强, 并强化应力腐蚀裂纹尖端的局部腐蚀, 从而提高腐蚀裂纹扩展速度。

(4) 铝合金在应力腐蚀过程中的电化学作用和力学作用是交互的, 彼此促进的, 因为电化学-力学效应形成的腐蚀通道和新位错会使合金的力学-电化学活性增大; 而电化学位的变化正比于拉应力的变化, 即 $\Delta\bar{\mu} = \Delta P$, 当拉应力增加时, ΔP 为负值, 则 $\Delta\bar{\mu}$ 也是负值, 电化学位 $\bar{\mu}$ 的下降意味着电化学反应的活化能的减小, 因此, 力学-电化学效应将导致电化学溶解速

率增加, 从而使电化学-力学活性得到加强。

参考文献

- [1] FLECK P, CALLEROS D, MADSEN M, et al. Retrogression and reaging of 7075 T6 aluminum alloy [A]. Mater Sci Forum [C]. Switzerland: 2000. Trans Tech Publications, 2000. 649-654.
- [2] TSAI T C, CHANG J C, CHUANG T H. Stress corrosion cracking of superplastically formed 7475 aluminum alloy [J]. Metall Mater Trans A, 1996, 28A (10): 2113-2121.
- [3] UGUZ A, MARTIN J W. The effect of retrogression and re-aging on the ductile fracture toughness of Al-Zn-Mg alloys containing different dispersoid phases [J]. J Mater Sci, 1995, 30 (5): 5923-5926.
- [4] 古特曼. 金属力学化学与腐蚀防护 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 1-172.

收稿日期: 2004-01-05; 修订日期: 2004-09-17

作者简介: 刘继华 (1969-), 男, 讲师, 博士, 现从事材料腐蚀及表面处理研究, 联系地址: 上海工程技术大学材料工程学院 (200336)。

* * * * *

(上接第 29 页)

实时监测梁构件的受力状态和变形及预警点。

(3) 经过理论计算与实验对比证明, 由理论计算建立的混凝土开裂预警值、极限荷载预警值和刚度预警值可较准确地反映实际状态。

参考文献

- [1] 毛超照, 赵斌元, 沈大荣, 等. 水泥基碳纤维复合材料压敏性研究 [J]. 复合材料学报, 1996, 13 (4): 8-11.
- [2] 毛超照, 杨元霞, 李卓球, 等. 碳纤维增强水泥压敏性影响因素的研究 [J]. 硅酸盐学报, 1997, 25 (6): 734-737.
- [3] 叶青, 胡国君. 水泥基复合材料的研究与开发 [J]. 材料科学与工程, 1995, (6): 28-32.
- [4] WEN Si-hai. Carbon fiber-reinforced cement as a thermistor [J]. Cement and Concrete Research, 1999, (26): 961-965.
- [5] 陈兵, 姚武, 吴科如, 等. 受压荷载下碳纤维水泥基复合材料机敏性研究 [J]. 建筑材料学报, 2002, 5 (2): 109-113.
- [6] 陈兵, 吴科如, 姚武, 等. 纤维增强混凝土导电性能的研究与应用 [J]. 混凝土, 2002, (7): 23-26.
- [7] 赵国藩, 彭少昆, 黄承逵. 钢纤维混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [8] 王秀峰, 王玉兰, 金志浩. 短纤维复合材料强度的体视学分析 [J]. 硅酸盐学报, 1998, 26 (4): 476-481.

基金项目: 黑龙江省科技厅资助 (GCOIA2180)

收稿日期: 2004-05-11; 修订日期: 2004-11-20

作者简介: 黄龙男 (1960-), 男, 副教授, 主要从事复合材料研究, 联系地址: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 (150001)。