

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0153-06

高温后方钢管再生混凝土短柱轴压受力性能分析

王 兵¹, 刘 晓¹, 赵 磊¹, 高 璐²

(1. 沈阳大学建筑工程学院, 辽宁, 沈阳 110044; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃, 兰州 730050)

摘 要: 为研究高温后钢管再生混凝土短柱的轴压力学性能, 利用 ABAQUS 有限元软件对轴压受力性能进行了理论分析和试验验证, 对比分析了曾经历的不同温度和不同取代率对荷载-应变全过程曲线的影响, 揭示了高温后轴压承载力折减系数的主要影响因素。研究表明: 随着曾经历温度的升高和取代率的增加, 钢管再生混凝土短柱的承载力整体上呈下降趋势, 温度在 500℃ 以上对承载力影响较大, 而取代率对承载力的影响较小, 且随曾经历温度的升高, 影响幅度越小; 含钢率、钢材屈服强度、核心混凝土抗压强度对高温后的轴压强度系数有显著影响, 而取代率没有影响。

关键词: 防灾减灾工程; 钢管再生混凝土; 高温后; 轴压; 承载力折减系数

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.04.S021

MECHANICAL ANALYSIS OF RECYCLED CONCRETE FILLED IN SQUARE STEEL TUBE AFTER HIGH-TEMPERATURE UNDER AXIAL COMPRESSION

WANG Bing¹, LIU Xiao¹, ZHAO Lei¹, GAO Lu²

(1. School of Architectural and Civil Engineering, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties to axial compression performance of recycled concrete short columns filled in a steel tube after high temperature under axial compressive forces, the theoretical analysis has carried by using the finite element software ABAQUS, and experimental verification has also performed. The contrast analysis has experienced different temperature and different substitution rates of the whole process of a load-strain curve, revealing the main influence factors about the axial bearing capacity reduction coefficient after high temperature. The results showed that: with the experienced temperature rise and substitution rate increase, the short column's bearing capacity of recycled concrete filled in steel tube will have an overall downward trend, and it will have a bigger influence on bearing capacity when temperature above 500℃, while the replacement rate has less effect on the bearing capacity; with the experienced temperature rise, the influence magnitude becomes smaller, and the steel ratio, steel strength, compressive strength of core concrete have a significant influence on the axial compressive strength coefficient after high temperature, while substitution rate has no effect.

Keywords: disaster prevention and mitigation engineering, recycled concrete filled in square steel tube, after high-temperature, axial compression, capacity reduction factor

废旧混凝土的堆积给生态环境带来了很大的 环境保护以及社会的可持续发展都具有紧迫的现
负面影响, 如何实现混凝土的再生利用, 对于生态、 实意义。再生混凝土是对废旧混凝土的再次利用,

收稿日期: 2014-04-24; 修改日期: 2014-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308347); 沈阳市科技攻关项目(f13171900)

通讯作者: 刘晓(1974—), 女, 辽宁省沈阳人, 教授, 博士后, 从事结构工程和防灾减灾工程研究(E-mail: liuxiao19740701@sina.com)。

作者简介: 王兵(1974—), 男, 辽宁省沈阳人, 副教授, 工学博士, 从事结构工程和防灾减灾工程研究(E-mail: wangbing616@163.com);

赵磊(1986—), 男, 河南省新乡人, 助教, 工学硕士, 从事结构工程和防灾减灾工程研究(E-mail: 353293860@qq.com);

高璐(1990—), 女, 辽宁省沈阳人, 硕士生, 从事结构工程和防灾减灾工程研究(E-mail: selfwan@163.com)。

其抗压强度、弹性模量低于相同配合比的普通混凝土，导致其力学性能、耐久性能、变形能力等都较差，不能在结构工程中推广应用，但再生混凝土与普通混凝土相比，具有升温滞后、耐高温性能好的优良特性，这种特性使其在高温作用后力学性能丧失较少^[1-2]；若将再生混凝土与钢管进行组合形成钢管再生混凝土组合构件，利用钢管对核心再生混凝土的“套箍”作用，可弥补再生混凝土力学性能差的缺陷，并提高了普通钢管混凝土的耐火能力^[3]。目前国内外针对钢管再生混凝土轴压力学性能的研究主要是在常温状态下力学性能^[4-7]，结构构件火灾后力学性能的研究对建筑物的安全与修复具有重要作用，但对高温后的构件力学性能和工作机理的研究刚刚起步，因此本文通过有限元对高温后钢管再生混凝土的轴压受力性能进行分析，研究温度、取代率、含钢率等主要参数对全过程曲线和轴压承载力的影响。

1 方钢管再生混凝土有限元模型

1.1 模型参数选取

通过 ABAQUS 建立有限元模型，所建模型为文献[10]中的方钢管再生混凝土短柱，其基本尺寸为 160mm×160mm×520mm，外圆角半径 10mm，两端盖板尺寸为 180mm×180mm×20mm。所建模型采用的材料是 C70 混凝土和 Q345 钢材。

1.2 本构模型

1) 钢材

常温下的钢材应力-应变关系取双线性模型按式(1)确定，其中，高温作用后的屈服强度 $f_y(T)$ 按式(2)确定。

$$\sigma = \begin{cases} E_s(T)\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y(T) \\ f_y(T) + E'_s(T) \cdot [\varepsilon - \varepsilon_y(T)], & \varepsilon > \varepsilon_y(T) \end{cases} \quad (1)$$

$$f_y(T) = \begin{cases} f_y, & T \leq 400^\circ\text{C} \\ f_y[1 + 2.33 \times 10^{-4}(T - 20) - 5.88 \times 10^{-7}(T - 20)], & T > 400^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

式中：钢材的弹性模量弹性段取 $E_s(T) = E_s$ ；强化段取 $E'_s = 0.01E_s(T)$ ； $\varepsilon_y(T) = f_y(T) / E_s(T)$ 。

2) 核心再生混凝土

高温后核心再生混凝土的应力-应变关系，在文献[3]的基础上引入取代率^[6]，其本构方程为：

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta(x-1)^\eta + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $x = \varepsilon / \varepsilon_0(T)$ ； $y = \sigma / \sigma_0(T)$ ； $\sigma_0(T) = \sigma_0 / (1 + 6.4\alpha_T^{3.9})$ ； $\varepsilon_0(T) = \varepsilon_0 \cdot [1 + (1500T + T^2) \times 10^{-6}]$ ； $\sigma_0 = f'_{c,r} = f'_c \cdot (1 - 0.28r + 0.08r^2)$ ； $\alpha_T = (T - 20) / 1000$ ； $\varepsilon_0 = (\varepsilon_{cc} + 800\xi_r^{0.2}) \cdot (1 + r / \theta) \times 10^{-6}$ ； $\varepsilon_{cc} = (1300 + 12.5f'_{c,r}) \times 10^{-6}$ ； $\theta = 65.715r^2 - 109.43r + 48.989$ ； $\eta = 1.6 + 1.5x$ ； $\beta = (f'_{c,r})^{0.1} / [1.2\sqrt{1 + \xi_r}]$ 。其中： $\varepsilon_0(T)$ 和 $\sigma_0(T)$ 分别为考虑温度影响的截面形心处的应变和应力； ε_0 和 σ_0 分别为常温下截面形心处的应变和应力； ε_{cc} 为截面的峰值应变； $f'_{c,r}$ 和 f'_c 分别为再生混凝土及其相应普通混凝土的圆柱体抗压强度； r 为再生骨料取代率； $\xi_r (= f_y \cdot A_s / (f_{ck,r} \cdot A_c) = \alpha \cdot f_y / f_{ck,r})$ 为再生混凝土的约束效应系数， $f_{ck,r}$ 为再生混凝土抗压强度标准值； $f_{ck,r} = f_{ck} \cdot (1 - 0.28r + 0.08r^2)$ ， f_{ck} 为普通混凝土抗压强度标准值。

1.3 单元选取、边界条件及网格划分

利于 ABAQUS 有限元软件，进行了有限元法分析^[8-9]。首先建立钢材和再生混凝土本构关系模型，并赋予对应的部件，然后建立钢管与盖板、钢管与核心混凝土、核心混凝土与盖板之间的接触模型；边界条件的确定，由于本文需要研究的是轴心方向的受压，所以对盖板 1 处实施刚性约束，不发生任何方向的位移与转角，在盖板 2 处，约束 x 、 y 方向的位移和 x 、 y 、 z 方向的转角，使构件在 z 方向可以发生位移；在加载时，本文通过对位移的控制进行加载，即在盖板 2 处施加 0.02m 的位移；本文网格划分密度为 0.018m，图 1 为有限元模型的网格划分示意图。

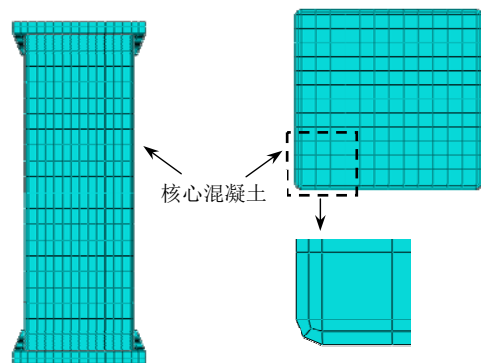


图 1 网格划分示意图

Fig.1 The schematic diagram of the grid division

1.3 模型验证

为了验证本文所建模型的正确性，按文献[10]中试件参数建立 ABAQUS 有限元模型，再将此模

型的运行结果，与文献[10]的试验结果进行对比。图2为模拟结果与试验结果的荷载-应变全过程曲线

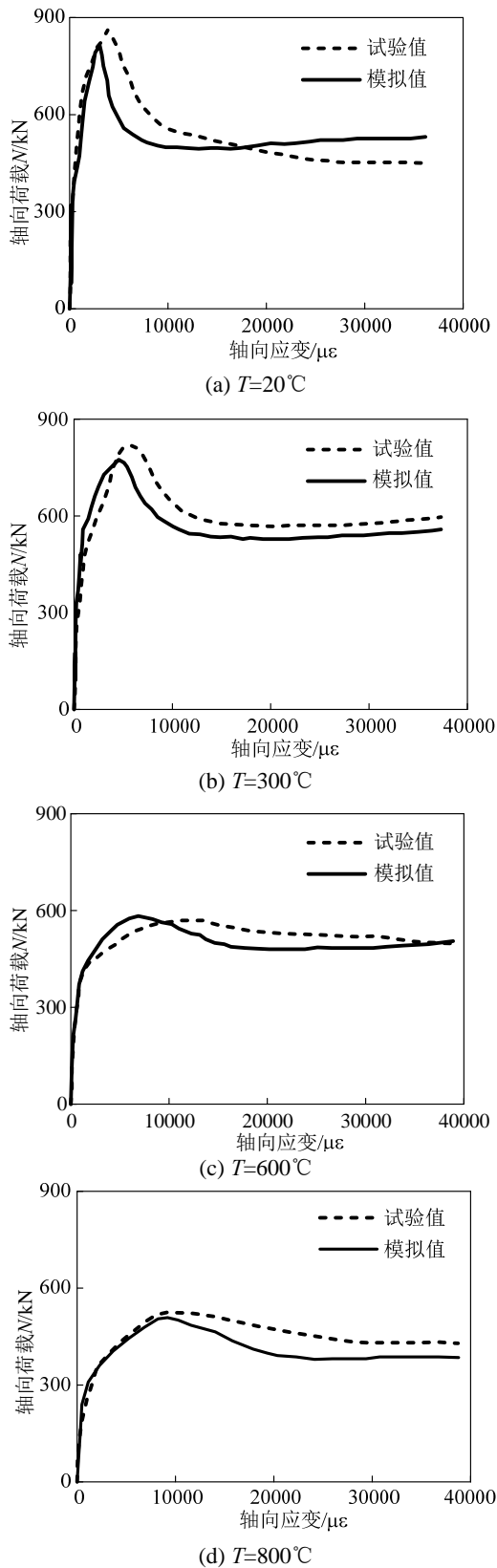


图2 荷载-应变有限元结果与试验结果的对比

Fig.2 Load-strain diagram of the simulation results contrast with literature

线对比图，由图可看出，在弹性阶段，模拟值与试验值基本重合，极限承载力和峰值应变也基本一致，达到峰值承载力之后，模拟值与试验值有一定的差别，但平均误差仅为4.6%，为误差允许范围。图3为受压承载力对比，由图可见，模拟值与试验值相比平均相差0.8%，误差较小。由此可见，本文所建ABAQUS模型的正确性。

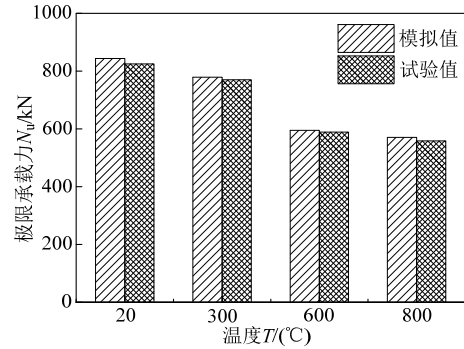


图3 受压承载力对比

Fig.3 Comparison diagram of limit bearing capacity

2 参数分析

利用以上有限元模型进行参数对比分析，选取温度 T (20°C 、 300°C 、 500°C 、 700°C 、 900°C)、取代率 r (0% 、 25% 、 50% 、 75% 、 100%)、含钢率 α (8% 、 12% 、 16%)、钢材屈服强度 f_y (235MPa 、 345MPa 、 420MPa)和混凝土抗压强度 f_{cu} (50MPa 、 70MPa 、 90MPa)等参数对荷载-位移曲线的影响。

2.1 温度

图4给出了各取代率在不同高温后的钢管再生混凝土的荷载-变形关系曲线。从图中可以看出，随着曾经历温度的升高，弹性阶段逐渐变短，极限荷载逐渐变小，各高温后短柱的极限荷载较常温时的下降幅度分别为： 300°C 时平均下降3.85%， 500°C 时平均下降14.15%， 700°C 时平均下降36.56%， 900°C 时平均下降54.61%；整体看来， 500°C 以下时，火灾温度对极限承载力影响不大，当温度高于 500°C 时，其下降速度明显变大，原因是：钢材在高温状态下，尽管内部金属结构发生变化导致强度降低，但在高温冷却后，强度有较大程度的恢复；而混凝土为热惰性材料，传热慢，受热温度较高时，强度、弹性模量等呈现出较大程度的降低，高温冷却后其力学性能基本没有得到恢复。所以，曾经历温度越高，混凝土的材性损失越大，且其力学性能基本不可恢复，故极限荷载随曾经历温度的升高而逐渐降低且降低幅度逐渐增大。从图4还可得知，

随着曾经历温度的升高，表现出更好的延性。这是由于随着曾经历温度的升高，钢管和核心混凝土对短柱的承载力的贡献发生了变化，曾经历温度越高，

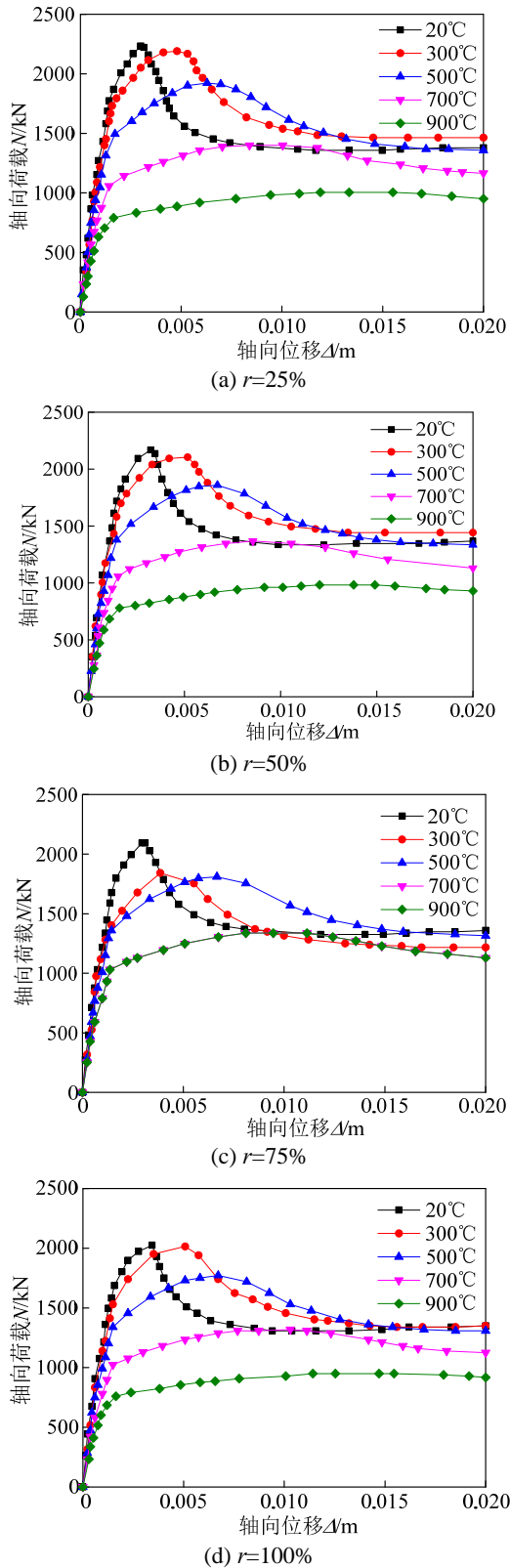


图4 不同温度作用后钢管再生混凝土模型的荷载-变形关系曲线

Fig.4 The load-deformation after different temperature

核心混凝土被压酥的程度越大，逐渐退出工作转而是由钢材承载，而钢材的延性较好，故随着曾经历温度的升高，没有明显的变形，下降段逐渐变缓，延性逐渐变好。

2.2 取代率 r

图5给出了各高温作用后的不同取代率的钢管再生混凝土轴压短柱模型的承载力比较。从图中可以看出：在曾经历温度相同时，随着取代率的增加，模型的承载力逐渐降低，但降低幅度不大，其原因是：对于再生混凝土这种材料，其拥有很好的耐高温性能，其力学性能受温度的影响小，温度的升高并不会造成其力学性能的明显下降，且随着取代率的增加，再生混凝土所占比例越大，由于再生混凝土优良的耐高温材性，随着再生混凝土取代率的增加，模型的承载力尽管有所降低，但降低幅度不大。

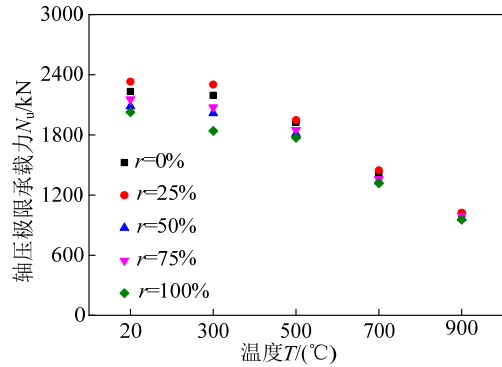


图5 不同取代率下的轴压承载力对比

Fig.5 The limit bearing capacity under different temperature

从图5还可以看出：随着温度的升高，模型的承载力降低幅度越小，在300°C时， $r=100\%$ 的承载力比 $r=0\%$ 的降低27.5%，500°C时降低15.3%，700°C时降低7.8%，而在900°C时，降低幅度很小。这是由于随着曾经历温度的升高，钢管再生混凝土中钢管对承载力的贡献逐渐增大，核心混凝土的贡献逐渐减小，所以取代率的影响不大。

2.3 承载力折减系数

为了更加准确的确定含钢率、钢材屈服强度、混凝土抗压强度对轴压承载力的影响，引入了高温后钢管再生混凝土轴压柱承载力折减系数 K_Y ，其计算式为：

$$K_Y = \frac{N_{u,r}^T}{N_{u,r}} \tag{4}$$

式中， $N_{u,r}^T$ 与 $N_{u,r}$ 分别是高温后和常温下钢管再生混凝土柱的承载力。

通过利用有限元模型，分析了含钢率 α 、钢材

屈服强度 f_y 、混凝土抗压强度 f_{cu} 、再生粗骨料取代率 r 对火灾后钢管再生混凝土轴压柱承载力折减系数 K_Y 的影响规律, 见图 6。本文计算参数的范围是

$\alpha=8\% \sim 16\%$, $f_y=235\text{MPa} \sim 420\text{MPa}$, $f_{cu}=50\text{MPa} \sim 90\text{MPa}$, $r=0 \sim 100\%$; 基本计算参数为 $\alpha=0.08$, $f_y=345\text{MPa}$, $f_{cu}=70\text{MPa}$, $r=50\%$ 。

由图 6(a)可见, 轴压承载力折减系数 K_Y 随着温度的升高而呈不断降低的趋势, 这表明曾经历温度越高, 分析模型的剩余承载力越少; 由图 6(b)、图 6(c)可见, 轴压承载力折减系数 K_Y 随着含钢率和钢材屈服强度的增加而呈变大趋势, 随再生混凝土强度的增大而呈降低的趋势, 表明, 经过高温作用之后, 拥有稳定材性的钢材为模型承载力的贡献较大, 而混凝土则由于高温丧失较多的承载能力; 由图 6(d)可见, 高温作用后, 轴压承载力折减系数 K_Y 几乎不受取代率的影响。

3 结论

(1) 随着曾经历温度的升高, 钢管再生混凝土的极限承载力整体上呈下降趋势, 但下降幅度不同, 500℃以下时, 曾经历温度对承载力影响不大, 当高于 500℃时, 其下降速度明显变大; 此外, 曲线下降段随曾经历温度升高而逐渐变缓, 表现出更好的延性。

(2) 随着取代率的增加, 钢管再生混凝土的极限承载力呈现逐渐降低的趋势, 但随着曾经历温度的提高, 核心混凝土逐渐退出工作, 取代率对承载力的影响逐渐减小。

(3) 轴压强度系数主要受含钢率、钢材屈服强度、再生混凝土强度的影响, 取代率的影响较小。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 55—65.
Xiao Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008: 55—65. (in Chinese)
- [2] Liu Xiao, Zhao Lei. Significance of fire resistance performance on the recycled concrete-filled steel tube [J]. Journal of Applied Mechanics and Materials, 2012(6): 1423—1427.
- [3] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2007: 1—5.
Han Linhai. Steel tube concrete structure [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 1—5. (in Chinese)
- [4] Yang Youfu, Han Linhai. Experimental behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular [J]. Journal of Construction Steel Research, 2006(3): 81—91.
- [5] 王玉银, 陈杰, 纵斌, 等. 钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 170—177.

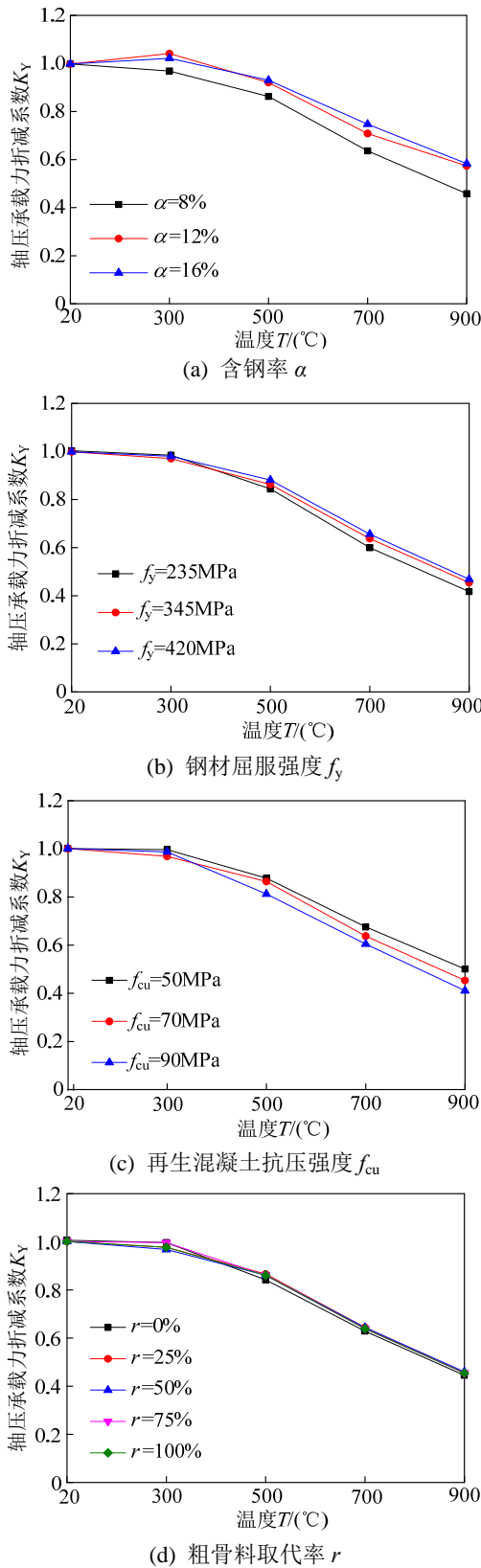


图 6 K_Y-T 关系图

Fig.6 K_Y-T relationship diagram

- Wang Yuyin, Chen Jie, Zong Bin, et al. The contrast test research about mechanical properties of axially compression short column which on recycled concrete filled steel tube and steel recycled concrete mechanical properties of axially compression short columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(12): 170—177. (in Chinese)
- [6] 吴凤英, 杨有福. 钢管再生混凝土轴压短柱力学性能初探[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(增刊): 305—308.
- Wu Fengying, Yang Youfu. The preliminary study of recycled concrete filled steel tube axial compression short column mechanical properties [J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2005, 33(Suppl): 305—308. (in Chinese)
- [7] Evangelista L, Brito I. Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2007, 29(5): 397—401.
- [8] 王勛成, 邵敏. 有限元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 98—101.
- Wang Xucheng, Shao Min. Basic principles of the finite element method and numerical methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 98—101. (in Chinese)
- [9] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 124—130.
- Zhu Baifang. Principles and applications of finite element method [M]. 2nd ed. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1998: 124—130. (in Chinese)
- [10] 杨有福, 侯睿. 高温后钢管再生混凝土短柱的理论分析与试验研究[J]. *大连理工大学*, 2012, 32(1): 72—74.
- Yang Youfu, Hou Rui. The theoretical analysis and experimental study of recycled concrete filled steel tube which after high temperature [J]. *Dalian University of Technology*, 2012, 32(1): 72—74. (in Chinese)

(上接第 152 页)

参考文献:

- [1] Han L H, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 100: 211—228.
- [2] Han L H, Hou C, Wang Q L. Square concrete filled steel tubular (CFST) members under loading and chloride corrosion: experiments [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 71(1): 11—25.
- [3] Hou C, Han L H, Zhao X L. Full-range analysis on square CFST stub columns and beams under loading and chloride corrosion [J]. *Thin-Walled Structures*, 2013, 68(1): 50—64.
- [4] Han L H, Hou C C, Wang Q L. Behavior of circular CFST stub columns under sustained load and chloride corrosion [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 103: 23—36.
- [5] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践 [M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2007: 509—515.
- Han Linhai. Concrete filled steel tube structures: theory and experience [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 509—515. (in Chinese)
- [6] Han L H, He S H, Liao F Y. Performance and calculations of concrete filled steel tubes (CFST) under axial tension [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(11): 1699—1709.
- [7] Han L H, Tao Z, Liu W. Effects of sustained load on concrete-filled hollow structural steel columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(9): 1392—1404.
- [8] Han L H, Li Y J, Liao F Y. Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns subjected to long-term sustained loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(12): 1534—1543.
- [9] 混凝土收缩与徐变专题协作组. 混凝土收缩与徐变实用数学表达式的试验研究[J]. *建筑科学*, 1987, 3: 14—22.
- Research group on concrete shrinkage and creep. The experimental study of mathematical expressions for concrete shrinkage and creep [J]. *Buliding Science*, 1987, 3: 14—22. (in Chinese)
- [10] ASTM G31-72, Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals [S]. 2004.