

文章编号: 1673-9469 (2017) 01-0006-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.01.002

HTRB600 级高强钢筋高温后力学性能试验研究

公伟, 胡克旭, 王懿迪

(同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘要: 为研究 600 MPa 级高强钢筋高温后的力学性能, 对 HTRB600 级热处理高强钢筋进行高温后的拉伸试验。加热温度为 20、200、300、400、500、600、700 及 800℃, 在空气中冷却之后对其进行拉伸试验并测得其屈服强度、极限强度、弹性模量及应力-应变曲线。试验结果表明: HTRB600 级高强钢筋经历温度小于 600℃ 时, 其高温后的应力-应变曲线与常温下相比无明显变化; 当经历温度达到 700℃ 时, 其高温后屈服强度与极限强度均下降为常温下的 80% 左右; 当经历温度达到 800℃ 时, 其高温后屈服强度下降为常温下的 60% 左右, 但极限强度与 700℃ 时相差不多。高温对 HTRB600 级高强钢筋高温后弹性模量无明显影响。最后提出了 HTRB600 级高强钢筋的高温后应力-应变曲线简化计算模型。

关键词: HTRB600 高强钢筋; 高温后; 力学性能; 试验研究

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Experimental research on mechanical properties of HTRB600 high-strength steel bar after high temperature

GONG Wei, HU Kexu, WANG Yidi

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to research the mechanical properties of 600 MPa grade high-strength steel bar after high temperature, the tensile strength test on HTRB600 high-strength steel bar after high temperature is conducted. The specimens are heated up to 20, 200, 300, 400, 500, 600, 700 and 800℃ using a electric furnace respectively, then the tensile test is carried out after the specimens are cooled in air and the yield strength, ultimate strength, elastic modulus and stress-strain curve of the specimens are also measured and recorded simultaneously. The experimental results show that when the temperature is lower than 600℃, the stress-strain curve of the HTRB600 steel bar after high temperature has no obvious difference compared with that of the unheated specimens; When the temperature reaches 700℃, the yield strength and ultimate strength of the steel bar after high temperature reduce to 80% of those of the unheated specimens; When the temperature reaches 800℃, the yield strength of the steel bar after high temperature reduces to 60% of that of the unheated specimens whereas the ultimate strength still maintains at the same level to that of the 700℃ heated specimens. The influence of temperature on the elastic modulus of the HTRB600 steel bar after high temperature is also not obvious. At last, the simplified calculation method for the stress-strain curve of HTRB600 steel bar after high temperature is proposed.

Key words: HTRB600 high-strength steel bar; after high temperature; mechanical properties; experimental research

钢筋高温后性能会发生严重退化, 且退化程度随经历温度的升高而增大^[1], 现行的建筑防火规范

均针对普通钢筋^[2-4], 而高强钢筋与普通钢筋的高温后性能并不相同。随着高强钢筋的普及, 对其高温

投稿日期: 2016-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51478362)

作者简介: 公伟 (1989-), 男, 山东蒙阴人, 博士研究生, 从事结构抗火及耐久性研究。

表 1 钢筋技术要求
Tab. 1 Technical specifications of steel bar

钢筋牌号	屈服强度 设计值 f_y /MPa	屈服强度 标准值 f_{yk} /MPa	极限强度 标准值 f_{syk} /MPa	弹性模量 E_s /MPa	断后伸长率 δ /%
HTRB 600	500	600	750	2.0×10^5	15.0

表 2 钢筋化学成分
Tab. 2 Chemical composition of steel bar

钢筋牌号	C	Si	P	Mn	S	C_{eq}
HTRB 600	0.28%	0.8%	0.035%	1.6%	0.035%	0.58%

性能的研究具有重要意义。目前相关研究多集中于 500 MPa 级钢筋^[5-15]，相应结果表明：500 MPa 级高强钢筋在经历温度小于 400℃ 时其冷却后残余性能变化并不明显，当经历温度大于 400℃ 时其高温后残余力学性能会发生严重退化。钢筋与混凝土之间的高温后的粘结锚固性能同样会随经历温度的升高而降低。随着近年来材料科学的发展，600 MPa 及更高强度的钢筋正在工程中得到普及，而相应的高温性能研究尚未完全开展。本文对 HTRB600 级热处理高强钢筋进行了高温后的拉伸试验，分别测得其经历 20、200、300、400、500、600、700 及 800℃ 高温后的屈服强度、极限强度、弹性模量及应力-应变曲线并提出了相应的简化计算模型。

1 试验概况

1.1 试验材料及设备

试验钢筋的技术要求及化学成分如表 1 和表 2 所示，钢筋直径为 16 mm，长度为 1 100 mm。由电热炉对钢筋进行加热，之后进行加载并由配套的数据采集系统测量钢筋应力和应变。

1.2 加载方案

试验温度取为 20、200、300、400、500、600、

700 和 800℃，不同温度下测试两根钢筋如表 3 所示。升温速率为 5℃/min，当炉温达到目标温度后恒温 1 h 使钢筋均匀受热。之后将钢筋置于空气中冷却 24 h 再进行加载，采用应变速率控制的方法进行试验，钢筋屈服前和屈服阶段应变速率取 0.005 min⁻¹，钢筋屈服后应变速率取为 0.05 min⁻¹ 直至试件破坏。

2 试验现象及讨论

2.1 试验现象

经历 200℃ 高温后的试件与常温下相比无明显区别；经历 300℃ 高温后的试件呈浅蓝色；经历 400℃ 与 500℃ 高温后的试件表面呈现少许青色；经历温度达到 600℃ 时，其表面呈黑色并起壳；经历 700℃ 与 800℃ 高温后的试件表皮出现脱落。拉伸过程中，经历温度低于 500℃ 的钢筋在屈服前表皮无脱落且截面无明显变化，进入强化阶段后其表皮开始剥落且发出细微爆裂声，之后出现颈缩且拉断时发出巨响；经历温度大于 600℃ 时试件在拉伸前期表皮就开始剥落，进入强化阶段后出现颈缩，拉断的声音随温度的升高而逐渐减小。常温下钢筋拉伸断口如图 1 (a) 所示，本次试验各试件断口截面如图 1 (b) 所示。经历温度小于 600℃ 的试件均能观测到断面三要素；经历温度大于 600℃ 时，钢筋塑性增大以致断口无剪切唇，仅剩纤维区与放射区，且经历温度越高，放射区越明显。

表 3 试件分组 Tab. 3 Testing groups		
试验温度 /℃	试件编号	
20	S-1	S-2
200	B2-1	B2-2
300	B3-1	B3-2
400	B4-1	B4-2
500	B5-1	B5-2
600	B6-1	B6-2
700	B7-1	B7-2
800	B8-1	B8-2

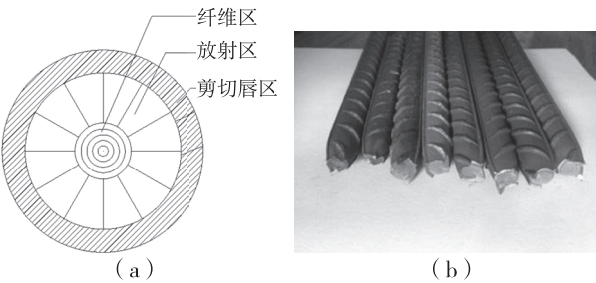


图 1 钢筋断面
Fig. 1 Cross section of steel bar

2.2 截面收缩率与延伸率

各试件的截面收缩率与延伸率分别示于图2及图3。400℃之前钢筋高温后的截面收缩率几乎不变; 400℃~600℃之间随温度的升高略有增大; 700℃之后明显下降。500℃之前钢筋高温后的延伸率随温度的升高而减小; 500℃以后随温度的升高而增大。

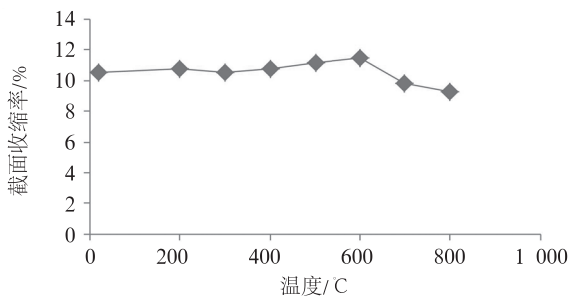


图2 钢筋截面收缩率

Fig.2 Section shrinkage rate of steel bar

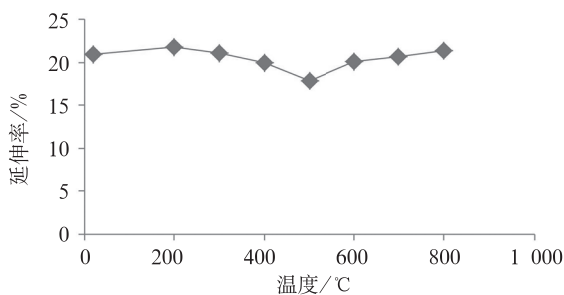


图3 钢筋延伸率

Fig.3 Elongation rate of steel bar

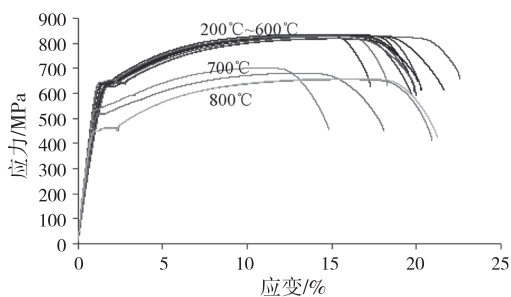


图4 钢筋应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of steel bar

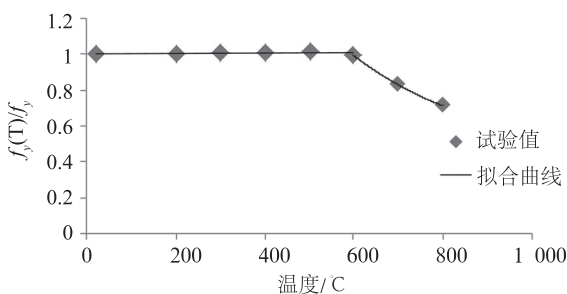


图5 钢筋屈服强度

Fig.5 Yield strength of steel bar

2.3 应力-应变曲线

各试件应力-应变曲线如图4所示, 从图中可以看出: 钢筋高温后的应力-应变曲线特征与常温下类似, 有明显的屈服台阶。经历温度小于600℃时, 高温对钢筋高温后的应力-应变曲线没有明显影响。经历温度大于700℃时, 其高温后的应力-应变曲线发生明显退化, 700℃时屈服强度与极限强度下降为常温下的80%左右, 800℃时屈服强度下降为常温下的60%左右, 但极限强度与700℃时相差不多。高温后钢筋的弹性模量与常温下相比几乎无变化。

2.4 屈服强度

各试件高温后屈服强度 $f_y(T)$ 与常温下 f_y 的比值如图5所示。当经历温度小于600℃时, 其屈服强度与常温下相比几乎不变; 当温度大于600℃后迅速下降。回归分析可得到其简化计算公式如式(1)所示。式中: $f_y(T)$ 与 f_y 分别为钢筋高温后的屈服强度和常温下的屈服强度; T 为钢筋温度。从应力-应变曲线上选取处于屈服阶段较后期一个点 (ϵ_n, σ_n) , 从这个点开始往强化阶段方向取下一个点 $(\epsilon_{n+1}, \sigma_{n+1})$, 应变与应力增量分别为 $\Delta\sigma$ 与 $\Delta\epsilon$, 取其应力增长率为 $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$, 当第 $n+1$ 级的应力增长率超过第 n 级应力增长率的 α 倍的时候, 说明应力增长出现突变, 曲线进入强化阶段, 将该点定为钢筋的屈服应变。即当 $(\Delta\sigma_{n+1}/\Delta\epsilon_{n+1})/(\Delta\sigma/\Delta\epsilon) > \alpha$ 时, 取点 $(\epsilon_{n+1}, \sigma_{n+1})$ 为钢筋的屈服应变。本次试验中 α 取为3, 各试件高温后屈服应变 $\epsilon_y(T)$ 与常温下 ϵ_y 的比值如图6所示。从图中可以看出, 当经历温度小于500℃时, 高温后钢筋的屈服应变随温度的升高缓慢增大; 当温度大于500℃时, 高温后钢筋的屈服应变迅速增长。回归分析可得到其简化计算公式如式(2)所示。式中: $\epsilon_y(T)$ 与 ϵ_y 分别为高温后钢筋的屈服强度和常温下的屈服强度对应的屈服应变值; T 为钢筋温度。

$$\frac{f_y(T)}{f_y} = \begin{cases} 1 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C} \\ 2.9382 - 4.6 \times 10^{-3}T + 2 \times 10^{-6}T^2 & 600^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_y(T)}{\epsilon_y} = \begin{cases} 0.9884 + 9 \times 10^{-4}T - 10^{-6}T^2 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \\ 6.1273 - 2 \times 10^{-3}T + 4 \times 10^{-5}T^2 - 2 \times 10^{-8}T^3 & 500^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

2.5 极限强度

各试件高温后极限强度 $f_u(T)$ 与常温下极限强度 f_u 的比值如图7所示。当经历温度小于500℃时极限

强度无明显变化,当经历温度大于 500℃时极限强度迅速降低。回归分析得到其简化计算模型如式(3)所示。式中: $f_u(T)$ 与 f_u 分别为高温后和常温下的钢筋极限强度; T 为钢筋温度。高温后各试件极限强度所对应的极限应变 $\varepsilon_u(T)$ 与常温下 ε_u 的比值如图 8 所示。500℃之前,钢筋高温后的极限应变随温度的增高而降低;当温度大于 500℃之后,极限应变呈现波动趋势。回归分析可得到其变化模型如式(4)所示。式中: $\varepsilon_u(T)$ 与 ε_u 分别为高温后和常温下的钢筋的极限强度对应的极限应变值; T 为钢筋温度。

$$\frac{f_u(T)}{f_u} = 1.019 - 9 \times 10^{-4}T + 6 \times 10^{-6}T^2 - 10^{-8}T^3 + 6 \times 10^{-12}T^4 \quad (3)$$

$$20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$$

$$\frac{\varepsilon_u(T)}{\varepsilon_u} = \begin{cases} 0.9816 + 8 \times 10^{-4}T - 4 \times 10^{-6}T^2 + 3 \times 10^{-9}T^3 & 20^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \\ -13.064 + 6.55 \times 10^{-2}T - 10^{-4}T^2 + 5 \times 10^{-8}T^3 & 500^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

2.6 弹性模量

高温后钢筋弹性模量如式(5)所示,式中: $E(T)$ 、 $f(T)$ 与 $\varepsilon(T)$ 分别表示高温后钢筋的弹性模量,应力与应变; T 为钢筋温度。各试件高温后弹性模量 $E(T)$ 与常温下弹性模量 E 的比值如图 9 所示,从

图中可以看出钢筋高温后的弹性模量随受热温度的升高略有降低但并不明显。回归分析得到其变化模型如式(6)所示。式中: $E(T)$ 与 E 分别为高温后和常温下的钢筋弹性模量; T 为钢筋温度。

$$E(T) = \frac{f(T)}{\varepsilon(T)} \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$\frac{E(T)}{E} = 1.0131 - 7 \times 10^{-4}T + 3 \times 10^{-6}T^2 - 4 \times 10^{-9}T^3 + 2 \times 10^{-12}T^4 \quad (6)$$

$$20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$$

2.7 不同强度钢筋高温后力学性能对比

选取不同强度钢筋高温后的试验数据^[16-19]与本文试验数据对比,其屈服强度、极限强度与弹性模量变化如图 10~12 所示。从图中可以看出:不同强度钢筋高温后屈服强度均随受热温度的升高而逐渐下降,335 MPa 与 400 MPa 钢筋高温后屈服强度的变化趋势基本一致;500 MPa 与 600 MPa 钢筋高温后屈服强度在受热温度低于 600℃时与普通钢筋基本一致,当受热温度高于 600℃时开始急速下降;高强钢丝高温后屈服强度从 300℃开始就急速下降且下降速度远大于其余钢筋。不同强度钢筋高温后极限强度随受热温度的升高整体呈现逐渐下降的趋势;当受热温度低于 600℃时各钢筋高温后极限强度基本保持一致,当受热温度大于 600℃时,500 MPa 与 600 MPa 钢筋高温后极限强度迅速下降;高强钢丝

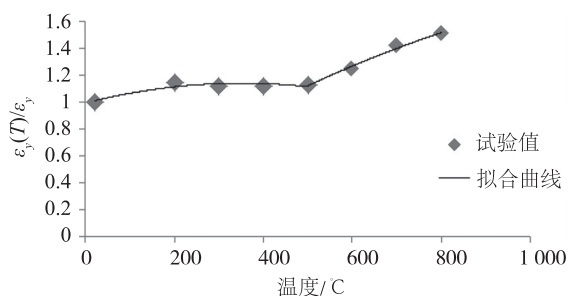


图 6 钢筋屈服应变

Fig.6 Yield strain of steel bar

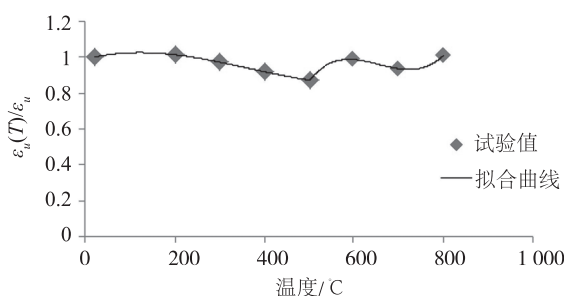


图 8 钢筋极限应变

Fig.8 Ultimate strain of steel bar

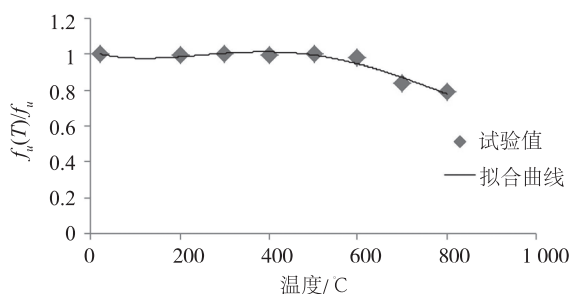


图 7 钢筋极限强度

Fig.7 Ultimate strength of steel bar

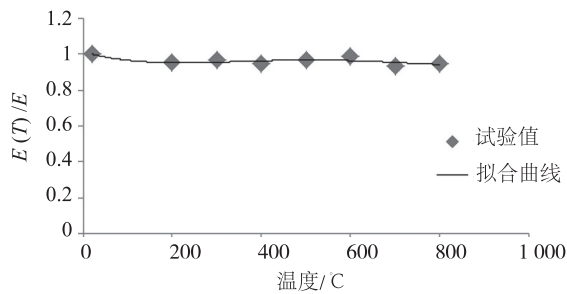


图 9 钢筋弹性模量

Fig.9 Elastic modulus of steel bar

高温后极限强度从 200℃ 开始就迅速下降且下降速度明显大于其余钢筋。不同强度钢筋高温后弹性模量同样随着受热温度的升高整体上呈下降趋势,但下降速度与强度无明显关系。

3 应力-应变曲线简化计算模型

由式 (1)~(6), 可算出经历任一高温后 HTRB600 级高强度钢筋应力-应变曲线上屈服阶段结束点 A, 极限强度点 B 和比例极限点 C, 连接以上各点即可得到其近似应力-应变曲线。但仅凭三个点来拟合曲线略显粗略, 需要更多关键点来保障精度。造成拟合曲线不精确的原因是圆滑曲线部分无法简单地用直线拟合, 因此可以将圆滑曲线部分曲率最大的点作为关键点 D, 使曲线更加精确。如果曲线精度仍

表 4 关键点应力与应变值
Tab. 4 Stress and strain value of key points

温度 /℃	关键点 D	
	应变 /%	应力 /MPa
200	5.6	780
300	5.5	780
400	5.7	784
500	5.4	787
600	5.6	765
700	5.5	654
800	5.4	594

不满足需求, 则再取剩余曲线段中曲率最大的点作为关键点 E, 以此类推直至精度满足需求 (本文精度要求拟合曲线与试验曲线之间误差小于 20 MPa)。经计算高温后应力-应变曲线上 (图 4) 的关键点如表 4 所示。

经历不同高温后关键点 D 应变值 $\epsilon_D(T)$ 与应力值 $\sigma_D(T)$ 分别示于图 13 及图 14。分别对其进行回归分析可以得到其简化计算公式。式中: $\epsilon_D(T)$ 与 $\sigma_D(T)$ 分别为钢筋高温后应力-应变曲线上关键点 D 的应变与应力值; T 为钢筋温度。

$$\epsilon_D(T) = 5.6536 - 0.0003T \quad 200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

$$\sigma_D(T) = \begin{cases} 774 + 0.025T & 200^{\circ}\text{C} \leq T < 600^{\circ}\text{C} \\ 0.0035T^2 - 5.685T + 2934 & 200^{\circ}\text{C} < T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

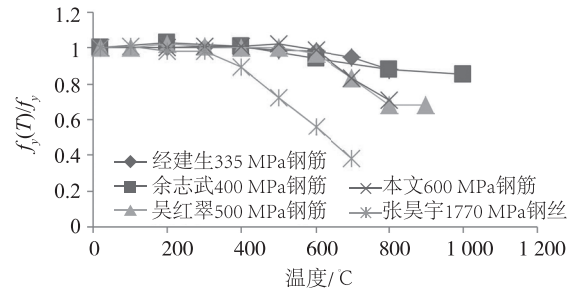


图 10 不同钢筋高温后屈服强度
Fig.10 Yield strength of rebar after high temperature

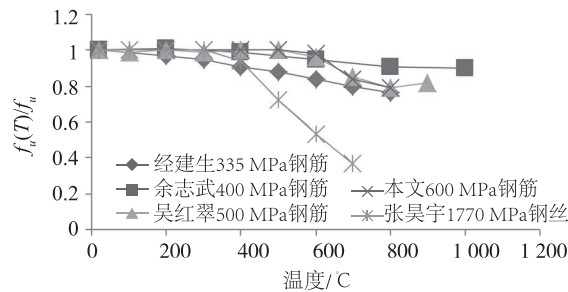


图 11 不同钢筋高温后极限强度
Fig.11 Ultimate strength of rebar after high temperature

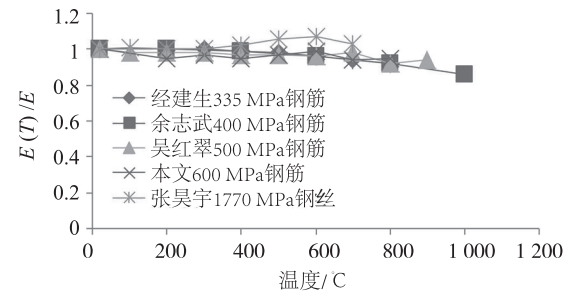


图 12 不同钢筋高温后弹性模量
Fig.12 Elastic modulus of rebar after high temperature

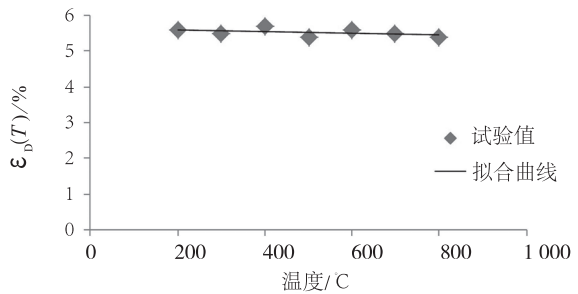


图 13 关键点 D 应变值
Fig.13 Strain value of key point D

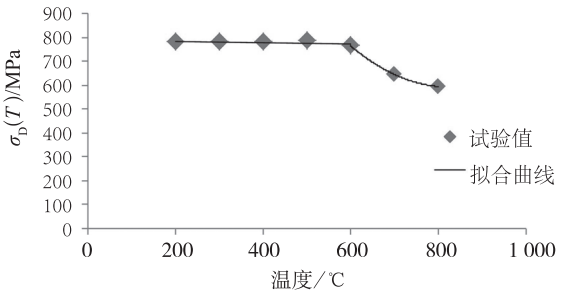


图 14 关键点 D 应力值
Fig.14 Stress value of key point D

现以 350℃ 为例, 进行简化计算过程如下: 由式 (1)~(2) 求出屈服阶段结束点 *A* 的应变与应力值分别为 1.30% 与 631.0 MPa; 由式 (3)~(4) 求出极限强度点 *B* 的应变与应力值分别为 14.1% 与 917.4 MPa; 由式 (5)~(6) 求出比例极限点 *C* 的应变与应力值分别为 0.66% 与 631.0 MPa; 由式 (7)~(8) 求出关键点 *D* 的应变与应力值分别为 5.55% 与 782.8 MPa; 将以上各点连接即可得到 HTRB600 级高强钢筋经历 350℃ 高温后的应力 - 应变曲线如图 15 所示。

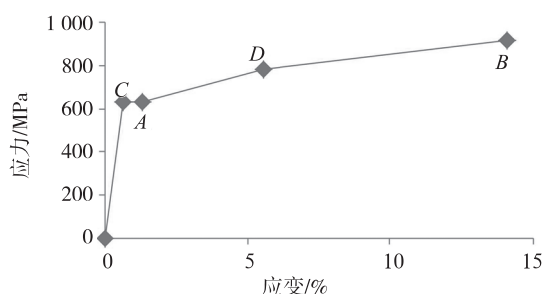


图 15 钢筋 350℃ 高温后应力 - 应变曲线

Fig. 15 Stress-strain curve of steel bar after 350℃

4 结论

1) HTRB600 级热处理高强钢筋高温后的应力 - 应变曲线特征与常温下类似, 均有明显的屈服台阶。经历温度小于 600℃ 时, 其高温后的应力 - 应变曲线与常温下相比无明显变化; 当经历温度达到 700℃ 时, 其高温后屈服强度与极限强度均下降为常温下的 80% 左右; 当经历温度达到 800℃ 时, 其高温后屈服强度下降为常温下的 60% 左右, 但极限强度仍与 700℃ 时相差不多。

2) 温度对 HTRB600 级高强钢筋高温后弹性模量的影响很小, 钢筋经历温度小于 600℃ 时其高温后弹性模量与常温下相比无明显变化, 经历温度大于 600℃ 时, 高温后弹性模量开始呈现略微下降趋势。

3) 提出了 HTRB600 级高强钢筋的高温后应力 - 应变曲线简化计算模型。

参考文献:

[1] KUMAR V, SHARMA U K, SINGH B, et al. Effect of temperature on mechanical properties of pre-damaged steel reinforcing bars [J]. Construction and Building Materials, 2013, 46: 19 - 27.
 [2] CECS 200-2006, 建筑钢结构防火技术规范 [S].
 [3] GB 50016-2006, 建筑设计防火规范 [S].
 [4] GB 50045-1995, 高层民用建筑设计防火规范 [S].

[5] 吴红翠, 王全凤, 徐玉野, 等. HRB500 级高强钢筋高温后的力学性能试验 [J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 432 - 435.
 [6] 吴红翠, 王全凤, 徐玉野, 等. HRBF500 钢筋高温后力学性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2009, 39(11): 5 - 8.
 [7] 王全凤, 吴红翠, 徐玉野, 等. 高温后 HRBF500 细晶粒钢筋力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 120 - 125.
 [8] FELICENTTI R, GAMBAROVA P G, MEDA A. Residual behavior of steel rebars and R/C sections after a fire [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (12): 3546 - 3555.
 [9] NIKOLAOU J, PAPADIMITRIOU G D. Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes (Tempcore, microalloyed with vanadium and work-hardened) [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18 (4): 243 - 254.
 [10] 吴昊, 陈礼刚. 高温后钢筋混凝土粘结性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2010, 40 (2): 105 - 108.
 [11] 牛向阳, 王全凤, 杨勇新, 等. 高温后普通混凝土与细晶粒钢筋粘结性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2012, 42 (3): 116 - 118.
 [12] 牛向阳, 王全凤, 徐玉野, 等. 高温后 HRB 高强钢筋粘结锚固性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 2010, 40(9): 84 - 87.
 [13] XIAO J Z, HOU Y Z, HUANG Z F. Beam test on bond behavior between high-grade rebar and high-strength concrete after elevated temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2014, 69: 23 - 35.
 [14] 肖建庄, 黄均亮, 赵勇. 高温后高性能混凝土和细晶粒钢筋间粘结性能 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 1296 - 1301.
 [15] 王全凤, 邱毅, 徐玉野. HRBF500 级钢筋混凝土梁受火后力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 50 - 55.
 [16] 经建生, 侯晓萌, 郑文忠. 高温后预应力钢筋和非预应力钢筋的力学性能 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(2): 441 - 446.
 [17] 余志武, 王中强, 史召锋. 高温后新Ⅲ级钢筋力学性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 112 - 116.
 [18] 吴红翠. 500 MPa 级细晶粒钢筋高温后力学性能试验研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2010: 10-55.
 [19] 张昊宇. 预应力钢丝抗火性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005: 12 - 47.

(责任编辑 王利君)