

不同冷却方式对高温后 600 MPa 级 高强钢筋拉伸性能的影响

秦培巧¹, 李利利¹, 李列列²

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 为了评估火灾后高强钢筋的性能演化规律, 文章研究了空气中冷却、炉内冷却和浸水冷却 3 种方式对高温作用后高强钢筋应力-应变曲线的影响, 分析了屈服强度、极限强度、强屈比、弹性模量和断后伸长率等力学参数的变化规律。结果表明: 1) 高强钢筋经历高温后在气冷、炉冷和水冷作用下, 其应力-应变曲线仍表现出明显的屈服台阶; 2) 与常温时相比, 极限强度和屈服强度均呈现出下降趋势, 而强屈比变化并不显著; 3) 不同冷却方式对高强钢筋的弹性模量和断后伸长率影响程度不同, 其中水冷作用对钢筋的弹性模量影响最大, 炉冷作用对钢筋的断后伸长率影响最大。此外, 通过建立不同冷却方式下高强钢筋的拉伸本构关系, 为高强钢筋在抗火结构中的应用提供依据。

关键词: 高强钢筋; 高温作用; 冷却方式; 拉伸性能; 本构关系

中图分类号: TU502⁺. 6

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)09-0014-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.09.114

Influence of different cooling methods on the tensile properties for 600 MPa high strength steel bar after high temperature

QIN Peiqiao¹, LI lili¹, LI lielie²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, School of water conservancy, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, School of civil engineering and transportation, Zhengzhou 450045, Henan, China)

Abstract: In order to evaluate the performance evolution of high-strength steel bars after fire, this paper studied the effects of air cooling, furnace cooling and water cooling on the stress-strain curves of high-strength steel bars after high temperature, and the variations of mechanical parameters such as yield strength, ultimate strength, strength yield ratio, elastic modulus and elongation after fracture are analyzed. The test results showed that: 1) The stress-strain curves of high-strength steel bars still showed obvious yield steps under the action of air cooling, furnace cooling and water cooling after high temperature; 2) Compared with normal temperature, both the ultimate strength and yield strength showed a decreasing trend, but the strength yield ratio did not change significantly; 3) Different cooling method has different effects on the elastic modulus and elongation after fracture of high-strength steel bars, in which water cooling had the greatest effect on the elastic modulus of steel bars, while furnace cooling had the greatest effect on the elongation after fracture of steel bars. Additionally, the tensile constitutive relationship of high-strength steel bars under different cooling methods is also established, which provided a basis for the application of 600 MPa high-strength steel bars in the design of fire-resistant structures.

Key words: high-strength steel bar; high temperature; cooling methods; tensile properties; constitutive relationship

收稿日期: 2023-12-20

作者简介: 秦培巧(1991—), 女, 助教, 从事建筑材料力学性能方面的研究。

建筑火灾是发生频率较高的灾害之一,具有火势蔓延速度快、扑救困难程度大等特点,一旦发生往往造成建/构筑物严重损坏并且产生重大的人员伤亡和经济损失^[1]。如:2015 年河南省平顶山市鲁山县康乐园老年公寓发生特别重大火灾事故,造成 39 人死亡、6 人受伤,过火面积高达 745.8 m²,直接经济损失 2 064.5 万元^[2];2021 年台湾省高雄市盐埕区“城中城大楼”发生重大火灾,导致 46 人死亡和 41 人受伤^[3];2023 年北京长峰医院“4·18”重大火灾事故,造成 29 人死亡、42 人受伤,直接经济损失高达 3 831.82 万元^[4]。钢筋混凝土结构经历火灾后,其表层温度迅速升高,混凝土保护层会出现爆裂和脱落等现象,造成钢筋直接与外界高温环境接触。由于钢筋属于热的良导体,高温作用迅速传递到相邻的钢筋网组织部分,致使受力钢筋的力学性能降低,最终导致建筑结构承载力下降,进而影响建筑结构的安全性和耐久性。因此,高温作用对钢筋性能的劣化影响研究受到广大学者的高度关注。张茂林等^[5]研究了 HRB400 钢筋在经历不同加热温度后的力学性能,发现加热温度低于 600 ℃ 时,喷水冷却、自然冷却和炉内冷却对钢筋的抗拉强度影响较小,当加热温度达到 600 ~ 700 ℃ 时,3 种冷却方式条件下的钢筋抗拉强度开始下降;王全凤等^[6]研究发现了 HRBF500 细晶粒钢筋经历高温后在自然冷却、浸水冷却和炉内冷却条件下,其应力-应变曲线仍具有明显的屈服阶段和强化阶段,且屈服强度和抗拉强度均呈现明显的下降趋势;公伟等^[7]研究发现,HRB600 级高强钢筋在经受 700 ℃ 高温作用后,其屈服强度和极限强度会下降到常温状态的 80%;王传智等^[8]通过试验发现,加热温度在 625、700 ℃ 时,自然冷却、随炉冷却和浸水冷却条件下的 600 MPa 级高强钢筋的屈服强度和极限强度随温度发生不同程度地下降;ELGHAZOU LI 等^[9]对热轧钢筋和冷加工钢筋进行了高温试验,发现冷加工钢筋在经受 600 ℃ 高温加热后,其强度降低了 10%~15%;EKRAMI 等^[10]对高温后不同马氏体体积分数和形态的双相钢进行了拉伸试验,发现在 450 ℃ 后,钢材的强度随加热温度升高呈现降低趋势;RAFI 等^[11]研究了 3 种不同类型钢筋在高温下的强度、应变和

弹性模量变化规律,发现当温度为 200 ℃ 时,钢材力学性能几乎不受影响,而当温度超过 400 ℃ 时,钢材表现出脆性行为。

600 MPa 级钢筋作为近年来出现的一种新型高强钢筋,相比于普通钢筋,具有更高的强度与纯度及较好的延性等优点^[12],且《钢筋混凝土用钢第 2 部分:热轧带肋钢筋》(GB/T 1499.2—2018)中增加了对 HRB600MPa 钢筋相关力学性能的要求。因此,对 600 MPa 级高强建筑用钢筋的抗火性能变化规律亟需进一步探索。本文将对高温后高强钢筋的拉伸性能演化规律及其应力-应变本构关系进行研究,以期在高温作用下高强钢筋混凝土结构的安全性评价与灾后修复提供一定的借鉴与参考。

1 试验方案

试验采用直径为 14 mm 且经过特殊工艺轧制而成的 600 MPa 级高强钢筋。试样通过截取获得,长度控制在 500 mm。试验方案采用空气中冷却、炉内冷却以及浸水冷却 3 种冷却方式,选取 3 组共 12 根 600 MPa 级高强钢筋试样分别开展室内高温试验和直接拉伸试验,同时另选 4 根 600 MPa 级高强钢筋试样作为常温状态下的对照组。采用箱式电炉对钢筋试样进行高温加热(目标温度设置为 650 ℃),利用程序自动控制加热速率和恒温过程。待高温试验完成后,将试样分别置于空气、水、炉内(炉门紧闭)自然冷却至室温。

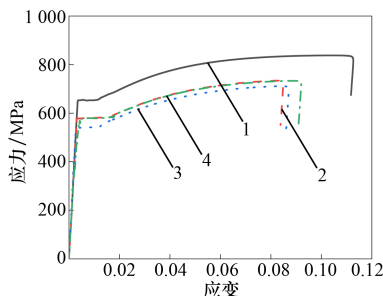
直接拉伸试验参照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)进行。采用 SHT4605 型液压伺服万能试验机,以 10 MPa/s 的应力控制方式进行直接拉伸试验,并采用高精度引伸计全程测量试样的变形情况,获得高温后不同冷却方式下 600 MPa 级高强钢筋试样的屈服荷载、极限荷载以及荷载-变形曲线。

2 试验结果分析

2.1 高温后不同冷却方式下高强钢筋的应力-应变曲线

图 1 为高温后不同冷却方式下高强钢筋试样的应力-应变全曲线。由图 1 可知:经 3 种方式

冷却后, 试样的应力-应变曲线与常温状态下的曲线形状基本保持一致, 其屈服台阶仍然很明显, 由弹性段、屈服段、强化段以及破坏段 4 个部分组成。与常温状态下的高强钢筋对比发现, 经历高温冷却后, 试样的条件屈服点和抗拉极限强度均下降, 屈服流幅增加, 屈服台阶随温度升高而降低。此外, 与空气中冷却和浸水冷却相比, 高温作用后炉内冷却方式下试样的抗拉强度和屈服强度值降低最为明显, 且其屈服台阶逐渐变短。



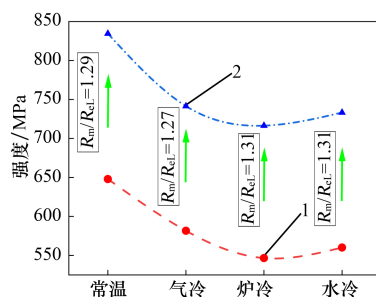
1—常温; 2—气冷; 3—炉冷; 4—水冷。

图 1 不同冷却方式下高强钢筋的应力-应变全曲线

2.2 不同冷却方式对高温后高强钢筋的强度影响

按照 GB/T 228.1—2010 规定, 钢筋的强度指标主要包括上屈服强度 R_{eH} 、下屈服强度 R_{eL} 、极限抗拉强度 R_m 和强屈比 R_m/R_{eL} 。高温后不同冷却方式下高强钢筋试样的强度指标变化如图 2 所示。由图 2 可知: 对照组在常温状态下的极限强度为 834.57 MPa, 屈服强度为 647.93 MPa。不同冷却方式对高强钢筋试样的强度有显著影响, 且屈服强度与极限强度的变化规律基本一致, 即: 气冷方式 > 水冷方式 > 炉冷方式, 试样的屈服强度比常温状态时的屈服强度分别降低 10.2%、13.5% 和 15.6%。原因可能是炉内冷却的降温速率最慢, 相当于金属制作过程中的退火工艺^[2]。与常温相比, 试样的极限强度在气冷、水冷和炉冷条件下分别下降了 11.2%、12.1% 和 14.2%, 这是由于高温后不同冷却方式造成了高强钢筋内部金相组织的改变^[13-14]。

基于试验数据, 对经历高温和 3 种方式冷却的高强钢筋试样的强屈比结果进行分析可知, 高强钢筋在常温下的强屈比为 1.29, 高温后经气冷、炉冷和水冷后, 其强屈比分别为 1.27、1.31 和 1.31。根据《混凝土结构设计规范(2015 版)》(GB 50010—2010) 和《钢筋混凝土用异型和普通



1—下屈服强度 R_{eL} ; 2—极限抗拉强度 R_m 。

图 2 高温后不同冷却方式下高强钢筋的拉伸强度结果
低合金钢棒标准规格》(ASTM A706/A706M—2014)要求, 钢筋混凝土构件在抗震设计中的实测强屈比应大于 1.25。因此, 经历高温后 3 种冷却方式下的高强钢筋试样的实测强屈比仍能满足规范要求。

2.3 不同冷却方式对高温后高强钢筋弹性模量和伸长率的影响

高温后 3 种冷却方式下高强钢筋试样的弹性模量和断后伸长率如图 3、4 所示。由图 3 可知: 与常温相比, 3 种冷却方式对高强钢筋的弹性模量影响不同, 其中气冷对弹性模量未产生影响, 炉冷作用下的弹性模量增加了 3.0%, 而水冷作用下的弹性模量下降了 9.6%。由图 4 可知: 气冷作用对高强钢筋的断后伸长率影响不显著, 炉冷作用下高强钢筋的断后伸长率下降了 2.9%, 而水冷作用下高强钢筋的断后伸长率略有上升, 约为 1.3%。

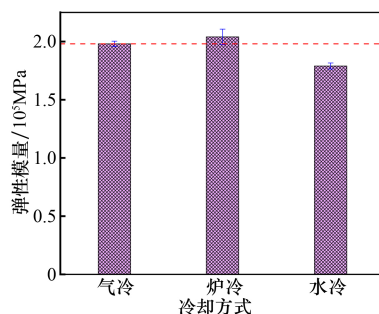


图 3 不同冷却方式下高强钢筋的弹性模量

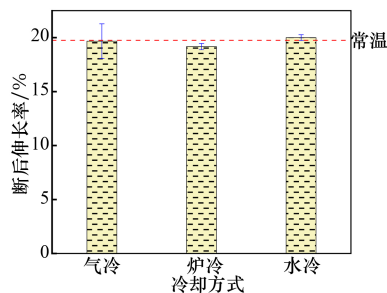


图 4 不同冷却方式下高强钢筋的断后伸长率

3 高温后不同冷却方式下高强钢筋的拉伸本构关系

二折线本构模型涉及参数较少、易于在试验中获取, 且模型形式相对简单; 三折线模型适用于描述具有明显屈服台阶的材料。基于 GB 50010—2010 规定, 分别构建高温作用后 3 种冷却方式下高强钢筋的拉伸二折、三折线本构模型, 如表 1 所示。其中 σ 为应力, MPa; ε 为应变。由表 1 可知: 在二折、三折线本构模型中, 炉冷作用下高强钢筋的弹性模量均大于气冷和水冷; 在二折线本构模型中, 气冷和炉冷作用下高强钢筋的强化系数大于水冷; 而在三折线本构模型中, 高强钢筋的强化系数大小依次: 气冷方式 > 水冷方式 > 炉冷方式。

图 5 为不同冷却方式下高强钢筋的拉伸本构关系对比结果。由图 5 可知: 构建的二折、三折线本构模型均能较好反映出高强钢筋的拉伸行为,

其中, 二折线本构模型可作为模拟高强钢筋拉伸应力 - 应变关系的简化模型。两种本构模型对高温后气冷、炉冷和水冷方式下高强钢筋应力 - 应变曲线的弹性段模拟效果均好, 但是二折线本构模型忽略了曲线的屈服台阶。气冷方式下的二折、三折线本构模型对高强钢筋应力 - 应变曲线的强化段模拟效果优于炉冷和水冷方式。

4 结 论

本文通过对 650 ℃ 高温后不同冷却方式下 600 MPa 级高强钢筋试样的应力 - 应变曲线以及屈服强度、极限强度、强屈比、弹性模量和断后伸长率等力学性能参数进行分析, 得到如下结论。

(1) 高强钢筋经历高温作用后在不同冷却方式下的拉伸性能明显下降, 但其应力 - 应变曲线仍由弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和破坏阶段组成, 且屈服台阶较为明显。

表 1 高温后不同冷却方式下高强钢筋的拉伸本构关系

冷却方式	二折线本构模型	三折线本构模型
气冷	$\sigma = 1.98 \times 10^5 \varepsilon (\varepsilon \leq 0.0029)$	$\sigma = 1.98 \times 10^5 \varepsilon (\varepsilon \leq 0.0029)$
	$\sigma = 581.62 + 0.021 \times 10^5 (\varepsilon - 0.0029)$ ($0.0029 < \varepsilon \leq 0.0802$)	$\sigma = 581.62 (0.0029 < \varepsilon \leq 0.0170)$ $\sigma = 581.62 + 0.025 \times 10^5 (\varepsilon - 0.0170)$ ($0.0170 < \varepsilon \leq 0.0802$)
炉冷	$\sigma = 2.04 \times 10^5 \varepsilon (\varepsilon \leq 0.0027)$	$\sigma = 2.04 \times 10^5 \varepsilon (\varepsilon \leq 0.0027)$
	$\sigma = 546.58 + 0.021 \times 10^5 (\varepsilon - 0.0027)$ ($0.0027 < \varepsilon \leq 0.0854$)	$\sigma = 546.58 (0.0027 < \varepsilon \leq 0.0124)$ $\sigma = 546.58 + 0.023 \times 10^5 (\varepsilon - 0.0124)$ ($0.0124 < \varepsilon \leq 0.0854$)
水冷	$\sigma = 1.79 \times 10^5 \varepsilon (\varepsilon \leq 0.0031)$	$\sigma = 1.79 \times 10^5 \varepsilon (\varepsilon \leq 0.0031)$
	$\sigma = 1.79 \times 10^5 \varepsilon (\varepsilon \leq 0.0031)$ ($0.0031 < \varepsilon \leq 0.0887$)	$\sigma = 560.16 (0.0031 < \varepsilon \leq 0.0178)$ $\sigma = 560.16 + 0.024 \times 10^5 (\varepsilon - 0.0178)$ ($0.0178 < \varepsilon \leq 0.0887$)

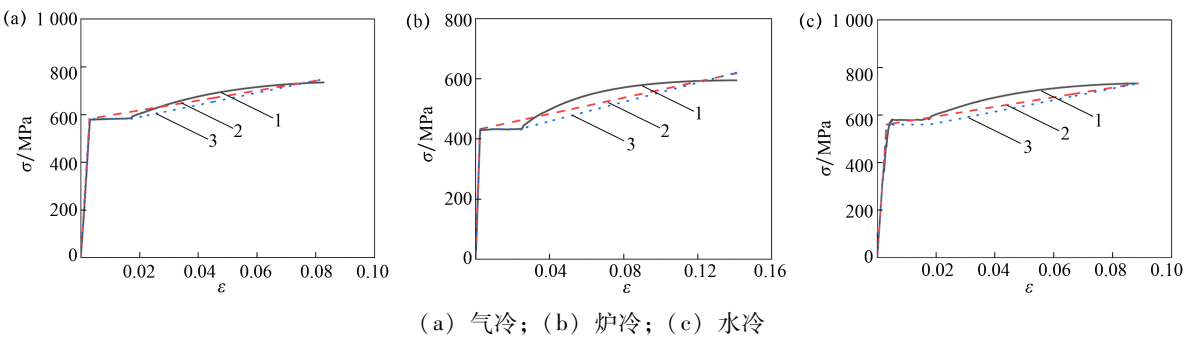


图 5 不同冷却方式下高强钢筋的拉伸本构关系对比

(2) 高强钢筋在高温作用后的屈服强度和极限强度均呈现下降趋势,且降幅排序为炉冷方式 > 水冷方式 > 气冷方式,而其强屈比变化不显著。高温后 3 种冷却方式下高强钢筋的弹性模量大小依次:炉冷方式 > 气冷方式 > 水冷方式,而断后伸长率的变化规律与之相反。

(3) 二折、三折线本构模型均能较好反映出高温作用后不同冷却方式下高强钢筋的拉伸行为,其中二折线本构模型可用作简化模拟,三折线模型能够准确反映出高强钢筋的屈服响应。

参考文献:

- [1] 李炎锋,李俊梅. 建筑火灾安全技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 安全监管总局人事司. 河南平顶山“5·25”特别重大火灾事故调查报告[EB/OL]. (2015-08-24)[2015-10-14]. http://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsdcbg/2015/201510/t20151014_245219.shtml.
- [3] 新华网. 高雄老旧大楼火灾已造成 46 人死亡[EB/OL]. [2021-10-14]. http://www.news.cn/tw/2021-10/14/c_1127957863.htm.
- [4] 新华社. 北京长峰医院重大火灾事故调查报告公布[EB/OL]. [2023-10-25]. http://www.mem.gov.cn/xw/bndt/202310/t20231025_466750.shtml.
- [5] 张茂林,杜红秀,陈良豪. HRB400 钢筋高温冷却后力学性能试验研究[J]. 中国科技论文,2018,13(1):81-85.
- [6] 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.
- [7] 公伟,胡克旭,王懿迪. HTRB600 级高强钢筋高温后力学性能试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2017,34(1):6-11.
- [8] 孙传智,李爱群,缪长青,等. 高温后 600MPa 级高强钢筋力学性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(6):93-101.
- [9] ELGHAZOULI A Y, CASHELL K A, IZZUDDIN B A. Experimental evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement at elevated temperature [J]. Fire Safety Journal,2009,44(6):909-919.
- [10] EKRAMI A. High temperature mechanical properties of dual phase steels [J]. Materials letters,2005,59(16):2070-2074.
- [11] RAFI M M, DAHAR A B, AZIZ T. High temperature mechanical properties of steel bars available in Pakistan [J]. Journal of Structural Fire Engineering,2017,9(3):203-221.
- [12] 戎贤,王海涛,刘平. 配置 600MPa 级钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 河北工业大学学报,2015(5):4.
- [13] 沈蓉,凤凌云,戎凯. 高温(火灾)后钢筋力学性能的评估[J]. 四川建筑科学研究,1991(2):7-11.
- [14] 张有桔,朱跃,赵升,等. 高温后不同冷却条件下钢材力学性能试验研究[J]. 结构工程师,2009(5):6.