

文章编号:1007-9629(2024)03-0230-07

2 060 MPa 级高强钢丝高温力学性能及破断模式

陈巍¹, 沈锐利^{1,2}, 白伦华³, 齐东春^{1,*}, 杨俊¹

(1. 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 3. 佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528225)

摘要:采用非接触式光学应变测试系统,跟踪测试了 2 060 MPa 级高强钢丝试件在 20~900 °C 下的全过程应力-应变曲线,建立了高温钢丝各力学性能指标的高温函数模型,得到其高温破断参数.结果表明:高温下高强钢丝试件的各力学性能指标均有不同程度折损.当温度低于 200 °C 时,试件的力学性能指标折损率不超过 10%,破断模式为脆性破坏;当温度超过 200 °C 后,试件的各力学性能指标折损率显著增大,破断模式逐渐由脆性破坏转变为塑性破坏.

关键词:高强钢丝;应力-应变曲线;高温;力学性能指标;折损程度;破断模式

中图分类号:U444

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.03.006

Mechanical Properties and Fracture Mode of 2 060 MPa Grade High-Strength Steel Wire at High-Temperature

CHEN Wei¹, SHEN Ruili^{1,2}, BAI Lunhua³, QI Dongchun^{1,*}, YANG Jun¹

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation (China Three Gorges University), China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. School of Transportation, Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan 528225, China)

Abstract: The non-contact optical strain testing system was used to track and test the stress-strain curves of 2 060 MPa grade high-strength steel wire specimens throughout the entire process at 20–900 °C. The mechanical performance index at high-temperature was determined, and the high-temperature fracture parameters of high-strength steel wire were obtained. The results indicate that the mechanical properties of high-strength steel wire specimens suffer various degrees of impairment at high-temperature. When the temperature does not exceed 200 °C, the degradation of each mechanical property index of specimen shall not exceed 10%, and the fracture mode is brittle failure. After the temperature exceeds 200 °C, the degradation of each mechanical property index of specimen significantly increases, and the fracture mode gradually changes from brittle failure to plastic failure.

Key words: high-strength steel wire; stress-strain curve; high-temperature; mechanical performance index; degree of impairment; fracture mode

钢索是大跨度缆索承重桥梁的主要承重与传力构件,一旦发生火灾破坏将对缆索承重桥梁结构安全造成极大威胁^[1].高强钢丝作为钢索的基本组成材

料,在缆索承重桥梁领域得到广泛应用^[2].高强钢丝高温下的力学性能须被重点关注,因此准确获得高强钢丝高温下的力学性能退化规律,是评估钢索构

收稿日期:2023-04-14; 修订日期:2023-09-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178396);防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金资助项目(2023KJZ21);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2022A15110289)

第一作者:陈巍(1991—),男,湖北随州人,三峡大学讲师,硕士生导师,博士. E-mail: 782851112@qq.com

通讯作者:齐东春(1978—),男,湖北宜昌人,三峡大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: qidongchun@163.com

件火灾后剩余承载力的重要依据。

目前,针对钢丝类材料已建立了较完善的常温力学性能指标体系^[3-5],且对其高温力学性能也开展了一些相关研究。如部分学者研究了缆索承重桥常用的1 670~1 860 MPa级高强钢丝的高温力学性能,建立了高强钢丝的高温力学性能指标函数模型^[6-9];还有学者针对高强钢丝的高温膨胀及蠕变性能开展了试验研究^[10-11]。上述研究获得了1 670~1 860 MPa级高强钢丝的高温力学性能参数。

近年来,更高强度的高强钢丝已应用于缆索承重桥梁上,如南京仙新路长江大桥主缆高强钢丝的强度超过2 000 MPa,此类高强钢丝的高温力学性能尚不明确。此外,目前高强钢丝的高温应变主要通过应变引伸计进行测试,但该方法无法测试高强钢丝全过程的力学本构关系。鉴于此,本文采用非接触式光学应变测试系统测试2 060 MPa级高强钢丝(以下简称高强钢丝)的高温力学性能,建立各力

学性能指标的高温函数模型,并探明其高温破断模式,进一步完善了高强钢丝的高温力学性能指标体系。

1 试验

1.1 试验总体布置

高强钢丝的高温拉伸试验在万能材料试验机上进行,整个试验装置由加载系统、升温系统及测量系统3部分组成,示意图见图1。其中加载系统为Instron液压伺服系统,最大加载力为500 kN,精度为0.5级。试验机上横梁处安装位移传感器,可测试高强钢丝加载全过程的轴向变形量;试验机下横梁处安装力传感器,可实时监测试验机的加载力。高强钢丝由管式加热炉升温,管式加热炉膛径约为50 mm,最高加热温度为1 100 ℃,炉内设置3个热电偶,分别位于炉膛上、中、下位置,用于测试高强钢丝试件受火核心区的温度 T 。

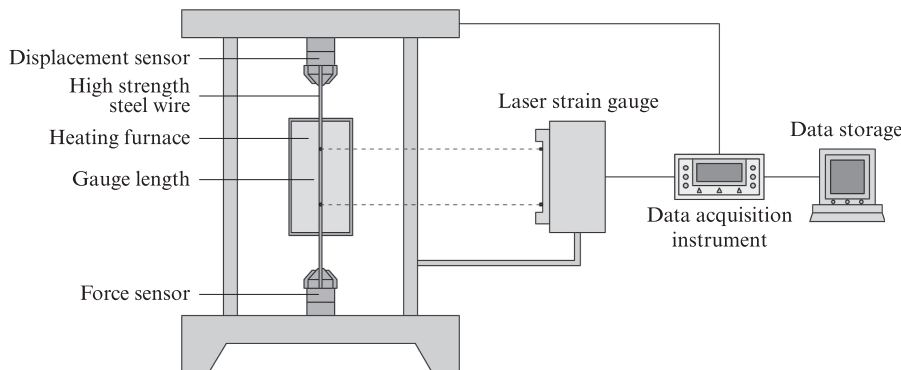


图1 高强钢丝高温力学性能试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-temperature mechanical performance test for high-strength steel wire

高强钢丝由加载至破断全过程的应力-应变(σ - ϵ)曲线是本试验的关键测试参数。由于常用的应变引伸计测试方法是通过夹持试件来测试应变的,试件破断会损坏引伸计,因此在试件达到屈服后需要取掉引伸计,导致试件由屈服至断裂阶段的应力-应变数据无法直接测量。对此,本试验采用更为先进的非接触式光学应变测试系统,来测试高强钢丝的全过程应力-应变曲线。

1.2 试件

高强钢丝由江苏法尔胜缆索有限公司制作,力学性能较优,成品高强钢丝表面涂有1层镀锌层,主要起防腐作用^[12]。高强钢丝直径 ϕ 为6.0 mm,根据试验机尺寸要求,将高强钢丝试件的长度取为580 mm,具体尺寸如图2所示。高强钢丝试件与试验机通过夹具连接,以避免在试件表面上出现加工螺纹而削弱其承载力。

1.3 试验过程

采用稳态试验方法(恒温加载法)测试高强钢丝的高温力学性能指标及破断参数。其中主要力学参数为应力-应变曲线、弹性模量 E 、比例极限 f_p 、屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 、极限应变 ϵ_u 、断裂应变 ϵ_r 、断面收缩率 Z 及断后伸长率 A 。试验过程严格按照GB/T 4338—2006《金属材料 高温拉伸试验方法》进行。

试验主要测试过程如下:(1)按要求将高强钢丝试件与试验机端头连接并调整试件位置,使受火核心区(应变测试区)与激光应变仪基本持平。(2)以10 ℃/min的升温速率将试件温度缓慢升高至20、100、200、300、400、500、600、700、800、900 ℃并保温30 min,使其受火核心区温度均匀。需要说明的是,在升温及保温过程中保持试件一端松弛,以消除钢丝热膨胀应变对测试结果的影响。(3)启动加载装置将试件缓慢张拉至破断,加载速率按应变速率控制,试

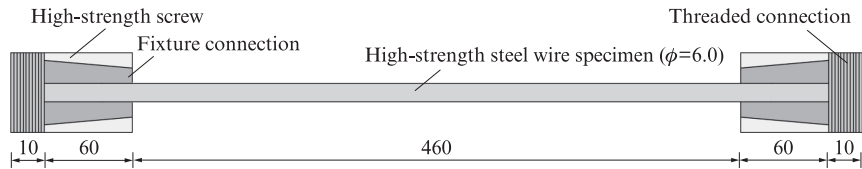


图2 高强钢丝试件尺寸示意图

Fig. 2 Dimensional drawing of high-strength steel wire specimen (size: mm)

验第一阶段的加载速率设为 0.003/min,待试件进入屈服阶段后适当提高加载速率;(4)高温力学性能测试完成后对不同温度水平下的试件断口进行测试,得到其破断参数。

2 高温力学性能指标测试结果与分析

2.1 测试结果汇总

试验测试了 20~900 ℃共 10 组温度水平下高强钢丝试件的力学性能指标,结果如表 1 所示。为减小试验误差,每组温度水平测试 3 根试件,共计 30 组试

件,试验结果取 3 根试件测试结果的平均值。

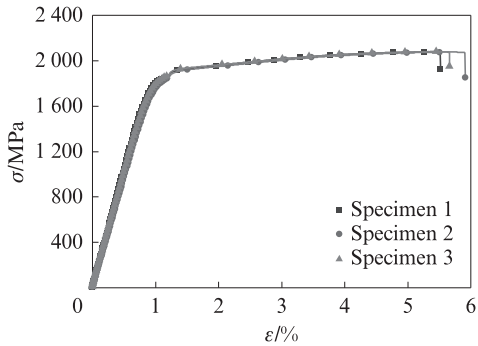
2.2 应力-应变曲线

采用非接触式光学应变测试系统,测试高强钢丝试件在不同温度水平下的应力-应变发展历程。试验机上的位移传感器及力传感器同步输出加载力-位移发展历程。图 3 给出了高强钢丝试件在 100、800 ℃下的全过程应力-应变曲线,其余各组试件测试结果与之类似,不再详细列出。对各组测试数据进行整理,得到高强钢丝试件在 20~900 ℃下的全过程应力-应变曲线,如图 4 所示。

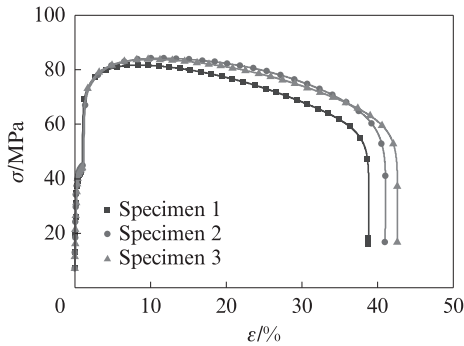
表 1 高强钢丝试件的高温力学性能指标

Table 1 High-temperature mechanical property indexes of high-strength steel wire specimens

$T/^\circ\text{C}$	E/GPa	f_p/MPa	f_y/MPa	f_u/MPa	$\epsilon_u/\%$	$\epsilon_f/\%$
20	197.0	1 733.5	2 058.3	2 156.2	5.86	6.65
100	198.3	1 499.3	1 957.3	2 077.6	5.48	5.65
200	185.2	1 253.5	1 883.7	2 015.2	4.52	5.02
300	172.7	1 001.2	1 691.4	1 715.0	3.50	9.48
400	142.7	646.9	1 307.0	1 311.7	2.44	12.23
500	97.1	362.9	715.1	726.3	2.85	14.93
600	50.6	101.3	312.8	322.8	3.04	24.89
700	25.8	36.1	135.8	138.2	2.93	35.39
800	22.3	26.0	79.6	83.3	5.61	40.79
900	25.2	22.7	45.8	57.0	12.93	54.16



(a) $T=100\text{ }^\circ\text{C}$



(b) $T=800\text{ }^\circ\text{C}$

图3 100、800 ℃下高强钢丝试件的全过程应力-应变曲线

Fig. 3 Complete stress-strain curves of high-strength steel wire specimens at 100 , 800 ℃

由图 3、4 可见:(1)高强钢丝试件的高温应力-应变曲线发展历程基本一致,整个发展历程分为 3 个阶段——第一阶段为弹性阶段,该阶段试件的应力-应变曲线呈线性变化,且试件温度越低,弹性阶段越

长;第二阶段为屈服阶段,该阶段试件的应力-应变曲线呈非线性变化,且试件温度越高,屈服阶段越长;第三阶段为破断阶段,该阶段试件很快达到其极限承载力后发生破断。(2)各温度水平下试件进入屈

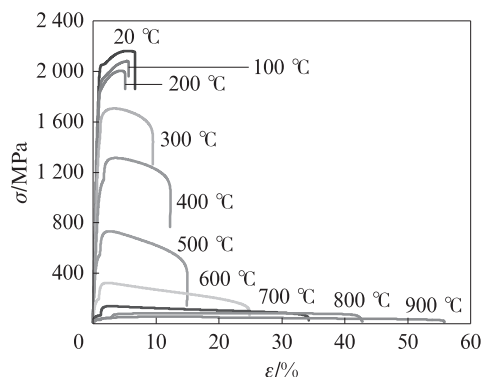


图4 20~900 °C下高强钢丝试件的全过程应力-应变曲线

Fig. 4 Complete stress-strain curves of high-strength steel wire specimens at 20~900 °C

$$\frac{E(T)}{E(20)} = 9.969 \times 10^{-12} \times T^4 - 1.115 \times 10^{-8} \times T^3 + 1.319 \times 10^{-6} \times T^2 - 1.334 \times 10^{-4} \times T + 1.0, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (1)$$

Holmes等^[13]测试了钢绞线的高温弹性模量,文献^[14]对Q235普通钢材的高温弹性模量进行了规定.将不同强度等级高强钢丝的高温弹性模量与预应力混凝土桥用钢绞线及普通钢材进行对比,得到不同类型钢材的高温弹性模量折减系数对比结果,如图5所示.

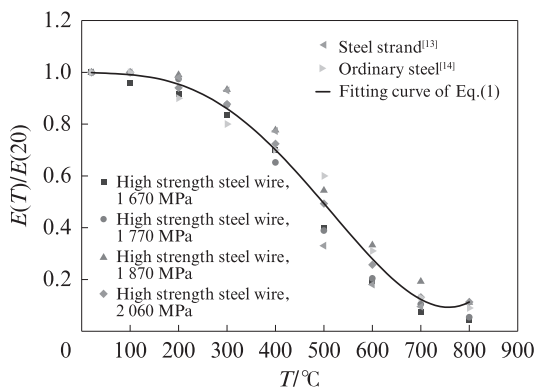


图5 不同类型钢材的高温弹性模量折减系数对比结果

Fig. 5 Comparison results of elastic modulus reduction coefficients at high-temperature for different types of steels

由图5可见:(1)不同强度等级高强钢丝、钢绞线及普通钢材的高温弹性模量折减规律基本一致——20~200 °C下,各钢材的弹性模量折减系数均在0.9以上,即弹性模量的折减均不超过10%;200~700 °C下,各钢材的弹性模量开始出现显著折减,当温度达到700 °C时弹性模量折减系数均小于0.2,即

屈服阶段后应力-应变曲线出现“台阶”,这是由于在试件进入屈服阶段后提高了加载速率,导致应力-应变曲线在加载速率转变点处出现突变.

2.3 弹性模量

高强钢丝试件的弹性模量根据应力-应变曲线的初始直线段斜率确定,具体取值为比例极限应力与比例极限应变的比值.将高强钢丝的高温弹性模量折减系数定义为高温下的弹性模量 $E(T)$ 与常温下的弹性模量 $E(20)$ 之比.采用多项式函数模型对高强钢丝试件的高温弹性模量折减系数进行拟合,得到其拟合函数,如式(1)所示.

弹性模量的折减超过80%;当温度超过700 °C后,弹性模量折减系数维持在0.1左右,材料基本丧失刚度.这表明,钢材的弹性模量主要与其组成有关,而与钢材类型、强度等级等因素关系不大.(2)式(1)可准确描述2 060 MPa级高强钢丝高温下的弹性模量折减规律,其拟合曲线的相关系数 R^2 大于0.995,拟合值与试验值的最大偏差在10%以内.这表明,采用式(1)进行高强钢丝的高温弹性模量计算具备足够精度.

2.4 屈服强度与极限强度

由于高强钢丝的应力-应变曲线无明显屈服平台,因此采用名义屈服强度作为其屈服强度.文献^[14]将2%应变作为钢材的名义应变,对应的应力水平为钢材的名义屈服强度;杜咏等^[7]建议将2%应变对应的应力作为高强钢丝的名义屈服强度.鉴于此,本文采用2%应变对应的应力水平作为2 060 MPa级高强钢丝的屈服强度.将高强钢丝的高温屈服强度折减系数定义为其高温下的屈服强度 $f_y(T)$ 与常温下的屈服强度 $f_y(20)$ 之比;将高强钢丝的极限强度定义为钢丝所承受的极限荷载与标称截面积的比值;将高强钢丝的高温极限强度折减系数定义为高温下的极限强度 $f_u(T)$ 与常温下的极限强度 $f_u(20)$ 之比.采用多项式函数模型对高强钢丝的高温屈服强度折减系数及极限强度折减系数进行拟合,得到其拟合函数,如式(2)、(3)所示.

$$\frac{f_y(T)}{f_y(20)} = \begin{cases} 1.0156 - 8.8562 \times 10^{-4} \times T + 4.0219 \times 10^{-6} \times T^2 - 1.0551 \times 10^{-8} \times T^3, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ 4.5220 - 1.6020 \times 10^{-2} \times T + 1.9057 \times 10^{-5} \times T^2 - 7.6137 \times 10^{-9} \times T^3, & 400^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{f_u(T)}{f_u(20)} = \begin{cases} 9.9280 \times 10^{-1} + 1.1589 \times 10^{-4} \times T - 2.1652 \times 10^{-6} \times T^2 - 1.3571 \times 10^{-9} \times T^3, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ 4.3076 - 1.5080 \times 10^{-2} \times T + 1.7822 \times 10^{-5} \times T^2 - 7.0619 \times 10^{-9} \times T^3, 400^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

Holmes等^[13]测试了钢绞线的高温屈服强度及极限强度.文献[14]对Q235普通钢材的高温屈服强度进行了规定.将不同强度等级高强钢丝的高温屈服

强度及极限强度,与预应力混凝土桥用钢绞线及普通钢材进行对比,得到不同类型钢材的高温强度折减系数对比结果,如图6所示.

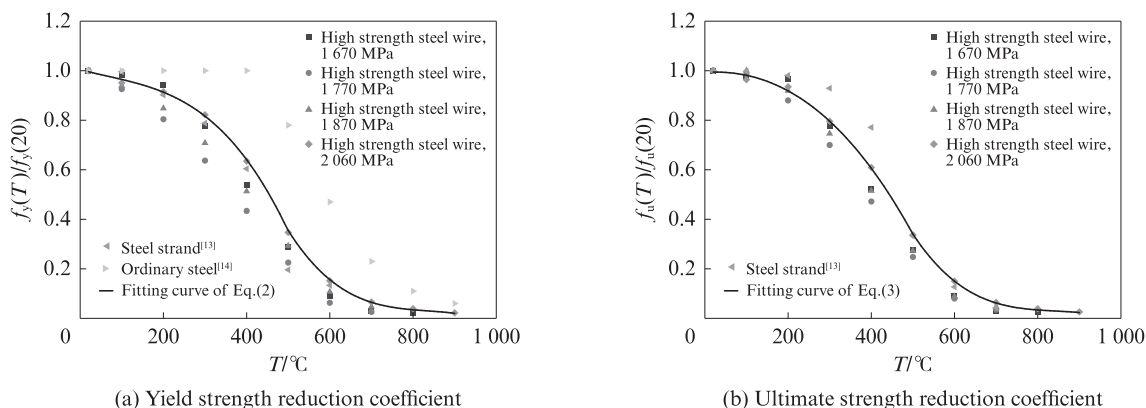


图6 不同类型钢材的高温强度折减系数对比结果

Fig. 6 Comparison results of strength reduction coefficients at high-temperature for different types of steels

由图6(a)可见:高强钢丝的高温屈服强度折减随温度变化较为敏感——从20℃升温开始,高强钢丝的屈服强度即开始折减;当温度达到400℃时,高强钢丝的屈服强度折减系数为0.6左右,即屈服强度损失约40%;当温度达到700℃时,高强钢丝的屈服强度折减系数不足0.1,即屈服强度损失超过90%,高强钢丝的强度损失十分严重.由图6(b)可见:高强钢丝的高温极限强度折减规律与屈服强度基本一致——极限强度从20℃开始折减,温度达到400℃时极限强度损失40%左右;当温度达到700℃时,极限强度损失超过90%,此时,高强钢丝的剩余抗拉强度不足10%,即钢丝基本丧失强度.图6显示,式(2)、(3)可准确描述2060 MPa级高强钢丝高温下的强度折减规律,其拟合曲线的相关系数 R^2 均大于0.995,拟合值与试验值的最大偏差不超过7%.这表明,采用式(2)、(3)进行高强钢丝的高温强度计算具备足够精度.

由图6还可见:(1)高强钢丝及钢绞线与普通钢材的高温强度折减规律有较大差异——文献[14]中的普通钢材高温屈服强度折减速率显著慢于高强钢丝及钢绞线;钢绞线的高温屈服强度折减规律与高强钢丝基本一致,但极限强度折减规律与高强钢丝存在一定差异,在0~400℃下,钢绞线的极限强度折减速率显著慢于高强钢丝,而温度超过500℃后两者吻合较好.(2)除1770 MPa级高强钢丝的高温屈服强度折减有较大差异外(可能与该试验测试条件有

关),其余强度等级高强钢丝的高温强度折减规律基本一致.对比结果表明,高强钢丝高温强度退化规律与钢绞线及普通钢材有显著差异,采用普通钢材或钢绞线的高温力学性能指标进行缆索体构件抗火分析误差较大.因此,缆索体构件的高温力学参数建议按照高强钢丝的高温力学性能试验结果确定.

3 高温破断参数测试结果与分析

3.1 破断特征分析

试验结果表明,高强钢丝试件在不同温度水平下具有不同破断特征——室温(20℃)下高强钢丝的破断模式为脆性破坏,断口截面不齐平、边缘有撕裂缺口,其破断时可听到清脆的断丝声响;20~200℃下,高强钢丝的破断模式仍为脆性破坏,断口截面出现颈缩,断口形态呈杯状,颜色呈暗黑色,但钢丝表面仍保持金属光泽;300~400℃下,其断口形态发生明显变化,钢丝表面镀锌层出现部分剥落,裸露出银白色金属表面,此时断口有明显颈缩,形态开始呈现锥形,断口截面较齐平;500~800℃下,高强钢丝的破断模式为塑性破坏,钢丝表面镀锌层全部剥落,表面呈暗黄色,断口颈缩更加明显,断口形态锥状化加剧,钢丝破断声音逐渐由清脆变为微弱.

采用扫描电镜(SEM)对不同温度水平下高强钢丝试件的断口进行观察,得到微观破断形态,如图7所示.由图7可见:(1)20℃时试件的微观结构为铁素体-珠光体,分子间作用力强,破坏分子间作用力需

要很大的外拉力.因此,高强钢丝在室温下具有很强的抗拉性能,其破断模式为脆性破坏,断口不齐平.(2)随着温度的升高,试件的微观结构逐渐发生变化,尤其是当温度超过700℃时,由于珠光体组织滑移和相变,导致试件的微观结构从铁素体-珠光体转

换为奥氏体,此时分子间作用力减弱,但材料塑性增强,由此导致试件的弹性模量、屈服强度及极限强度等力学性能参数减小,而极限应变和断裂应变等变形参数增大.此时,高强钢丝破断模式为塑性破断,断口较齐平.

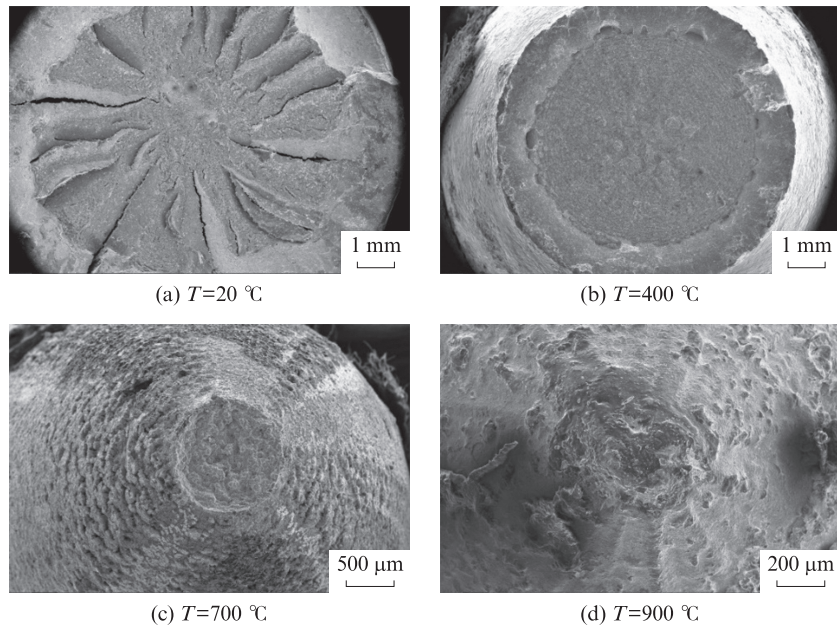


图7 不同温度水平下高强钢丝试件的微观破断形态

Fig. 7 Micro fracture morphologies of high-strength steel wire specimens at different temperatures

3.2 破断参数

高强钢丝的破断参数主要有断后伸长率 A 及断口截面收缩率 Z ,可反映其破断模式及特征.高强钢丝在不同温度水平下的破断模式及参数有较大差异.采用多项式函数模型对高强钢丝的断后伸长率 A 及

$$Z = \begin{cases} (1.1647 \times 10^{-4} \times T^2 + 3.4070 \times 10^{-2} \times T - 3.2721 \times 10)/100, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C} \\ (-2.5000 \times 10^{-5} \times T^2 + 5.3700 \times 10^{-2} \times T + 7.0950 \times 10)/100, & 600^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

高强钢丝试件在20~900℃下的断破参数随温度的变化曲线如图8所示.由图8可见:(1)高强钢

丝试件的断后伸长率 A 在0~200℃下基本维持稳定,约为6%,符合其常温或低温下的脆性破断特征;当温度超过200℃时,试件的断后伸长率 A 随温度升高逐渐增大;当温度达到900℃时,其断后伸长率 A 达到55%左右.这说明高强钢丝破断会经历很长的塑性变形过程,符合其高温下的塑性破断特征.(2)高强钢丝试件的断面收缩率 Z 随温度升高呈持续增大变化规律.当温度达到300℃时,试件的断口截面收缩率 Z 超过50%;当温度达到600℃时,其断口截面收缩率 Z 达到95%.这说明高强钢丝高温破断具有显著的断口颈缩特征,图7中高强钢丝试件的微观破断形态也反映了该特征.

(3)拟合曲线的相关系数 R^2 均大于0.99,即采用式(4)、(5)进行高强钢丝的高温断裂参数计算具备足够精度.

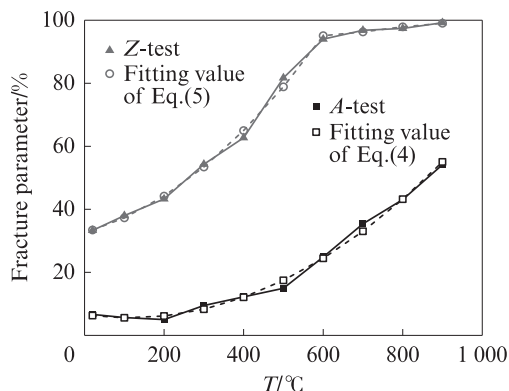


图8 高强钢丝试件的破断参数随温度的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of fracture parameters with temperature for 2 060 MPa grade high-strength steel wire specimens

4 结论

(1) 2 060 MPa级高强钢丝的高温应力-应变曲线分为弹性阶段、屈服阶段及破坏阶段. 高强钢丝温度越低, 弹性阶段越长; 高强钢丝温度越高, 屈服阶段越长. 进入破坏阶段后高强钢丝很快达到极限承载力而破坏.

(2) 高温下高强钢丝的各力学性能指标均有不同程度折减. 20~200 °C下高强钢丝的各力学性能指标折减均不超过10%; 随着钢丝温度的升高, 各力学性能指标折减显著增大, 温度超过700 °C后各力学性能指标折减达到90%以上, 即钢丝材料基本丧失刚度及强度. 本文建立的高强钢丝各力学性能指标高温函数模型具备足够计算精度, 可反映高强钢丝的各力学性能参数高温退化规律. 高强钢丝各力学性能指标的高温折减规律与钢绞线及普通钢材有较大差异, 因此进行缆索体构件抗火分析时, 建议采用高强钢丝的高温力学性能指标作为缆索体构件抗火分析的基本力学参数.

(3) 20~200 °C下高强钢丝的破坏模式为脆性破坏, 断口截面呈杯状, 断面无明显颈缩, 断面收缩率及断后伸长率均较小; 当温度超过200 °C后, 高强钢丝的破坏模式逐渐由脆性破坏转变为塑性破坏, 断口截面由杯状向锥状转变, 断面出现显著颈缩, 断面收缩率及断后伸长率参数均快速增大. 由此表明, 高温下高强钢丝由屈服至最终破坏会经历较长的塑性伸长过程.

参考文献:

- [1] ZHONG T. Mechanical properties of prestressing steel after fire exposure[J]. Materials and Structures, 2015, 48(9):3037-3047.
- [2] 吴琼, 强强, 周祝兵, 等. 武汉青山长江公路大桥1 860 MPa级斜拉索锚具设计研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(增刊1):106-111. WU Qiong, QIANG Qiang, ZHOU Zhubing, et al. Study of anchorage design for 1 860 MPa grade stay cables of Qingshan Changjiang River Highway Bridge in Wuhan [J]. Bridge Construction, 2020, 50(Suppl 1):106-111. (in Chinese)
- [3] 邹易清, 雷欢, 覃磊, 等. 1 670 MPa级高强钢丝的力学性能及Johnson-Cook模型参数研究[J]. 空间结构, 2022, 28(1):55-59. ZOU Yiqing, LEI Huan, QIN Lei, et al. Mechanical properties and Johnson-Cook model parameters of 1 670 MPa grade high-strength steel wire[J]. Spatial Structures, 2022, 28(1):55-59. (in Chinese)
- [4] 孟二从, 姚国文, 余亚琳, 等. 服役环境下镀锌钢丝力学性能影响因素分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4):934-940. MENG Ercong, YAO Guowen, YU Yalin, et al. Influence factor analysis on the mechanical behavior of galvanized steel wire under service environment[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):934-940. (in Chinese)
- [5] 曾严红, 顾祥林, 张伟平, 等. 锈蚀预应力筋力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2):169-174, 209. ZENG Yanhong, GU Xianglin, ZHANG Weiping, et al. Study on mechanical properties of corroded prestressed tendons[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(2):169-174, 209. (in Chinese)
- [6] ZONG Z, JIANG D, ZHANG J. Study of the mechanical performance of grade 1 860 steel wires at elevated temperatures [J]. Materials Research Innovations, 2015, 19 (Suppl 5):1175-1181.
- [7] 杜咏, 肖丽萍, 李国强, 等. 预应力平行钢丝束高温力学性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):114-121. DU Yong, XIAO Liping, LI Guoqiang, et al. Mechanical properties of high tensile parallel wire cables at elevated temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):114-121. (in Chinese)
- [8] 郑文忠, 张昊宇, 胡琼. 基于温度历程的高强钢丝应变及应力计算方法[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(3):288-294. ZHENG Wenzhong, ZHANG Haoyu, HU Qiong. Stress and strain calculate methods of high strength steel wire considering temperature-time path[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(3):288-294. (in Chinese)
- [9] 肖建庄, 代媛媛, 赵勇, 等. 500 MPa细晶粒钢筋高温下的应力-应变关系[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(3):276-282. XIAO Jianzhuang, DAI Yuanyuan, ZHAO Yong, et al. Stress-strain relationship of HRBF500 at high temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(3):276-282. (in Chinese)
- [10] 周浩, 杜咏, 李国强, 等. 预应力钢绞线温度膨胀及高温蠕变性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(6):123-131. ZHOU Hao, DU Yong, LI Guoqiang, et al. Experimental study on thermal expansion and creep properties of pre-stressed steel strands at elevated temperature [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6):123-131. (in Chinese)
- [11] CLARKE N W B, WALLEY F. Creep of high-tensile steel wire [J]. ICE Proceedings, 1953, 2(2):107-135.
- [12] CHEN W, SHEN R L, WANG H, et al. Study of anti-corrosion system and anti-corrosion mechanism for the main cable of suspension bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(12):04021088.
- [13] HOLMES M, ANCHOR R D, COOK G M E, et al. The effects of elevated temperatures on the strength properties of reinforcing and prestressing steels[J]. Structural Engineer—Part B: R&D Quarterly, 1982, 60(1):7-13.
- [14] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures (Part 1/2): General rules—Structural fire design: BS EN 1993-2:2006[S]. London: British Standards Institution, 2006.