

超低温下钢筋单轴受拉时的应力-应变关系

刘爽, 顾祥林, 黄庆华, 张伟平

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 按照《金属材料低温拉伸试验方法》(GB/T13239—2006)的要求制作拉伸试件, 对3种钢筋(热轧带肋钢筋HRB335、HRB400和热轧细晶粒钢筋HRBF400)共84根试件在 -180°C ~ -80°C 温度下的力学性能进行单轴受拉试验, 研究低温下钢筋力学性能的变化规律. 结果表明, 随着温度的降低, 钢筋的应力-应变曲线形状及极限应变基本不改变, 但屈服平台长度、屈服强度、极限强度、强化应变增加. 根据试验结果, 给出了低温下钢筋屈服强度、极限强度、强化应变等力学特征值随温度的变化规律, 进而可建立超低温下钢筋的应力-应变关系.

关键词: 超低温; 钢筋; 应力-应变关系; 力学特征值

中图分类号: TU 511.3; TU502.6

文献标识码: A

Stress - Strain Relationship of Steel Bars at Super-low Temperature

LIU Shuang, GU Xianglin, HUANG Qinghua, ZHANG Weiping

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Mechanical properties of three kinds of 84 steel bars (HRB335, HRB400, and HRBF400) were studied through tests under low temperature ranging from -180°C to -80°C . Tensile specimens were prepared according to national code of GB/T 3239—2006. Through tensile tests, the mechanical behaviors of these rebars under low temperature were studied. Analysis of the test results reveals that the shape of the stress-strain curve and the ultimate strain for steel bars may not be changed by the temperature, but the yield plateau, the yield strength, the ultimate strength, and the hardening strain of steel bars will increase with the decrease of the temperature. Based on the test results, regression equations of the characteristic values reflecting mechanical properties of rebars in super-low temperature environment were established, and then the stress-strain relationship of

steel bars at super-low temperature was proposed.

Key words: super-low temperature; rebar; stress - strain relationship; mechanical characteristic value

地球上可以利用的土地和资源是有限的. 人类为了争取更大的生存空间, 可能向深海拓宽、向极地进军、向太空迈进. 极地和太空的一个共同特点就是环境温度低. 我国东北地区的最低气温纪录为 -53.4°C , 南极地区的最低温度纪录为 -68.2°C ^[1], 而月球最低温度达 -183°C ^[2]. 另外, 在贮液罐中混凝土结构的工作温度一般也为 -180°C ^[3]. 在这种情况下, 研究适用于低温环境下的钢筋混凝土结构具有重要意义. 为了解混凝土结构在低温下的工作性能, 对其进行耐久性评估、寿命预测以及相应的计算机仿真分析, 必须首先研究钢筋在低温下的力学性能.

目前, 钢材低温性能研究的温度变化范围主要集中在 -60°C 以上. 研究表明, 钢材的强度随温度的降低而升高, 塑性和韧性则随着温度的降低而降低^[4-10]. 笔者曾对3种钢筋(热轧带肋钢筋HRB335、HRB400和热轧细晶粒钢筋HRBF400)在 -180°C ~ -80°C 温度下的力学性能进行了探索性试验研究(试件共21根)^[11], 得到了类似的结论. 但由于试验装置的局限, 未能测得钢筋在超低温下的加载全过程曲线, 仅用文献[11]中的结果难以建立超低温下钢筋的应力-应变关系. 现在其试验成果的基础上, 重新选择了试验设备, 又补充进行了这3种钢筋在 -180°C ~ -80°C 环境下的低温拉伸试验(试件共63根), 旨在综合两次试验结果建立超低温下建筑钢筋的应力-应变关系, 为进一步分析钢筋混凝土构件的低温受力性能做准备.

收稿日期: 2009-10-22

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z415)

作者简介: 刘爽(1977—), 女, 博士生, 主要研究方向为混凝土结构. E-mail: liushuang.tongji@163.com

顾祥林(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构与砌体结构基本理论、结构全寿命设计与维护、结构计算机仿真. E-mail: gxl@tongji.edu.cn

1 钢筋的低温拉伸试验

1.1 试验设备

先期试验在上海材料研究所金属检测实验室进行,只测得钢筋的屈服强度和极限强度.后期试验在同济大学力学试验中心进行.研究钢筋低温力学性能的试验设备包括加载、降温和温度控制以及数据测量和记录等三个系统.试验装置的基本原理是利用冷却剂获取试验所需的低温条件,冷却剂采用的是液氮和空气的混合气体.试验设备原理见图1,试验设备见图2.

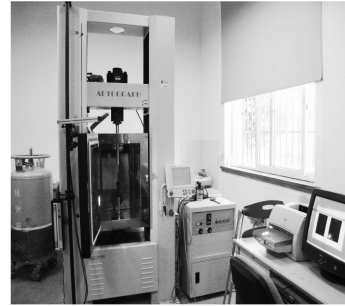


图2 试验装置
Fig.2 Test set-up

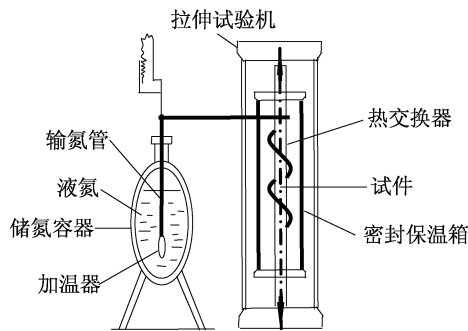


图1 低温拉伸试验原理

Fig.1 Schematic illustration of tension test at low temperature

1.2 试件制作

选择在建筑工程中广泛应用的、直径 $d = 25$ mm 的2种热轧带肋钢筋 HRB335、HRB400 和1种新型热轧细晶粒钢筋 HRBF400.表1列出了试验钢筋的力学指标及化学成分^[11].

钢筋试件按照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228—2002)^[12]及《金属材料低温拉伸试验方法》(GB/T13239—2006)^[13]的要求制作.第一批钢筋拉伸试件标距长度 $l_0 = 50$ mm,平行段总长 $L = 60$ mm.由于更换了试验设备,第二批钢筋的 $l_0 = 100$ mm, $L = 130$ mm.其他指标相同.试件的尺寸如图3所示,图4为加工好的实物照片.试件编号如表2所示.

表1 试验钢筋的力学指标及化学成分

Ta.1 Chemical composition and mechanical property of test specimens

钢筋类型	力学指标				化学成分/%						
	d/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	ϵ_u	D	$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(P)$	$w(S)$	$q_1(C)$
HRB335	25	≥ 335	≥ 455	≥ 0.075	$3d$	0.25	0.44	1.52	0.011	0.035	0.47
HRB400	25	≥ 400	≥ 540	≥ 0.075	$4d$	0.24	0.49	1.48	0.022	0.024	0.50
HRBF400	25	≥ 400	≥ 540	≥ 0.075	$4d$	0.22	0.53	1.35	0.018	0.027	0.45

注: $q_1(C)$ 为碳当量, $q_1(C) = q(C) + q(Mn)/6 + q(Cr, V, Mo)/5 + q(Cu, Ni)/15$; f_y 为屈服强度; f_u 为极限强度; ϵ_u 为极限应变; D 为180°冷弯芯直径; w 为质量分数.

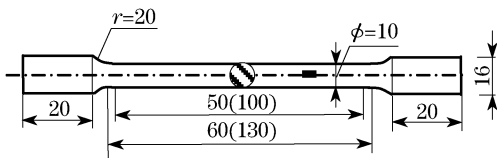


图3 拉伸试件几何尺寸(单位:mm)

Fig.3 Dimensions of test specimens(unit:mm)



图4 加工好的拉伸试件

Fig.4 Photograph of a test specimen

表2 钢筋低温拉伸试件的编号

Tab.2 Specimens' names

钢种	第一批编号	第二批编号
HRB335	LA 1~LA 7	GA 1/2/3/4/5/6/7-1~ GA 1/2/3/4/5/6/7-3
HRB400	LB 1~LB 7	GB 1/2/3/4/5/6/7-1~ GB 1/2/3/4/5/6/7-3
HRBF400	LC 1~LC 7	GC 1/2/3/4/5/6/7-1~ GC 1/2/3/4/5/6/7-3

注:L代表第一批试验钢筋试件,G代表第二批试验钢筋试件;
A表示 HRB335,B表示 HRB400,C表示 HRBF400; 1~7
分别对应 20℃, -80℃, -100℃, -120℃, -140℃,
-160℃, -180℃.

1.3 试验温度与数据采集

拉伸试验的温度点 t 设为 20, -80, -100, -120, -140, -160, -180 °C. 20 °C 下对每种钢筋的 3 个试件进行试验, 其余温度点下对每种钢筋的 4 个试件进行试验. 在每一个给定试验温度下, 都要得到力学指标: 屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 、弹性模量 E_s 、强化应变 ϵ_h 和极限应变 ϵ_u .

第一批试验无相应的钢筋变形测试仪器^[11]. 第二批低温拉伸试验的试验机上配套 DV-201 型非接触式引伸计, 通过 CCD 摄像传感器检测钢筋试件上标线之间的变位, 获得钢筋变形参数. 试验数据通过安装在计算机上的数据采集软件采集, 采集频率为

20 Hz, 数据保存于硬盘. 试件达到预定试验温度后, 恒温 20 min, 开始对试件加载, 加载速度为 5 mm · min⁻¹, 同时采集试验数据.

2 钢筋应力-应变关系试验结果

试验测得的 3 种钢筋在各个温度点下的强度和变形指标如表 3, 4, 5 所示, 3 种钢筋典型的应力-应变关系曲线如图 5 所示. 图中的应力-应变关系曲线从低到高依次对应 20, -80, -100, -120, -140, -160, -180 °C. 试验结果表明, 在 -80 ~ -180 °C 温度范围内, 各温度点的应力-应变曲线形状相似,

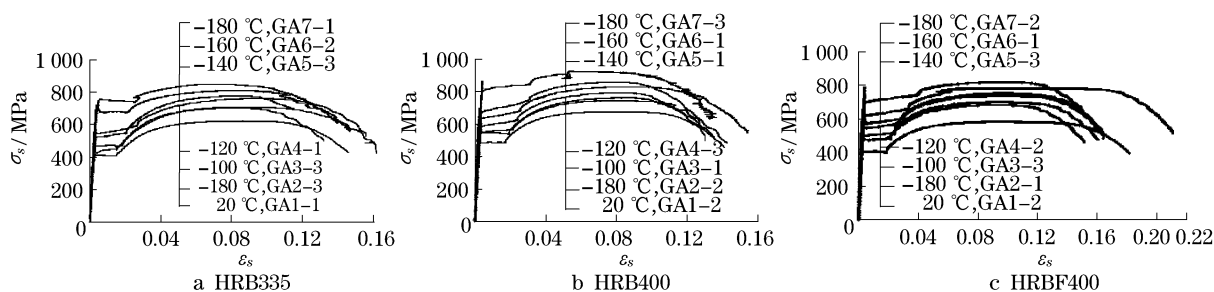


图5 不同试验温度下钢筋应力-应变关系典型曲线

Fig.5 Typical testing strain-stress curves for steel bars at low temperature

表3 HRB335 钢筋低温拉伸试验结果

Tab.3 Test results of steel bars of HRB335

编号	数量	$t/^\circ\text{C}$	f_y/MPa		f_u/MPa		屈服比/%		$E_s/10^5 \text{ MPa}$		ϵ_h		ϵ_u	
			数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值
LA 1	4	20	390	403.75	620.00	622.51	62.90	64.86	—	1.93	—	0.016	—	0.134
GA 1-1			410		623.60		65.75		2.00		0.015		0.125	
GA 1-2			400		608.55		65.73		2.00		0.016		0.144	
GA 1-3			415		637.89		65.06		1.80		0.016		0.134	
LA 2	4	-80	455	442.5	705.00	694.5	64.54	63.70	—	1.53	—	0.017	—	0.124
GA 2-1			435		678.09		64.15		1.00		0.015		0.126	
GA 2-2			455		693.17		65.64		1.90		0.019		0.129	
GA 2-3			425		701.72		60.57		1.70		0.016		0.118	
LA 3	4	-100	445	463.25	720.00	715.41	61.81	64.77	—	2.03	—	0.019	—	0.122
GA 3-1			472		722.81		65.30		2.00		0.018		0.128	
GA 3-2			470		710.65		66.14		2.20		0.020		0.118	
GA 3-3			466		708.18		65.80		1.90		0.019		0.119	
LA 4	4	-120	500	505.00	745.00	752.69	67.11	67.09	—	2.23	—	0.021	—	0.116
GA 4-1			525		777.41		67.53		1.70		0.021		0.098	
GA 4-2			495		747.00		66.27		3.00		0.020		0.120	
GA 4-3			500		741.34		67.45		2.00		0.021		0.130	
LA 5	4	-140	570	543.75	780.00	764.43	73.08	71.10	—	1.87	—	0.023	—	0.123
GA 5-1			555		783.00		70.88		2.00		0.021		0.140	
GA 5-2			505		732.08		68.98		1.80		0.021		0.114	
GA 5-3			545		762.64		71.46		1.80		0.027		0.115	
LA 6	4	-160	625	650.5	810.00	819.34	77.16	79.40	—	2.22	—	0.023	—	0.112
GA 6-1			680		827.02		82.22		2.60		0.021		0.109	
GA 6-2			675		810.69		83.26		2.17		0.023		0.112	
GA 6-3			622		829.64		74.97		1.90		0.026		0.115	
LA 7	4	-180	675	688.75	840.00	850.14	80.36	81.08	—	1.70	—	0.027	—	0.083
GA 7-1			740		849.68		87.09		1.80		0.028		0.086	
GA 7-2			645		874.67		73.74		1.50		0.020		0.062	
GA 7-3			695		836.19		83.12		1.80		0.033		0.100	

注: 第一批试验结果已在文献^[11]中发表, 但未获得相关变形数据。

表 4 HRB400 钢筋低温拉伸试验结果
Tab.4 Test results of steel bars of HRB400

编号	数量	t/°C	f _y /MPa		f _u /MPa		屈强比/%		E _s /10 ⁵ MPa		ε _h		ε _u	
			数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值
LB 1			478		673.33		70.99		—					
GB 1-1	4	20	465	479.5	648.07	669.39	71.75	71.63	1.9	1.90	0.017	0.017	0.132	0.132
GB 1-2			485		676.98		71.64		1.8		0.017		0.134	
GB 1-3			490		679.16		72.15		2.0		0.017		0.130	
LB 2			540		750.00		72.00		—					
GB 2-1	4	-80	540	537.5	757.06	746.83	71.33	71.98	1.5	1.70	0.020	0.020	0.122	0.115
GB 2-2			540		745.35		72.45		1.9		0.019		0.111	
GB 2-3			530		734.89		72.12		1.7		0.020		0.111	
LB 3			550		765.00		71.90		—					
GB 3-1	4	-100	545	568.75	763.21	797.30	71.41	71.33	2.0	2.00	0.021	0.021	0.109	0.107
GB 3-2			645		904.34		71.32		2.2		0.021		0.108	
GB 3-3			535		756.53		70.71		1.8		0.019		0.102	
LB 4			560		765.00		73.20		—					
GB 4-1	4	-120	590	578.75	798.77	785.18	73.86	73.70	2.3	2.03	0.022	0.023	0.119	0.113
GB 4-2			575		784.73		73.27		1.8		0.023		0.111	
GB 4-3			590		792.21		74.48		2.0		0.024		0.107	
LB 5			665		830.00		80.12		—					
GB 5-1	4	-140	630	640.00	831.98	829.30	75.72	77.17	3.4	2.37	0.026	0.026	0.109	0.108
GB 5-2			635		826.02		76.87		1.6		0.026		0.114	
GB 5-3			630		829.22		75.98		2.1		0.026		0.102	
LB6			705		860.00		81.98		—					
GB 6-1	4	-160	670	686.25	859.42	859.87	77.96	79.81	1.7	1.87	0.031	0.026	0.093	0.101
GB 6-2			690		869.77		79.33		1.7		0.016		0.101	
GB 6-3			680		850.3		79.97		2.2		0.031		0.108	
LB 7			825		915.00		90.16		—					
GB 7-1	4	-180	835	822.50	959.87	927.35	86.99	88.72	1.8	1.57	—	0.033	0.099	0.087
GB 7-2			825		906.69		90.99		1.2		0.034		0.077	
GB 7-3			805		927.84		86.76		1.7		0.032		0.085	

注:第一批试验结果已在文献[11]中发表,但未获得相关变形数据。

表 5 HRBF400 钢筋低温拉伸试验结果
Tab.5 Test results of steel bars of HRBF400

编号	数量	t/°C	f _y /MPa		f _u /MPa		屈强比/%		E _s /10 ⁵ MPa		ε _h		ε _u	
			数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值	数值	平均值
LC 1			405		593.33		68.26		—					
GC 1-1	4	20	410	411.25	598.41	593.95	68.51	69.24	2.1	2.10	0.019	0.019	0.143	0.146
GC 1-2			410		584.31		70.17		2.0		0.019		0.161	
GC 1-3			420		599.73		70.03		2.2		0.019		0.133	
LC 2			485		690.00		70.29		—					
GC 2-1	4	-80	480	476.25	684.02	681.87	70.17	69.84	1.9	1.90	0.022	0.022	0.127	0.126
GC 2-2			470		677.74		69.35		1.9		0.023		0.130	
GC 2-3			470		675.71		69.56		1.9		0.022		0.121	
LC 3			465		735.00		63.27		—					
GC 3-1	4	-100	470	486.25	681.19	707.66	69.00	68.77	2.2	2.03	0.023	0.023	0.095	0.118
GC 3-2			510		712.68		71.56		1.8		0.023		0.137	
GC 3-3			500		701.76		71.25		2.1		0.024		0.122	
LC 4			545		735.00		74.15		—					
GC 4-1	4	-120	535	535.00	729.83	732.26	73.30	73.05	2.2	2.00	0.027	0.027	0.127	0.127
GC 4-2			545		740.30		73.62		1.9		0.027		0.128	
GC 4-3			515		723.90		71.14		1.9		0.026		0.126	
LC 5			575		760.00		75.66		—					
GC 5-1	4	-140	550	568.75	741.18	751.84	74.21	75.65	2.2	1.97	0.029	0.030	0.135	0.132
GC 5-2			580		753.07		77.02		1.9		0.031		0.131	
GC 5-3			570		753.09		75.69		2.0		0.030		0.128	
LC 6			625		790.00		79.11		—					
GC 6-1	4	-160	615	620.00	782.97	781.70	78.55	79.34	1.8	1.77	0.034	0.034	0.123	0.117
GC 6-2			620		760.92		81.48		1.6		0.035		0.122	
GC 6-3			620		792.90		78.19		1.8		0.034		0.106	
LC 7			745		855.00		87.13		—					
GC 7-1	4	-180	745	722.5	846.78	837.70	87.98	86.23	1.8	1.80	0.039	0.039	0.093	0.096
GC 7-2			700		821.91		85.17		1.9		0.041		0.102	
GC 7-3			700		827.11		84.63		1.7		0.038		0.093	

注:第一批试验结果已在文献[11]中发表,但未获得相关变形数据。

均包括弹性阶段、屈服平台、强化阶段和颈缩几个部分;随着温度降低,屈服平台的长度略有增加,应力-应变曲线进入屈服平台之前出现明显的突起尖点,即应力-应变曲线沿着弹性阶段上升到较高的强度,然后迅速下跌一定数值进入屈服阶段,突起尖点和屈服平台的差值增大;3种钢筋在低温下的应力-应变曲线总体趋势相同.钢筋拉伸形变区微结构主要为位错和孪晶^[9].超低温下钢筋的变形特征可能与孪晶硬化机制与位错硬化机制之间的相互作用有关.详细的机理有待深入研究.

3 钢筋力学性能的变化规律

3.1 钢筋强度随温度的变化规律

图 6a,b 为 28 根 HRB335 钢筋试件在低温下的屈服强度相对值、极限强度相对值随温差的变化规律.其中,强度相对值为钢筋低温下的强度与室温下强度平均值的比值,Δ*t* 为试验温度与室温(设为 20℃)的差值.从图中可以看出,随着温度的降低,钢筋的屈服强度相对值、极限强度相对值均近似按指数关系递增,且屈服强度相对值比极限强度相对值增加更为显著.式(1)和式(2)分别给出了低温下 HRB335 钢筋屈服强度相对值和极限强度相对值随温差变化的回归计算公式,相关系数分别为 0.813,0.932.

$$\alpha_{y1} = e^{-0.0021\Delta t}, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\alpha_{u1} = e^{-0.0014\Delta t}, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中:α_{y1}, α_{u1} 分别为低温下 HRB335 钢筋屈服强度和极限强度相对值, α_{y1} = *f*_{y1}/*f*_y, α_{u1} = *f*_{u1}/*f*_u; *f*_{y1}, *f*_{u1} 分别为低温下 HRB335 钢筋的屈服强度和极限强度.

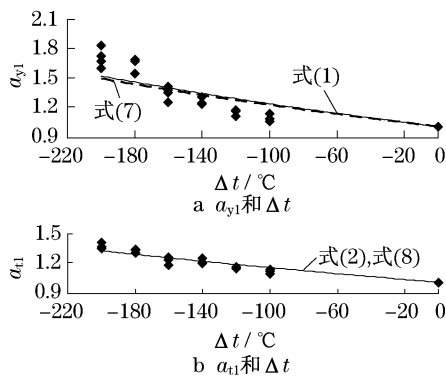


图 6 HRB335 屈服强度、极限强度相对值和温差的关系
Fig.6 Relationship between relative yield strength or relative ultimate strength and temperature difference for HRB335 steel bars

图 7a,b 所示为 28 根 HRB400 钢筋试件在低温下的屈服强度相对值、极限强度相对值随温差的变化规律.和 HRB335 钢筋类似,随着温度的降低,钢筋的屈服强度相对值、极限强度相对值均近似按指数关系递增,且屈服强度相对值比极限强度相对值增加更为显著.式(3)和式(4)分别给出了低温下 HRB400 钢筋屈服强度相对值和极限强度相对值随温差变化的回归计算公式,相关系数分别为 0.820, 0.872.

$$\alpha_{y2} = e^{-0.0019\Delta t}, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$\alpha_{u2} = e^{-0.0014\Delta t}, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

式中:α_{y2}, α_{u2} 分别为低温下 HRB400 钢筋屈服强度和极限强度相对值, α_{y2} = *f*_{y2}/*f*_y, α_{u2} = *f*_{u2}/*f*_u; *f*_{y2}, *f*_{u2} 分别为低温下 HRB400 钢筋的屈服强度和极限强度.

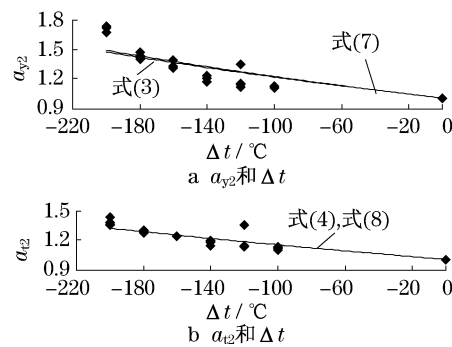


图 7 HRB400 屈服强度、极限强度相对值和温差的关系
Fig.7 Relationship between relative yield strength or relative ultimate strength and temperature difference for HRB400 steel bars

图 8a,b 所示为 28 根 HRBF400 钢筋试件在低温下的屈服强度相对值、极限强度相对值随温差的变化规律.从图中可以看出,有和 HRB335、HRB400 钢筋类似的结论.式(5)、式(6)分别给出了低温下 HRBF400 钢筋屈服强度相对值和极限强度相对值随温差变化的回归计算公式,相关系数依次为 0.870,0.959.

$$\alpha_{y3} = e^{-0.0022\Delta t}, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$\alpha_{u3} = e^{-0.0015\Delta t}, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

式中:α_{y3}, α_{u3} 分别为低温下 HRBF400 钢筋屈服强度和极限强度相对值, α_{y3} = *f*_{y3}/*f*_y, α_{u3} = *f*_{u3}/*f*_u; *f*_{y3}, *f*_{u3} 分别为低温下 HRBF400 钢筋的屈服强度和极限强度.

分别比较两组公式——式(1),(3),(5),及式(2),(4),(6),发现每组公式间的差别很小.便于应用,统一用式(7),(8)表示钢筋屈服强度相对值和

极限强度相对值随温差的变化规律,其与 84 根钢筋试验结果的相关系数分别为 0.832,0.916.

$$\alpha_y = e^{-0.002\Delta t}, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$\alpha_u = e^{-0.0014\Delta t}, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

式中: α_y, α_u 分别为低温下钢筋屈服强度和极限强度相对值, $\alpha_y = f_{yt}/f_y, \alpha_u = f_{ut}/f_u$; f_{yt}, f_{ut} 分别为低温下钢筋的屈服强度和极限强度.

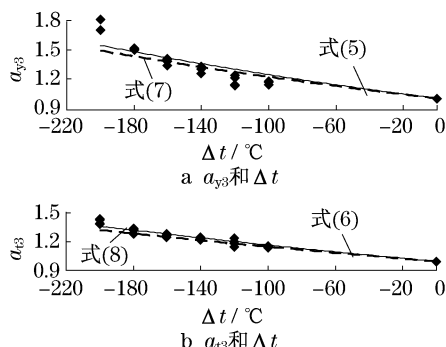


图 8 HRBF400 屈服强度、极限强度相对值和温差的关系
Fig.8 Relationship between relative yield strength or relative ultimate strength and temperature difference for HRBF400 steel bars

依据式(7),(8),可以得到 20 °C ~ -60 °C 范围内各温度下钢筋相对强度的计算值.以 HRB335 钢筋为例,并选文献[13]中化学成分与之相近的 16Mn

钢进行比较分析,结果如表 6 所示.从表中可以看出,计算值与试验值的误差在 4%以内,吻合较好.说明式(7),(8)可以很好地估计 -80 °C ~ 20 °C 之间钢筋的力学性能.

表 6 与文献[13]中部分试验结果的比较
Tab.6 Comparison with some test results in reference[13]

计算结果	t/°C				
	20	0	-20	-40	-60
$\alpha_y^{(1)}$	1	1.050	1.100	1.150	1.200
$\alpha_y^{(2)}$	1	1.034	1.066	1.111	1.160
$(\alpha_y^{(1)}/\alpha_y^{(2)})/\%$	100	101.5	103.2	103.5	103.4
$\alpha_y^{(1)}$	1	1.032	1.064	1.096	1.128
$\alpha_y^{(2)}$	1	1.019	1.038	1.065	1.104
$(\alpha_y^{(1)}/\alpha_y^{(2)})/\%$	100	101.3	102.5	102.9	102.2

注:1)本文结果,对应 HRB335;2)文献[13]结果,对应 16 Mn 钢.

3.2 钢筋弹性模量、特征应变随温度的变化规律

3.2.1 弹性模量

图 9a, b, c 分别给出了 HRB335, HRB400, HRBF400 的钢筋试件弹性模量随温差变化关系的试验结果.从图中可以看出:随着温度的降低,各种钢筋的弹性模量均变化不大,近似在某一个确定值附近上下波动.因此,本文在确定低温下钢筋应力-应变关系模型时,不考虑弹性模量随温度的变化.

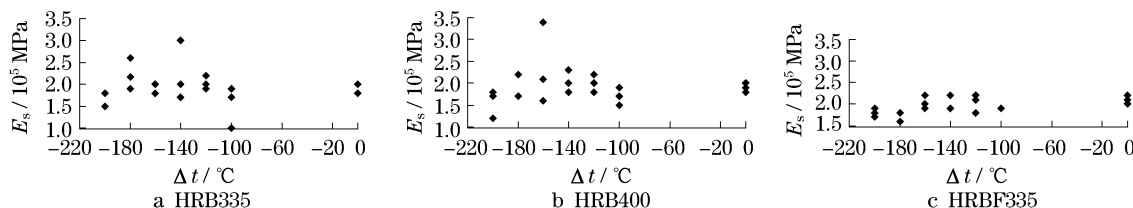


图 9 3 种钢筋弹性模量和温差的关系
Fig.9 Relationship between elastic modulus and temperature difference

3.2.2 强化应变

图 10a 给出了 28 根 HRB335 钢筋试件的强化应变相对值随温差的变化规律.其中,强化应变相对值为低温下钢筋的强化应变与室温下钢筋强化应变平均值的比值, Δt 为试验温度与室温(20 °C)的差值.从图中可以看出,随着温度的降低,钢筋的强化应变相对值近似按二次式关系递增.式(9)给出了钢筋强化应变相对值随温差变化的回归计算公式,相关系数为 0.780.

$$\alpha_{hl} = 1 + 0.0013\Delta t + 2 \times 10^{-5}\Delta t^2, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

式中: α_{hl} 为低温下 HRB335 钢筋强化应变相对值, $\alpha_{\epsilon_{hl}} = \epsilon_{hl}/\epsilon_h$; ϵ_{hl} 为低温下 HRB335 钢筋的强化应变; ϵ_h 为常温下钢筋的强化应变.

图 10b 给出了 28 根 HRB400 钢筋试件的强化应变相对值随温差的变化规律.同理可以得出式(10)所示的钢筋强化应变相对值随温差变化的回归公式,相关系数为 0.980.

$$\alpha_{h2} = 1 + 0.0025\Delta t + 4 \times 10^{-5}\Delta t^2, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

式中: α_{h2} 为低温下 HRB400 钢筋强化应变相对值, $\alpha_{h2} = \epsilon_{h2}/\epsilon_h$; ϵ_{h2} 为低温下 HRB400 钢筋的强化应变;

ϵ_h 为常温下钢筋的强化应变.

图 10c 给出了 28 根 HRBF400 钢筋试件的强化应变相对值随温差的变化规律. 同理, 式(11)给出了钢筋强化应变相对值随温差变化的回归公式, 相关系数为 0.990.

$$\alpha_{h3} = 1 + 0.0026\Delta t + 4 \times 10^{-5}\Delta t^2, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

式中: α_{h3} 为低温下 HRBF400 钢筋强化应变相对值, $\alpha_{h3} = \epsilon_{h3} / \epsilon_h$; ϵ_{h3} 为低温下 HRBF400 钢筋的强化应变; ϵ_h 为常温下钢筋的强化应变.

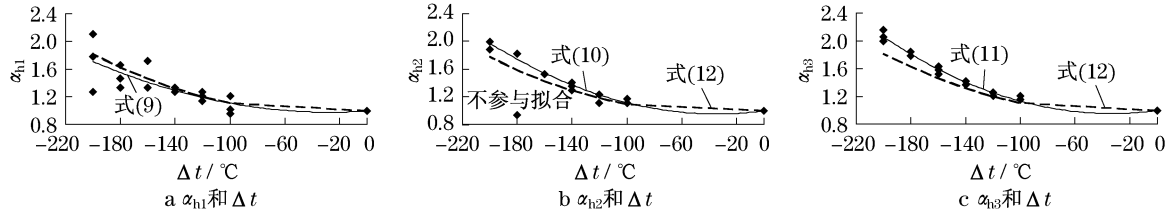


图 10 强化应变相对值和温差的关系

Fig.10 Relationship between relative hardening strain and temperature difference for steel bars

比较式(9)~式(11)表明,不同钢筋的强化应变随温差的变化规律基本相同,为应用方便,统一用式(12)计算低温下钢筋强化应变的相对值(式(12)和 84 根钢筋试验结果的相关系数为 0.900).

$$\alpha_h = 1 + 0.0021\Delta t + 3 \times 10^{-5}\Delta t^2, \quad \Delta t \geq -200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12)$$

式中: α_h 为低温下钢筋强化应变相对值, $\alpha_h = \epsilon_{ht} / \epsilon_h$; ϵ_{ht} , ϵ_h 分别为低温和常温下钢筋的强化应变.

3.2.3 极限应变

图 11a, b, c 分别给出了 HRB335, HRB400, HRBF400 各 28 根钢筋试件的极限应变相对值和温差关系的试验结果. 其中,极限应变相对值为低温下与室温下钢筋强化极限应变平均值的比值. 由图可见:随着温度降低,钢筋极限应变相对值整体呈降低趋势,但较为离散. 因此,在确定低温下钢筋应力-应变关系模型时,近似认为极限应变随温度变化.

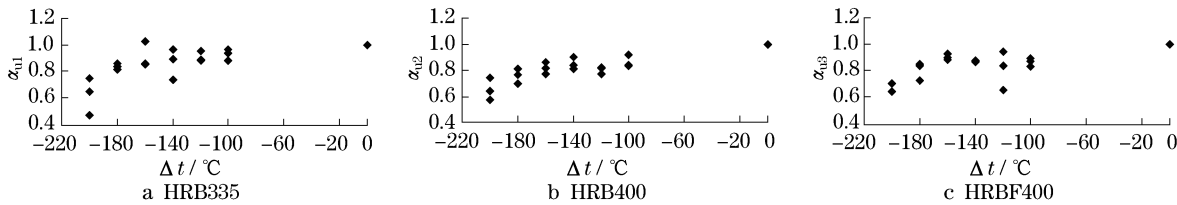


图 11 钢筋极限应变相对值和温差的关系

Fig.11 Relationship between ultimate strain and temperature difference

4 结语

随着温度的降低,不同种类钢筋力学性能随温度的变化规律基本相同:①屈服强度相对值、极限强度相对值均按指数关系递增,且屈服强度相对值比极限强度相对值增加更为显著.②弹性模量基本不变化.③钢筋的强化应变近似按二次项关系递增.④极限应变基本不变化,且钢筋应力-应变关系曲线的形状基本不随温度的变化而改变.因此,结构分析时可以采用文献[14]建议的二线形或三线形的钢筋应力-应变本构关系,但应根据本文建议的关系式确定低温下钢筋的关键力学特征值.

参考文献:

[1] 陈锦年,褚健婷,许兰英. 南极气候和海冰的时空变化特征及其与太平洋海温场的关系[J]. 海洋学报,2003,25(6):39. CHEN Jinnian, CHU Jianting, XU Lanying. Spatio-temporal characteristics of antarctic temperature and sea ice and their relationship[J]. Acta Oceanologica Sinica,2003,25(6):39.

[2] 李雄耀,王世杰,程安云. 月球表面温度物理模型研究现状[J]. 地球科学进展,2007,22(5):480. LI Xiongyao, WANG Shijie, CHEN Anyun. A review of lunar-surface temperature model[J]. Advances in Earth Science, 2007,22(5):480.

[3] 王笃学. 温度对混凝土的影响[J]. 国外建筑科学,1997,15(1):23.

(下转第 968 页)