

国产结构用铝合金高温力学性能试验研究

郭小农¹,高志朋¹,朱劭骏^{1†},王昆¹,相阳¹,高安江²

(1.同济大学 土木工程学院,上海 200092; 2.丛林铝业集团有限公司,山东 龙口 265705)

摘要:为了研究铝合金材料在高温下的力学性能,完成了国产结构用铝合金 6082-T6、6N01-T6、6061-T4 和 6061-T6 的高温下恒温加载试验.试验测得了 4 种牌号铝合金在不同温度下(20 ~ 300 ℃)的力学性能,包括名义屈服强度、极限强度和延伸率等力学性能指标.然而在试验中发现高温下材料应变难以准确测量,因此未能获得各牌号铝合金高温下的弹性模量.将试验数据进行拟合,得到了 4 种牌号铝合金力学性能指标高温折减系数的计算式,为铝合金结构的抗火性能研究打下基础.此外,还将所得到的折减系数计算式与欧洲规范和美国规范中的建议值进行对比,结果表明规范建议值均偏安全,其中美国规范最为保守.

关键词:铝合金;高温;拉伸试验;力学性能

中图分类号:TU512.4

文献标志码:A

Experimental Research on Mechanical Property of Domestic Structural Aluminum Alloy at Elevated Temperatures

GUO Xiaonong¹, GAO Zhipeng¹, ZHU Shaojun^{1†}, WANG Kun¹, XIANG Yang¹, GAO Anjiang²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Conglin Group Co., Ltd., Longkou 265705, China)

Abstract: In order to investigate the elevated-temperature mechanical behavior of aluminum alloy, tensile tests of domestic structural aluminum alloy 6082-T6, 6N01-T6, 6061-T4, 6061-T6 under constant elevated temperatures were carried out, and their mechanical properties under various temperatures (20 ~ 300 ℃) were obtained, including the nominal yield strength, ultimate strength and elongation. It was found that the strain of aluminum alloy specimens at elevated temperature could hardly be accurately measured, leading that their elastic modulus was not obtained. The formulae of reduction factors on the mechanical properties of the 4 kinds of aluminum alloy at elevated temperatures were derived through numerical fitting method, laying a solid foundation of the research on fire resistance of aluminum alloy structures. Moreover, the theoretical formulae were compared with the reduction factors suggested by Eurocode and American Standard. The results revealed that the codes inclined to the safe side, and the American Standard was more conservative.

Key words: aluminum alloy; elevated temperatures; tensile tests; mechanical properties

* 收稿日期:2017-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478335), National Natural Science Foundation of China(51478335)

作者简介:郭小农(1977—),男,四川金堂人,同济大学副教授,博士生导师,工学博士

† 通讯联系人, Email: zhushaojun@tongji.edu.cn

铝合金是一种新型建筑材料,和传统的钢材相比,铝合金具有重量轻、强度高、可模性好、延展性好、耐腐蚀性好等优点,因此被广泛应用于工业和民用建筑中^[1]。和钢材相比,铝合金的防火性能较差,随着温度的升高,铝合金的强度和弹性模量下降很快^[2]。铝合金材料的耐火性能直接影响到铝合金结构高温下的安全性,因此研究铝合金高温下的力学性能是十分必要的。

国外对于铝合金高温下的力学性能研究较为成熟。Khalifa^[3]和 Kaufman^[4]等分别对铝合金材料进行拉伸试验和受弯试验,Dorn^[5]和 Harmathy^[6]等提出了考虑材料蠕变效应的本构关系模型,用以模拟铝合金材料高温下的本构关系,Maljaars等^[7]提出不同系列铝合金高温弹性模量公式。Maljaars等^[8]还指出,铝合金的高温强度受蠕变变形的影响,对于5xxx系列(如5083-O,5083-H12,等)铝合金,欧洲规范^[9]给出的名义屈服强度偏于不安全。

和国外的研究相比,国内对于铝合金高温力学性能的研究起步较晚。2009年,彭航^[10]等完成了建筑用6061-T6系铝合金高温下力学性能试验研究,得出了该系列铝合金高温下的材料性能指标,包括抗拉强度、弹性极限强度和延伸率等力学性能参数,并根据试验结果拟合得到高温下的材性模型。梁水平^[11]完成了国产7020-T6铝合金高温下力学性能试验研究,得到了该系列铝合金的名义屈服应力、弹性模量、延伸率、抗拉强度等力学性能参数,并给出了高温下力学性能的折减系数建议值。张辉^[12]等完成了4050系铝合金的热压缩实验,得到了该铝合金的热变形行为及其热加工特性。严红革^[13]等研究了2024Al/Gr/SiCp复合材料高温下的拉伸力学性能。

近年来,在建筑结构领域,除了传统牌号6061-T6以及6061-T4,一些新型牌号也逐渐得到应用,比如6082-T6和6N01-T6等。对于这些国产牌号的铝合金,其高温下的力学性能研究资料非常匮乏。鉴于此,本文完成了上述4种牌号铝合金高温下的力学性能试验,得出了其高温下的力学性能指标。

1 试验设计

1.1 试件设计

依据《金属材料拉伸试验》(GB/T228.1—2010, GB/T228.2—2015)^[14-15],本文设计了4种牌号的铝合

金试件共计48根,试件编号如表1所示。由于铝合金在300℃以上时,承载力下降过快,同时也受限于试验条件,故本文共设置了20℃、100℃、150℃、200℃、250℃、300℃等6个温度点。表1还给出每根试件的实测截面尺寸。试件图如图1所示,所有试件均为板材拉伸试样,名义截面尺寸为15mm×4mm;为满足高温炉的夹持要求,等截面段长度150mm,试件总长度300mm。图2给出了6082-T6系列试件在试验前的照片。

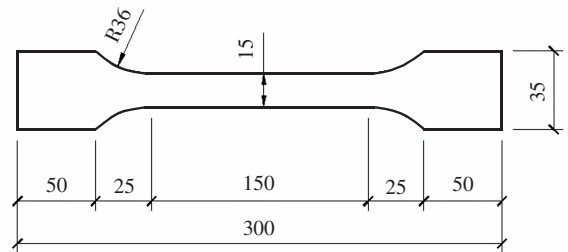


图1 试件详图

Fig.1 Specimen detailed information

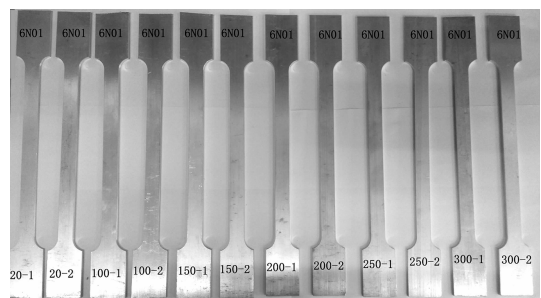


图2 部分试件照片

Fig.2 Part of the specimens

1.2 加载和测量装置

本试验在同济大学力学试验中心完成,所用试验仪器为岛津高温电子万能试验机,型号为AG-250。试验机最大量程为250 kN,满足试验要求。试验仪器由四部分组成,分别为加载装置(见图3)、热与恒温设备、位移测量侧摄像头、操作与控制装置。由于试验是在高温下进行的,因此常温位移引伸计不再适用,本试验采用了高清摄像头捕捉应变;试验前首先在试件上涂刷防火漆以加大反光率,然后在防火漆上设定光学捕捉标记,通常标记间距为20~40 mm;试验时将高清摄像头捕捉到的距离变化输入到采集系统中,并通过标距进一步换算出应变。试件加载前在恒温设备内加热,达到预设温度后保持恒温15 min,然后在恒定温度下进行加载试验。

表1 试件信息汇总表
Tab.1 Summary table of the specimens

材料牌号	试件编号	试验温度/°C	实测截面/(mm × mm)	材料牌号	试件编号	试验温度/°C	实测截面/(mm × mm)
6082-T6	A+020-1	20	14.91 × 4.09	6N01-T6	B+020-1	20	15.03 × 3.75
	A+020-2		14.90 × 4.06		B+020-2		15.05 × 3.74
	A+100-1	100	14.94 × 4.25		B+100-1	100	15.09 × 4.11
	A+100-2		14.94 × 3.91		B+100-2		15.08 × 3.82
	A+150-1	150	14.91 × 3.93		B+150-1	150 °C	15.07 × 3.91
	A+150-2		14.91 × 3.95		B+150-2		15.07 × 4.96
	A+200-1	200	14.99 × 4.12		B+200-1	200	15.03 × 4.99
	A+200-2		15.02 × 4.05		B+200-2		15.06 × 3.77
	A+250-1	250	15.03 × 4.05		B+250-1	250	15.23 × 3.78
	A+250-2		14.95 × 3.89		B+250-2		15.14 × 3.16
	A+300-1	300	14.97 × 4.11		B+300-1	300	14.99 × 3.66
	A+300-2		14.97 × 3.99		B+300-2		15.07 × 3.07
6061-T6	C+020-1	20	15.23 × 4.03	6061-T4	D+020-1	20	15.12 × 4.13
	C+020-2		15.15 × 3.64		D+020-2		15.14 × 4.11
	C+100-1	100	15.02 × 3.55		D+100-1	100	15.10 × 4.11
	C+100-2		14.96 × 3.78		D+100-2		15.09 × 4.09
	C+150-1	150	15.17 × 4.11		D+150-1	150	15.13 × 4.06
	C+150-2		15.07 × 3.37		D+150-2		15.09 × 4.05
	C+200-1	200	15.07 × 3.38		D+200-1	200	15.10 × 4.05
	C+200-2		15.16 × 3.47		D+200-2		15.10 × 4.09
	C+250-1	250	15.09 × 3.37		D+250-1	250	15.07 × 4.07
	C+250-2		15.09 × 3.35		D+250-2		15.11 × 4.10
	C+300-1	300	15.09 × 4.15		D+300-1	300	15.10 × 4.11
	C+300-2		15.17 × 4.11		D+300-2		15.10 × 4.08

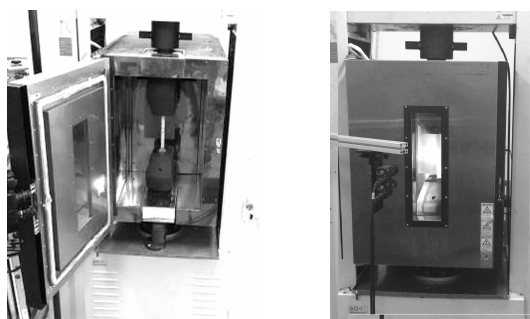


图3 加载装置
Fig.3 Loading device

2 试验结果分析

各试件在加载初期,拉力增长速度很快,而拉

伸变形只有少量增加,应力-应变曲线近似为一条倾斜的直线,材料处于弹性阶段.当拉力增大到一定程度后,拉伸变形开始急剧增大,而拉力基本恒定,材料进入屈服阶段.最后试件某个位置出现颈缩,荷载急剧下降,直至试件断裂.当温度相对较低时,试件断裂时能听到明显的断裂声,试件断口呈现45°斜破坏面;而随着温度升高,断裂时的声音逐渐微弱,断口截面收缩更为明显,断口更加平直.

表2给出了所有试件的实测抗拉强度、屈服强度、延伸率和断面收缩率,并给出了各组试件的试验结果均值.图4给出部分试件拉断后的照片.从图4可以看出,由于试验条件限制,部分试件的断口未出现在中部,因此表2中的延伸率数据不够准确.

表 2 试验结果汇总表
Tab.2 Summary table of the test results

试件编号	抗拉强度 f_u /MPa	平均值/MPa	屈服强度 $f_{0.2}$ /MPa	平均值/MPa	延伸率 δ_5 /%	平均值/%	断面收缩率 ψ /%	平均值/%
A+020-1	290.6		258.7		12.0		27.9	
A+020-2	293.7	292.2	261.9	260.3	15.0	13.5	27.7	27.8
A+100-1	280.2		254.6		13.7		19.7	
A+100-2	282.1	281.2	254.7	254.7	13.3	13.5	27.2	23.5
A+150-1	215.6		185.0		14.0		29.1	
A+150-2	248.3	232.0	195.0	190.0	14.9	14.5	25.4	27.3
A+200-1	233.4		180.0		14.0		26.4	
A+200-2	207.5	220.5	172.0	176.0	14.7	14.5	24.8	25.2
A+250-1	190.4		159.2		12.3		27.4	
A+250-2	196.2	193.3	156.8	158.0	12.0	12.2	24.9	26.2
A+300-1	154.5		140.0		11.3		14.4	
A+300-2	134.3	144.4	115.0	127.5	9.3	10.3	17.0	15.7
B+020-1	273.1		228.0		18.5		22.6	
B+020-2	278.3	275.7	222.8	225.4	17.7	18.1	21.4	22.0
B+100-1	229.3		206.5		16.4		31.8	
B+100-2	230.6	229.9	201.5	204.0	15.5	15.9	31.3	31.6
B+150-1	207.4		184.9		15.3		32.9	
B+150-2	210.4	208.9	187.6	186.3	16.3	15.8	26.5	29.7
B+200-1	192.3		179.0		15.3		24.0	
B+200-2	178.5	185.4	166.4	172.7	10.3	12.8	25.5	24.8
B+250-1	170.5		163.0		9.3		22.9	
B+250-2	167.0	168.8	160.9	162.0	9.0	9.2	24.0	23.5
B+300-1	142.6		142.0		6.0		20.2	
B+300-2	135.9	139.3	135.8	138.9	6.0	6.0	20.8	20.5
C+020-1	270.0		199.0		13.0		43.0	
C+020-2	276.7	273.4	244.0	221.5	12.4	12.7	36.0	39.5
C+100-1	250.0		219.0		9.3		39.4	
C+100-2	229.0	239.5	206.0	212.5	9.5	9.4	41.9	40.7
C+150-1	254.8		235.3		13.3		43.1	
C+150-2	225.9	240.4	210.3	222.8	7.3	10.3	38.7	40.9
C+200-1	228.4		222.4		9.3		43.4	
C+200-2	196.1	212.3	190.0	206.2	16.7	13.0	43.7	43.6
C+250-1	178.9		170.0		12.0		41.2	
C+250-2	175.1	177.0	159.0	164.5	7.7	9.9	36.2	38.7
C+300-1	147.0		143.0		12.7		53.7	
C+300-2	130.0	138.5	128.0	135.5	14.3	13.5	53.2	53.5
D+020-1	228.9		112.1		19.3		26.9	
D+020-2	227.5	228.2	108.0	110.1	19.0	19.2	30.2	28.6
D+100-1	200.8		105.8		20.0		30.4	
D+100-2	191.4	196.1	115.0	110.4	21.7	20.9	34.9	32.7
D+150-1	200.4		109.0		16.0		30.5	
D+150-2	198.5	199.5	115.3	112.2	13.3	14.7	35.8	33.2
D+200-1	180.7		107.0		15.7		30.5	
D+200-2	171.7	176.2	106.0	106.5	15.3	15.5	38.0	34.3
D+250-1	165.8		104.0		19.0		32.6	
D+250-2	164.0	164.9	101.0	102.6	17.0	18.0	31.4	32.0
D+300-1	124.8		97.2		10.3		38.0	
D+300-2	130.3	127.5	95.7	96.5	11.0	10.7	30.4	34.2



(a)6N01-T6



(b)6061-T6

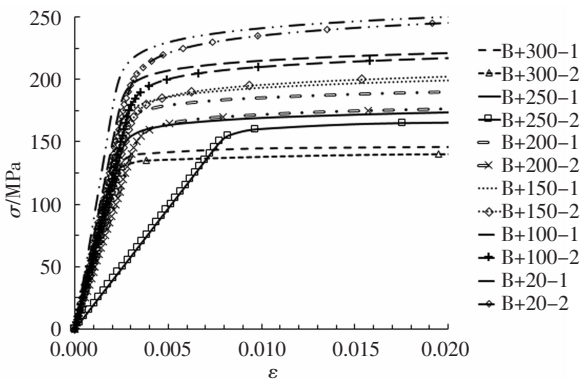


(c)6082-T6

图4 拉断后的试件照片

Fig.4 Image of the tensile failure specimens

图5给出了6082-T6系列试件和6N01-T6系列试件的实测应力应变曲线,从图5可以看出:随着温度的升高,铝合金的名义屈服强度和极限抗拉强度均不断下降。



(a)6N01-T6

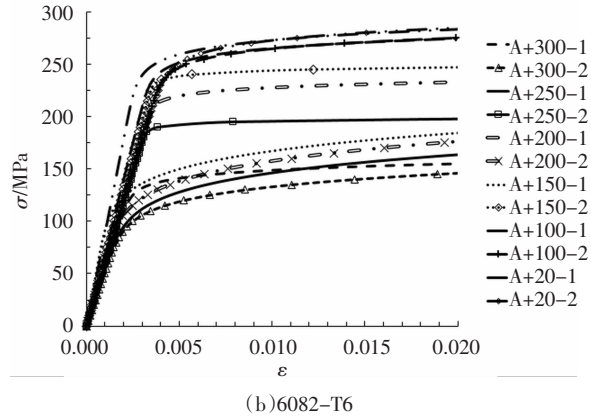


图5 部分试件的实测应力-应变曲线

Fig.5 Part of the measured stress-strain curves of the specimens

3 高温下力学性能指标折减系数

高温下和常温下结构分析的一个主要区别在于材料性能随温度的变化而变化,因此结构抗火分析结果的精度很大程度上取决于分析中所采用的高温下力学性能指标.其中最为重要的力学性能指标包括弹性模量、名义屈服强度、极限强度和延伸率等.由于试验得到的弹性模量和延伸率不够准确,故后文仅给出了极限强度和名义屈服强度的高温折减系数.

3.1 极限强度高温折减系数

记 $k_1(T)$ 为高温下极限强度折减系数,则为温度 T 时铝合金极限强度标准值 $f_u(T)$ 可按下式计算:

$$f_u(T) = k_1(T) \times f_u \quad (1)$$

其中, f_u 为常温下的铝合金极限强度.采用表2中得到的试验平均值进行多项式拟合,可以得到各牌号铝合金的抗拉强度高温折减系数公式如式(2a)~式(2d)所示:

对于6082-T6:

$$k_1(T) = 1.015 - 6.160 \times 10^{-4} \times T - 3.648 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (2a)$$

对于6N01-T6:

$$k_1(T) = 1.023 - 1.925 \times 10^{-3} \times T + 7.318 \times 10^{-7} \times T^2 \quad (2b)$$

对于6061-T6:

$$k_1(T) = 1.005 - 5.399 \times 10^{-4} \times T - 3.694 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (2c)$$

对于6061-T4:

$$k_1(T) = 1.012 - 7.264 \times 10^{-4} \times T - 2.297 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (2d)$$

采用表 2 中得到的试验数值计算得到具有 95% 保证率的标准值进行多项式拟合,可以得到各牌号铝合金的抗拉强度高温折减系数公式如式(3a)~式(3d)所示:

对于 6082-T6:

$$k_1(T) = 1.026 - 1.296 \times 10^{-3} \times T - 1.969 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (3a)$$

对于 6N01-T6:

$$k_1(T) = 1.014 - 1.975 \times 10^{-3} \times T + 7.747 \times 10^{-7} \times T^2 \quad (3b)$$

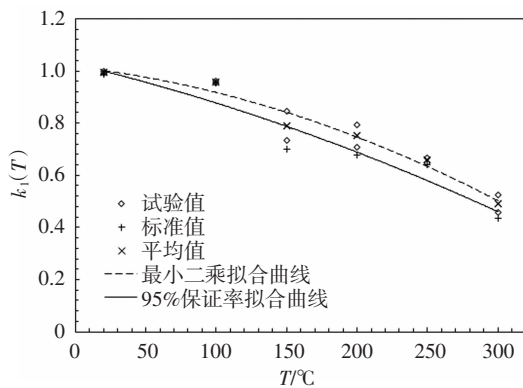
对于 6061-T6:

$$k_1(T) = 0.974 - 1.105 \times 10^{-3} \times T - 1.840 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (3c)$$

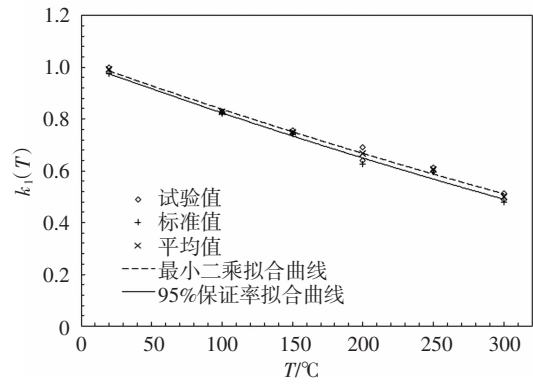
对于 6061-T4:

$$k_1(T) = 0.989 - 7.166 \times 10^{-4} \times T - 2.255 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (3d)$$

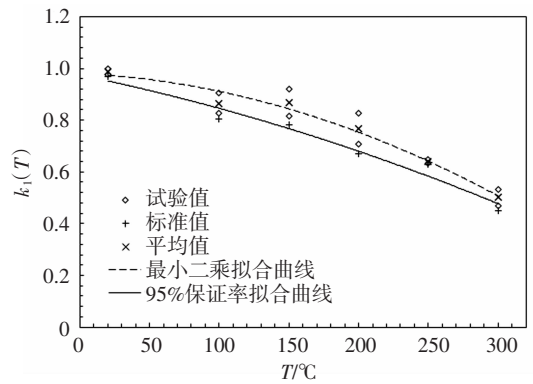
以上各式中, 温度 T 的适用范围为 $0 \sim 300$ °C。图 6 给出了各种牌号铝合金的高温试验点和拟合曲线之间的关系图。表 3 列出了根据拟合公式计算得到的极限强度高温折减系数值, 并将 6061-T6 和美国规范^[16]的结果进行了对比, 美国规范没有给出其余牌号铝合金的极限强度高温折减系数。



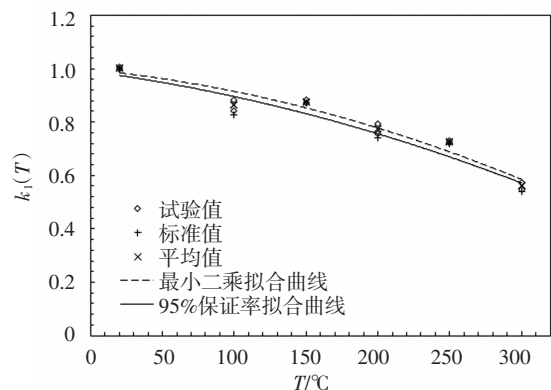
(a) 6082-T6



(b) 6N01-T6



(c) 6061-T6



(d) 6061-T4

图 6 极限强度高温折减系数。

Fig.6 Ultimate strength reduction factor at elevated temperatures

表 3 极限强度高温折减系数

Tab.3 Ultimate strength reduction factor at elevated temperature

温度/°C	6082-T6			6N01-T6			6061-T6			6061-T4		
	拟合公式	试验均值	美国规范	拟合公式	试验均值	美国规范	拟合公式	试验均值	美国规范	拟合公式	试验均值	美国规范
20	1.00	1.00	—	1.00	1.00	—	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—
100	0.92	0.96	—	0.84	0.83	—	0.91	0.87	0.94	0.92	0.86	—
150	0.84	0.79	—	0.75	0.75	—	0.84	0.87	0.76	0.85	0.88	—
200	0.75	0.75	—	0.67	0.67	—	0.75	0.77	0.42	0.77	0.77	—
250	0.63	0.66	—	0.59	0.61	—	0.64	0.64	0.16	0.69	0.72	—
300	0.50	0.49	—	0.51	0.50	—	0.51	0.50	0.10	0.59	0.56	—

3.2 名义屈服强度高温折减系数

记 $k_2(T)$ 为高温下名义屈服强度折减系数, 则为温度 T 时铝合金的名义屈服强度标准值 $f_{02}(T)$ 可按式(4)计算:

$$f_{02}(T) = k_2(T) \times f_{02} \quad (4)$$

其中, f_{02} 为常温下的铝合金名义强度. 采用表 2 中试验平均值进行多项式拟合, 可以得到各牌号铝合金的名义屈服强度高温折减系数公式如式(5a)~式(5d)所示:

对于 6082-T6:

$$k_2(T) = 1.052 - 1.598 \times 10^{-3} \times T - 1.010 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (5a)$$

对于 6N01-T6:

$$k_2(T) = 1.010 - 1.128 \times 10^{-3} \times T - 5.898 \times 10^{-7} \times T^2 \quad (5b)$$

对于 6061-T6:

$$k_2(T) = 1.019 + 7.923 \times 10^{-4} \times T - 7.144 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (5c)$$

对于 6061-T4:

$$k_2(T) = 1.005 + 6.278 \times 10^{-4} \times T - 3.428 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (5d)$$

采用表 2 中得到的试验数值计算得到具有 95% 保证率的标准值进行多项式拟合, 可以得到各牌号铝合金的名义屈服强度高温折减系数公式如式(6a)~式(6d)所示:

对于 6082-T6:

$$k_2(T) = 1.036 - 1.373 \times 10^{-3} \times T - 2.276 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (6a)$$

对于 6N01-T6

$$k_2(T) = 0.994 - 1.192 \times 10^{-3} \times T - 4.263 \times 10^{-7} \times T^2 \quad (6b)$$

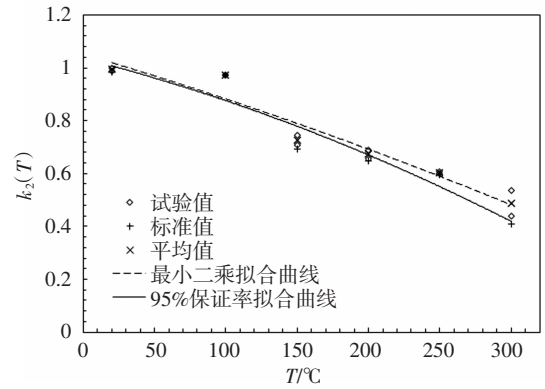
对于 6061-T6:

$$k_2(T) = 0.950 + 5.276 \times 10^{-4} \times T - 6.083 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (6c)$$

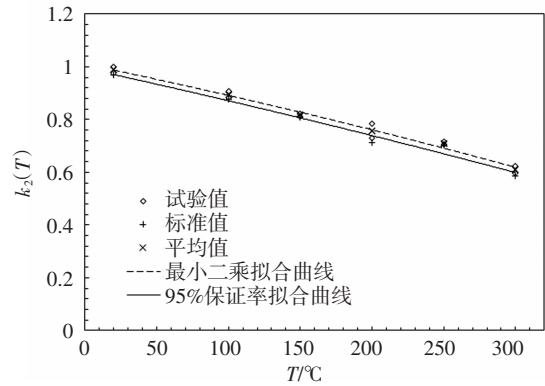
对于 6061-T4:

$$k_2(T) = 0.963 + 5.445 \times 10^{-4} \times T - 2.828 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (6d)$$

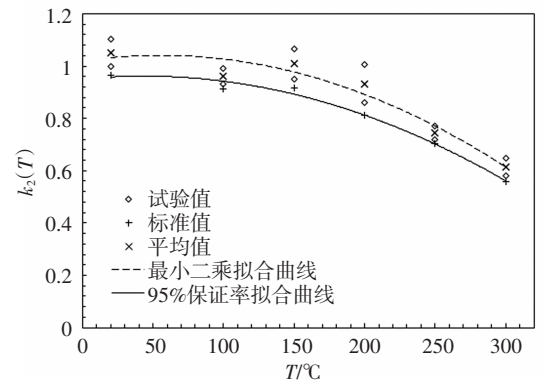
以上各式中, 温度 T 的适用范围为 0~300 °C. 图 7 给出了 4 种牌号铝合金的高温试验点和拟合曲线之间的关系图. 表 4 列出了根据平均值拟合公式计算得到的名义屈服强度高温折减系数值, 并和欧洲规范^[9]的结果进行了对比.



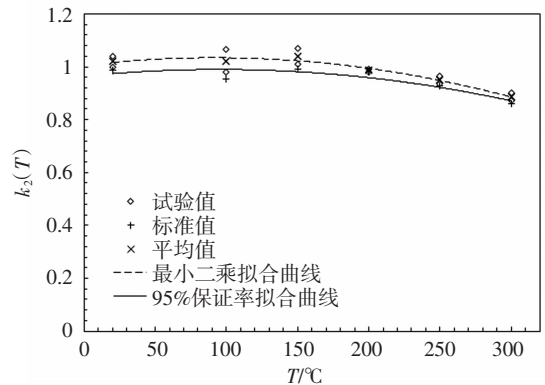
(a) 6082-T6



(b) 6N01-T6



(c) 6061-T6



(d) 6061-T4

图 7 名义屈服强度高温折减系数.

Fig.7 The nominal yield strength reduction factors at elevated temperatures

表 4 名义屈服强度高温折减系数

Tab.4 The nominal yield strength at elevated temperature

温度/°C	6082-T6			6N01-T6			6061-T6			6061-T4			
	拟合公式	试验均值	欧洲规范	拟合公式	试验均值	欧洲规范	拟合公式	试验均值	欧洲规范	美国规范	拟合公式	试验均值	欧洲*
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	—	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100	0.88	0.97	0.90	0.89	0.89	—	1.02	0.96	0.95	0.95	1.03	1.02	1.00
150	0.79	0.73	0.79	0.83	0.82	—	0.97	1.00	0.91	0.78	1.02	1.04	0.84
200	0.69	0.67	0.65	0.76	0.76	—	0.88	0.93	0.79	0.38	0.99	0.99	0.77
250	0.59	0.60	0.38	0.69	0.71	—	0.75	0.74	0.55	0.21	0.95	0.95	0.77
300	0.48	0.49	0.20	0.62	0.61	—	0.59	0.61	0.31	0.07	0.88	1.11	0.34

注*:欧洲规范中没有 6061-T4 牌号,6061-T4 和 6082-T4 材性较为接近,为便于比较,表中列出了欧洲规范 6082-T4 的数据.

3.3 拟合公式和各国规范的对比

欧洲铝合金抗火规范^[9]给出了欧洲常用铝合金的名义屈服强度高温折减系数,但是并没有给出极限强度的高温折减系数.图 8 对比了本文的拟合公式和欧洲规范以及美国规范的建议曲线.欧洲规范推荐的合金牌号包括 6061-T6 和 6082-T6,但没有 6N01-T6 以及 6061-T4;而美国规范推荐了 6061-T6 牌号,其余 3 种牌号没有推荐.从图 8 可以看出:本文的 4 条拟合曲线中,6061-T4 的曲线明显高于其余 3 条曲线,说明高温下热处理状态为 T4 的强硬化合金受高温影响不明显;对于 6061-T6,本文拟合曲线和 EC9 曲线较为接近,而本文曲线略高于 EC9 曲线,但均远高于美国规范曲线,这说明美国标准非常偏于安全;对于 6082-T6,本文曲线和 EC9 曲线也较为接近,但也略高于 EC9 曲线.另外,将 6061-T6 曲线和 6082-T6 曲线进行对比可以发现,本文拟合曲线和 EC9 曲线均呈现 6061-T6 高于 6082-T6 的情况,这表明由于 6082-T6 的强度更高,其受高温的影响更为严重.

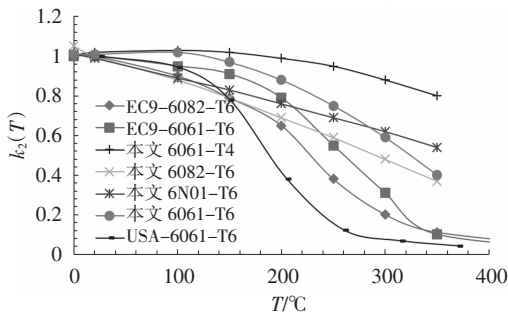


图 8 名义屈服强度高温折减系数.

Fig.8 The nominal yield strength reduction factors at elevated temperatures

美国规范^[16]还给出了美国常用铝合金的极限强度高温折减系数.图 9 对比本文的拟合公式和美国

规范的建议曲线以及彭航等^[10]的试验结果.从图 9 可以看出,本文的 4 条拟合曲线基本重合在一起,其中仅 6N01-T6 略低;本文的 4 条拟合曲线和美国规范相比,除了 6N01-T6 曲线在 20 ~ 150 °C 区间略低以外,其余远高于美国规范,美国规范对高于 150 °C 区间的折减系数取值大幅偏于安全.原因为本试验的数据点较少,且美国规范取值也偏于保守.彭航等^[10]的试验曲线比本文的试验曲线略高.

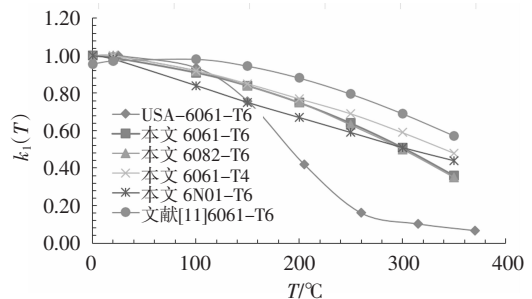


图 9 极限强度高温折减系数.

Fig.9 The ultimate strength reduction factors at elevated temperatures

图 10 还给出了本文拟合的曲线中 6061-T6 和 6061-T4 的对比情况.从图 10 可以看出,对于名义屈服强度,6061-T4 的曲线明显高于 6061-T6 的曲线,这是由于 6061-T4 为强硬化合金,其常温下名义屈服强度 $f_{0.2}$ 较小而屈服比较大,热处理状态对合金的硬化效果不显著,因此高温对于其名义屈服强度影响反而较小;而 6061-T6 为弱硬化合金,其常温下的 $f_{0.2}$ 较大,热处理的硬化效果显著,以至于高温对于其名义屈服强度的影响更为显著.从图 10 还可以看出,对于极限强度,6061-T4 的曲线和 6061-T6 的曲线却几乎重合,这表明虽然热处理状态会影响合金的名义屈服强度,但对合金的极限强度影响有限,因而其高温折减系数基本相同.

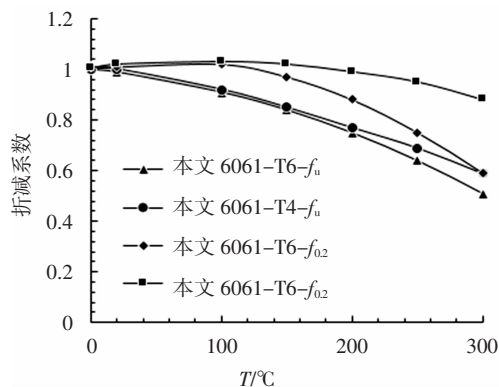


图10 6061-T6和6061-T4的曲线对比

Fig.10 Comparison on 6061-T6 and 6061-T4 curve

4 结论

1) 本文完成了 6082-T6、6N01-T6、6061-T6 以及 6061-T4 等 4 种牌号国产铝合金的高温恒温拉伸试验,得到各试件在高温下的名义屈服强度、极限强度、延伸率和断面收缩率。

2) 根据试验数据拟合得到了 4 种牌号国产铝合金的名义屈服强度高温折减系数公式和极限强度高温折减系数公式,并和欧洲规范以及美国规范的建议值进行了对比。对比表明,本文拟合得到的高温折减系数曲线均高于欧洲规范和美国规范,其中美国规范最为保守。

3) 为能准确地获得铝合金高温弹性模量,需要对高温下材料弹性模量的测量方法进行深入研究。为了能更加准确地了解国产铝合金的高温力学性能,还需要补充更多的试验,建立试验数据库,从统计学角度出发,给出更为精确合理的计算公式。

参考文献

[1] 沈祖炎,郭小农,李元齐. 铝合金结构研究现状综述[J]. 建筑结构学报,2007,28(6):100-109.
SHEN Z Y, GUO X N, LI Y Q. State-of-the-arts research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):100-109. (In Chinese)

[2] 郭小农,梁水平,蒋首超. 铝合金构件不锈钢螺栓连接高温性能研究综述[J]. 建筑钢结构进展,2015,17(5):18-23.
GUO X N, LIANG S P, JIANG S C. Research review on the mechanical behavior of stainless steel bolted joint for aluminum alloy members at elevated temperatures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2015, 17(5):18-23. (In Chinese)

[3] KHALIFA T A, MAHMOUD T S. Elevated temperature mechanical properties of Al alloy AA6063/SiCp MMCs [C]// Proceedings of the World Congress on Engineering. London, 2009:1-3.

[4] KAUFMAN J G. Properties of aluminum alloys: Tensile, creep, and fatigue data at high and low temperatures [J]. ASM International, 1999, 23(9):668-670.

[5] DORN J E. Some fundamental experiments on high temperature creep [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1954, 3(2):85-116.

[6] HARMATHY T Z. A comprehensive creep model [J]. Journal of Fluids Engineering, 1967, 89(2):496-502.

[7] MALJAARS J, SOETENS F, KATGERMAN L. Constitutive model for aluminum alloys exposed to fire conditions [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(4):778-789.

[8] MALJAARS J, TWILT L, FELLINGER J, et al. Aluminum structures exposed to fire conditions—An overview [J]. Heron, 2010, 55(2):85-122.

[9] BS EN1999-1-2: 2007 Eurocode 9: Design of aluminum structures—part 1-2: general rules—structural fire design [S]. London: European Committee for Standardization, 2007:19-20.

[10] 彭航,蒋首超,赵媛媛. 建筑用 6061-T6 系铝合金高温下力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7):46-49.
PENG H, JIANG S C, ZHAO Y Y. Experimental study on the mechanical property of structural AL-alloy at elevated temperatures [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7):46-49. (In Chinese)

[11] 梁水平. 铝合金板件不锈钢螺栓连接高温承载性能研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2016: 21-28.
LIANG S P. Research on the mechanical behavior of aluminum alloy components with stainless steel bolt connection at elevated temperature, engineering master's degree theses [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2016: 21-28. (In Chinese)

[12] 张辉,伍豪杰,蒋福林. 4045 铝合金热变形行为及其加工图[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(8):83-89.
ZHANG H, WU H J, JIANG F L. Hot deformation behavior and processing map of 4045 aluminum alloy [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(8):83-89. (In Chinese)

[13] 严红革,胡程进,陈吉华,等. 2024Al/Gr/SiCp 复合材料耐热性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(6):1-9.
YAN H G, HU C J, CHEN J H, et al. Heat resistant properties of the 2024Al/Gr/SiCp hybrid composites [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(6):1-9. (In Chinese)

[14] GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011:6-15.
GB/T 228.1-2010 Metallic material—tensile testing—part 1: method of test at room temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011:6-15. (In Chinese)

[15] GB/T 228.2-2015 金属材料拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015:3-8.
GB/T 228.2-2015 Metallic material—tensile testing—part 2: method of test at elevated temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015:3-8. (In Chinese)

[16] The Aluminum Association. Aluminum design manual [M]. 8th ed. Washington D C: Aluminum Association, 2005:V-33.