

国产结构用铝合金低温力学性能试验研究

郭小农¹,陶磊¹,吴杰^{1†},王千青¹,高安江²

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

摘要:为弥补目前国内外对结构用铝合金低温力学性能试验研究的不足,完成了国产结构用铝合金 6082-T6、6N01-T6、6061-T6 和 6061-T4 的低温恒温加载试验. 试验测得 4 种牌号铝合金在-120~20 °C 下的抗拉极限强度、名义屈服强度、延伸率和断面收缩率等力学性能指标. 试验结果表明,低温下铝合金会出现加工硬化现象,其抗拉极限强度和名义屈服强度均有所增加,但断后延伸率以及断面收缩率的变化规律不明显. 通过试验数据拟合,得到 4 种牌号铝合金力学性能指标的低温提高系数的计算式. 最后,将提高系数计算式与美国规范建议值进行比较,结果表明美国规范较为保守.

关键词:铝合金;低温;力学性能

中图分类号:TU512.4;TU395

文献标志码:A

Experimental Study on Mechanical Property of Chinese Structural Aluminum Alloy at Low Temperatures

GUO Xiaonong¹, TAO Lei¹, WU Jie^{1†}, WANG Qianqing¹, GAO Anjiang²

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

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

Abstract: To complement the insufficient experimental study on the mechanical behavior of aluminum alloy at low temperature, tensile tests of Chinese structural aluminum alloy 6082-T6, 6N01-T6, 6061-T6, and 6061-T4 under constant low temperatures were carried out, and their mechanical properties including the ultimate tensile strength, nominal yield strength, elongation rate and section shrinkage were obtained at different temperatures that range from -120 to 20 °C. It is found that material hardening of the aluminum alloy occurs at low temperatures, leading to the increase of the ultimate tensile strength and nominal yield strength. However, the change rule of the elongation rate and section shrinkage is not clear. The increasing factor formulae of the mechanical properties for the 4 kinds of aluminum alloy at low temperatures were derived through a numerical fitting method. Moreover, the fitting formulae were compared with the corresponding formula prescribed in American standard. The results demonstrate that the American standard method provides more conservative estimation

Key words: aluminum alloys; low temperature; mechanical properties

* 收稿日期:2018-03-18

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

† 通讯联系人, E-mail: wwuji@tongji.edu.cn

铝合金具有自重轻、耐腐蚀性好、韧性好和强度高优点,在建筑结构中得到了越来越广泛的应用.相比于钢材低温下容易脆断的缺点,铝合金在低温条件下却具有强度提高和韧性改善的优点^[1],因此,在极地探索、航空航天、寒冷地区高速列车等低温领域,铝合金具有十分广阔的应用空间和应用前景.

国外对铝合金材料力学性能的研究较为成熟,当前的研究主要集中于高温领域.Khalifa 等^[2-4]分别对铝合金材料进行拉伸试验和弯曲试验,并提出了考虑材料蠕变效应的本构关系模型^[5-6];欧洲规范^[7]和美国规范^[8]对于铝合金高温下力学性能也有明确规定.然而,国外对于铝合金低温力学性能的研究相对较少.Kaufman^[3]在1999年对铝合金材料进行低温拉伸,得到了美国常用铝合金的低温材性数据,但并未提出合理的低温材性本构模型;美国规范也仅是总结 Kaufman 等人的试验数据,对少数几种牌号铝合金的低温力学性能给出了建议值.Yin 等^[9]利用液氮低温环境进行多轴锻造,使得7075铝合金的金属组织晶粒细化,力学性能得到较大提高.Baudouy 等^[10]发现随着温度的降低,铝合金5056的导热系数减小.Schneider 等^[11]分别对航空航天常用的EN AW-1050、EN AW-5182、EN AW-6016、EN AW-7021等铝合金在77~298 K温度区间下进行拉伸试验,得到低温下其力学性能提升的结论,并发现低温可以有效缓解其金属塑性不稳定现象.

国内对铝合金材料力学性能的研究起步较晚.郭小农等^[12]研究了国产结构用铝合金的常温本构关系及物理力学性能,指出Ramberg-Osgood模型和SteinHardt建议适用于国产结构用铝合金.彭航等^[13]对建筑结构用6061-T6系铝合金进行了高温下的力学性能研究,提出了各力学参数随温度变化的计算公式.张辉等^[14]发现连续挤压工艺会使得铝合金组织晶粒细小而均匀,从而改善其拉伸性能.孟立春等^[15]研究了7N01和6N01铝合金T型焊接接头,发现接头不同区域晶粒组织存在显著差异.对于铝合金低温力学性能,刘瑛等^[16]曾从微观角度对2519铝合金的低温性能提升的原因进行过探究.然而对于铝合金低温下力学性能的提高系数,尤其是常见的6xxx系列结构用铝合金,国内的研究几乎为空白.程丽霞^[17]将3105铝合金分别在-20℃、-60℃和-100℃下保温1h后进行拉伸试验,试验结果表明随着温度的降低,铝合金材料的抗拉强度呈上升趋势.而对3105铝合金进行不同温度不同时间的深冷处理后,再进行常温下的拉伸试验结果表明:深冷处理对铝合金的常温拉伸性能无明显影响.蒋显全等^[18]研

究了O、H19和H26状态下3012铝合金在-175~300℃的力学性能,试验发现3种状态下铝合金的抗拉强度和屈服强度均随着温度升高而降低,且H19和O状态铝合金在低温下塑性没有明显改善,而H26状态铝合金则具有优良的低温塑性.

近年来,在建筑结构领域中,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,其低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种牌号铝合金低温下的力学性能试验,得出了其低温下的力学性能指标.

1 试验设计

1.1 试件设计

本文设计了4种牌号的铝合金试件共计54根.试件详图如图1所示.图2为6061-T6系列试件在试验前的照片.试件编号如表1所示.由于极端低温环境下的温度一般不会低于-120℃,同时也受限于试验条件,故本文共设置了20℃、0℃、-20℃、-50℃、-100℃、-120℃等6个温度点.表1还给出每根试件的实测截面尺寸.所有试件均为板材拉伸试样,名义截面尺寸为15 mm×4 mm;为满足低温箱内的夹持要求,等截面段长度150 mm,试件总长度300 mm.

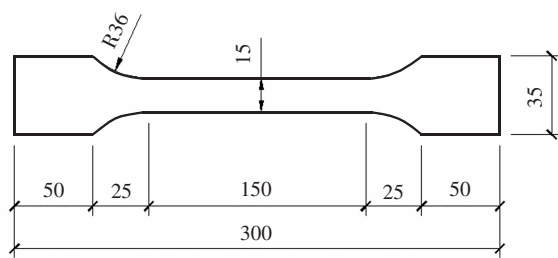


图1 试件详图

Fig.1 Specimen size

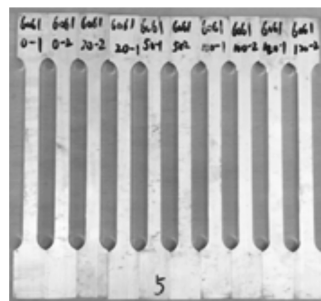


图2 部分试件图片

Fig.2 Part of the specimens

表 1 试件汇总表
Tab.1 Summary of specimens

材料牌号	试件编号	温度/℃	实测截面/(mm × mm)	材料牌号	试件编号	温度/℃	实测截面/(mm × mm)
6082-T6	A+20-1	20	14.91×4.09	6N01-T6	B+20-1	20	15.03×3.75
	A+20-2		14.90×4.06		B+20-2		15.05×3.74
	A-0-1	0	15.00×2.97		B-0-1	0	15.00×3.35
	A-0-2		15.04×3.11		B-0-2		14.97×3.55
	A-20-1	-20	14.94×2.95		B-20-1	-20	15.06×3.37
	A-20-2		14.96×3.11		B-20-2		15.09×2.91
	A-50-1	-50	14.99×3.30		B-20-3	-50	14.93×3.37
	A-50-2		15.01×3.33		B-50-1		15.06×2.86
	A-50-3	-100	15.00×3.21		B-50-2	-100	14.98×3.42
	A-100-1		14.95×2.97		B-100-1		14.91×4.33
	A-100-2	-120	15.00×3.14		B-100-2	-120	15.04×3.67
	A-100-3		15.14×3.03		B-120-1		15.05×3.45
	A-120-1	-120	15.02×3.14		B-120-2	-120	15.06×3.34
	A-120-2		15.15×3.21				
6061-T6	C+20-1	20	15.23×4.03	6061-T4	D+20-1	20	15.12×4.13
	C+20-2		15.15×3.64		D+20-2		15.14×4.11
	C-0-1	0	15.01×4.07		D-0-1	0	15.03×3.94
	C-0-2		14.97×4.00		D-0-2		14.93×4.22
	C-20-1	-20	15.07×4.35		D-20-1	-20	14.98×3.95
	C-20-2		14.97×4.25		D-20-2		14.99×4.05
	C-50-1	-50	14.91×4.41		D-50-1	-50	14.95×3.94
	C-50-2		14.91×3.87		D-50-2		14.98×4.00
	C-100-1	-100	14.91×3.97		D-100-1	-100	14.93×3.95
	C-100-2		14.91×4.13		D-100-2		14.96×4.05
	C-120-1	-120	14.94×3.79		D-120-1	-120	14.92×4.05
	C-120-2		14.95×3.93		D-120-2		14.97×3.94
	C-120-3		14.97×4.41				

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低温电子万能试验机,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、降温与恒温设备、位移测量摄像头、操作与控制装置.由于试验是在低温下进行的,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耐低温漆以加大反光率,然后在涂层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.

按照规范 GB/T 13239—2006^[19]的要求,安装试件对中后固定试件两端,调整试验机加载端位移以

释放试件上的初始应力,由仪器控制液氮的充入使得试件达到指定温度,并保持温度恒定 10 min,再采用应变速率控制进行加载,应变加载速率为 2 mm/min(相对误差±20%).加载装置如图 3 所示.

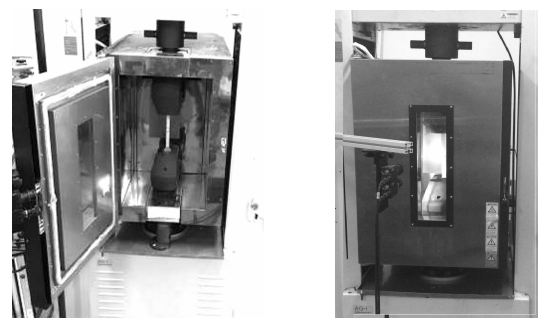


图 3 加载装置

Fig.3 Loading systems

2 试验结果分析

铝合金拉伸试件所受到的荷载及其变形由数据万能试验机的自动采集系统得到.与此同时,试验过程中通过光学摄像头捕捉试件中部的位移变化可以完整地记录试件在加载过程中标记段的伸长量.试件拉断后采用游标卡尺可测得断后延伸率和断面收缩率.试件拉断后情况见图 4.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,因此测得的部分延伸率数据不够准确.

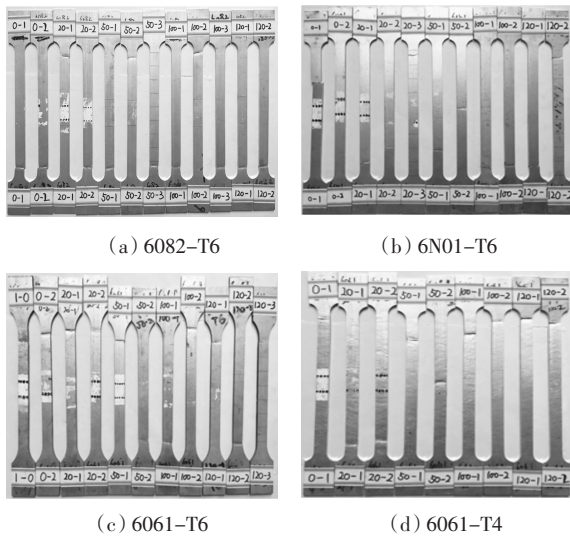


图 4 试验后试件

Fig.4 Specimens after testing

图 5 给出了部分试件的断口照片,从图 5 可以看出,强硬合金 6061-T4 在低温下的破坏接近塑性破坏,断口截面有较明显的颈缩;而 6N01-T6 则接近脆性破坏,断口有许多参差不齐的金属纤维,试件断裂时能听到清脆的断裂声.

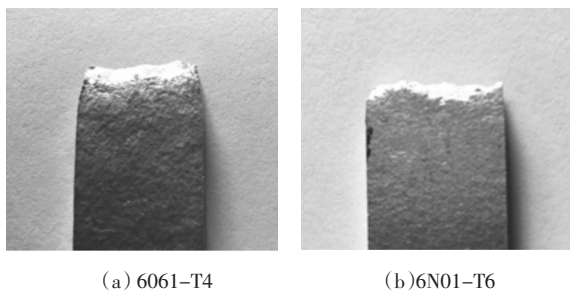
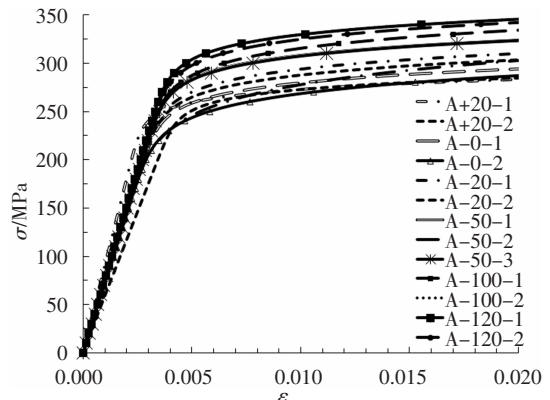


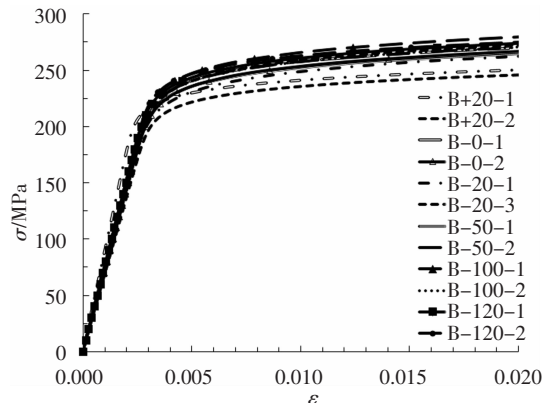
图 5 试件破坏断口

Fig.5 Breaking section of specimens

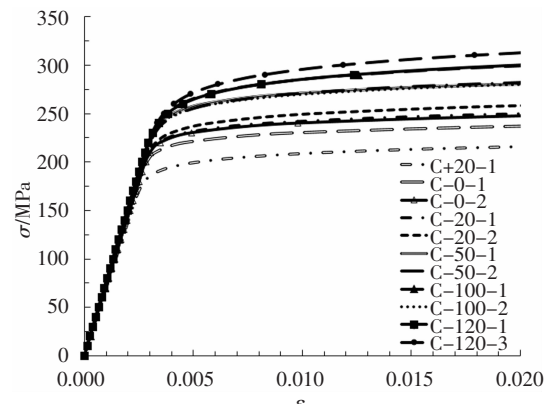
图 6 给出所有试件在 0~2%应变范围内的应力-应变曲线.表 2 给出了所有试件的力学性能指标实



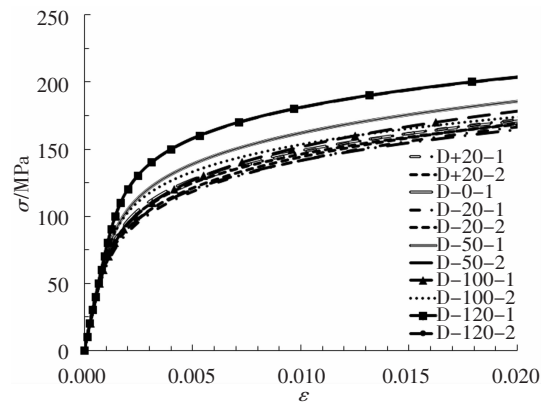
(a) 6082-T6



(b) 6N01-T6



(c) 6061-T6



(d) 6061-T4

图 6 低温铝合金应力-应变曲线
Fig.6 Stress-strain curve for aluminum alloy at low temperature

表 2 低温铝合金材性试验结果

Tab.2 Results of tensile test of aluminum alloys at low temperature

试件编号	抗拉强度 f_u/MPa	平均值	名义屈服强度 $f_{0.2}/\text{MPa}$	平均值	延伸率 $\delta_5/\%$	平均值/ $\%$	断面收缩率 $\psi/\%$	平均值/ $\%$
A+20-1	290.6		258.7		12.0		27.9	
A+20-2	293.7	292.2	261.9	260.3	15.0	13.5	27.7	27.8
A-0-1	301.3		263.6		10.4		28.1	
A-0-2	294.0	297.6	247.3	255.5	10.5	10.5	33.2	30.6
A-20-1	321.6		276.5		11.1		29.2	
A-20-2	315.3	318.5	270.4	273.5	10.8	10.9	31.8	30.5
A-50-1	341.1		291.8		12.1		34.8	
A-50-2	347.2	343.2	250.0	277.4	12.5	12.5	35.9	35.8
A-50-3	341.4		290.5		12.8		36.7	
A-100-1	350.4		296.0		11.2		33.2	
A-100-3	358.7	354.5	313.8	304.9	11.0	11.1	30.3	31.7
A-120-1	366.3		313.7		11.1		35.9	
A-120-2	361.0	363.6	307.2	310.5	12.1	11.6	32.2	34.0
B+20-1	273.1		228.0		18.5		22.6	
B+20-2	278.3	275.7	222.8	225.4	17.7	18.1	21.4	22.0
B-0-1	296.0		243.0		13.2		15.2	
B-0-2	295.1	295.6	237.5	240.3	15.7	14.5	17.0	16.1
B-20-1	288.0		231.8		15.1		16.4	
B-20-3	299.7	293.9	242.5	237.2	15.6	15.4	16.3	16.3
B-50-1	294.9		236.8		15.9		20.9	
B-50-2	297.2	296.1	241.9	239.4	14.2	15.0	17.8	19.3
B-100-1	302.7		248.8		14.1		23.7	
B-100-2	299.1	300.9	241.4	245.1	15.9	15.0	26.4	25.1
B-120-1	300.1		244.6		13.9		19.2	
B-120-2	303.2	301.7	248.0	246.3	11.9	12.9	18.6	18.9
C+20-1	270.0		199.0		13.0		43.0	
C+20-2	276.7	273.4	244.0	221.5	12.4	16.5	36.0	39.5
C-0-1	254.3		221.7		17.0		38.8	
C-0-2	264.3	259.3	231.2	226.5	15.7	16.4	38.9	38.8
C-20-1	257.8		232.5		15.1		36.4	
C-20-2	274.2	266.0	237.9	235.2	16.5	15.8	30.4	33.4
C-50-1	286.0		259.9		14.8		32.3	
C-50-2	291.6	288.8	257.8	258.9	15.7	15.3	25.7	29.0
C-100-1	310.2		269.2		14.9		25.9	
C-100-2	300.8	305.5	257.3	263.3	16.6	15.7	31.3	28.6
C-120-1	309.5		268.3		15.0		30.2	
C-120-3	323.3	316.4	276.6	272.5	14.5	14.8	25.9	28.1
D+20-1	228.9		112.1		19.3		26.9	
D+20-2	227.5	228.2	108.0	110.1	19.0	19.2	30.2	28.6
D-0-1	214.8	214.8	110.0	110.0	25.1	25.1	36.0	36.0
D-20-1	231.4		106.2		24.3		36.6	
D-20-2	234.4	224.6	114.2	112.1	25.6	25.0	38.8	37.4
D-50-1	247.6		128.8		19.5		40.7	
D-50-2	225.3	236.4	108.3	118.6	24.0	21.7	43.7	42.2
D-100-1	239.5		114.1		24.8		44.4	
D-100-2	244.4	242.0	123.7	118.9	23.4	24.1	40.4	42.4
D-120-1	245.3		149.5		25.2		37.6	
D-120-2	251.3	248.3	149.5	149.5	24.6	24.9	39.4	38.5

注:1. 在加载初期, 试验测得的应变波动比较大, 由此计算的弹性模量 E 并不准确, 但仍能反映低温条件下铝合金增强的特性.

2. 部分试件的破坏面并不在中间区段, 因此这部分试件的断后延伸率不是很准确, 但断面收缩率相对准确.

3. 本次试验中, 部分数据为无效数据, 在本表中没有列出. 无效的数据点包括: A-100-2、B-20-2、C-120-2、D-0-2. 其中 D-0-2 数据失效后, 由于试验条件限制没有进行补做, 此外所有数据点均有 2 个或 3 数据取平均值.

测结果.从表 2 和图 6 可以看出,对于各个系列铝合金,随着温度的降低,极限强度 f_u 逐渐提高,其中 6061-T6 和 6082-T6 的提高幅度较大,而 6N01-T6 和 6061-T4 的提高幅度较小;随着温度的降低,名义屈服强度 $f_{0.2}$ 也逐渐提高,其中 6061-T4 的提高幅度最大.从微观角度来看^[16-17],低温下铝合金金属组织晶粒细化,同时变形时位错分布呈现均匀性,并且位错间相互缠绕发生强烈的交互作用,有助于提高合金的形变抗力,使得拉伸时开动位错滑移的临界分切应力增大,因此其强度得到提升.

低温下铝合金拉伸变形表现出加工硬化现象^[18],图 7 特别给出了 6061-T4 系铝合金在 0~1%应变范围内的应力应变曲线.从图 7 可以看出,随着温度的降低,6061-T4 系铝合金由弹性段进入塑性段的过渡更加平缓,这说明温度越低,材料位错增殖越快,加工硬化现象越突出,即 R-O 模型的 n 值越小.

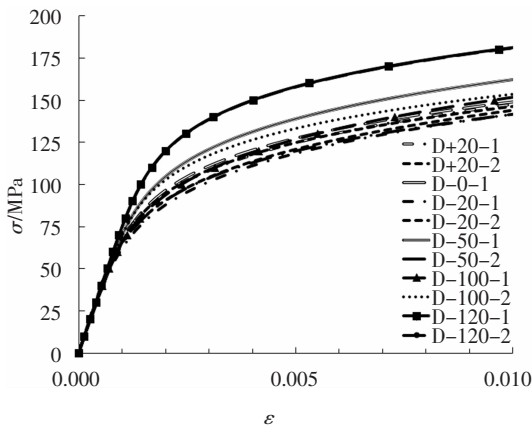


图 7 6061-T4 应力-应变曲线
Fig.7 Stress-strain curve of 6061-T4

图 8 和图 9 分别为试件延伸率 δ_5 (平均值)和断面收缩率 ψ (平均值)随温度的变化曲线,两者的变化规律大致相同.可以看出,6061-T4 的延伸率和断面收缩率曲线几乎一直高于其余三个牌号,且其断面收缩率达到 40%左右,而 6N01-T6 的曲线则处于比较低的水平,这与前文观察两者断口图得到的结论一致.

由于试验误差的原因,6061-T4 和 6082-T6 的延伸率和断面收缩率随温度变化的规律不明显,但总体都呈现上升的趋势,并且都高于室温下的数值,表现出良好的低温塑性.从微观角度来看^[20],随着温度的降低,金属原子位错发生滑移的难度增

加,因此导致铝合金材料的流变应力和加工硬化能力增强,变形的均匀性增强,使得其延伸率基本维持不变甚至有所增长.然而,6061-T6 在试验温度区间,随着温度的降低,其延伸率和断面收缩率都略有降低,但降低幅度不大.

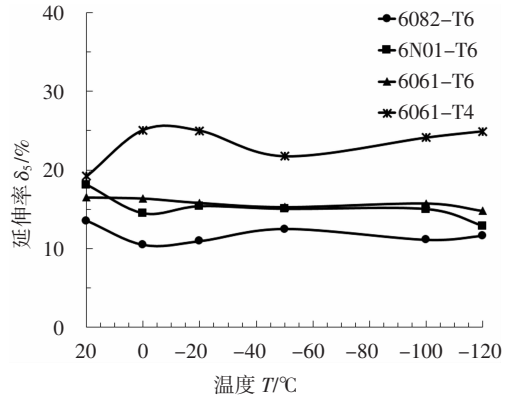


图 8 延伸率曲线
Fig.8 Elongation rate curve

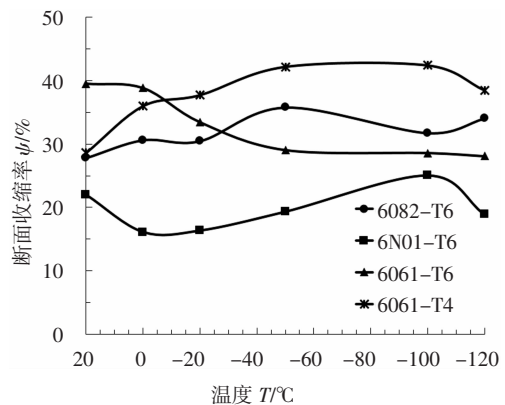


图 9 断面收缩率曲线
Fig.9 Reduction of area curve

3 铝合金低温强度提高系数

前文通过试验得到了 4 种牌号铝合金低温下的力学性能,其中由于测量手段限制,弹性模量和延伸率的准确度不高,因此本节基于试验数据,仅对低温下抗拉极限强度和名义屈服强度的提高系数进行了公式拟合.

3.1 抗拉极限强度的低温提高系数

记 $k_1(T)$ 为低温下抗拉强度提高系数,则温度为 T 时铝合金极限强度标准值 $f_u(T)$ 可按下式计算:

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

式中: f_u 为常温下铝合金抗拉极限强度.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极限强度的低温提高系数公式如

式(2a)~式(2d)所示.

对于 6082-T6:

$$k_1(T)=1.025-3.673\times 10^{-3}\times T-1.581\times 10^{-5}\times T^2 \quad (2a)$$

对于 6N01-T6:

$$k_1(T)=1.067-2.193\times 10^{-4}\times T \quad (2b)$$

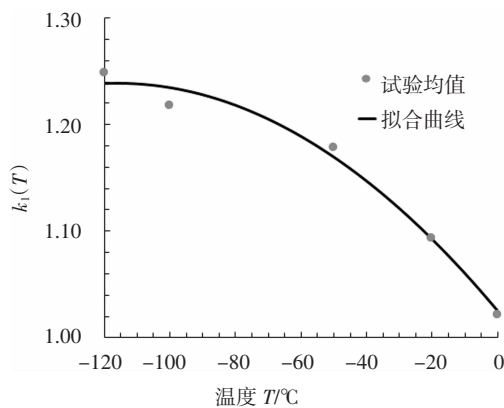
对于 6061-T6:

$$k_1(T)=1.039-2.428\times 10^{-3}\times T-4.192\times 10^{-6}\times T^2 \quad (2c)$$

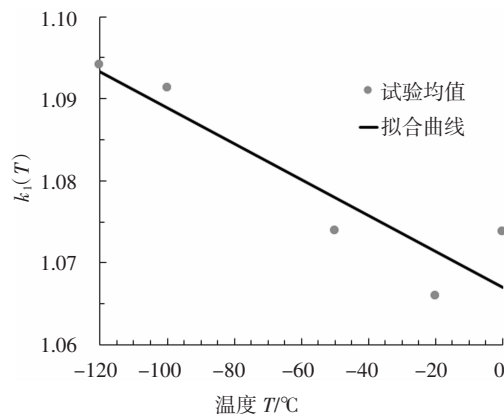
对于 6061-T4:

$$k_1(T)=1.007-4.652\times 10^{-4}\times T+1.414\times 10^{-6}\times T^2 \quad (2d)$$

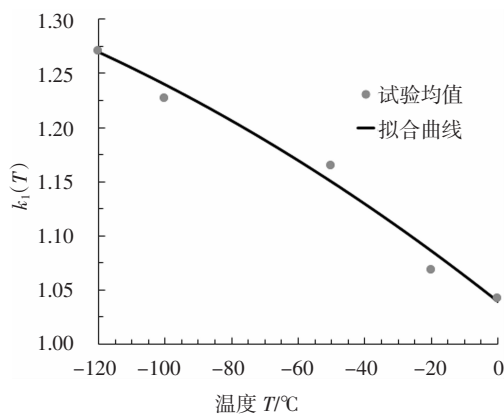
式中:温度 T 的适用范围为 $-120\sim 20$ °C.图 10 给出了各种牌号铝合金的低温试验点和拟合曲线之间的关系图.



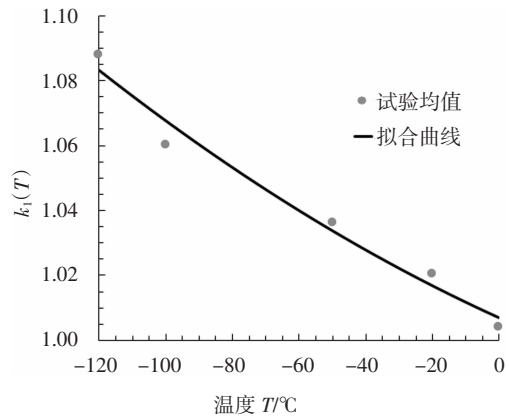
(a) 6082-T6



(b) 6N01-T6



(c) 6061-T6



(d) 6061-T4

图 10 抗拉极限强度的低温提高系数

Fig.10 Ultimate tensile strength increasing factor at low temperature

表 3 列出了根据拟合公式计算得到的抗拉强度低温提高系数值,并和文献[3]试验结果以及美国规范^[8]推荐值进行了对比.美国规范^[8]仅给出了 6061-T6 的低温力学性能,且仅有 -30 °C、 -80 °C 和 -195 °C 等 3 个数据点.文献[3]给出了 6061-T6 和 6061-T4 两个牌号的低温数据点,但也仅有 -196 °C、 -80 °C、 -30 °C 等 3 个数据点.文献 [3] 提供的牌号中并不包括 6082-T6 和 6N01-T6,为了对比方便,表 3 中在相应位置给出了 6101-T6 和 6063-T6 的数据.

3.2 名义屈服强度的低温提高系数

记 $k_2(T)$ 为低温下名义屈服强度提高系数,则温度为 T 时铝合金的名义屈服强度标准值 $f_{02}(T)$ 可按下式计算:

$$f_{02}(T) = k_2(T) \times f_{02} \quad (3)$$

式中: $f_{02}(T)$ 为常温下的铝合金名义屈服强度.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低温提高系数公式如式(4a)~式(4d)所示.

对于 6082-T6:

$$k_2(T)=1.017-1.047\times 10^{-3}\times T+3.903\times 10^{-6}\times T^2 \quad (4a)$$

对于 6N01-T6:

$$k_2(T)=1.055-2.979\times 10^{-4}\times T \quad (4b)$$

对于 6061-T6:

$$k_2(T)=1.018-3.226\times 10^{-3}\times T-1.302\times 10^{-5}\times T^2 \quad (4c)$$

对于 6061-T4:

表 3 抗拉极限强度的低温提高系数对比

Tab.3 Comparison of ultimate tensile strength increasing factor at low temperature

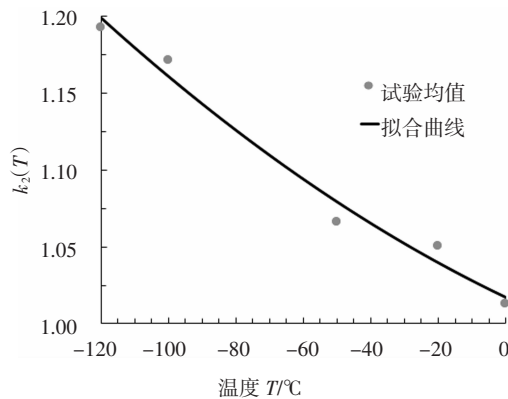
温度/℃	6082-T6		文献[3] 6101-T6	6N01-T6		文献[3] 6063-T6	6061-T6				6061-T4		
	试验 均值	拟合 公式		试验 均值	拟合 公式		试验 均值	拟合 公式	美国 规范	文献[3]	试验 均值	拟合 公式	文献[3]
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0	1.02	1.03	—	1.07	1.07	—	1.04	1.04	—	—	1	1.01	—
-20	1.09	1.09	—	1.07	1.07	—	1.07	1.09	—	—	1.02	1.02	—
-30	—	1.12	1.07	—	1.07	1.04	—	1.11	1.04	1.05	—	1.02	1.06
-50	1.18	1.17	—	1.07	1.08	—	1.16	1.15	—	—	1.04	1.03	—
-80	—	1.22	1.14	—	1.08	1.08	—	1.21	1.09	1.10	—	1.05	1.13
-100	1.22	1.23	—	1.09	1.09	—	1.23	1.24	—	—	1.06	1.07	—
-120	1.25	1.24	—	1.09	1.09	—	1.27	1.27	—	—	1.09	1.08	—

$$k_2(T) = 1.013 - 4.734 \times 10^{-4} \times T + 2.189 \times 10^{-5} \times T^2 \quad (4d)$$

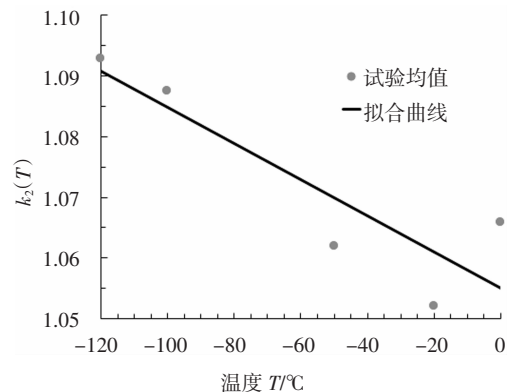
以上各式中,温度 T 的适用范围为 $-120 \sim 20$ ℃.

图 11 给出了 4 种牌号铝合金的低温试验点和拟合曲线之间的关系图.

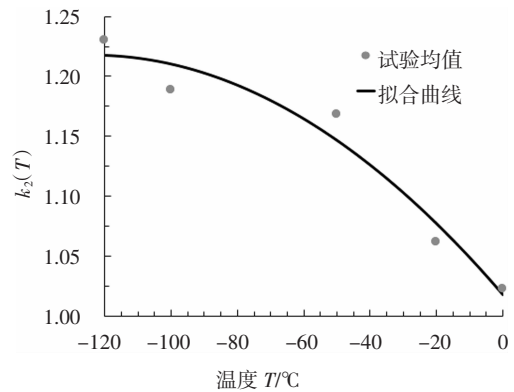
表 4 列出了根据拟合公式计算得到的名义屈服强度低温提高系数值,并和文献[3]试验结果以及美国规范^[8]推荐值行了对比.对于美国规范和文献[3]的数据引用方法和表 3 一致.



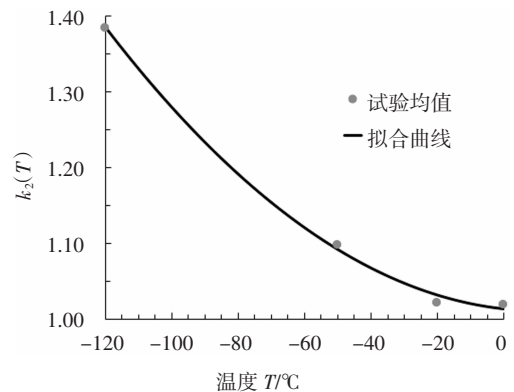
(a) 6082-T6



(b) 6N01-T6



(c) 6061-T6



(d) 6061-T4

图 11 名义屈服强度的低温提高系数

Fig.11 Nominal yield strength increasing factor at low temperature

3.3 拟合公式与美国规范和文献[3]对比

依据美国规范、文献[3]所给出的特定温度点下的影响系数,利用二项式拟合从而获得其影响系数的变化曲线,将变化曲线与拟合公式的结果进行对比,从而得出拟合公式与相关参考资料的影响系数变化趋势的规律.

表4 名义屈服强度的低温提高系数对比

Tab.4 Comparison of nominal yield strength increasing factor at low temperature

温度 /°C	6082-T6		文献[3] 6101-T6	6N01-T6		文献[3] 6063-T6	6061-T6				6061-T4			
	试验 均值	拟合 公式		试验 均值	拟合 公式		试验 均值	拟合 公式	美国 规范	文献[3]	试验 均值	拟合 公式	文献[3]	
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	1.00	1.00
0	1.01	1.02	—	1.07	1.06	—	1.02	1.02	—	—	1.02	1.01	—	—
-20	1.05	1.04	—	1.05	1.06	—	1.06	1.08	—	—	1.02	1.03	—	—
-30	—	1.05	1.03	—	1.06	1.02	—	1.10	1.03	1.04	—	1.05	1.03	—
-50	1.07	1.08	—	1.06	1.07	—	1.17	1.15	—	—	1.10	1.09	—	—
-80	—	1.13	1.05	—	1.08	1.07	—	1.19	1.05	1.05	—	1.19	1.10	—
-100	1.17	1.16	—	1.09	1.08	—	1.19	1.21	—	—	1.10	1.28	—	—
-120	1.19	1.20	—	1.09	1.09	—	1.23	1.22	—	—	1.38	1.39	—	—

图12对比了各系列铝合金抗拉极限强度的提高系数曲线,图中包括本文拟合公式、美国规范推荐值以及文献[3]的试验值.从图12可以看出:本文的4条拟合曲线中,6061-T6和6082-T6的曲线随温度降低增长明显高于其余曲线,说明低温状态对上述两种牌号铝合金的性能提高影响最为明显;对于6061-T4,本文拟合曲线低于文献[3]和美国规范数值,这也说明了如果直接参考国外资料进行设计可能会出现不安全的情况;而本文其他曲线均接近或高于美国规范曲线,这说明美国规范较为保守;对于6N01-T6铝合金,曲线增长非常缓慢,说明其在低温条件下抗拉强度变化不大.

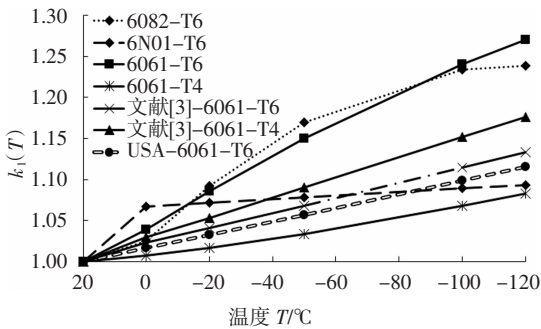


图12 抗拉极限强度的低温提高系数曲线

Fig.12 Curves of ultimate tensile strength increasing factor at low temperature

图13对比了各系列铝合金名义屈服强度的提高系数曲线,图中包括本文拟合公式、美国规范推荐值以及文献[3]的试验值.从图13可以看出,本文的拟合曲线除6N01-T6外均高于美国规范或文献[3],说明美国规范较为保守;6061-T6和6061-T4的曲线高于其余两条,说明6061系铝合金在低温条件下屈服强度有较大的提高,且6061-T4提高最

明显;6N01-T6铝合金的屈服强度也几乎没有太大的变化,综合其抗拉强度的变化规律,可以知道该种铝合金在低温条件下性能非常稳定.

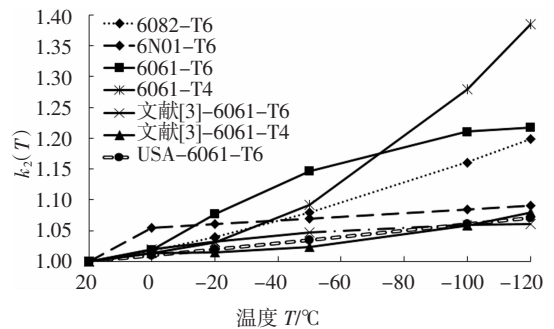


图13 名义屈服强度的低温提高系数曲线

Fig.13 Curves of nominal yield strength increasing factor at low temperature

4 结论和展望

本文完成了国产6082-T6、6N01-T6、6061-T6和6061-T4铝合金在-120~20℃的恒温低温拉伸材性试验,测得了各种牌号铝合金在各个温度条件下的应力-应变曲线.主要结论如下:

1) 本文测得国产6082-T6、6N01-T6、6061-T6和6061-T4铝合金在-120~20℃下的抗拉极限强度、名义屈服强度、延伸率和断面收缩率等力学性能指标.

2) 随着温度的降低,各种铝合金的力学性能有所差异,但总体趋势是抗拉极限强度和名义屈服强度均有所增加;低温对断后延伸率以及断面收缩率的影响规律不明显.

3) 通过试验数据的拟合,给出国产6082-T6、6N01-T6、6061-T6和6061-T4铝合金在-120~20℃

时抗拉极限强度 f_u 和名义屈服强度 $f_{0.2}$ 的低温提高系数计算公式.

4) 由于测量仪器的误差和试件断口位置的影响,测得的铝合金低温弹性模量和延伸率不够准确,需要对低温下的应变测量方法进行深入研究;另外,由于试验数据点较少,要得出更为广泛的结论,有必要进行更加深入和广泛的试验研究.

参考文献

- [1] 陈鼎,陈振华. 铝合金在低温下的力学性能[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(4):1—7.
CHEN D, CHEN Z H. Mechanical properties of pure aluminum alloys at cryogenic temperatures[J]. Aerospace Materials & Technology, 2000, 30(4):1—7. (In Chinese)
- [2] 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, 2009:1557—1562.
- [3] 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.
- [4] MALJAARS J, SOETENS F, SNIJDER H H. Local buckling of aluminium structures exposed to fire.Part1:tests [J]. Thin-walled Structures, 2009, 47(11):1404—1417.
- [5] DORN J E. Some fundamental experiments on high temperature creep [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1954, 3:85—116.
- [6] HARMATHY T Z. A comprehensive creep model [J]. Journal of Basic Engineering, 1967, 89:496—502.
- [7] BS EN1999-1-2: 2007 Eurocode 9 Design of aluminum structures- part1-2:general rules-structural fire design[S]. London:European Committee for Standardization, 2007:19—20.
- [8] The Aluminum Association. Aluminum design manual [S]. 8th ed. Washington DC: Aluminum Association, 2005:V—33.
- [9] YIN J, LU J, MA H, *et al.* Nanostructural formation of fine grained aluminum alloy by severe plastic deformation at cryogenic temperature[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(8):2851—2854.
- [10] BAUDOY B, FOUR A. Low temperature thermal conductivity of aluminum alloy 5056[J]. Cryogenics, 2014, 60(2):1—4.
- [11] SCHNEIDER R, HEINE B, GRANT R J, *et al.* Mechanical behaviour of aircraft relevant aluminium wrought alloys at low temperatures [J]. Journal of Materials Design & Applications, 2013, 229(2):126—136.
- [12] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 国产结构用铝合金材料本构关系及物理力学性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6):110—117.
GUO X N, SHEN Z Y, LI Y Q, *et al.* Stress-strain relationship and physical-mechanical properties of domestic structural aluminum alloy [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):110—117. (In Chinese)
- [13] 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)
- [14] 张辉, 罗松, 蒋福林. 连续挤压 Al-1.1Mg-0.3Cu 合金的拉伸性能和加工硬化行为[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(6):60—65.
ZHANG H, LUO S, JIANG F L. Tensile properties and work hardening behavior of continuous-extruded Al-1.1Mg-0.3Cu alloy [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(6):60—65. (In Chinese)
- [15] 孟立春, 刘春辉, 赖玉香, 等. 6N01-7N01 铝合金 T 型焊接接头的微观组织与性能的研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(12):20—26.
MENG L C, LIU C H, LAI Y X, *et al.* The heterogeneity in microstructure and property of the welded joints between 6N01 and 7N01 aluminum alloys [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(12):20—26. (In Chinese)
- [16] 刘瑛, 张新明, 李慧忠, 等. 2519 铝合金的低温拉伸力学性能 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(4):641—645.
LIU Y, ZHANG X M, LI H Z, *et al.* Tensile properties of 2519 aluminum alloy at low temperature [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2006, 37(4):641—645. (In Chinese)
- [17] 程丽霞. 低温处理对 3105 铝合金组织和性能的影响[D]. 重庆:西南大学材料与能源学部, 2013:27—39.
CHEN L X. Effect of deep cryogenic treatment on microstructure and properties of 3105 aluminum alloy [D]. Chongqing: Faculty of Materials and Energy, Southwest University, 2013:27—39. (In Chinese)
- [18] 蒋显全, 蒋诗琪, 齐宝, 等. 铝合金高低温力学性能研究及应用前景[J]. 世界有色金属, 2015(10):20—25.
JIANG X Q, JIANG S Q, QI B, *et al.* The study and application prospect on low-temperature mechanical properties of aluminium alloy [J]. World Nonferrous Metals, 2015(10):20—25. (In Chinese)
- [19] GB/T 13239—2006 金属材料低温拉伸试验方法 [S]. 北京:中国标准出版社, 2006:5—11.
GB/T 13239—2006 Metallic materials-tensile testing at low temperature [S]. Beijing:China Standard Press, 2006:5—11. (In Chinese)
- [20] WIGLEY D A. Mechanical properties of materials at low temperatures[J]. Strength of Materials, 1971, 8(3):286—291.