

高温后 6061-T4 系铝合金板材单向循环 拉伸力学性能试验研究

赵子雁, 孙国华, 陈慧娴, 黎明

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要:为明晰 GB 50429—2007《铝合金结构设计规范》推荐的 6061-T4 系铝合金板材在火灾后力学性能的退化规律,设计完成了 38 个 6061-T4 铝合金试件在室温及高温后的单向循环拉伸试验,重点评估了铝合金板材在不同冷却方式及单向循环荷载作用下的破坏特征、初始弹性模量、强度、应变退化和耗能等。研究表明:6061-T4 铝合金板材的单向循环拉伸应力-应变曲线无明显屈服平台,显著屈服后并未呈现明显的强化特征;在加热温度为 100~300 °C 区间时,铝合金试件表面银白色光泽变暗但不明显,表面状况不宜作为评估 6061-T4 铝合金试件火灾损伤程度的评价依据;温度对 6061-T4 铝合金初始弹性模量影响较小,冷却方式对 6061-T4 铝合金试件高温后力学性能影响不大。当温度低于 200 °C 时,温度对铝合金板材强度影响不明显;当温度高于 200 °C 时,随着温度升高,铝合金板材强度呈显著降低趋势;常温下单向循环拉伸试验过程中铝合金试件屈服应变略低于单向加载试件,由于循环受拉过程的塑性累积损伤,导致试件在单向循环荷载作用下的延性劣化;随着温度的不断升高,试件屈服会趋于更早,其变形能力呈现先变差后变好的规律;6061-T4 铝合金试件累积耗能随着温度升高逐渐降低,且耗能大小与铝合金材料强度及单向循环拉伸圈数正相关。

关键词:6061-T4 铝合金;单向循环拉伸试验;高温;耗能;冷却方式

中图分类号:TU395

文献标志码:A

Experimental study on the mechanical properties of 6061-T4 aluminum alloy after elevated temperature under unidirectional cyclic tensile load

ZHAO Ziyang, SUN Guohua, CHEN Huixian, LI Ming

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: To clarify the degradation law of the mechanical property of 6061-T4 aluminum alloy after elevated temperatures as recommended by the GB 50429—2007 code for design of aluminium structures, a total of thirty-eight 6061-T4 aluminum alloy specimens were designed, and the unidirectional loading tests and cyclic tensile loading tests at room temperature and elevated temperature were performed. The effects of cooling type and loading protocol on the failure characteristics, initial elastic modulus, strength, stress degradation, and energy dissipation were evaluated. The experimental results show that the yield platform and strain hardening behavior in the unidirectional cyclic tensile stress-strain curve of 6061-T4 aluminum alloy were not observed. When the heating temperature was in the range of 100~300 °C, the surface of 6061-T4 aluminum alloy specimens became slightly darker but not significantly. The surface condition of the 6061-T4 aluminum alloy can not be used as an indicator to evaluate the damage degree after fire. The temperature had a slight effect on the initial modulus of 6061-T4 aluminum alloy, and the cooling method also slightly affected the mechanical property of 6061-T4 aluminum alloy. When the temperature

收稿日期:2023-11-13; 修回日期:2024-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51578355,52378173);江苏省自然科学基金项目(BK20231343)

作者简介:赵子雁(1999—),女,硕士研究生,主要从事钢结构抗震研究。E-mail:nkwangwei3748@163.com

通信作者:孙国华(1978—),男,教授,博士,主要从事钢结构及钢-混凝土组合结构抗震研究。E-mail:sungh-529@163.com

was below 200 °C, the temperature did not have a significant effect on the strength of the aluminum alloy. When the temperature was above 200 °C, the strength of 6061-T4 aluminum alloy exhibited a significant decreasing trend with the increase in temperature. During unidirectional cyclic tensile tests at room temperature, the yield strain of aluminum alloy specimens was slightly lower than that of unidirectional loaded specimens. Due to the plastic accumulation damage during the cyclic tensile process, the ductility of the specimens deteriorated under unidirectional cyclic loading. With the continuous increase in temperature, the yield of the specimens tended to occur earlier, and the deformation capacity changed from worse to better. The energy dissipation capacity of 6061-T4 aluminum alloy gradually decreased with the increase of temperature, and the cumulative energy was positively correlated to aluminum alloy strength and cycle number.

Key words: 6061-T4 aluminum alloy; unidirectional cyclic tensile loading test; elevated temperature; energy dissipation; cooling method

0 引言

铝合金材料具有轻质高强、耐腐蚀、可循环利用等优点,在航空领域得到广泛应用,现已逐渐拓展至土木工程领域^[1]。2008年 Kieran Timberlake 建筑设计公司在美国纽约建成了一座 5 层铝合金框架住宅^[2],南京牛首山文化旅游区佛顶宫大穹顶就已采用铝合金网壳结构^[3]。但铝合金材料在火灾中,由于受到高温影响,材料力学性能会显著降低^[4]。考虑火灾后建筑结构完整性和结构构件的更换需求,铝合金材料灾后残余力学性能评估成为当前领域的重点研究内容。WANG 等^[4]对 7A04-T6 高强铝合金试样进行了单向拉伸试验,研究了火灾中、火灾后 2 种不同环境下 7A04-T6 高强铝力学性能的变化规律,试验发现高强铝合金材料在高温下力学性能显著降低,当温度超过 400 °C 时,材料强度仅有室温时的 5%,但其大部分力学性能可在高温冷却后恢复。CHEN 等^[5]通过对火灾后 6061-T6 和 7075-T73 这 2 种型号铝合金材料的单向拉伸试验研究了其火灾后残余力学性能,试验评估了温度、冷却方式对 2 种铝合金材料力学性能的影响规律,基于试验结果提出了可准确评估 2 种型号铝合金的火灾后力学性能的预测方程。LIU 等^[6]完成了 50 个 6082-T6 系铝合金的标准拉伸试验,评估了不同热处理温度和冷却方式对其火灾后残余力学性能的影响,建立了上述型号铝合金材料火灾后力学的简化预测方程。SUMMERS 等^[7]对 AA5083-H116 和 AA6061-T651 这 2 种型号铝合金材料进行了一系列单向拉伸试验,揭示了残余力学性能取决于加热温度和升温速率,基于数据结果建立的经验模型可用于评估真实火灾中的残余屈服强度。RIPPE 等^[8]对 6061-T651 铝合金材料性能进行了试验研究,所获得的结果与 SUMMERS 等^[7]研究一致。WANG 等^[9]系统梳理了近年来铝合金在火灾中、火灾后的力学特性以及铝合金结构在火灾下的整体性能,具体包括铝合金构件、连接以及整体结构等。SU 等^[10]研究了 6063-T5、6061-T6 系列铝合金在高温下的力学性能,并与美国规范、欧洲规范相关规定进行对比,提出了上述系列铝合金的力学性能预测方程。贾斌等^[11]对铝合金材料进行单向拉伸和循环加载试验,结果证实铝合金材料在循环荷载下的力学性能与单向拉伸结果区别较大,表现出了应变强化特征。GUO 等^[12]对 6082-T6、7020-T6 铝合金进行了 3 种循环加载方式的试验研究,评估了单向加载和循环加载下 2 种铝合金的破坏模式和力学性能,研究发现循环荷载作用下的应力-应变关系与单向荷载作用下的试验结果差异不明显。PISAPIA 等^[13]对 5 系、6 系和 7 系铝合金材料进行了单向和循环加载试验,获得了相关铝合金材料的应力-应变曲线、循环硬化、耗能能力和塑性断裂等性能指标,并对欧洲规范推荐的结构用铝提出了设计建议。杨舒涵^[14]对 6061-T6 铝合金材料进行单向拉伸和循环加载试验,再现了铝合金材料的包辛格效应、循环硬化及累积损伤等特性,但并未发现明显的循环软化特性。

由前述研究可知,大部分关于铝合金材料力学性能的相关研究主要集中在温度、加载模式、冷却方式以及加热速率方面,对于我国 GB 50429—2007《铝合金结构设计规范》^[15]所推荐采用的具有良好变形能力的 6061-T4 系铝合金在不同温度及单向循环荷载作用下的力学性能研究较少,绝大部分研究仍聚焦于钢材^[16-19]。基于此,本文以 6061-T4 系铝合金板材为研究对象,进行了 38 个材性试样的单向及单向循环拉伸试验,重点考虑了温度、冷却方式和加载方式等因素,获得了相关因素对其屈服强度、极限抗拉强度、断裂伸长率、断面收缩率和耗能的影响规律,相关成果可为 6061-T4 铝合金结构火灾后结构或构件的损伤评估提供试验依据。

1 试验概况

1.1 试验设计

图1给出了6061-T4铝合金材性试件的基本尺寸。材性试件厚度为10 mm,两段夹持端长度为60 mm,宽度为80 mm,另各设置4个M5的螺栓孔,过渡弧半径为15 mm。材性试样中部区域的平行段长度为105 mm,宽度为20 mm。材性试件几何尺寸根据GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》^[20]进行设计,所有试件均为板状试件。表1给出了材性试样的基本信息。其中,单向拉伸试件编号规则为ST-1~ST-7,单向循环加载试件编号规则为TC-W/A-100/150/200/250/300-1/2/3。TC为拉伸循环试验;W为高温后浸水冷却;A为高温后自然冷却。考虑到铝合金材性的离散性,共进行了7个常温状态下6061-T4铝合金试样的单向拉伸试验,并将其平均结果作为高温单向循环拉伸结果的对比标准。在高温加热过程中,需将高温炉加热到预定的目标温度,加热速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ^[21],试件在达到预设温度后保持恒温30 min^[20],确保整个铝合金材料试件达到稳态条件,结束后将试件采用浸水冷却、自然冷却2种方式冷却至室温,然后在室温条件下进行加载试验。考虑到铝合金熔点及实际工程中铝合金材料实际情况,本批试验考虑100、150、200、250、300 $^{\circ}\text{C}$ 这5种目标温度。

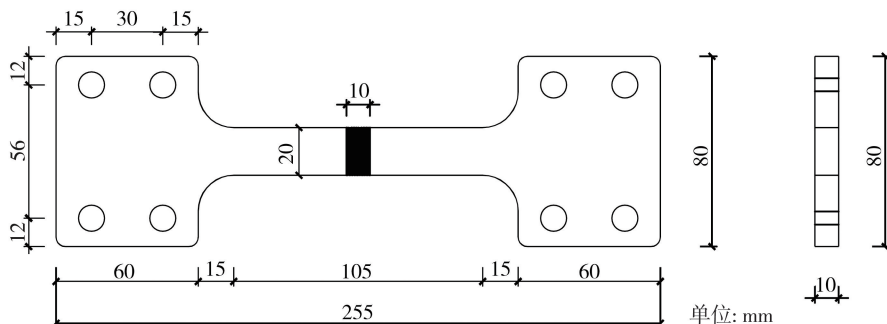


图1 6061-T4铝合金材性试件几何尺寸

Fig. 1 Dimensions of 6061-T4 aluminum alloy specimens

表1 试件参数汇总

Table 1 Specimen parameters information

编号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	加载方式	编号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	加载方式	编号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	加载方式
ST-1~7	室温	单向加载	TC-A-150-1	150	单向循环	TC-W-250-3	250	单向循环
TC-0	室温	单向循环	TC-A-150-2	150	单向循环	TC-A-250-1	250	单向循环
TC-W-100-1	100	单向循环	TC-A-150-3	150	单向循环	TC-A-250-2	250	单向循环
TC-W-100-2	100	单向循环	TC-W-200-1	200	单向循环	TC-A-250-3	250	单向循环
TC-W-100-3	100	单向循环	TC-W-200-2	200	单向循环	TC-W-300-1	300	单向循环
TC-A-100-1	100	单向循环	TC-W-200-3	200	单向循环	TC-W-300-2	300	单向循环
TC-A-100-2	100	单向循环	TC-A-200-1	200	单向循环	TC-W-300-3	300	单向循环
TC-A-100-3	100	单向循环	TC-A-200-2	200	单向循环	TC-A-300-1	300	单向循环
TC-W-150-1	150	单向循环	TC-A-200-3	200	单向循环	TC-A-300-2	300	单向循环
TC-W-150-2	150	单向循环	TC-W-250-1	250	单向循环	TC-A-300-3	300	单向循环
TC-W-150-3	150	单向循环	TC-W-250-2	250	单向循环			

1.2 试验装置

试验在苏州科技大学材料力学实验室的2000 kN电液伺服万能拉伸试验机上进行。为方便试件安装,设计了一套自制夹具,装配于试验机上配合使用。在试件平行段安装引伸计测量拉伸应变,引伸计标距为50 mm,量程为10 mm。使用量程为1000 kN的力传感器实时输出试验施加的轴力。通过8颗M22螺栓将试验机上部工作台、力传感器与夹具上端板连接,同样通过4颗M22螺栓将夹具下部端板与试验机底部工作台连接。随后,将6061-T4铝合金试件放置于夹持装置的凹槽内,通过8颗M8螺栓将试件固定于凹槽避免其产生滑移。图2给出了试验加载装置。

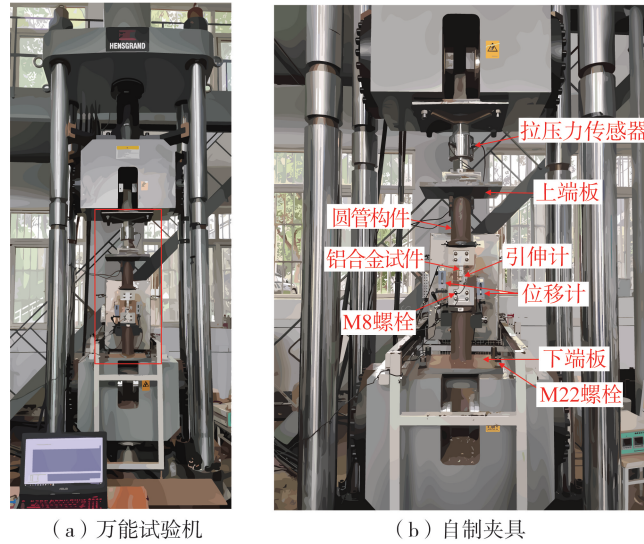


图 2 试验装置
Fig. 2 Test setup

1.3 加载制度

本次试验考虑 2 种加载制度:①单向拉伸加载方式;②单向循环拉伸加载方式。单向拉伸试验全程采用位移控制加载,加载速率为 0.5 mm/min^[20]。根据 ECCS 规范^[22]建立了单向循环拉伸加载制度,全程采用位移和力协同控制加载;加载时采用位移控制,加载速率为 3 mm/min,加载至每级目标位移后,转为力控制,并卸载至 0。图 3 给出了具体加载方案。其中, e_y 为屈服位移,根据已完成的单向拉伸试验的荷载位移曲线确定。初始弹性阶段加载时,力卸载至 0 后试件变形完全恢复;试件屈服后发生塑性变形,力卸载至 0 后试件出现残余变形。

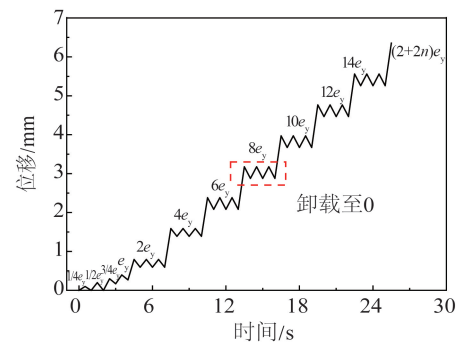


图 3 单向循环加载制度
Fig. 3 Unidirectional cyclic loading protocol

2 结果与分析

2.1 试验现象

1) 单向拉伸试验试件破坏现象

6061-T4 铝合金试件在单向拉伸作用下的试验破坏现象如图 4 所示。由图可知,6061-T4 铝合金试件表面光滑且具有明显的银白色金属光泽。在单向拉伸过程中,试件在破坏前有明显的颈缩现象。随后,铝合金试件的抗拉承载力持续下降直至断裂,并伴随着巨大声响。试验结束后,观察到 6061-T4 铝合金试件断裂面位于中部偏上位置,大部分断裂面与试件轴线呈 45°方向,少部分断裂面形状不规则且凹凸不平,断裂面呈现颗粒状。



图 4 6061-T4 铝合金试件在单向拉伸作用下的试验破坏现象

Fig. 4 Failure modes of 6061-T4 aluminum alloy specimens under unidirectional tensile load

2) 单向循环拉伸试验试件破坏现象

6061-T4 铝合金试件高温冷却后在单向循环拉伸作用下的破坏现象如图 5 所示。由图可知,6061-T4 铝合金试件暴露于不超过 300 °C 的高温且冷却后,铝合金试件表面仍呈现银白色的金属光泽;随着加热温度的升高,铝合金表面的金属光泽逐渐减弱,其表面颜色的变化是由于在加热过程中铝合金表面会形成不同厚度的致密氧化物,这与文献[23]结论一致。在单向拉伸循环试验过程中,铝合金试件在破坏前均具有明显的颈缩现象,且加热温度越高,试件颈缩现象越明显;随后,铝合金试件受拉承载力下降,直至试件突然断裂并伴随巨大声响,但经历 300 °C 高温热处理试件断裂时无响声,其颈缩现象明显,且持续时间长。6061-T4 铝合金试件断裂处截面发生较大的横向收缩,断面边缘塑性变形明显,表明经历 300 °C 温度处理后的铝合金试件变形能力显著增加。试验后观察到 6061-T4 铝合金试件断裂面位置在截面中心偏上位置,在温度为 100~200 °C 时断裂面与试件轴线呈 45° 斜交,在温度为 250~300 °C 时断裂面不规则且凹凸不平,所有断裂面颜色发白且呈颗粒状。

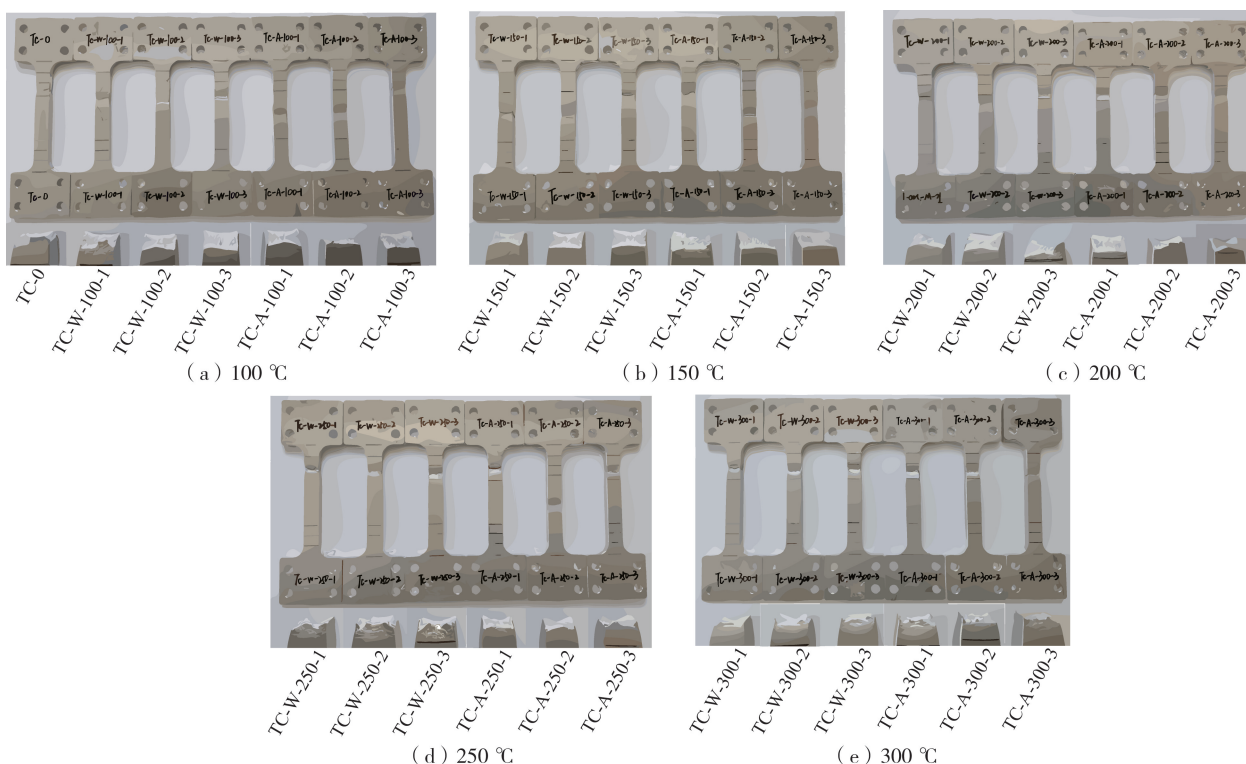


图 5 6061-T4 铝合金试件在单向循环拉伸作用下的试验破坏现象

Fig. 5 Failure modes of 6061-T4 aluminum alloy specimens under unidirectional cyclic tensile load

2.2 应力-应变关系曲线

1) 单向拉伸试验试件的应力-应变关系曲线

6061-T4 铝合金试件单向拉伸的试验结果如表 2 所示。表中, σ_y 为铝合金的屈服应力; σ_u 为铝合金的极限抗拉应力; ε_y 为屈服应变; ε_u 为极限应变; E 为弹性模量; δ 为屈强比, $\delta=f_y/f_u$; A 为断裂伸长率; ξ 为断面收缩率; E_1 为单向拉伸试验的耗能。

表 2 6061-T4 铝合金试件的单向拉伸试验结果

Table 2 Experimental results of 6061-T4 aluminum alloy specimens under unidirectional tensile load

试件编号	σ_y /MPa	σ_u /MPa	E /MPa	ε_y	ε_u	δ	A /%	ξ /%	E_1 /J
ST-1	242.1	267.1	68 519.7	0.006 1	0.074	0.91	15.3	35.1	709.2
ST-2	268.5	294.4	67 289.8	0.006 1	0.074	0.91	15.6	37.1	738.1
ST-3	247.1	270.9	69 329.3	0.006 3	0.082	0.91	15.6	36.4	659.0
ST-4	202.9	229.7	70 306.8	0.005 1	0.080	0.88	14.4	35.7	571.6
ST-5	224.0	251.2	71 454.4	0.005 5	0.077	0.89	15.3	34.4	607.9
ST-6	265.1	293.1	72 547.7	0.005 9	0.073	0.90	14.5	33.1	702.9
ST-7	237.2	262.1	68 579.3	0.005 2	0.078	0.88	14.8	35.4	620.3
平均	241.0	266.9	69 718.1	0.005 7	0.077	0.90	15.1	35.3	658.4

6061-T4 铝合金单向拉伸试验的应力-应变关系曲线如图 6 所示。由图可知,与传统钢材的应力-应变曲线不同,6061-T4 铝合金试件在室温下的应力-应变关系曲线无明显屈服平台,在铝合金材料显著屈服后并未呈现明显的强化特征,试件的屈强比接近 1.0,试件屈服后的强度储备比较小。铝合金试件的断裂伸长率平均为 15.1%,在试验过程中有较为明显的颈缩现象,试件破坏模式呈一定的延性破坏,且应力-应变全曲线形状基本一致。虽然上述铝合金试件均取至同一块铝板,但铝合金材料力学性能仍呈现一定的离散性。

2) 单向循环拉伸试验试件的应力-应变关系曲线

表 3 给出了室温及不同冷却方式下 6061-T4 铝合金试件单向循环拉伸的力学特征值。表中 E_2 为单向循环拉伸试验的滞回耗能,其他符号含义同表 1。6061-T4 铝合金单向循环拉伸试验的应力-应变关系曲线如图 7 所示。

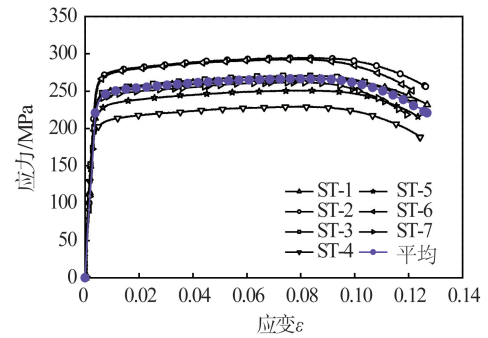


图 6 6061-T4 铝合金试件在单向拉伸下的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of 6061-T4 aluminum alloy specimens under unidirectional tensile load

表 3 6061-T4 铝合金单向循环拉伸试验结果

Table 3 Experimental results of 6061-T4 aluminum alloy specimens under unidirectional cyclic tensile load

试件编号	σ_y /MPa	σ_u /MPa	E /MPa	ϵ_y	ϵ_u	δ	A /%	n /圈	ξ /%	E_2 /J
TC-0	243.42	307.14	73 776.46	0.005 3	0.073	0.79	13.13	52.5	35.17	836.90
TC-W-100-1	257.68	334.90	69 881.20	0.005 7	0.074	0.77	15.00	61.5	38.50	1 040.37
TC-W-100-2	259.66	319.48	70 772.67	0.005 7	0.083	0.81	15.25	64.5	35.36	1 099.36
TC-W-100-3	292.29	342.36	66 240.19	0.006 5	0.085	0.85	13.25	58.5	38.11	994.41
TC-A-100-1	296.33	344.82	66 979.03	0.006 5	0.099	0.86	15.63	61.5	37.28	987.03
TC-A-100-2	277.15	310.70	67 948.88	0.006 1	0.098	0.89	15.25	64.5	41.91	1 062.81
TC-A-100-3	286.28	329.50	67 388.14	0.006 2	0.070	0.87	13.38	52.5	37.46	867.75
TC-W-150-1	282.49	333.39	72 451.86	0.005 9	0.071	0.85	15.00	61.5	39.90	1 015.65
TC-W-150-2	282.58	337.46	68 666.67	0.006 1	0.069	0.84	14.75	61.5	38.63	1 081.04
TC-W-150-3	303.51	346.50	70 378.38	0.006 3	0.086	0.88	14.00	58.5	31.82	1 051.65
TC-A-150-1	247.35	329.62	72 311.57	0.005 5	0.084	0.75	14.75	58.5	38.79	916.09
TC-A-150-2	263.02	328.51	69 250.67	0.005 8	0.069	0.80	15.13	64.5	38.15	1 137.72
TC-A-150-3	263.35	327.84	66 110.11	0.005 9	0.071	0.80	14.13	61.5	39.60	1 110.69
TC-W-200-1	275.64	320.78	68 261.17	0.006 1	0.072	0.86	14.38	58.5	36.30	895.41
TC-W-200-2	287.45	322.06	72 113.28	0.006 0	0.082	0.89	14.75	61.5	40.26	1 034.37
TC-W-200-3	264.20	315.05	67 209.88	0.006 0	0.069	0.84	14.75	58.5	37.00	974.71
TC-A-200-1	252.65	327.08	69 223.65	0.005 7	0.066	0.77	12.50	46.5	33.92	667.56
TC-A-200-2	251.95	301.95	73 438.62	0.005 5	0.072	0.83	12.88	52.5	41.57	842.19
TC-A-200-3	271.14	304.79	68 449.29	0.006 0	0.071	0.89	12.50	52.5	38.17	852.49
TC-W-250-1	219.64	266.87	68 958.95	0.005 2	0.060	0.82	12.38	46.5	41.03	598.85
TC-W-250-2	203.56	251.58	67 352.70	0.005 0	0.065	0.81	13.50	52.5	45.53	704.91
TC-W-250-3	205.97	259.41	69 352.24	0.005 0	0.072	0.79	13.75	55.5	44.36	705.72
TC-A-250-1	196.88	249.06	69 722.96	0.004 8	0.063	0.79	13.88	49.5	46.25	620.44
TC-A-250-2	203.65	260.51	70 352.32	0.004 9	0.075	0.78	14.38	55.5	43.05	743.06
TC-A-250-3	182.06	234.56	71 588.57	0.004 6	0.067	0.78	14.00	52.5	47.00	607.19
TC-W-300-1	108.62	184.56	66 034.71	0.003 6	0.079	0.59	16.25	61.5	51.25	590.84
TC-W-300-2	111.76	191.42	70 056.30	0.003 6	0.088	0.58	16.88	61.5	51.92	624.60
TC-W-300-3	104.38	179.41	66 802.12	0.003 6	0.075	0.58	16.25	61.5	52.53	557.87
TC-A-300-1	92.36	170.89	64 158.90	0.003 4	0.084	0.54	17.13	61.5	54.17	491.02
TC-A-300-2	110.88	185.04	63 530.47	0.003 7	0.073	0.60	16.50	64.5	53.06	630.28
TC-A-300-3	106.24	184.60	69 108.43	0.003 6	0.092	0.58	16.88	64.5	51.83	614.08

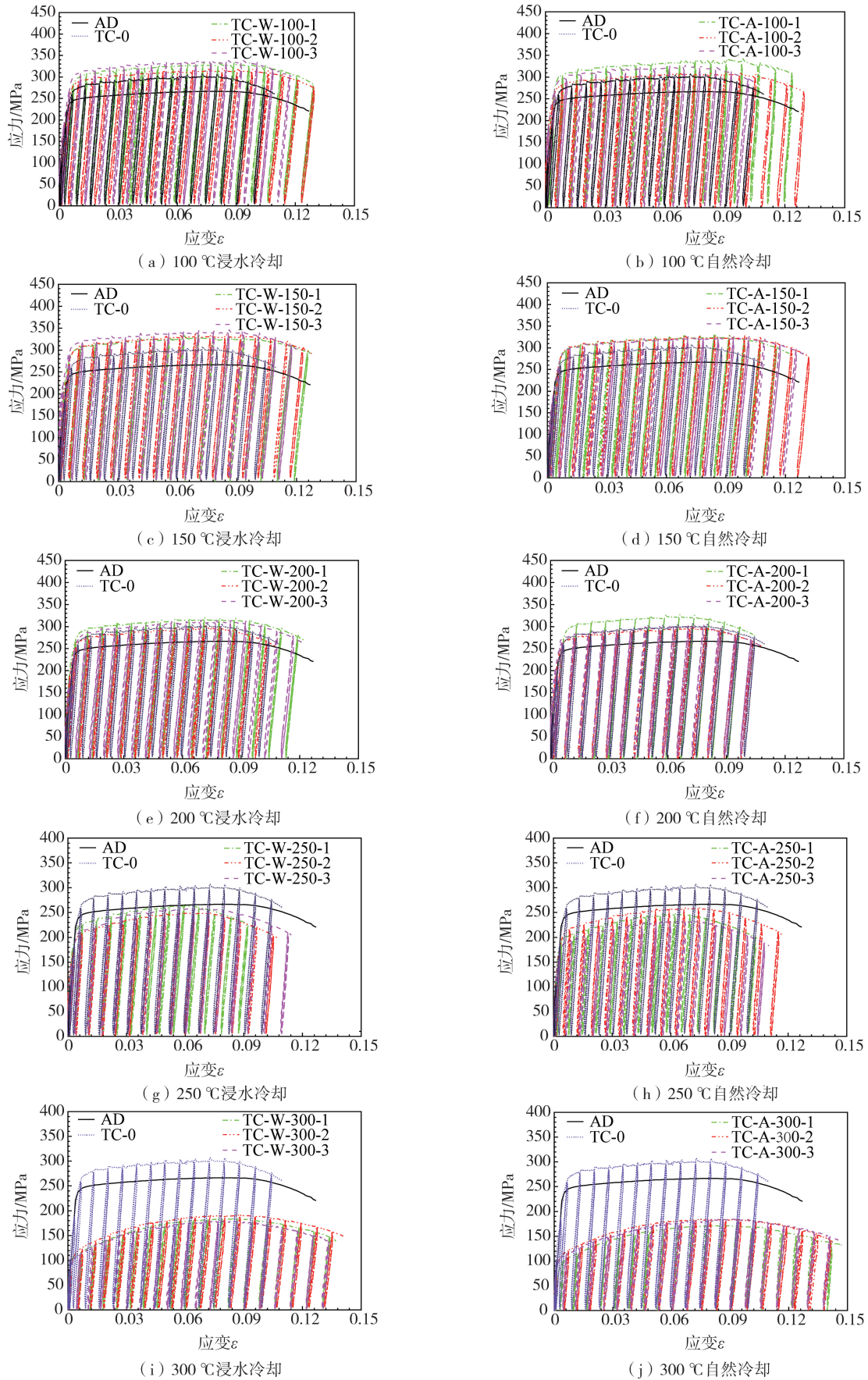


图7 6061-T4 铝合金试件在不同温度及冷却方式下的应力-应变关系曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of 6061-T4 aluminum alloy specimens considering the temperature and cool type

由表3及图7可知,6061-T4 铝合金在经历100~300 °C 热处理且冷却后,其屈服强度、极限强度、断裂伸长率、屈强比、断面收缩率以及耗能能力相比于常温状态均有显著变化,但对其初始弹性模量影响不明显。

室温下,6061-T4 铝合金试件经历单向循环拉伸后,断裂伸长率低于单向拉伸试件,表明其在单向循环拉伸荷载作用下出现了一定的累积塑性损伤。浸水冷却条件下,6061-T4 铝合金试件的屈服强度在加热温度为 100~200 °C 区间时,与常温下相比增加约 10%~20%;加热温度达到 250、300 °C 时,6061-T4 铝合金试件的屈服强度为常温性能的 86.16%、44.47%,随着温度的升高,铝合金材料的屈服强度呈现先增大后减小的变化规律,当达到 150 °C 附近时,屈服强度达到最大。极限抗拉强度在加热温度为 100~200 °C 区间时,与常温下相比增加约 4%~11%;加热温度达到 250、300 °C 时,极限抗拉强度为常温性能的 84.42%、60.28%。可得随着温度的升高,铝合金材料的极限抗拉强度呈现先增大后减小的变化规律,当达到 150 °C 附近时,极限抗拉强度达到最大。断裂伸长率在加热温度为 100~200 °C 区间时,与常温下相比增加约 10%~12%;加热温度达到 250 °C 时,断裂伸长率与常温性能较为接近,但加热温度达到 300 °C 时,与常温下相比增加约 25.36%。随着温度的升高,试件的断裂伸长率呈现先减小后增大的变化规律。断面收缩率在加热温度为 100~200 °C 区间时,比常温结果增加约 4%~8%;加热温度达到 250、300 °C 时,断面收缩率与常温下相比增加 24.08%、47.57%。可以看出,随着温度的升高,试件的断面收缩率逐渐增大。自然冷却条件下,6061-T4 铝合金试件的屈服强度在加热温度为 100~200 °C 区间时,与常温下相比增加约 5%~20%;加热温度达到 250、300 °C 时,6061-T4 铝合金试件的屈服强度为常温性能的 79.78%、42.38%。其极限抗拉强度在加热温度为 100~200 °C 区间时,与常温下相比增加约 1%~10%;加热温度达到 250、300 °C 时,极限抗拉强度为常温性能的 80.76%、58.66%。断裂伸长率在加热温度为 100~150 °C 区间以及 250 °C 时,与常温下相比增加约 11%~13%;在加热温度达到 200 °C 时,断裂伸长率与常温性能较为接近,加热温度达到 300 °C 时,与常温下相比增加约 28.23%。断面收缩率在加热温度为 100~200 °C 区间时,与常温下相比增加约 7%~11%;加热温度达到 250、300 °C 时,断面收缩率与常温下相比增加 29.18%、50.75%。由此可知,浸水冷却与自然冷却 2 种不同的冷却方式对铝合金材料力学性能影响不大。由表 3 可知,不同冷却方式以及加热温度对 6061-T4 铝合金试件的屈强比影响较小。需要特殊说明的是在加热温度达到 300 °C 时,6061-T4 铝合金试件浸水冷却和自然冷却下屈强比分别为常温性能的 73.84%、72.57%。

2.3 应力-应变骨架曲线

骨架曲线是每圈循环加载达到承载力峰值点依次相连所得到的轨迹曲线,可反映出试件在各阶段的强度、刚度、变形能力等力学特性。图 8 给出了 6061-T4 铝合金试件在加热温度为 100~300 °C 且采用 2 种不同的冷却方式冷却后的骨架曲线对比。由图可知,铝合金试件骨架曲线形状与单向拉伸曲线形状相类似,且不同加热温度和冷却方式对于试件初始弹性模量影响不太明显,但对其抗拉承载力影响显著。在温度低于 200 °C 时,6061-T4 铝合金材料的变形能力略呈增加趋势,但对其抗拉承载力影响不明显;当温度超越 200 °C 时,6061-T4 铝合金试件的变形能力逐渐增大,且其抗拉承载力呈降低趋势,温度越高降低幅度越大。

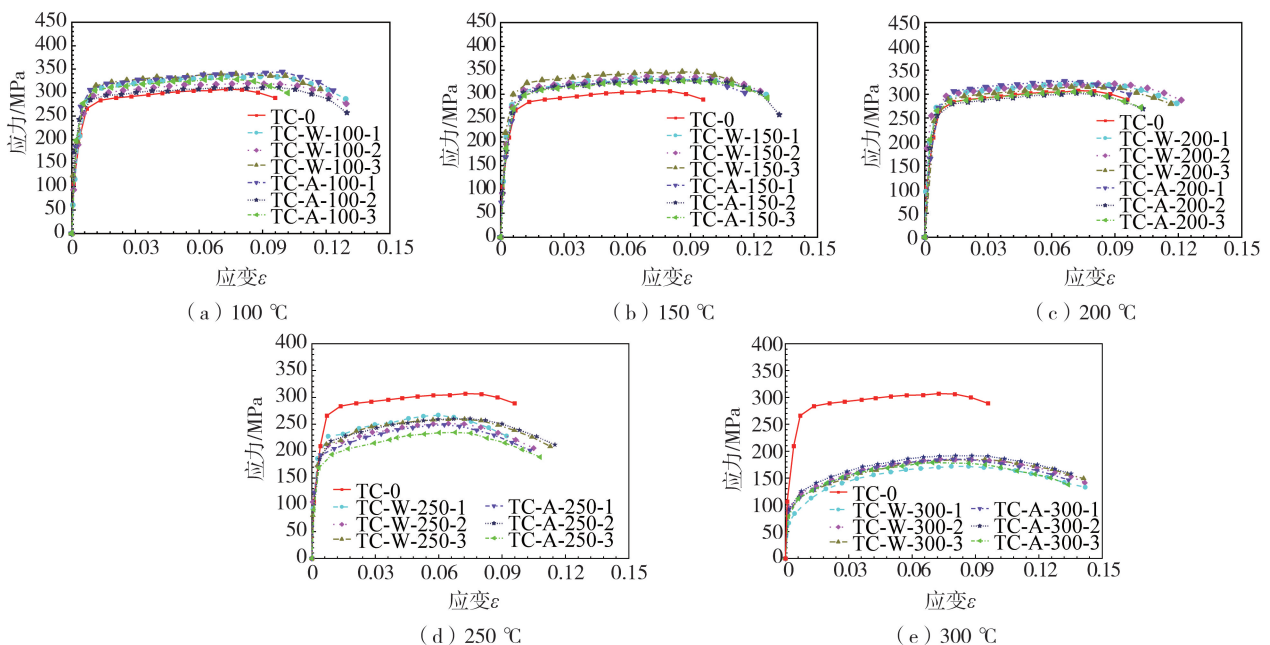


图 8 6061-T4 铝合金试件的骨架曲线对比

Fig. 8 Comparison of skeleton curves for 6061-T4 aluminum alloy specimens

2.4 耗能能力

构件滞回耗能通常可采用荷载-位移曲线的包络面积评估,滞回曲线越饱满,包络面积越大,耗能能力越强。本节重点评估了 6061-T4 铝合金试件在单向循环拉伸荷载作用下的累积滞回耗能能力,图 9 给出了不同温度、冷却方式下 6061-T4 铝合金试件的累积滞回耗能能力。由图可知,浸水冷却条件下,6061-T4 铝合金试件累积滞回耗能在加热温度为 100~200 °C 区间时,与常温下相比增加约 15%~25%;加热温度达到 250、300 °C 时,6061-T4 铝合金试件的累积滞回耗能为常温性能的 80.0%、70.6%。自然冷却条件下,6061-T4 铝合金试件的累积滞回耗能在加热温度为 100~150 °C 的区间时,与常温下相比增加约 15%~30%;在加热温度为 200~300 °C 区间时,6061-T4 铝合金试件的累积滞回耗能分别为常温性能的 94.1%、78.5%、69.1%。总体上,高温后 6061-T4 铝合金试件的累积滞回耗能随加热温度升高而呈现下降的趋势。累积滞回耗能与铝合金材料强度及单向拉伸循环圈数正相关,在材料强度相同的情况下,6061-T4 铝合金试件的累积滞回耗能随单向拉伸循环圈数的增加而增加;在单向拉伸循环圈数一致的情况下,6061-T4 铝合金试件的累积滞回耗能随材料强度提高而增加。

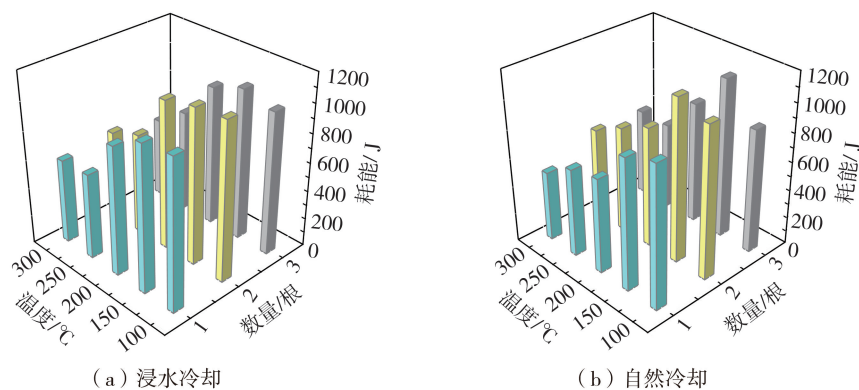


图 9 不同冷却方式下 6061-T4 铝合金试件的累积滞回耗能

Fig. 9 Cumulative hysteretic energy dissipation of 6061-T4 aluminum alloy specimens at different cooling type

2.5 铝合金力学性能的对比如

常温单向加载与单向循环作用的应力-应变(σ - ε)曲线对比如图 10 所示。由图可知,试件在单向循环荷载作用下与单向加载作用下的应力-应变关系曲线有一定的差别。弹性阶段单向循环作用下的 σ - ε 曲线与单向加载作用下 σ - ε 曲线一致,试件屈服后无明显强化特征;另一方面,试件 TC-0 的极限应力比单向加载试件平均极限应力提高了 15.08%;由于在循环受拉过程中的塑性累积损伤,试件 TC-0 的断后伸长率(13.13%)要低于单向加载试件的平均断后伸长率(15.1%),表明试件在单向循环荷载作用下延性变差;铝合金断裂时的应力受到受拉循环作用的影响,单向循环荷载作用下应力值要略高于单向加载应力值。

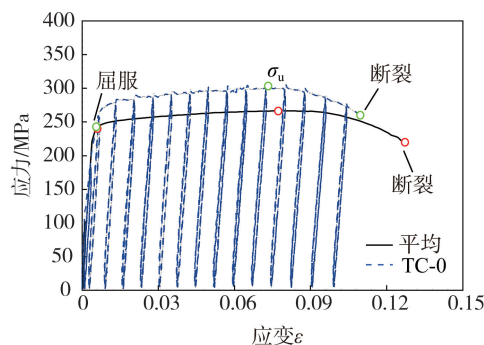


图 10 单向加载与单向循环应力-应变曲线对比

Fig. 10 Stress-strain curves comparison of unidirectional tensile load and cyclic tensile load

为更好地表征试件加热后的延性变化规律,定义断裂应变比为断裂应变与屈服应变比值。其中,屈服应变指屈服点对应应变值;断裂应变指应力达到极限应力后断裂时的应变值。屈服应变退化比和极限应变退化比随温度的变化规律如图 11 所示。由图可知,随着温度的不断升高,与单向加载试验数据相比,单向循

环荷载作用下应变退化的整体趋势为随着温度的不断升高,试件屈服提早;延性变化规律为先变差后变好。这表明试件在高温加热冷却后,铝合金内部微观结构发生变化导致铝合金试件力学性能改变。

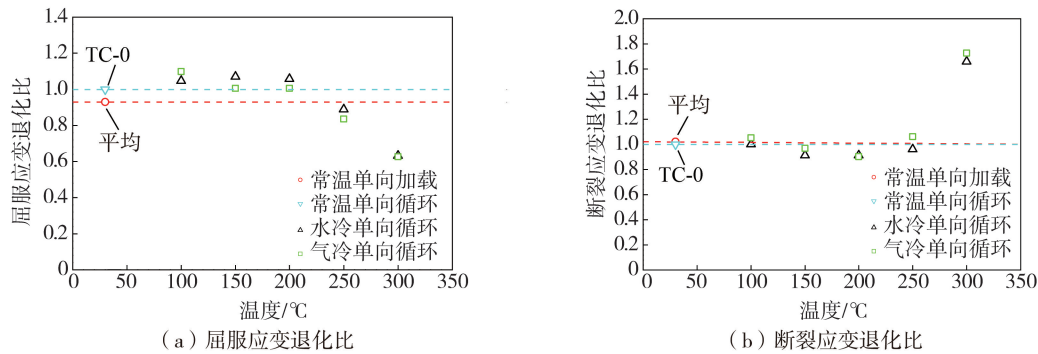


图 11 试件高温后单向拉伸与单向循环荷载下应变比退化对比

Fig. 11 Strain ratio degradation comparison of specimens under unidirectional tensile load and unidirectional cyclic tensile load after elevated temperatures

3 结论

共计完成了 38 个 6061-T4 铝合金板材试件在不同温度冷却后的单向及单向循环加载试验,获得了其破坏特征、应力-应变关系曲线、耗能能力等,评估了冷却方式和温度等因素对 6061-T4 铝合金材料力学性能的影响,得出以下主要结论:

1) 6061-T4 铝合金试件在常温下表面具有明显的银白色金属光泽,单向拉伸破坏前有明显的颈缩现象,断裂时有巨大声响,断裂面与试件轴线约呈 45° 方向,断裂面形状不规则且凹凸不平,呈现颗粒状。室温下 6061-T4 铝合金材料应力-应变关系曲线无明显屈服平台,屈服后无明显强化特征。

2) 6061-T4 铝合金试件在温度低于 200 °C 冷却后,铝合金试件在单向拉伸循环荷载作用下破坏前颈缩明显,且断裂产生巨大声响,高温后力学性能指标与常温结果相近;当温度高于 200 °C 时,6061-T4 铝合金试件破坏前仍具有颈缩现象,断裂面不规则且凹凸不平,颜色发白且呈颗粒状。

3) 6061-T4 铝合金试件在温度低于 200 °C 冷却后,铝合金试件的弹性模量、屈服强度和极限强度变化不明显;当温度高于 200 °C 冷却后,铝合金试件的屈服强度和极限强度降低幅度较大,变形能力显著增加;冷却方式对铝合金试件的力学性能指标影响不明显。

4) 6061-T4 铝合金试件屈服后无明显强化特征。与单向荷载作用相比,铝合金试件因循环受拉作用导致塑性累积损伤,极限变形能力和延性变差。随着温度的升高,铝合金试件屈服提早,变形能力劣化,但当温度达到 300 °C 时,变形能力略有提升。

5) 6061-T4 铝合金试件单向累积滞回耗能随着加热温度的升高而呈降低趋势,其降低原因是抗拉承载力降低所致。

参考文献:

- [1] 赵洪飞, 乔崎云, 曹万林, 等. 铝合金-木组合短柱轴压性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(5): 55-64.
ZHAO Hongfei, QIAO Qiyun, CAO Wanlin, et al. Experimental investigation on the aluminum alloy-timber composite stub columns under axial compression[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(5): 55-64. (in Chinese)
- [2] KIERAN S, ISENSTADT S, TIMBERLAKE J. et al. Cellophane house[M]. Philadelphia; Kieran Timberlake, 2011: 29-36.
- [3] 张雪峰, 崔家春, 尹建. 南京牛首山文化旅游区佛顶宫大穹顶大跨空间自由曲面铝合金网壳结构设计[J]. 建筑结构, 2018, 48(14): 8-13.
ZHANG Xuefeng, CUI Jiachun, YIN Jian. Structural design on large-span space freedom surface aluminum shell of the roof of Fo Ding Palace large dome in Nanjing Niushoushan Culture and Tourism Zone[J]. Building Structure, 2018, 48(14): 8-13. (in Chinese)
- [4] WANG Z X, MA C Y, LI M Y, et al. Mechanical properties of 7A04-T6 high strength structural aluminium alloy at elevated temperatures and after cooling down[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 180: 109930.
- [5] CHEN Z H, LU J, LIU H B, et al. Experimental investigation on the post-fire mechanical properties of structural aluminum alloys 6061-T6 and 7075-T73[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 106: 187-200.

- [6] LIU Y, LIU H B, CHEN Z H. Post-fire mechanical properties of aluminum alloy 6082-T6[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 196: 256-266.
- [7] SUMMERS P T, CASE S W, LATTIMER B Y. Residual mechanical properties of aluminum alloys AA5083-H116 and AA6061-T651 after fire[J]. *Engineering Structures*, 2014, 76: 49-61.
- [8] RIPPE C, CASE S, LATTIMER B. Modeling post-fire behavior of aluminum structural components using a maximum temperature approach[J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 91: 561-567.
- [9] WANG Z X, LI M Y, HAN Q H, et al. Structural fire behaviour of aluminium alloy structures: Review and outlook[J]. *Engineering Structures*, 2022, 268: 114746.
- [10] SU M N, YOUNG B. Material properties of normal and high strength aluminium alloys at elevated temperatures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 137: 463-471.
- [11] 贾斌, 张其林, 罗晓群. 结构用铝合金材料循环加载性能研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(8): 21-27, 36.
JIA Bin, ZHANG Qilin, LUO Xiaoqun. Study on cyclic loading performance of structural aluminum alloy materials[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(8): 21-27, 36. (in Chinese)
- [12] GUO X N, WANG L, SHEN Z R, et al. Constitutive model of structural aluminum alloy under cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 180: 643-654.
- [13] PISAPIA A, NASTRI E, PILUSO V, et al. Experimental campaign on structural aluminium alloys under monotonic and cyclic loading[J]. *Engineering Structures*, 2023, 282: 115836.
- [14] 杨舒涵. 冷弯钢材及铝合金材料循环本构模型研究及应用[D]. 天津: 天津大学, 2018.
YANG Shuhan. Research and application of cyclic constitutive models for cold-formed steel and aluminum alloy material [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [15] GB 50429—2007 铝合金结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
GB 50429—2007 Code for design of aluminium structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)
- [16] 姜涛, 戴君武, 杨永强, 等. Q235B 结构钢颈缩后的力学行为研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(6): 82-93.
JIANG Tao, DAI Junwu, YANG Yongqiang, et al. Study on mechanical behavior of Q235B structural steel after necking[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(6): 82-93. (in Chinese)
- [17] 石文龙, 陶正华, 张福寿. 低屈服点钢研究进展与力学性能数据分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(1): 175-183.
SHI Wenlong, TAO Zhenghua, ZHANG Fushou. Research progress and mechanical properties data analysis of low yield point steel[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(1): 175-183. (in Chinese)
- [18] 梁岩, 班亚云, 罗小勇, 等. 不同荷载模式下锈蚀钢筋力学性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2017, 37(4): 22-30.
LIANG Yan, BAN Yayun, LUO Xiaoyong, et al. Study on mechanical performance of corroded reinforcement bar under different loading modes[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2017, 37(4): 22-30. (in Chinese)
- [19] 罗文伟, 李海峰, 曹宝安. 开孔 Q460 高强钢在大应变循环拉伸下的力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6): 1291-1299.
LUO Wenwei, LI Haifeng, CAO Baoan. Mechanical properties of Q460 high-strength steel with holes under high-strain cyclic tensile loading[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6): 1291-1299. (in Chinese)
- [20] GB/T 228.1—2021 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, 2021.
GB/T 228.1—2021 Metallic materials-Tensile Testing-Part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [21] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-2: General actions-Actions on structures exposed to fire[S]. Brussels Belgium: European Committee for standardization(CEN), 2002.
- [22] Recommended testing procedure for assessing the behavior of structural steel elements under cycling loads[S]. ECCS-Technical Committee 1-Structural Safety and Loadings Technical Working Group 1.3-Seismic Design, 1986.
- [23] SUN Y, ZHANG K Y, GONG G B. Material properties of structural aluminium alloys after exposure to fire[J]. *Structures*, 2023, 55: 2105-2111.