

引用格式:石宇,吴玥,李江,等. 高强铝合金板件螺栓连接低温抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑,2026,56(4):285-291. SHI Yu, WU Yue, LI Jiang, et al. Experimental Research on the Shear Performance of Bolted Connections of High-Strength Aluminum Alloy Plates at Low Temperatures[J]. Industrial Construction, 2026, 56(4): 285-291 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG24091402

高强铝合金板件螺栓连接低温抗剪性能试验研究

石宇^{1,2} 吴玥^{1,2} 李江^{1,2} 薛暄译^{1,2} 汪建桥^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要 通过对9个高强铝合金板件螺栓连接进行低温环境下单向拉伸试验,研究了温度和边距对其抗剪性能的影响规律。研究发现:低温基本不会影响试件的破坏模式,而边距由 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 和 $2.0d_0$ 时,破坏模式由净截面破坏变为端部撕裂和横向撕裂的混合破坏;试件的极限承载力基本不受低温影响,但当边距由 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 时会显著提高试件的极限承载力(极限承载力提高了约1倍)。最后将试验结果与国内外规范的计算结果进行了对比,发现美规范较好地预测试件的极限承载力,而中规范和欧规范在边距不小于 $1.5d_0$ 时的计算结果较为保守。

关键词 高强铝合金;螺栓连接;低温;破坏模式;抗剪性能

Experimental Research on the Shear Performance of Bolted Connections of High-Strength Aluminum Alloy Plates at Low Temperatures

SHI Yu^{1,2} WU Yue^{1,2} LI Jiang^{1,2} XUE Xuanyi^{1,2} WANG Jianqiao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The influence of temperature and edge distance on the shear performance of nine high-strength aluminum alloy plate bolted connections was studied through low-temperature monotonic tensile tests. The results showed that low temperatures did not significantly affect the failure mode of specimens. When the edge distance increased from $1.0d_0$ to $1.5d_0$ and $2.0d_0$, the failure mode changed from net cross-section failure to a mixed failure of end tearing and transverse tearing; the ultimate bearing capacity of the specimen was basically not affected by low temperatures. However, when the edge distance increased from $1.0d_0$ to $1.5d_0$, the ultimate bearing capacity of the specimen increased significantly, by about 100%. The experimental results were compared with the calculation results of domestic and international standards. It was found that the American standard can better predict the ultimate bearing capacity of the specimens, while the calculation results of the Chinese and European standards are more conservative when the edge distance is not less than $1.5d_0$.

Keywords: high-strength aluminum alloy; bolted connection; low temperature; failure mode; shear performance

0 引言

随着人类对月球的不断探索,在月面建设基地是进行深度科考和资源开发的必然选择。在月面

金属元素中,铝元素的含量排在第二位,有望作为原位制造合金的原材料。此外,铝合金具有高强度、轻质、耐腐蚀等优势,在航天工程中被广泛使

第一作者:石宇,博士,主要从事轻钢结构方面的研究。

电子信箱:wuyue0091@163.com

收稿日期:2024-09-14

用。因此,对于月面建造而言,铝合金是一种理想的结构材料。由于月表的昼夜温差较大,最低温度可达到 -175°C ,而铝合金材料的低温力学性能与常温相比存在一定差异,因此开展低温下铝合金构件承载性能的研究具有重要意义。目前,铝合金结构的主要连接方式为焊缝连接和螺栓连接,其中焊接过程中的热输入会显著降低焊缝周围材料的力学性能,检查与修复也比较复杂^[1],使得螺栓连接在建筑结构中的应用更为广泛。因此,研究铝合金板件螺栓连接的低温抗剪性能是月球基地设计和建造的基础,同时也可以为地面高原高寒地区及极地科考使用铝合金结构提供参考。

目前,国内外对于钢结构和普通强度铝合金板件螺栓连接进行了大量的试验和理论研究。Cai等^[2]、Wang等^[3]和Cho等^[4]对不同钢材种类进行了试验研究,讨论了不同几何参数对螺栓连接破坏模式和承载性能的影响。Cai等^[5]采用稳态试验研究了高温中端距对薄钢板单剪螺栓连接的影响,发现端距不大于3倍螺栓直径时,极限荷载随端距的增大而增大,研究还发现连接强度的降低与高温下相应材料强度的降低有关。程明等^[1]详细讨论了国内外规范中铝合金各种机械连接方式的设计方法,认为铝合金螺栓连接和钢结构螺栓连接的设计方法相似。王元清等^[6]通过试验和有限元分析方法研究了6061-T6和6063-T5铝合金板件双剪螺栓连接的承压性能,并提出了铝合金板件螺栓连接承压强度的计算公式。郭小农等^[7]通过试验研究了高温中铝合金板件不锈钢螺栓双剪连接的承载性能,并利用有限元方法进一步探讨了板件几何尺寸、螺栓直径等参数对承载性能的影响,拟合得出铝合金板件不锈钢螺栓抗剪连接高温承载力的计算公式。Tajeuna等^[8]、Cho等^[9]和Liu等^[10]对6061-T6铝合金板件螺栓连接进行了试验研究和数值模拟。上述对于钢结构和普通强度铝合金板件螺栓连接的研究主要集中在常温 and 高温条件下,对于低温条件下钢结构和普通强度铝合金板件螺栓连接承载性能的研究相对较少。

由于工程结构中对高强度建筑材料的需求日益渐增,以及近年来金属加工技术的提高,7系(Al-Zn-Mg-Cu)高强铝合金在建筑结构中的应用逐渐增多。近年来,国内外学者对7系铝合金板件螺栓连接也开展了相关研究。Kim等^[11]通过单轴拉伸试验研究了7075铝合金单剪螺栓连接的极限承载力

和破坏机理,通过有限元模拟研究了连接的应变分布和翘曲变形模式对连接性能的影响。王美丽等^[12]采用有限元分析方法研究了端距和边距对7A04铝合金螺栓连接承载性能的影响,并提出7A04铝合金螺栓连接承压强度的计算公式。Wang等^[13]通过有限元模拟分析了7A04铝合金螺栓连接的承载性能,提出使用该材料时螺孔直径的建议值以及长螺栓连接中螺栓剪力折减系数的设计方法。综上所述,对于7系铝合金板件螺栓连接的研究主要集中在常温条件下,而对其低温抗剪性能的研究较少。

本文通过对9个7075铝合金板件螺栓连接试件进行低温环境下单向拉伸试验,得到温度和边距对试件破坏模式和极限承载力的影响规律,并将试验结果与国内外规范中设计方法的计算结果进行对比。

1 试验概况

1.1 材料力学性能

文中研究对象为2 mm厚的7075高强铝合金板。为了测试7075铝合金板的低温力学性能,依据ASTM E8^[14]对铝合金板单向拉伸试件进行设计,试件均沿板材轧制方向取样。受限于试验条件,试验温度包括20, -30 , -60°C ,共3个温度水平。每个低温温度下设置了2个平行试件,常温下设置了3个平行试件。

不同温度下铝合金板的应力-应变曲线如图1所示,材料试验结果的平均值见表1,其中 T 为试验温度, E 为弹性模量, f_y 为屈服强度(取残余应变为0.2%时对应的应力), f_u 为抗拉强度, ε_u 为极限应变。

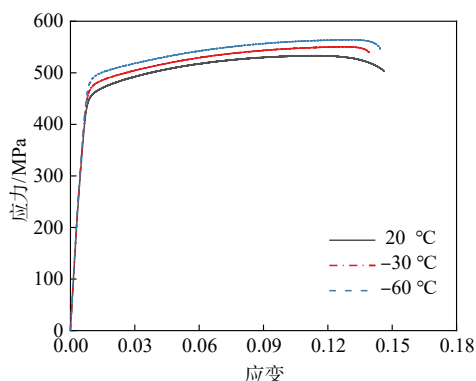


图1 不同温度下铝合金应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of the aluminum alloy at different temperatures

表 1 材性试验结果

Table 1 Material property test results

$T/^{\circ}\text{C}$	E/GPa	f_y/MPa	f_u/MPa	$\varepsilon_u/\%$
20	68.48	445.07	532.58	11.60
-30	69.52	462.34	551.99	13.65
-60	71.46	474.29	559.59	12.32

1.2 试件设计

本文共设计了 9 个铝合金板件单颗螺栓单剪连接试件, 铝合金板件厚度 t 为 2 mm, 试件总长 L 为 315 mm, 如图 2 所示, 其中端距 e_1 为螺栓孔中心沿内力方向至构件边缘距离, 边距 e_2 为螺栓孔中心沿垂直内力方向至构件边缘距离。为了避免螺栓发生剪切破坏, 采用屈服强度和抗拉强度分别为 965, 1043 MPa 的 TC4 钛合金螺栓, 螺栓直径为 12 mm, 孔径为 12.5 mm。设计时考虑了 3 种温度和 3 种边距共 9 种组合工况, 试件参数及编号如表 2 所示。试件以温度和边距组合编号, 形式为“SST- e_2/d_0 ”。例如编号为 SS20-1.0 的试件, 表示试验温度 T 为 20 $^{\circ}\text{C}$ 、边距 e_2 为 1.0 d_0 的单颗螺栓单剪连接试件。

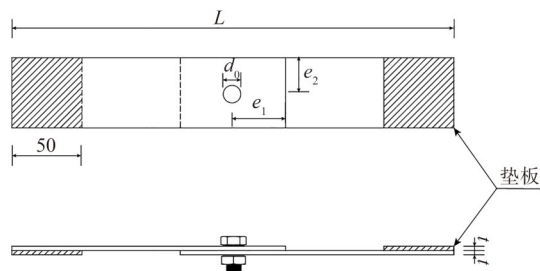


图 2 试件示意 mm

Fig. 2 Schematic diagram of the specimen

表 2 试件参数及编号

Table 2 Specimen parameters and identification numbers

试件编号	$T/^{\circ}\text{C}$	e_2/d_0	e_1/d_0
SS20-1.0	20	1.0	2.0
SS-30-1.0	-30	1.0	2.0
SS-60-1.0	-60	1.0	2.0
SS20-1.5	20	1.5	2.0
SS-30-1.5	-30	1.5	2.0
SS-60-1.5	-60	1.5	2.0
SS20-2.0	20	2.0	2.0
SS-30-2.0	-30	2.0	2.0
SS-60-2.0	-60	2.0	2.0

安装螺栓时栓头和螺母与铝合金板件接触面均布置了垫片。对所有试件的螺栓进行拧紧操作, 但不对其施加预紧力。为了避免加载偏心的影响, 使加载力通过螺栓中部的剪切面, 在试件两端夹持

部分分别固定一块与试验板件材料相同的垫板, 如图 2 所示。

1.3 试验装置和加载方案

单调拉伸试验采用 MTS 810 液压伺服万能试验机, 试验机最大量程为 100 kN, 低温环境是通过在 MTS 651 环境箱中输入液氮来实现, 装置如图 3 所示。环境箱内部热电偶用于测量炉内空气温度, 试件中部用铜丝固定一个外部热电偶用于测量试件表面温度。试验过程中, 通过力传感器和数据采集系统记录试验荷载和位移。

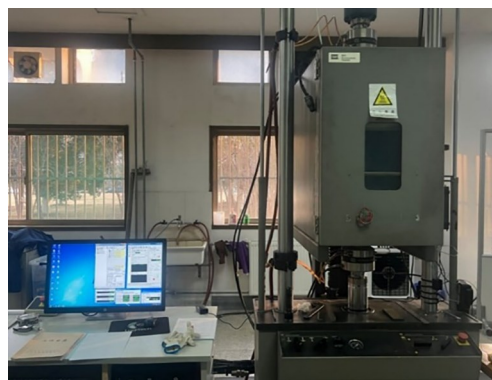


图 3 试验装置

Fig. 3 Test setup

本试验采用稳态试验方法, 即试验过程中温度保持不变, 按照指定的加载速率进行加载。试验开始时, 试件上端夹具夹紧, 下端松开, 通过控制液氮的输入来达到指定温度。当到达指定温度后保温 20~30 min, 以保证试件内部温度均匀。降温及保温过程中, 始终保持上端夹具夹紧, 下端松开, 即在温度变化过程中允许试件自由变形。保温结束后将试件下端夹紧, 并采用位移控制加载, 加载速率为 0.2 mm/min, 直至试件破坏后停止加载。

2 试验结果与分析

2.1 破坏模式

各试件的破坏模式如图 4 所示。试验过程中, 所有试件均因铝合金板件的破坏而失效, 钛合金螺栓并未发生明显变形。

如图 4(a)~(c) 所示, 边距为 1.0 d_0 的试件破坏模式均为净截面破坏, 并在板件截面削弱处观察到轻微颈缩现象。如图 4(d)~(i) 所示, 边距为 1.5 d_0 和 2.0 d_0 的试件破坏模式均为混合破坏, 板件上同时出现端部撕裂和横向撕裂, 端部撕裂是由孔壁承压引起的, 而横向裂缝是由板件面外翘曲引起的, 在

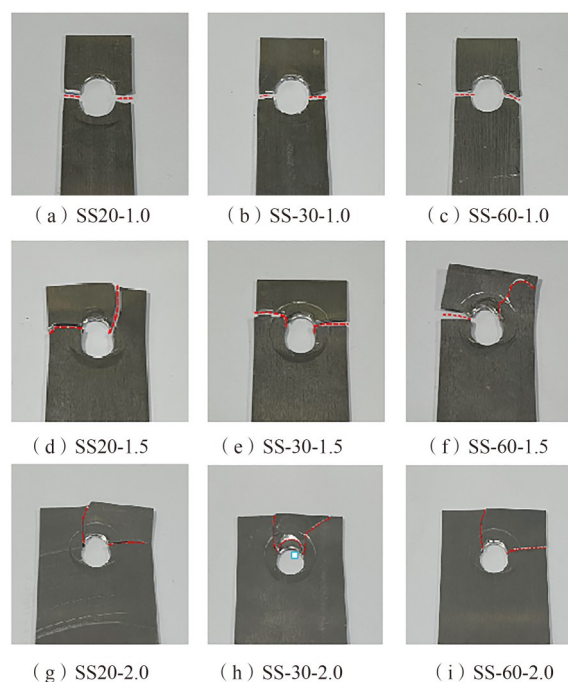


图4 试件破坏模式

Fig. 4 Failure modes of specimens

Rogers等^[15]的研究中也观察到由于板件面外翘曲导致横向裂缝的现象。由上可知,试件边距由 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 和 $2.0d_0$ 时,破坏模式由净截面破坏变为混合破坏,边距会显著影响试件的破坏模式。而当边距不变时,随着温度的变化,试件的破坏模式基本未发生改变,说明在 $20\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内温度基本不影响试件的破坏模式。

2.2 荷载-位移曲线

如图5和图6所示,所有试件的荷载-位移曲线变化趋势基本一致。在加载初期,试件处于弹性阶段,荷载与位移之间呈线性关系。随着位移增大,螺杆与孔壁因接触而产生应力集中。随着荷载增大,应力集中逐渐显著,使得试验板很快进入塑性阶段,荷载-位移曲线刚度逐渐减小。当达到峰值荷载后,荷载-位移曲线开始出现急剧下降,试件表现出明显的脆性破坏特性。此外,部分试件的荷载-位移曲线在接近峰值荷载之前出现了一定程度的波动,这是因为7系铝合金塑性较差,当塑性变形发展到一定程度后,在局部先出现开裂,开裂后应力得到释放并进一步扩散,从而承载力出现略微波动。

如图5所示,当边距相同时,不同温度下各试件荷载-位移曲线的弹性段基本重合,说明低温基本不影响铝合金板件螺栓连接的初始承载刚度,这是因为温度在 $20\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内对铝合金弹性模量的影响

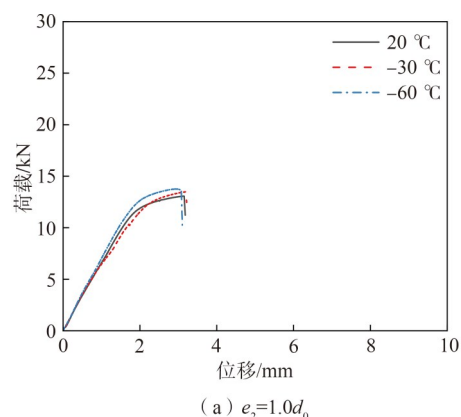
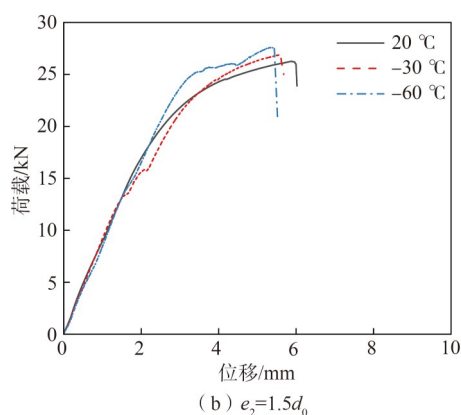
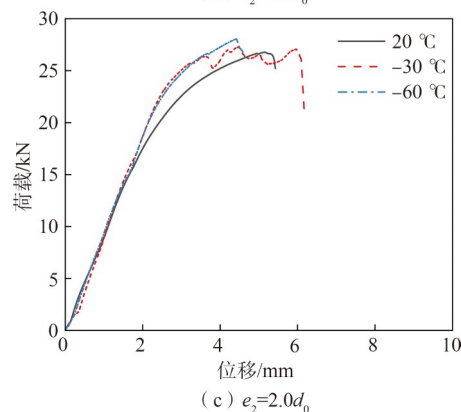
(a) $e_2=1.0d_0$ (b) $e_2=1.5d_0$ (c) $e_2=2.0d_0$

图5 不同温度下试件的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of specimens at different temperatures

较小。此外,当边距相同时,不同温度下各试件的极限承载力随着温度降低略微增大,这是由于低温条件轻微提高了铝合金的强度性能。总的来看,在 $20\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内温度对铝合金板件螺栓连接极限承载力的影响有限。

如图6所示,相同温度下,当边距 e_2 从 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 时,试件的初始承载刚度和极限承载力均显著增大。这是由于净截面承载面积随着边距 e_2 增大而增大,且破坏模式由净截面破坏转变为混合破坏。然而,当边距 e_2 由 $1.5d_0$ 增大到 $2.0d_0$ 时,试件

的初始承载刚度和极限承载力增大程度远小于边距 e_2 由 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 的情况,说明当边距超过 $1.5d_0$ 后边距对试件抗剪性能的影响较小。

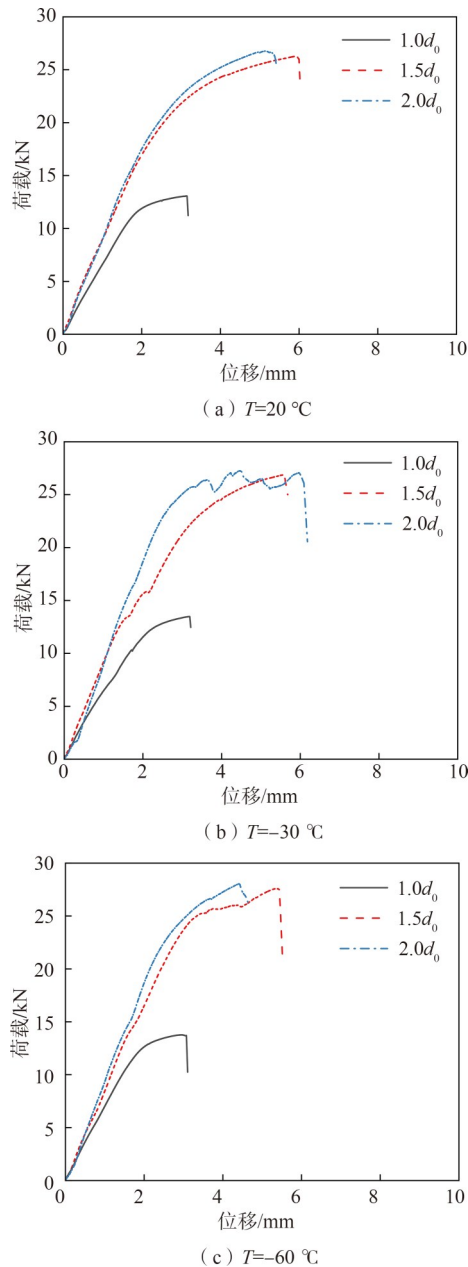


图6 不同边距下试件的荷载-位移曲线
Fig. 6 Load-displacement curves of specimens under varying edge distance conditions

2.3 极限承载力

各试件的极限承载力 P 如表3所示。

为了更直观地反映试件极限承载力受温度和边距变化的影响,分别将温度和边距作为横坐标,试件的极限承载力为纵坐标,绘制了相应极限承载力随温度和边距的变化曲线,如图7所示。

表3 试件极限承载力

Table 3 Ultimate bearing capacity of specimens kN			
试件编号	极限承载力 P	试件编号	极限承载力 P
SS20-1.0	13.17	SS-60-1.5	27.71
SS-30-1.0	13.58	SS20-2.0	26.88
SS-60-1.0	13.87	SS-30-2.0	27.36
SS20-1.5	26.36	SS-60-2.0	28.17
SS-30-1.5	26.97		

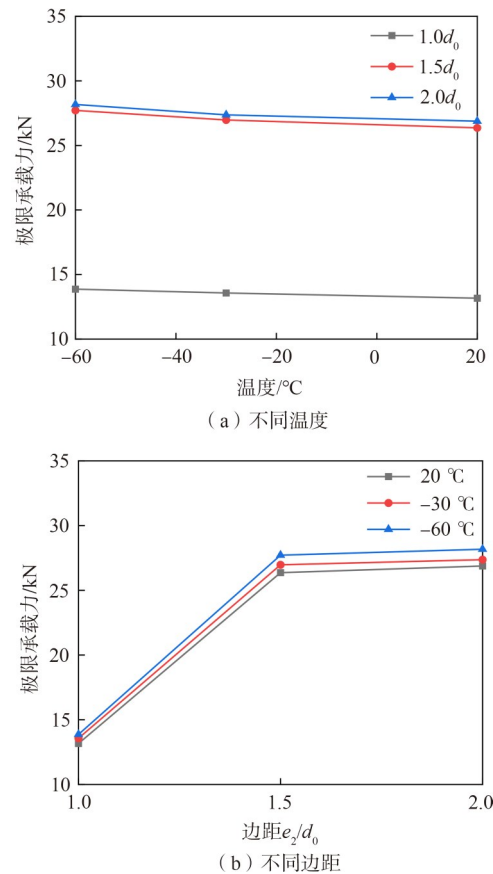


图7 极限承载力随温度和边距的变化
Fig. 7 Variations of ultimate bearing capacity with temperature and edge distance

如图7(a)所示,不同边距试件的极限承载力随温度的变化趋势一致,总体表现为极限承载力随温度降低而增大。当边距为 $1.0d_0$ 时,试件在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极限承载力相较于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分别提升了 3.1% 和 5.3% ;当边距为 $1.5d_0$ 时,试件在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极限承载力相较于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分别提升了 2.3% 和 5.1% ;当边距为 $2.0d_0$ 时,试件在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极限承载力相较于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分别提升了 1.8% 和 4.8% 。可见,3种边距条件下,低温引起的极限承载力的提高程度均不超过 10% ,说明试件的极限承载力在 $20\sim -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内受温度的影响较小,这是因为在该温度范围内低温对铝合金力学性能

的提升效果较小。

如图7(b)所示,在相同温度下,边距由 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 时,试件在20、-30、-60℃三种温度下的极限承载力分别提高了100.2%、98.7%和99.8%,增大程度约为1倍。然而,边距由 $1.5d_0$ 增大到 $2.0d_0$ 时,试件在20、-30、-60℃三种温度下的极限承载力分别提高了2.0%、1.6%和1.7%,提高程度远小于边距从 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 的情况。由此得出,当边距 $e_2 < 1.5d_0$ 时,试件的极限承载力随边距的增大而显著提升,当边距 $e_2 \geq 1.5d_0$ 时,试件的极限承载力基本不受边距影响。

3 国内外规范中的设计方法

目前关于铝合金板件螺栓连接极限承载力的设计方法可以参考中国规范GB 50429—2007《铝合金结构设计规范》^[16]、欧洲规范(EC 9)^[17]和美国规范(ADM 2020)^[18]。由于试验采用了高强度螺栓来保证螺栓不发生剪切破坏,因此在后续设计公式对比中仅考虑板件承压破坏和净截面破坏两种破坏模式。

3.1 中国规范

GB 50429—2007^[16]中针对螺栓连接承压和净截面承载力的计算方法如下。

承压承载力:

$$N_c^b = d \sum t \cdot f_c^b \quad (1a)$$

净截面承载力:

$$N = f A_{en} \quad (1b)$$

式中: d 为螺栓杆直径; $\sum t$ 为在不同受力方向中一个受力方向承压构件总厚度的较小值; f_c^b 为板件承

压强度设计值(规范^[16]中取值为 $f_c^b = 1.16f_u$, f_u 为材料的抗拉强度); A_{en} 为净截面面积; f 为铝合金材料的抗拉强度设计值。

3.2 欧洲规范

EC 9^[17]中针对螺栓连接承压和净截面承载力的计算方法如下。

承压承载力:

$$F_{b,Rd} = \alpha_b f_u d t \leq 1.5 f_u d t \quad (2a)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{e_1}{d_0}; \frac{3f_{ub}}{f_u}; 3 \right) \quad (2b)$$

净截面承载力:

$$N_{u,Rd} = 0.9 A_{net} f_u \quad (2c)$$

式中: d 为螺栓直径; t 为连接板厚度; d_0 为螺栓孔直径; f_u 和 f_{ub} 分别为连接板和螺栓的抗拉强度; e_1 为端距; A_{net} 为净截面面积。

3.3 美国规范

ADM 2020^[18]中针对螺栓连接承压和净截面承载力的计算方法如下。

承压承载力:

$$R_n = d_e t F_{tu} \leq 2 D t F_{tu} \quad (3a)$$

净截面承载力:

$$P_n = F_u A_e \quad (3b)$$

式中: d_e 为螺栓中心沿力方向到部件边缘的距离; t 为板厚; D 为螺栓名义直径; A_e 为有效净截面面积; F_{tu} 为连接板的抗拉强度。

由于各规范仅适用于常温条件,为了能与试验结果进行直接比较,在计算中用低温材性替代常温材性。试验结果与中国规范、欧洲规范和美国规范的计算结果对比见表4。

表4 试验结果与各国规范计算结果对比

Table 4 Comparison between test results and calculation results from various standards

试件编号	试验破坏模式	中国规范			欧洲规范			美国规范		
		P_{GB}/kN	破坏模式	P_{GB}/P	P_{EC}/kN	破坏模式	P_{EC}/P	P_{ADM}/kN	破坏模式	P_{ADM}/P
SS20-1.0	N	13.31	N	1.01	11.98	N	0.91	13.31	N	1.01
SS-30-1.0	N	13.80	N	1.02	12.42	N	0.91	13.80	N	1.02
SS-60-1.0	N	13.99	N	1.01	12.59	N	0.91	13.99	N	1.01
SS20-1.5	M	19.28	B	0.73	19.17	B	0.73	25.56	B	0.97
SS-30-1.5	M	19.98	B	0.74	19.87	B	0.74	26.50	B	0.98
SS-60-1.5	M	20.25	B	0.73	20.15	B	0.73	26.86	B	0.97
SS20-2.0	M	19.28	B	0.72	19.17	B	0.71	25.56	B	0.95
SS-30-2.0	M	19.98	B	0.73	19.87	B	0.73	26.50	B	0.97
SS-60-2.0	M	20.25	B	0.72	20.15	B	0.72	26.86	B	0.95

注:破坏模式中,“B”表示承压破坏,“M”表示混合破坏,“N”表示净截面破坏。

从表 4 中可以看出,对于边距为 $1.0d_0$ 的试件,不同温度下中国规范和美国规范极限承载力的计算值与试验值基本吻合,而欧洲规范的预测结果较保守。对于边距不小于 $1.5d_0$ 的试件,不同温度下中国规范和欧洲规范的极限承载力计算值基本相同,但均低于试验值,两个规范极限承载力计算值与试验值的平均比值均为 0.73;美国规范的计算结果较为准确,不同温度下极限承载力计算值与试验值的误差不超过 5%。

欧洲规范和美国规范将端部撕裂作为承压破坏的特殊情况,中国规范则是通过严格的构造要求避免发生端部撕裂。因此,从表 4 中可以看出,中国规范、欧洲规范和美国规范对于试件的破坏模式预测均较为准确。

4 结 论

本文试验研究了低温下 7075 铝合金板件螺栓连接的抗剪性能,得到了温度和边距对试件破坏模式和极限承载力的影响规律,并将试验结果与国内外规范的计算结果进行了对比,得出结论如下:

1) 试件的破坏模式在 $20\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内基本不受温度影响。此外,边距由 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 和 $2.0d_0$ 会显著影响试件的破坏模式。随着边距增大,破坏模式从净截面破坏变为端部撕裂和横向撕裂的混合破坏。

2) 在 $20\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,温度对试件极限承载力的影响较小,随着温度降低,极限承载力的提高幅度在 10% 以内。在相同温度下,当边距由 $1.0d_0$ 增大到 $1.5d_0$ 会显著提高试件的极限承载力,极限承载力增大程度约为 1 倍;在边距超过 $1.5d_0$ 后,试件的极限承载力受边距的影响较小,当边距由 $1.5d_0$ 增大到 $2.0d_0$ 时,极限承载力提高程度在 3% 以内。

3) 美国规范中的设计方法能较好地预测低温下高强铝合金板件螺栓连接的极限承载力。中国规范能准确预测发生净截面破坏的试件的极限承载力,而低估承压破坏试件的极限承载力。对于净截面和承压破坏试件而言,欧洲规范的计算结果均较为保守。中国规范、欧洲规范和美国规范对于破坏模式的预测均较为准确。

参 考 文 献

[1] 程明,石永久,王元清. 铝合金结构的连接及其设计方法[J]. 建筑科学, 2006(3): 85-88.

- [2] CAI Y, YOUNG B. Structural behavior of cold-formed stainless steel bolted connections [J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 83: 147-156.
- [3] WANG Y B, LYU Y F, LI G Q, et al. Behavior of single bolt bearing on high strength steel plate[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 137: 19-30.
- [4] CHO Y, TEH L H, YOUNG B. Effects of material ductility and cooling methods on the bearing strength of steel bolted connections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 181: 106625.
- [5] CAI Y, YOUNG B. Effects of end distance on thin sheet steel single shear bolted connections at elevated temperatures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 148: 106577.
- [6] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 铝合金板件螺栓连接承压强度试验与计算方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(5): 203-208.
- [7] 郭小农,于孟同,梁水平,等. 铝合金板件不锈钢螺栓连接的高温承载性能分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(9): 1695-1703.
- [8] TAJEUNA T A D, LÉGERON F, LABOSSIÉRE P, et al. Effect of geometrical parameters of aluminum-to-steel bolted connections[J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 344-357.
- [9] CHO Y, KIM T. Estimation of ultimate strength in single shear bolted connections with aluminum alloys (6061-T6)[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 101: 43-57.
- [10] LIU H, LIU X, CHEN Z, et al. Mechanical properties of bolted connections for aluminum alloy structures at elevated temperatures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107067.
- [11] KIM T, CHO Y. Investigation on ultimate strength and failure mechanism of bolted joints in two different aluminum alloys[J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 74-88.
- [12] 王美丽,王丙,张松,等. 利用 7A04-T6 铝合金改进的“321”钢桥主桁螺栓连接强度研究[J]. 军事交通学报, 2023, 2(2): 89-94.
- [13] WANG Z X, WANG Y Q, ZHANG G X, et al. Tests and parametric analysis of aluminum alloy bolted joints of different material types[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 185: 589-599.
- [14] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test methods for tension tests of metallic materials: ASTM E8[S]. West Conshohocken: ASTM, 2022.
- [15] ROGERS C A, HANCOCK G J. Failure modes of bolted-sheet-steel connections loaded in shear[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(3): 288-296.
- [16] 中华人民共和国建设部. 铝合金结构设计规范: GB/T 50429—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] Commission of the European Communities. Eurocode 9: design of aluminium structures—part 1-1: general structural rules: EN 1999-1-1: 2023(E)[S]. Brussels: Commission of the European Communities, 2023.
- [18] The Aluminum Association. Aluminum design manual: ADM 2020 [S]. Washington, D C: The Aluminum Association, 2020.