高强铝合金板件螺栓连接高温抗剪性能研究

石 宇[1,2],吴 玥[1,2*],罗泽巧[1,2],薛暄译[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: 本文通过高温下7075高强铝合金材性试验,研究了7075铝合金材料应力-应变曲线及关键力学参数随温度的变化规律;通过高温下7075高强铝合金板件螺栓连接抗剪承载试验,探究了温度和边距对抗剪连接试件破坏模式及极限承载力的影响。试验结果表明:当温度达到200 ℃时,材料的弹性模量和强度开始显著下降;当温度达到300 ℃时,材料的屈服强度和极限强度均约为常温时屈服强度和极限强度的15%。抗剪连接试件的破坏模式表现为两类,分别为净截面破坏与混合破坏,且温度和边距可能会影响试件的破坏模式;试件极限承载力劣化规律与高温下材料强度衰减趋势一致,当温度达到300 ℃时,试件的极限承载力约降低至常温时极限承载力的15%;试件的极限承载力随边距的增大而增大,当边距由$1.0d_0$(d_0为螺栓孔径)增大到$1.5d_0$时,极限承载力增大约1倍,当边距由$1.5d_0$增大到$2.0d_0$时,极限承载力的增大程度有限。建立的有限元模型能较准确地模拟螺栓连接的抗剪性能,具有一定的可靠性。将试验结果与采用国内外规范计算的结果进行对比,发现各国规范在边距不小于$1.5d_0$时的计算结果均偏保守。

关键词: 高强铝合金; 高温; 螺栓连接; 抗剪性能; 破坏模式; 规范对比
中图分类号: TU395 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2026)08-0017-09
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20241223002

Study on High-Temperature Shear Performance of High-Strength Aluminum Alloy Plate Bolted Connections

SHI Yu[1,2], *WU Yue*[1,2*], *LUO Zeqiao*[1,2], *XUE Xuanyi*[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, Chongqing University, Chongqing 400045, China)
*Corresponding author: wuyue0091@163.com

Abstract: High-temperature material tests were conducted on 7075 high-strength aluminum alloy to investigate the stress-strain curves and the variation of key mechanical parameters with temperature. High-temperature shear bearing tests were then carried out on 7075 high-strength aluminum alloy plate bolted connections at high temperatures, to examine the influence of temperature and edge distance on the failure modes and ultimate bearing capacity of specimens. The test results show that when the temperature is above 200 ℃, the elastic modulus and strength of the material begin to decrease significantly. When the temperature reaches 300 ℃, the yield strength and ultimate strength of the material are both about 15% of those at room temperature. The shear connection specimens exhibit two failure modes, namely net cross-section failure and mixed failure, and both temperature and edge distance can affect the failure mode of the

收稿日期:2024-12-23
基金项目:国家自然科学基金(52378132)
作者简介:
石 宇(1978—),女,博士,教授,主要从事轻钢结构方面的研究。E-mail:shiyu7811@163.com。
通信作者:
吴 玥(2000—),女,硕士研究生,主要从事铝合金结构方面的研究。E-mail:wuyue0091@163.com。

specimen. The degradation of the ultimate bearing capacity of specimens shows a trend similar to the reduction in material strength at high temperatures. When the temperature reaches 300 ℃, the ultimate bearing capacity of specimens decreases to about 15% of that at room temperature. The ultimate bearing capacity of the specimen increases with the increase of edge distance. When the edge distance increases from $1.0d_0$ to $1.5d_0$, the ultimate bearing capacity approximately doubles. When the edge distance increases from $1.5d_0$ to $2.0d_0$, the increase in ultimate bearing capacity is limited. The established finite element model can accurately simulate the shear performance of bolted connections and shows a certain degree of reliability. The experimental results were compared with the calculation results of domestic and foreign codes, and the results showed that the calculation results based on various national codes were relatively conservative when the edge distance was not less than $1.5d_0$.

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

铝合金因强度高、质量轻、耐腐蚀性好等优势，广泛应用于大跨度及网壳等建筑结构。铝合金结构常用连接形式包括焊缝连接与螺栓连接，焊缝连接工艺缺陷较多，焊接会显著降低母材热影响区力学性能，后期维护难度较大[1]，因此螺栓连接成为铝合金结构的主要连接形式。此外，火灾高温对结构材料性能影响显著，与钢材相比，铝合金耐火性能较差，温度接近500 ℃时强度基本丧失[2-4]，易导致结构失效，存在较大安全隐患。因此，开展高强铝合金板件螺栓连接高温抗剪性能研究具有重要工程价值。

目前，针对常温和高温环境下普通强度铝合金板件螺栓连接，国内外学者已开展大量试验研究与理论分析。程明等[1]基于各国铝合金结构规范研究了不同机械连接的设计方法，并着重探讨了铝合金结构和钢结构连接方面的差异。石永久等[5]通过有限元模拟探究了铝合金螺栓连接的承载力和破坏模式，并研究了长连接情况下各螺栓之间的剪力分布关系。KIM等[6]对铝合金单剪螺栓连接进行抗剪试验，研究了材料种类、几何尺寸和螺栓排列方式对试件极限承载力和破坏模式的影响，同时对螺栓连接的翘曲现象进行了讨论。CHO等[7]通过试验和有限元分析方法研究了板件翘曲时极限承载力的降低程度和翘曲发生的条件，并将分析结果与美国规范进行比较，提出了考虑有效剪应力和翘曲效应的承载力修正方程。郭小农等[8]以铝合金板件不锈钢螺栓连接为研究对象，开展了高温加载试验，研究了芯板尺寸、盖板尺寸和螺栓尺寸对连接抗剪性能的影响规律。LIU等[9]通过高温拉伸试验和有限元分析方法研究了铝合金板件螺栓连接从常温到400 ℃温度下的抗剪性能，提出了适用于铝合金板件螺栓连接极限承载力评估的高温折减系数。

建筑领域常用5系、6系普通强度铝合金，其强度与Q235钢材相当。近年来随着加工工艺的进步与高强建材需求的提升，强度接近Q460高强钢的7系(Al-Zn-Mg-Cu)高强铝合金逐渐被应用于工程结构中，成为工程轻量化的重要发展方向。目前，国内外学者主要采用试验、有限元数值模拟和理论分析等方法开展了7系铝合金板件螺栓连接的相关研究。KIM等[10]对7075铝合金单剪螺栓连接进行了单调加载试验，讨论了连接试件的破坏模式和极限承载力，并通过数值模拟对连接的翘曲变形展开了深入分析。WANG等[11]利用数值模拟研究了7A04铝合金螺栓连接的极限承载力，提出了考虑材料类型的承载力设计方法及螺栓孔径的取值建议。王美丽等[12]针对钢桥自重大、安装难度高等问题，提出了高强铝合金板件螺栓连接方案，并通过有限元模拟探究了不同几何参数对铝合金螺栓连接抗剪性能的影响规律。

综上，现有关于高强铝合金板件螺栓连接抗剪性能的研究大多集中于常温条件下，而高温条件下的研究尚不充分。因此，本文通过对高强铝合金进行材性试验，研究了铝合金材料的应力-应变曲线和关键力学参数随温度的变化规律，并对7075高强铝合金板件螺栓连接试件进行高温下单调拉伸试验，探究了温度和边距对试件破坏模式和极限承载力的影响规律。建立了有限元模型并与试验结果进行了对比，验证模型的准确性，并将试验结果与采用国内外规范计算的结果进行了对比。

1 材性试验

1.1 试件设计

本试验以7075高强铝合金轧制板材为研究对象，板材厚度为2 mm，化学成分见表1。参考ASTM E21-20[13]的要求设计材性试件，试件具体尺寸如图1所示，所有试件均沿板材轧制方向取样。根据试验温度不同，共设计4组试件，高温试验每组设置2个平行试件，常温试验设置3个平行试件。

表1 7075铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy %

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
0.18	0.31	1.60	0.19	2.80	0.21	—	5.60	0.04	89.07

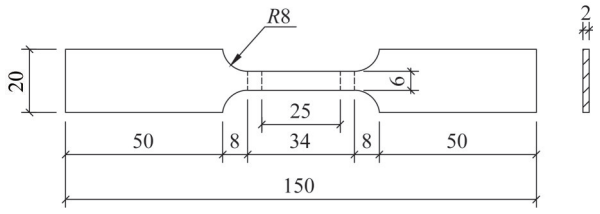


图1　材性试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1　Geometric dimension of material property specimen (unit:mm)

1.2　试验方案

试验装置如图2所示,单调拉伸试验采用MTS 810液压伺服万能试验机,通过电炉加热并采用MTS 651环境箱来维持试验温度。试件温度和箱内空气温度分别通过外部热电偶和内置热电偶实时监测。试验中采用标距为25 mm的引伸计测量试件应变,利用力传感器和数据采集系统记录试验荷载和位移。

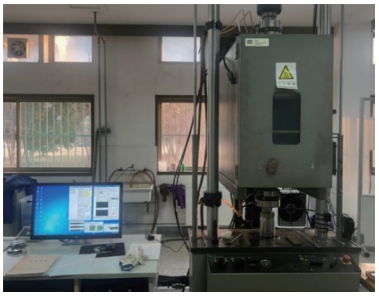


图2　试验装置

Fig. 2　Test device

由于铝合金在高温300 ℃以上时强度衰减显著,所以设置20 ℃(常温)、100 ℃、200 ℃、300 ℃共4个温度水平。试验初始阶段,先夹紧试件上端夹具,下端夹具处于松开状态,通过调整电炉的升温速率,使炉内温度逐步升至试验温度。为了使试件内部温度均匀,在达到试验温度后,保温20~30 min。保温完成后,再将试件下端夹具夹紧并采用位移控制进行加载。先采用0.2 mm·min^{-1}的加载速率,当达到极限强度后,将加载速率调整为0.5 mm·min^{-1},直至试件破坏后停止加载。

1.3　试验结果与分析

1.3.1　破坏形态

图3给出了高温下单调拉伸试验后7075铝合金试件的破坏形态。可以看出,20 ℃时试件断裂区域几乎没有出现颈缩现象,试件断口呈斜面,试件破坏时听到清脆的断裂声,接近脆性破坏。而在100~300 ℃时,断口处出现明显的颈缩现象,试件表现为塑性破坏。当温度达到200 ℃时,随着温度的升高,试件断裂时的声音逐渐减弱,试件塑性变形逐渐增大,断口颈缩现象更为明显,断口更加平直。

1.3.2　应力-应变曲线

由于各温度下平行试件的应力-应变曲线较为相似,因此图4仅展示了各温度下其中一个试件的应力-应变曲线。所有温度下7075铝合金的应力-应变曲线均没有明显的屈服平台,且应力-应变曲线随温度的升高发生显著变化。当温度为100 ℃时,其应力-应变曲线与常温时相似,曲线中存在一个硬化阶段,材料强度受温度影响较小;当温度达到200 ℃及以上时,硬化阶段几乎消失,材料强度开始显著下降。此外,材料塑性随温度升高而逐渐提升,尤其在300 ℃时,材料软化特征明显,塑性大幅度提升。

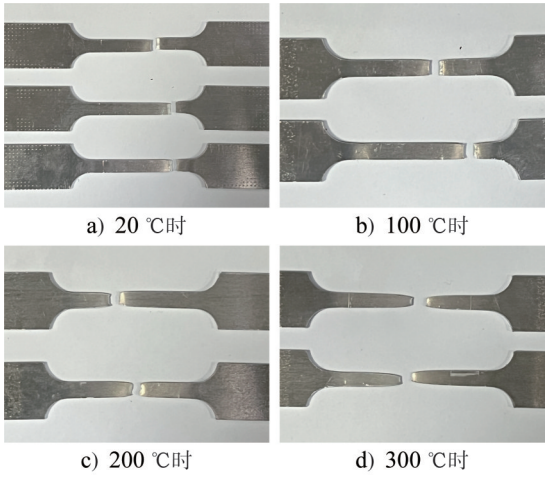


图3　试件的破坏形态

Fig. 3　Failure modes of specimens

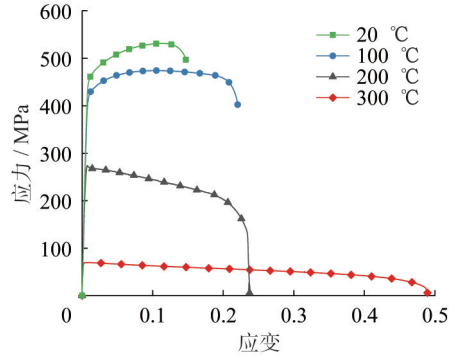


图4　高温下试件的应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves of specimens in high temperatures

1.3.3　关键力学参数

7075铝合金高温下关键力学参数及折减系数分别见表2和表3,表中结果取平行试件的平均值。折减系数定义为高温下与常温下某力学参数值的比值,例如高温下

弹性模量折减系数为E_T/E_{20}，其中E_{20}为常温时7075铝合金的弹性模量，E_T为高温T下铝合金的弹性模量。图5给出了7075铝合金高温下关键力学参数折减系数变化曲线。图6对比了文中7系铝合金与文献[14]中6系铝合金的屈服强度和极限强度。由表2、表3、图5和图6可以看出：

（1）高温下弹性模量折减系数E_T/E_{20}在100 ℃、200 ℃、300 ℃时分别为0.93、0.83、0.71，说明在20～300 ℃范围内温度对7075铝合金弹性模量的影响较大，弹性模量随着温度升高而逐渐降低。

（2）高温下屈服强度折减系数$f_{y,T}/f_{y,20}$和极限强度折减系数$f_{u,T}/f_{u,20}$均随着温度升高而显著降低，当温度为300 ℃时，屈服强度和极限强度分别仅为常温时屈服强度和极限强度的16%和13%，说明在20～300 ℃范围内温度会显著影响材料的强度性能。

（3）高温下断裂应变与常温下断裂应变的比值$\varepsilon_{f,T}/\varepsilon_{f,20}$均大于1.00，且在温度为300 ℃时达到峰值3.74，说明高温会显著提高7075铝合金的变形能力。

（4）在温度为20 ℃、100 ℃、200 ℃和300 ℃时，7系铝合金相较于6系铝合金屈服强度分别提高了55%、48%、46%和19%，极限强度分别提高了74%、62%、47%和18%，总体上强度提升幅度随温度的升高逐渐降低。

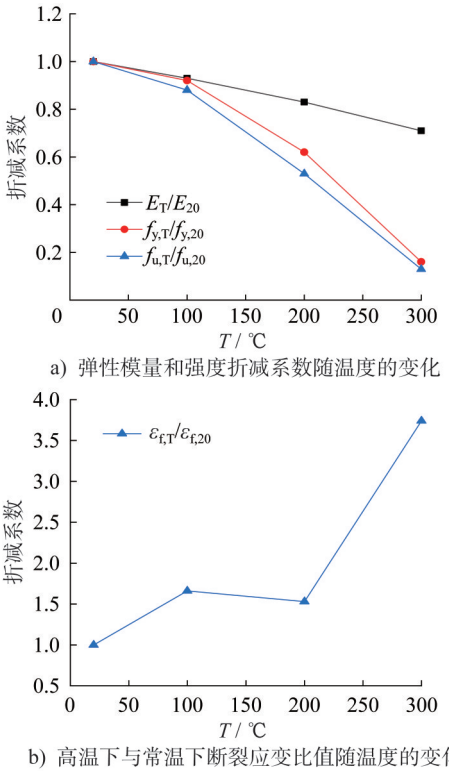


图5 不同高温下与常温下关键力学参数比值变化

Fig. 5 Variation of key mechanical parameter ratios at different high temperature to room temperature

表2 不同温度下关键力学参数

Table 2 Key mechanical parameters under different temperatures

T/℃	E_T/MPa	$f_{y,T}$/MPa	$f_{u,T}$/MPa	$\varepsilon_{f,T}$/%
20	68 476.66	445.07	532.58	14.31
100	63 495.56	411.20	470.96	23.77
200	56 764.41	277.98	281.32	21.94
300	48 787.72	69.24	70.11	53.51

表3 高温下与常温下关键力学参数比值

Table 3 Ratio of key mechanical parameters at high temperature to room temperature

T/℃	E_T/E_{20}	$f_{y,T}/f_{y,20}$	$f_{u,T}/f_{u,20}$	$\varepsilon_{f,T}/\varepsilon_{f,20}$
20	1.00	1.00	1.00	1.00
100	0.93	0.92	0.88	1.66
200	0.83	0.62	0.53	1.53
300	0.71	0.16	0.13	3.74

2 抗剪承载试验

2.1 试件设计

本试验共设计18个抗剪连接试件，试件由厚度t为2 mm的高强铝合金板和钛合金螺栓组合而成，试件尺寸如图7所示，其中端距e_1和边距e_2分别为螺栓中心到板件端部和边缘的距离。为了避免螺栓抗剪强度不足而发生剪切破坏，采用直径d为12 mm的TC4高强钛合金螺栓，螺栓孔径d_0为12.5 mm。试验考虑了4种温度和3种边距共12种组合工况，试件编号和参数取值如表4所示。试验温度为200 ℃和300 ℃的连接试件每组设置一个平行试件，其余均为一个试件。

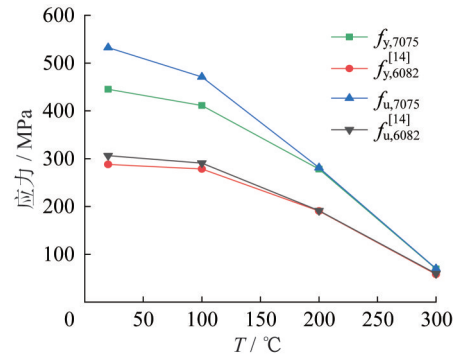


图6 6系与7系铝合金强度对比

Fig. 6 Strength comparison between series 6 and series 7 aluminum alloys

在试件组装过程中，螺栓均被拧紧但未施加预紧力。为了使力作用于螺栓中部剪切面从而避免加载偏心的影

响，在试件两端夹持部分固定一块与试验板件材料相同的垫板。

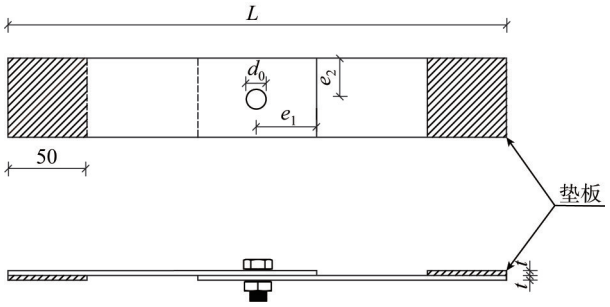


图7　试件尺寸（单位：mm）

Fig. 7　Dimensions of specimen（unit：mm）

表4　试件编号及参数

Table 4　Specimen numbers and parameters

试件编号	T/℃	e_2/d_0	e_1/d_0
SS-20-1.0	20	1.0	2.0
SS-100-1.0	100	1.0	2.0
SS-200-1.0	200	1.0	2.0
SS-300-1.0	300	1.0	2.0
SS-20-1.5	20	1.5	2.0
SS-100-1.5	100	1.5	2.0
SS-200-1.5	200	1.5	2.0
SS-300-1.5	300	1.5	2.0
SS-20-2.0	20	2.0	2.0
SS-100-2.0	100	2.0	2.0
SS-200-2.0	200	2.0	2.0
SS-300-2.0	300	2.0	2.0

2.2　试验方案

单调拉伸试验的试验设备与材性试验相同，如图2所示。试验中采用力传感器和数据采集系统记录试验荷载和位移。试验步骤与材性试验保持一致，包括升温、保温和加载三个步骤。正式加载时，采用位移控制加载。先采用0.2 mm·min^{-1}的加载速率，当达到峰值荷载后，将加载速率调整为0.5 mm·min^{-1}，直至试件被拉断后停止加载。

2.3　试验结果与分析

2.3.1　破坏模式

各试件的破坏模式如图8所示。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8a)～d)、f)～h)所示，试件的破坏模式为净截面破坏，温度为300 ℃的试件由于材料高温软化，在孔前发生了较大的塑性变形，截面颈缩现象更加明显。如图8e)、i)～l)所示，试件的破坏模式为混合破坏，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，而横向撕裂是由板件面外翘曲引起的。ROGERS等[15]和GUO等[16]的研究中也对板件面外翘曲导致的裂缝进行了讨论。

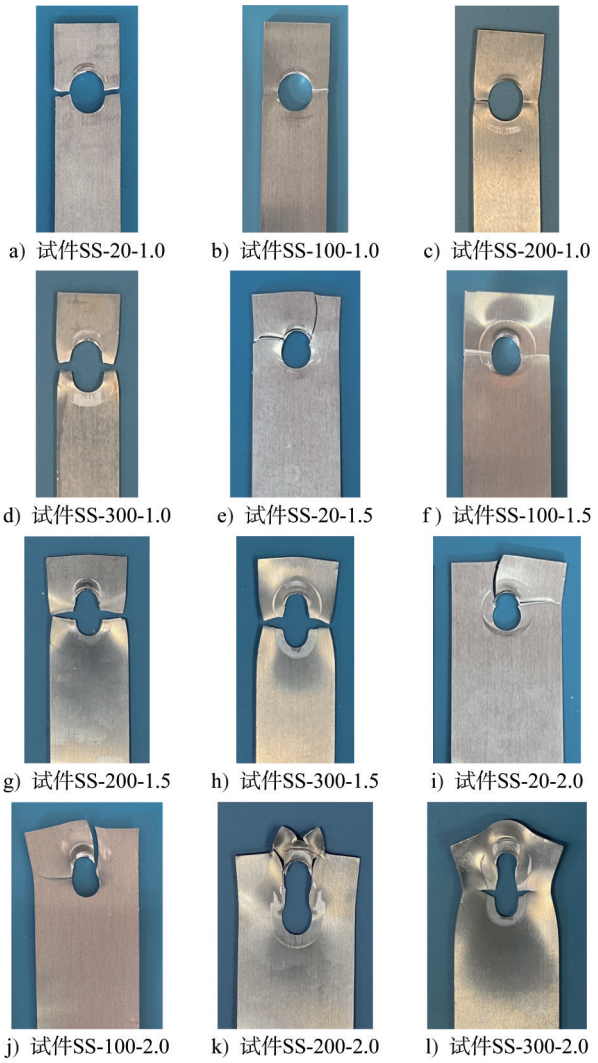


图8　试件破坏模式

Fig. 8　Failure modes of specimens

当边距为1.0d_0和2.0d_0时，在20～300 ℃范围内温度变化不会影响试件的破坏模式，但当边距为1.5d_0时，随着温度升高破坏模式会由混合破坏变为净截面破坏，说明在20～300 ℃范围内温度可能会使试件的破坏模式发生改变。而在相同温度下，随着边距增大，试件的破坏模式由净截面破坏转变为混合破坏，说明边距变化会影响试件的破坏模式。

2.3.2　荷载-位移曲线

所有试件的荷载-位移曲线如图9所示，其中200 ℃和300 ℃两个平行试件的曲线较为接近，因此图中仅展

示其中一条曲线。初始加载时，试件呈现线弹性力学特征。随着位移增大，螺杆与孔壁因接触而产生应力集中并促使铝合金板迅速进入塑性阶段，荷载-位移曲线逐渐趋于平缓。当达到峰值荷载后，温度为20 ℃和100 ℃的试件荷载-位移曲线骤降，而温度为200 ℃和300 ℃的试件荷载-位移曲线在达到峰值点后缓慢下降。

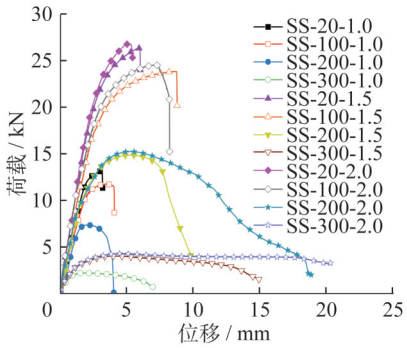


图9 各试件荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of specimens

由图9可知，在相同边距下，各试件曲线弹性段斜率随温度升高而降低，表明高温使试件的初始承载刚度降低，其原因是温度升高会降低铝合金的弹性模量；极限承载力也随温度升高而显著降低，其原因是高温会大幅度削弱铝合金的强度性能，从而显著劣化试件的极限承载力。在相同温度下，当边距 e_2 由 $1.0d_0$ 增至 $1.5d_0$ 时，试件的初始承载刚度和极限承载力因净截面处承载面积增大而显著增大。而当边距 e_2 继续增至 $2.0d_0$ 时，这两项性能参数的增幅有限，说明当边距超过 $1.5d_0$ 后边距变化对试件初始承载刚度和极限承载力基本无影响。

2.3.3 极限承载力

各试件的极限承载力 P 如表5所示，其中温度为200 ℃和300 ℃试件的极限承载力取两个平行试件的平均值。试件极限承载力随温度和边距变化的变化趋势如图10所示。

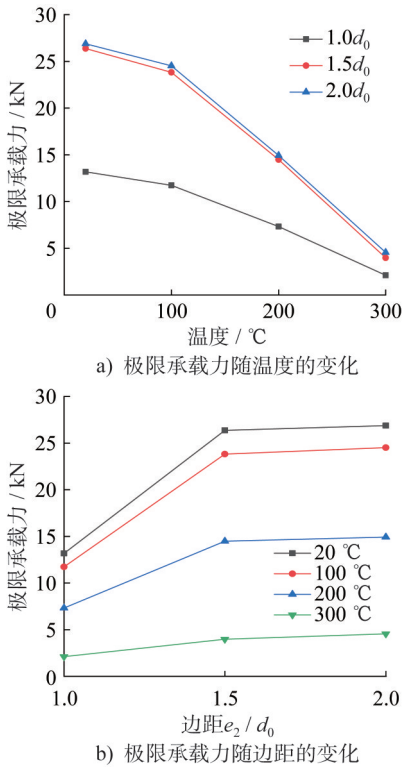
如图10a)所示，当温度为100 ℃时，各试件极限承载力较常温时极限承载力平均降幅约为9.77%，最大降幅为10.9%；当温度超过200 ℃时，试件极限承载力的劣化趋势加剧；当温度达到300 ℃时，各试件极限承载力仅为常温时极限承载力的15.1%～16.9%，说明300 ℃高温对试件极限承载力的劣化影响十分显著。由此可以看出，在20～300 ℃范围内温度对试件极限承载力的影响显著，且试件极限承载力劣化与高温下材料强度削弱呈现相似的变化趋势。

如图10b)所示，当温度为20 ℃、100 ℃、200 ℃、300 ℃时，边距为 $1.5d_0$ 试件的极限承载力相较于边距为 $1.0d_0$ 试件的极限承载力分别增大了100.2%、103.1%、98.0%和88.2%，且随温度升高试件极限承载力的增大程度呈现略微降低的趋势。然而，当边距由 $1.5d_0$ 增大到 $2.0d_0$ 时，20 ℃～300 ℃下试件极限承载力分别仅增大了2.0%、3.0%、3.0%和14.6%，增幅有限。由此可知，试件极限承载力在边距小于 $1.5d_0$ 时随边距增大而显著增大，在边距超过 $1.5d_0$ 后边距变化基本不影响试件的极限承载力。

表5 试件极限承载力

Table 5 Ultimate bearing capacity of specimens

试件编号	极限承载力 P/kN	试件编号	极限承载力 P/kN
SS-20-1.0	13.17	SS-200-1.5	14.49
SS-100-1.0	11.73	SS-300-1.5	3.97
SS-200-1.0	7.32	SS-20-2.0	26.88
SS-300-1.0	2.11	SS-100-2.0	24.52
SS-20-1.5	26.36	SS-200-2.0	14.92
SS-100-1.5	23.82	SS-300-2.0	4.55



a) 极限承载力随温度的变化

b) 极限承载力随边距的变化

图10 极限承载力随温度和边距的变化

Fig. 10 Variation of ultimate bearing capacity with temperatures and edge distances

3 有限元模型建立与验证

采用ABAQUS软件建立螺栓连接有限元模型并进行数值模拟，与试验结果对比验证模型的准确性。铝

合金板件和螺栓均采用实体单元C3D8R模拟。螺栓采用线弹性材料属性，铝合金板应力-应变关系采用双折线模型，具体数据通过试验所得的工程应力-应变关系转化为真实应力-应变关系确定。螺栓连接各部件的网格尺寸为2 mm，由于螺杆与螺栓孔壁接触会产生应力集中现象，对螺栓孔周网格进行局部加密。接触方式设置为面与面接触，法向接触采用硬接触，切向接触采用“罚”函数来定义面与面间的滑动特性。有限元模型与试验的边界条件保持一致，对螺栓连接施加轴向位移荷载。螺栓连接试件的有限元模型及网格划分如图11所示。

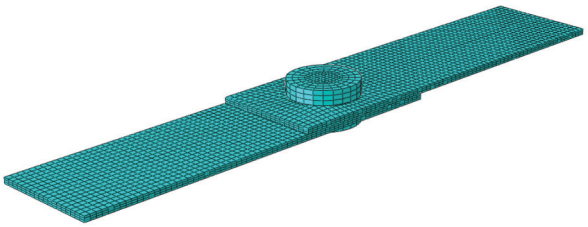
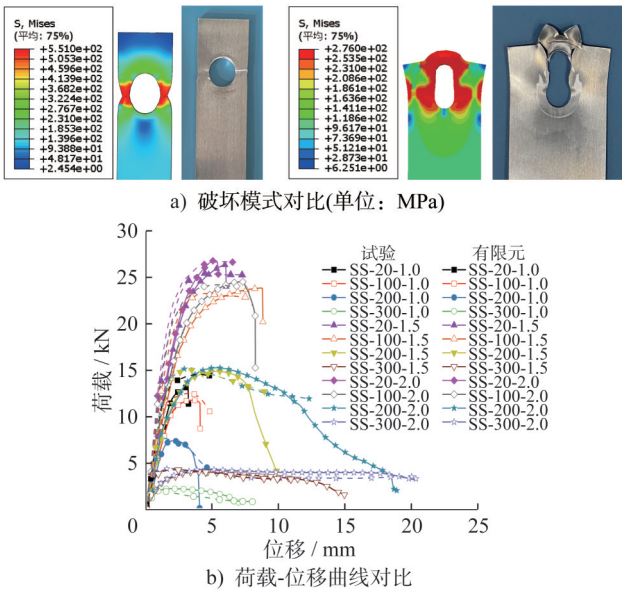


图11　螺栓连接试件的有限元模型及网格划分

Fig. 11　Finite element model and mesh generation of bolted connection specimen

数值模拟结果与试验结果对比如图12所示。有限元模型能较准确地模拟试件的破坏模式，二者荷载-位移曲线的走势大致相同。由于有限元模拟的是较理想的试验情况，故有限元模拟的初始刚度与试验结果有所差异。螺栓连接极限承载力试验值和有限元模拟值的对比如表6所示。由此看出，二者的误差基本在5%以内，平均误差为3.76%，说明模型可靠性良好。



a) 破坏模式对比(单位：MPa)

b) 荷载-位移曲线对比

图12　各试件数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 12　Comparison between numerical simulation results and test results of specimens

表6　各试件极限承载力对比

Table 6　Comparison of ultimate bearing capacity of specimens

试件编号	P/kN	P_F/kN	误差/%
SS-20-1.0	13.17	14.51	10.17
SS-100-1.0	11.73	12.49	6.48
SS-200-1.0	7.32	7.62	4.10
SS-300-1.0	2.11	2.11	0.00
SS-20-1.5	26.36	25.41	−3.60
SS-100-1.5	23.82	23.23	−2.48
SS-200-1.5	14.49	14.98	3.38
SS-300-1.5	3.97	4.24	6.80
SS-20-2.0	26.88	26.66	−0.82
SS-100-2.0	24.52	24.18	−1.39
SS-200-2.0	14.92	15.20	1.88
SS-300-2.0	4.55	4.37	−3.96
误差平均值			3.76

注：P为试验极限承载力；P_F为有限元模拟的极限承载力。误差$=(P_F-P)/P\times100\%$。

4　国内外规范中的设计方法

目前铝合金螺栓连接极限承载力的设计方法主要参考中国规范《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)[17]、欧洲规范Eurocode 9[18]和美国规范AA ADM-2020[19]。由于试验试件未发生剪切破坏，因此在后续极限承载力设计公式对比中仅考虑板件承压破坏和净截面破坏。

4.1　中国规范

GB 50429—2007[17]中螺栓连接极限承载力的计算方法如下：

承压承载力：

$$N_c^b = d\sum t f_c^b \tag{1}$$

净截面承载力：

$$N = fA_{en} \tag{2}$$

式中：d为螺栓直径；$\sum t$为一个受力方向承压构件总厚度的较小值；A_{en}为净截面面积；f_c^b为板件承压强度设计值；f为连接板抗拉强度设计值。

4.2　欧洲规范

Eurocode 9[18]中螺栓连接极限承载力的计算方法如下：

承压承载力：

$$F_{b,Rd} = \alpha_b f_u dt \leqslant 1.5 f_u dt \tag{3}$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{d_0}, \frac{3f_{ub}}{f_u}, 3\right) \tag{4}$$

净截面承载力：

$$N_{u,Rd} = 0.9A_{net}f_u \tag{5}$$

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

4.3 美国规范

AA ADM-2020[19]中螺栓连接极限承载力的计算方法如下：

承压承载力：

$$R_n = d_e t F_{tu} \leqslant 2DtF_{tu} \tag{6}$$

净截面承载力：

$$P_n = F_{tu}A_e \tag{7}$$

式中：d_e为端距；t为连接板厚度；D为螺栓直径；A_e为净截面面积；F_{tu}为连接板抗拉强度。

为便于同试验结果对比，将各国规范计算公式中的常温材性替换为高温材性进行计算分析。各国规范计算结果与试验结果对比见表7。

表7 各国规范计算结果与试验结果对比

Table 7 Comparison between the calculation results of various national codes and the test results

试件编号	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
SS-20-1.0	N	13.31	N	1.01	11.98	N	0.91	13.31	N	1.01
SS-100-1.0	N	11.77	N	1.00	10.60	N	0.90	11.77	N	1.00
SS-200-1.0	N	7.03	N	0.96	6.33	N	0.86	7.03	N	0.96
SS-300-1.0	N	1.75	N	0.83	1.58	N	0.75	1.75	N	0.83
SS-20-1.5	M	19.28	B	0.73	19.17	B	0.73	25.56	B	0.97
SS-100-1.5	N	17.04	B	0.72	16.95	B	0.71	22.61	B	0.95
SS-200-1.5	N	10.18	B	0.70	10.13	B	0.70	13.50	B	0.93
SS-300-1.5	N	2.54	B	0.64	2.52	B	0.64	3.37	B	0.85
SS-20-2.0	M	19.28	B	0.72	19.17	B	0.71	25.56	B	0.95
SS-100-2.0	M	17.04	B	0.70	16.95	B	0.69	22.61	B	0.92
SS-200-2.0	M	10.18	B	0.68	10.13	B	0.68	13.50	B	0.91
SS-300-2.0	M	2.54	B	0.56	2.52	B	0.55	3.37	B	0.74

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

由表7可知，当温度为20～200 ℃时，边距为$1.0d_0$试件的中美规范极限承载力计算值与试验结果基本一致，而300 ℃时极限承载力计算值均偏低；不同温度下欧洲规范的预测精度均低于中国规范和美国规范的预测精度。对于边距不小于$1.5d_0$的试件，不同温度下各国规范计算值均较为保守，但美国规范的预测精度比中国规范和欧洲规范的预测精度高。各国规范极限承载力计算值与试验值的平均比值分别为0.68、0.68、0.90。

由于混合破坏是由承压强度起主导作用，且各国规范中的承压承载力计算方法中并未具体区分纯承压破坏模式和其他特殊承压破坏模式，因此为了便于与各国规范预测的破坏模式进行对比分析，将混合破坏归为承压破坏模式。由表7可知，对于边距为$1.0d_0$和$2.0d_0$的试件，各国规范均能较好地预测螺栓连接的破坏模式；对于边距为$1.5d_0$的试件，各国规范能预测常温下螺栓连接的破坏模式，对高温下螺栓连接的破坏模式预测不够准确。

5 结论

本文通过高温下材性试验和抗剪承载试验，开展了高强铝合金板件螺栓连接抗剪性能研究，得出结论如下：

（1）高温对7075铝合金的破坏形态有显著影响。在20 ℃时，材性试件断裂区域基本没有颈缩现象，表现为脆性破坏，而在100～300 ℃时，材性试件断口处有明显颈缩现象，表现为塑性破坏，且随着温度升高，试件断口颈缩现象更为明显，断裂面更加平直。

（2）铝合金的弹性模量和强度随着温度升高而逐渐降低，高温会明显削弱其材料强度，当温度为300 ℃时，屈服强度和极限强度均约为常温时屈服强度和极限强度的15%。而高温会使断裂应变增大，增强了铝合金的变形能力。

（3）温度与边距共同影响抗剪连接试件的破坏模式。当边距为$1.5d_0$时，随着温度的升高破坏模式由混合破坏变为净截面破坏。而当温度在20～300 ℃范围内，相同温度下边距由$1.0d_0$增大至$2.0d_0$时，试件的破坏模式

会由净截面破坏变为混合破坏。

（4）高温对试件极限承载力的影响显著，当温度达到300 ℃时试件的极限承载力约为常温时极限承载力的15%，且试件极限承载力劣化与高温中材料强度削弱呈现相似的变化趋势。在相同温度下，当边距由$1.0d_0$增大到$1.5d_0$时，极限承载力增大约1倍；当边距由$1.5d_0$增大到$2.0d_0$时，极限承载力的增大程度有限。

（5）对比有限元结果与试验结果发现，二者破坏模式相似，荷载-位移曲线走势大致相同，极限承载力的平均误差为3.76%，说明模型具有较高的可靠性。

（6）对于边距为$1.0d_0$的试件，在20～200 ℃时，中国规范和美国规范能较为准确地预测其极限承载力，而300 ℃时的预测结果偏保守；欧洲规范的预测精度低于中国规范和美国规范的预测精度。对于边距大于等于$1.5d_0$的试件，各国规范的极限承载力计算值均低于试验值。

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，2006，22(3)：85-88，69. DOI：10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2006.03.022.
CHENG Ming，SHI Yongjiu，WANG Yuanqing. Connection of aluminum members and design method [J]. Building Science，2006，22(3)：85-88，69. DOI：10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2006.03.022.(in Chinese)

[2] YIN L，NI Z P，LIU J Y，et al. High-temperature mechanical properties of constructional 6082-T6 aluminum alloy extrusion[J]. Structures，2023，48：1244-1258. DOI：10.1016/j.istruc.2023.01.043.

[3] 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. DOI：10.1016/j.tws.2019.01.012.

[4] 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. DOI：10.1016/j.engstruct.2022.114746.

[5] 石永久，张贵祥，王元清. 铝合金结构螺栓连接的抗剪计算方法[J]. 建筑钢结构进展，2008，10(1)：1-7.
SHI Yongjiu，ZHANG Guixiang，WANG Yuanqing. Shear resistance of bolted connection in aluminum structures [J]. Progress in Steel Building Structures，2008，10(1)：1-7.（in Chinese）

[6] KIM T S，JO Y H，KIM S H，et al. Ultimate behavior of single shear bolted connections with thin-walled aluminum alloys (6061-T6)[J]. Advanced Materials Research，2012，446/447/448/449：3441-3445. DOI：10.4028/www.scientific.net/amr.446-449.3441.

[7] 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. DOI：10.1016/j.tws.2015.11.017.

[8] 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. DOI：10.3785/j.issn.1008-973X.2017.09.003.
GUO Xiaonong，YU Mengtong，LIANG Shuiping，et al. Bearing performance of stainless steel bolted shear connection for aluminum alloy members at elevated temperature [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2017，51(9)：1695-1703. DOI：10.3785/j.issn.1008-973X.2017.09.003.(in Chinese)

[9] LIU H B，LIU X N，CHEN Z H，et al. Mechanical properties of bolted connections for aluminum alloy structures at elevated temperatures[J]. Thin-Walled Structures，2020，157：107067. DOI：10.1016/j.tws.2020.107067.

[10] 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. DOI：10.1016/j.matdes.2014.01.045.

[11] 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. DOI：10.1016/j.conbuildmat.2018.07.062.

[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.
WANG Meili，WANG Bing，ZHANG Song，et al. Study on bolt connection strength of “321” steel bridge main truss improved by 7A04-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Military Transportation，2023，2(2)：89-94.(in Chinese)

[13] ASTM E21-20 Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials[S].

[14] TORIĆ N，BRNIĆ J，BOKO I，et al. Experimental analysis of the behaviour of aluminium alloy EN 6082AW T6 at high temperature[J]. Metals，2017，7(4)：126. DOI：10.3390/met7040126.

[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. DOI：10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126：3(288).

[16] GUO X，KYVELOU P，YE J，et al. Experimental investigation of wire arc additively manufactured steel single-lap shear bolted connections [J]. Thin-Walled Structures，2022，181：110029. DOI：10.1016/j.tws.2022.110029.

[17] GB 50429—2007 铝合金结构设计规范[S].
GB 50429—2007 Code for design of aluminium structures[S].(in Chinese)

[18] EN 1999-1-1 Eurocode 9：Design of aluminium structures—Part 1-1：General structural rules[S].

[19] AA ADM-2020 Aluminum design manual 2020[S].