

循环利用损伤对螺栓球节点受拉承载性能的影响

刘红波^{1,2}, 吴越¹, 陈蕙芸^{3*}

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;
3. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215129)

摘要: 为促进建筑节能减排和全过程减碳, 建筑拆除及回用关键技术成为了当前研究的重点。螺栓球节点作为建筑结构中的一种关键节点, 其循环利用过程对受拉承载能力的影响却鲜少被研究。因此, 对螺栓球节点开展了考虑循环利用损伤的轴拉力学性能试验研究。研究表明: 当持荷水平不大于高强螺栓承载力设计值的90%、拆装次数不大于10次且锤击损伤程度不大于80%时, 反复拆装损伤对节点抗拉承载力的影响可忽略不计, 锤击损伤对反复拆装节点的受拉极限承载力的影响可采用0.95的安全系数来考虑; 无论是否发生锤击或打磨损伤, 节点抗拉承载力随拧入缺陷损伤的增加几乎呈线性下降; 在拧入缺陷损伤的基础上, 锤击或打磨损伤对节点承载力的影响在20%范围内; 其余条件相同时, 双侧锤击或打磨损伤比单侧损伤对节点抗拉承载力的影响小, 打磨损伤比锤击损伤对节点抗拉承载力的影响小。工程中对该类节点进行拆除及回收利用时, 须严格控制拧入缺陷造成的螺纹损伤并注意单侧锤击损伤。

关键词: 螺栓球节点; 循环利用; 损伤; 抗拉性能; 试验研究

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)01-0083-10

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230810001

Influence of Recycling Damage on Tensile Bearing Capacity of Bolted Ball Joints

LIU Hongbo^{1,2}, WU Yue¹, CHEN Huiyun^{3*}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215129, China)

*Corresponding author: hychen@usts.edu.cn

Abstract: To promote building energy saving and carbon reduction in the whole process, the key technologies of building demolition and reuse have become the focus of current research. As a kind of key joint in building structure, the influence of recycling on the tensile performance of bolted ball joint has rarely been studied. Therefore, an experimental study on the mechanical properties of bolted ball joints under axial tension considering recycling damage was carried out. It is shown that when the load holding level is not more than 90% of the design value of the bearing capacity of the high-strength bolt, the number of disassembly is not more than 10 times and the degree of hammering damage is not more than 80%, the influence of repeated disassembly damage on the tensile bearing capacity of the

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 河北省杰出青年基金(E2021402006)

作者简介:

刘红波(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事新型钢结构与大型公共建筑防灾减灾理论方面的研究。E-mail: hbliu@tju.edu.cn。

吴越(1992—), 女, 硕士, 主要从事新型钢结构与大型公共建筑防灾减灾理论方面的研究。

通信作者:

陈蕙芸(1995—), 女, 博士, 讲师, 主要从事既有钢结构腐蚀后的性能评估方面的研究。E-mail: hychen@usts.edu.cn。

joints can be ignored, and the influence of hammering damage on the tensile ultimate bearing capacity of the repeatedly disassembled joints can be taken as 0.95 safety factor. Whether the thread damage caused by hammering and grinding occurs or not, the tensile bearing capacity of the joints decreases almost linearly with the increase of screw defect damage. On the basis of screw defect damage, the influence of hammering or grinding damage on the bearing capacity of the joints is in the range of 20%. Other conditions being the same, bilateral hammering or grinding damage has less influence on the tensile bearing capacity of joints than unilateral damage, and grinding damage has less influence on the tensile bearing capacity of joints than hammering damage. It is necessary to strictly control the thread damage caused by screw defect damage and pay attention to the unilateral hammering damage when recycling bolted ball joints in the project.

Keywords: bolted ball joint; recycling; damage; tensile performance; test investigation

因承载力受损、服役期满、使用功能改变等原因,一些既有建筑空间网格结构需被拆除^[1-2]。随着“双碳”目标的提出^[3],结构拆除后的构件循环利用问题逐渐凸显。而螺栓球节点作为空间网格结构的关键组成部分,研究循环利用损伤对节点受拉承载性能的影响十分重要。

以往对螺栓球节点力学性能的研究多聚焦于不同荷载工况、环境条件和单一安装缺陷的影响。对于不同荷载工况,赵胤琦^[4]、闫崑等^[5]、李峰等^[6]、曾强等^[7]、喻晓晨等^[8]研究并推导了螺栓球节点的静力学性能与计算模型;曹正罡等^[9-10]分析了地震作用下单层球面网壳中螺栓球节点的位移响应和应力响应并揭示了网壳强震失效机理;应皎洁^[11]、张洁^[12]研究了螺栓球节点的低周疲劳性能和超低周疲劳性能;李绍鹏^[13]研究了螺栓球节点的抗冲击性能。对于不同环境条件,谭志伦等^[14]、高宇^[15]、闫立兴等^[16]研究了螺栓球节点腐蚀后的抗拉性能;刘红波等^[17]、冯绍攀等^[18]和陈安阳等^[19]则分别研究了螺栓球节点在高温下和高温后的力学性能退化规律以及螺栓球柱节点在高温下的受压承载力。而对于单一安装缺陷,大多数学者对节点单次安装过程中拧入深度不足的影响开展了研究。黄炳生等^[20]研究发现,当螺栓的拧入深度为0.8或0.9倍螺栓直径时,螺栓会由断裂破坏转变为拔出破坏;吴琼尧等^[21]提出了螺栓球节点抗拉承载能力下降率随拧入深度变化的关系曲线;付宜东等^[22]发现螺栓破坏模式的变化临界点是0.94倍螺栓直径,并通过有限元分析和拟合得到了螺栓球节点受拉承载力与螺栓拧入深度的关系式。吴滨^[23]则进一步给出了螺栓球节点在拉弯和压弯作用下的工作模式和破坏机理。此外,石庆洪等^[24]还研究了中性轴偏移对螺栓球节点力学性能的影响并建立了极限弯矩理论模型。

在螺栓球节点循环利用过程中出现的反复拆装磨损、人为锤击或打磨、拧入深度不足等问题,均可视为造成节点循环利用过程中螺纹损伤的原因。研究循环利用损伤对节点受拉承载力的影响实际就是研究这些因

素作用下节点承载力的变化规律。然而,几乎没有学者研究循环利用过程产生的损伤对螺栓球节点受拉承载性能的影响。即使在研究拧入缺陷问题时,过去也是作为一种单一安装缺陷开展研究,并未将其视为一种螺纹损伤类型的成因进行分析,也未同时考虑拧入缺陷损伤和其他损伤共同作用下的节点承载力退化规律。因此,本文开展了考虑循环利用损伤的螺栓球节点轴拉力学性能试验研究并进行了系统的比较和分析。研究结果为螺栓球节点循环利用技术的提出奠定了基础并提供了数据支持。

1 试验概况

1.1 试件设计

螺栓球节点试件尺寸按照《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》(GB/T 16939—2016)^[25]设计,试件的材料按照《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)^[26]选取。试验中螺栓球采用45号钢加工,高强螺栓采用40Cr加工,套筒采用Q235钢加工,封板(锥头)和钢管采用Q345钢加工。试件的尺寸如图1~2所示。

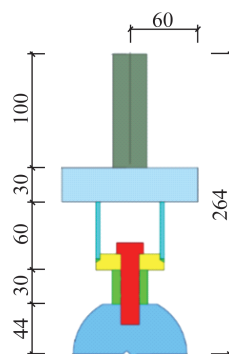


图1 M16试件尺寸示意图(单位:mm)

Fig. 1 Dimension schematic diagram of M16 specimen (unit: mm)

为研究循环利用中的反复拆装和人为锤击过程造成的损伤影响,设计了10个试件。高强螺栓规格选取M16,

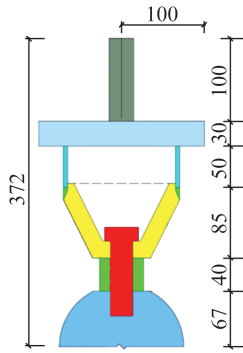


图2 M27试件尺寸示意图(单位:mm)
Fig. 2 Dimension schematic diagram of M27 specimen (unit:mm)

螺纹总数为11个。持荷水平取高强螺栓受拉承载力设计值的30%(20 kN)、90%(60 kN)、180%(120 kN)^[27],持荷时间均为1 h;拆装次数为5次、10次和15次。人为锤击损伤个数包括单侧6、8、10个以及双侧各5个,损伤深度为54%~84%。各试件参数如表1所示,编号M16-DZ表示对照组试件;以编号M16-60-10-8为例说明表中试件编号的含义,M16表示高强螺栓直径,数值60表示施加60 kN循环荷载,数值10表示拆装次数为10次,数值8表示锤击螺纹损伤8个,若为2*5则表示双侧各5个。

表1 M16螺栓球节点的试件参数

Table 1 Specimen parameters of M16 bolted ball joints

试件编号	持荷水平/ kN	拆装 次数	锤击损 伤个数	锤击损 伤深度/%
M16-DZ	0	0	0	0.00
M16-20-5	20	5	0	0.00
M16-60-5	60	5	0	0.00
M16-60-15	60	15	0	0.00
M16-120-15	120	15	0	0.00
M16-60-10	60	10	0	0.00
M16-60-10-6	60	10	6	54.21
M16-60-10-8	60	10	8	69.87
M16-60-10-10	60	10	10	72.28
M16-60-10-2*5	60	10	2×5	84.33/79.51

为研究循环利用中的人为锤击或打磨以及拧入缺陷造成的螺纹损伤的影响,设计了22个试件,高强螺栓规格为M27,螺纹总数为10个。各试件参数如表2所示。此处需要说明,在拧入深度不足的部分,缺失的螺纹数量可视为螺纹损伤深度100%的螺纹数量。以M27-8为例,已拧入螺纹数量为8,未拧入螺纹数量为

2,可视为该试件发生了螺纹损伤长度为20%,螺纹损伤深度为100%的螺纹损伤。而人为锤击或打磨造成的螺纹损伤是针对已拧入的螺纹开展的。其中,人为锤击造成的螺纹损伤用于模拟安装和拆除过程中螺纹因受到暴力击打而产生的螺纹损伤,这种螺纹损伤并无材料损失。角磨机人为打磨造成的螺纹损伤用于模拟螺纹被外物磨损造成的螺纹损伤,这种螺纹损伤有材料损失。人为锤击或打磨造成的螺纹损伤深度包括:单侧损伤程度80%和双侧各损伤40%;损伤长度包括:拧入螺纹的全损伤和半损伤。以试件编号JM-M27-8-4-40为例说明编号含义, JM表示角磨机打磨造成的螺纹损伤;M27表示高强螺栓直径;数值8表示拧入螺纹个数,对应于拧入缺陷相关的螺纹损伤长度为20%;数值4表示在已拧入的8个螺纹中有4个螺纹受到打磨损伤;数值40表示打磨损伤的螺纹损伤深度为双侧各损伤40%。

表2 M27螺栓球节点的试件参数

Table 2 Specimen parameters of M27 bolted ball joints

试件 编号	拧入缺 陷损伤 个数	锤击/打 磨损伤 个数	锤击/打磨 损伤深 度/%	人为损伤 原因
M27-10	0	0	0	—
M27-8	2	0	0	—
M27-7	3	0	0	—
M27-6	4	0	0	—
M27-5	5	0	0	—
M27-4	6	0	0	—
M27-8-8-40	2	8	40	锤击
M27-8-8-80	2	8	80	锤击
M27-6-6-40	4	6	40	锤击
M27-6-6-80	4	6	80	锤击
M27-4-4-40	6	4	40	锤击
M27-4-4-80	6	8	80	锤击
JM-M27-8-8-40	2	8	40	角磨
JM-M27-8-8-80	2	8	80	角磨
JM-M27-6-6-40	4	6	40	角磨
JM-M27-6-6-80	4	6	80	角磨
JM-M27-4-4-40	6	4	40	角磨
JM-M27-4-4-80	6	4	80	角磨
JM-M27-8-4-40	2	4	40	角磨
JM-M27-8-4-80	2	4	80	角磨
JM-M27-6-3-40	4	3	40	角磨
JM-M27-6-3-80	4	3	80	角磨

1.2 试验装置与试验方法

按照《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[27]进行试验。采用WAW-1000微机控制电液伺服试验机加载,试验机最大荷载为1 000 kN,准确度级别为0.5,试验装置如图3所示。



图3 试验装置

Fig. 3 Test setup

在M16节点的试验中,由于节点尺寸较小,预加载阶段的荷载取为节点设计承载力的10%,然后进行正式加载,加载速率为 $0.1 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ 。加载至指定荷载后持荷1 h,卸载拆装再加载,直至完成规定的拆装次数。最后,开展反复拆装试验后的单轴拉伸试验直至节点破坏。试验包括加载、持荷、卸载以及拆装4个环节。其中持荷阶段利用试验机触控屏的力闭环模式控制,此时荷载不再变化,位移计继续采集节点的位移。

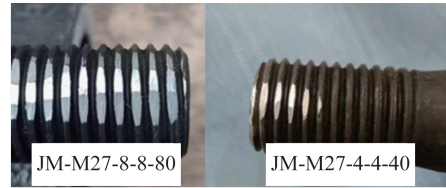
在M27节点的试验中,由于节点尺寸较大,预加载阶段的荷载提高至节点设计承载力的20%,正式加载速率取 $0.3 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ 。不再设置循环加载试验,直接对节点进行单轴拉伸至节点破坏。试验包括加载、持荷、卸载以及拆装4个环节。其中持荷阶段利用试验机触控屏的力闭环模式控制,此时荷载不再变化,位移计继续采集节点的位移。

螺纹的损伤程度采用游标卡尺测量,记录测得的数据如图4所示。锤子撞击节点两侧或者一侧螺栓的螺纹,制造双侧或单侧螺纹损伤;角磨机同理。以部分试件为例,螺纹损伤示意如图5所示。

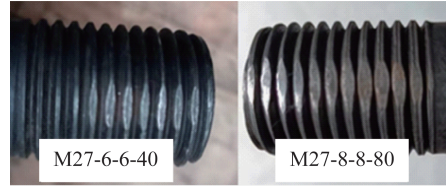


图4 高强度螺栓尺寸测量

Fig. 4 Size measurement of high-strength bolt



a) 不同损伤长度



b) 不同损伤深度

图5 高强度螺栓螺纹损伤

Fig. 5 Thread damage of high-strength bolt

2 试验结果及分析

2.1 反复拆装损伤对节点抗拉承载性能的影响

2.1.1 试验现象

在单轴拉伸试验前,观察持荷水平为60 kN但不同拆装次数下的M16节点螺栓形貌,如图6所示,可以发现不同拆装次数下的螺纹损伤量均较小且无明显区别。

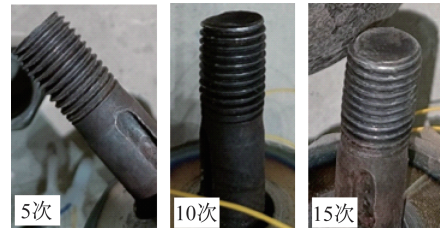


图6 不同拆装次数下的螺纹损伤

Fig. 6 Thread damage under different disassembly times

单轴拉伸试验时,不同拆装次数和持荷水平下节点的破坏模式均为高强螺栓杆被拉断。随着位移的增加,荷载先增大至极限承载力然后减小,最后随着一声巨响,高强螺栓被拉断。

2.1.2 极限受拉承载力

根据试验测得的数据绘制了图7和表3。发现反复拆装后节点的高强螺栓试验承载力均大于受拉承载力设计值67.5 kN,但均明显低于《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》(GB/T 16939—2016)^[25]要求的最高承载力195.0 kN。

从试验数据来看,反复拆装后试件的极限承载力略微增大(增大幅度在5%内)。持荷水平与节点极限承载力为反比关系;拆装次数与节点极限承载力为正比关系。但考虑到节点的尺寸偏差、试验误差等因素,本文偏保守地认为:当持荷水平不大于高强螺栓承载力设计值的90%且拆装次数不大于15次时,反复拆装损伤对节点极限承载力的影响可以忽略不计。

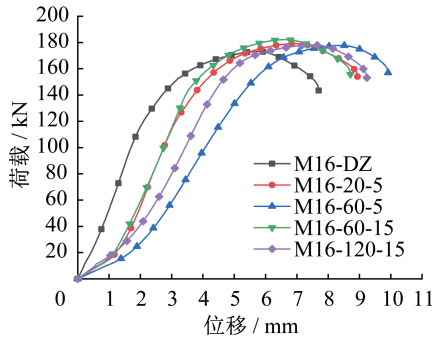


图7 考虑反复拆装损伤的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves with damage caused by repeated disassembly

表3 考虑反复拆装损伤的试验结果

Table 3 Test results with damage caused by repeated disassembly

试件编号	试验承载力/kN	承载力变化/%	破坏模式
M16-DZ	173.222	0.00	螺栓拉断
M16-20-5	179.192	3.45	螺栓拉断
M16-60-5	177.786	2.63	螺栓拉断
M16-60-15	182.242	5.21	螺栓拉断
M16-120-15	178.122	2.83	螺栓拉断

2.2 反复拆装后锤击损伤对节点抗拉承载性能的影响

2.2.1 试验现象

考虑锤击损伤后, M16的螺栓球节点的破坏模式仍然均为高强螺栓杆被拉断, 如图8所示。可以看到: 螺栓杆出现了明显的颈缩, 断口并不平整, 为延性破坏; 此外, 螺栓球内螺纹并无明显变形, 高强螺栓断裂部分可以轻松从球体中拧出。



图8 螺栓球节点试验破坏现象

Fig. 8 Test failure phenomenon of bolted ball joints

2.2.2 极限受拉承载力

考虑反复拆装和锤击损伤后的节点荷载-位移曲线

如图9所示, 节点的抗拉极限承载力变化情况如表4所示。

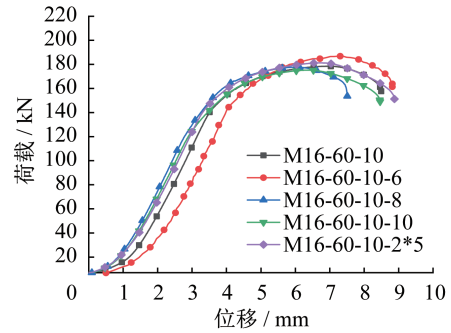


图9 考虑反复拆装和锤击损伤的荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves with damage caused by repeated disassembly and hammering

表4 考虑反复拆装和锤击损伤的试验结果

Table 4 Test results with damage caused by repeated disassembly and hammering

试件编号	试验承载力/kN	承载力变化/%	破坏模式
M16-60-10	178.462	0.00	螺栓拉断
M16-60-10-6	177.744	-0.40	螺栓拉断
M16-60-10-8	175.212	-1.82	螺栓拉断
M16-60-10-10	181.232	1.55	螺栓拉断
M16-60-10-2*5	187.206	4.90	螺栓拉断

分析发现, 节点的试验承载力仍然在《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》(GB/T 16939—2016)^[25]规定的范围内。反复拆装和锤击损伤共同作用后, 节点的极限承载力出现小范围(5%以内)波动。结合2.1节中只考虑反复拆装损伤的节点试验结果: 拆装次数不大于15次时, 反复拆装后试件的极限承载力略微增大(增大幅度在5%内)。

2.3 拧入缺陷损伤对节点抗拉承载性能的影响

2.3.1 试验现象

M27节点在拧入缺陷造成的螺纹损伤下表现出两种破坏模式: 当按规范要求拧入(10个螺纹)即螺纹没有发生损伤时, 节点同样发生高强螺栓杆的拉断破坏(试验现象与2.1.1和2.2.1节中的试验现象相同, 此处不再重复阐述)。当螺纹损伤分别为2、3、4、5、6个且螺纹损伤深度为100%时, 节点发生螺栓拔出破坏。以M27-4节点为例阐述螺栓拔出破坏, 如图10所示。可以看到节点的破坏表现为螺栓球螺纹剥落破坏。高强螺栓螺纹未变形, 螺栓杆并没有出现明显的颈缩, 为脆性破坏。



图10 螺栓球节点试验破坏现象(M27-4)

Fig. 10 Failure phenomenon of tensile test of bolted ball joints (M27-4)

2.3.2 极限受拉承载力

根据试验测得的数据绘制了表5、图11和12。

表5 考虑拧入缺陷造成的螺纹损伤的试验结果

Table 5 Test results with thread damage caused by screw-in defects

试件编号	试验承载力/kN	承载力变化/%	破坏模式
M27-10	541.282	0.00	螺栓拉断
M27-8	530.600	-1.97	螺栓拔出
M27-7	481.400	-11.06	螺栓拔出
M27-6	413.500	-23.61	螺栓拔出
M27-5	348.900	-35.54	螺栓拔出
M27-4	258.120	-52.31	螺栓拔出

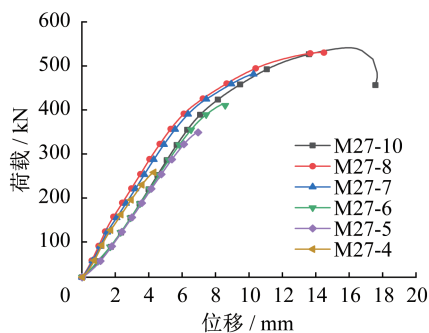


图11 考虑拧入缺陷造成的螺纹损伤的荷载-位移曲线
Fig. 11 Load-displacement curves with thread damage caused by screw-in defects

对比图7、9与11发现,当发生拔出破坏时,荷载随位移的增加而增加,当达到极限承载力后螺栓直接拔出,荷载不再存在达到极限承载力后继续随位移增加而减小的过程。观察表5和图12可知,节点的抗拉承载力随螺纹损伤个数的增加几乎呈线性下降;螺纹完全损伤占比达到60%时,节点受拉极限承载力下降约50%。

2.4 拧入缺陷、锤击或打磨损伤对节点抗拉承载性能的影响

2.4.1 试验现象

在拧入缺陷、锤击或打磨造成的损伤作用下,节点均

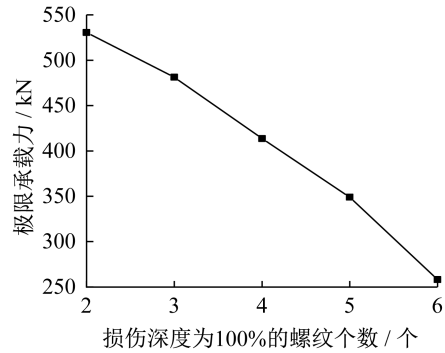


图12 受拉承载力随拧入缺陷造成的螺纹损伤个数变化曲线

Fig. 12 Variation curve of tensile bearing capacity with the number of thread damage caused by screw-in defects

表现为螺栓脆性拔出破坏。试验过程和试验现象与2.3.1节中的拧入缺陷造成的螺纹损伤节点试件类似,此处不再重复。

2.4.2 极限受拉承载力

试件的抗拉极限承载力如表6所示。试件的荷载-位移曲线如图13所示,承载力退化规律如图14所示。

表6 考虑拧入缺陷、锤击和打磨造成的螺纹损伤的试验结果

Table 6 Test results with thread damage caused by screw-in defects, hammering and grinding

试件编号	试验承载力/kN	承载力变化/%	破坏模式
M27-10	541.282	0.00	螺栓拉断
M27-8-8-40	497.100	-8.16	螺栓拔出
M27-8-8-80	425.200	-21.45	螺栓拔出
M27-6-6-40	374.000	-30.90	螺栓拔出
M27-6-6-80	327.800	-39.44	螺栓拔出
M27-4-4-40	195.300	-63.92	螺栓拔出
M27-4-4-80	178.300	-67.06	螺栓拔出
JM-M27-8-8-40	503.024	-7.07	螺栓拔出
JM-M27-8-8-80	468.400	-13.46	螺栓拔出
JM-M27-6-6-40	375.272	-30.66	螺栓拔出
JM-M27-6-6-80	371.500	-31.37	螺栓拔出
JM-M27-4-4-40	246.800	-54.40	螺栓拔出
JM-M27-4-4-80	241.100	-55.46	螺栓拔出
JM-M27-8-4-40	529.800	-2.12	螺栓拔出
JM-M27-8-4-80	522.500	-3.47	螺栓拔出
JM-M27-6-3-40	391.400	-27.69	螺栓拔出
JM-M27-6-3-80	389.600	-28.02	螺栓拔出

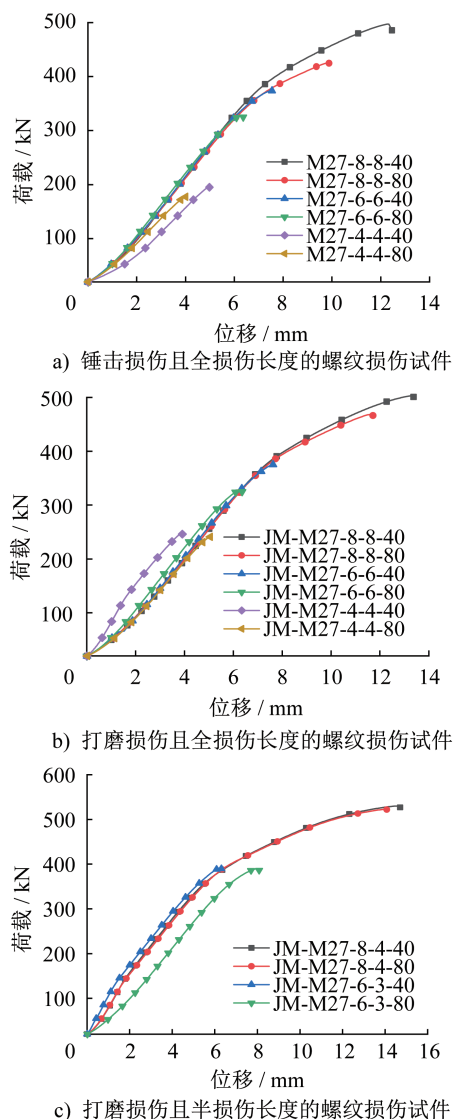


图 13 考虑拧入缺陷、锤击和打磨造成的螺纹损伤的荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves with thread damage caused by screw-in defects, hammering and grinding

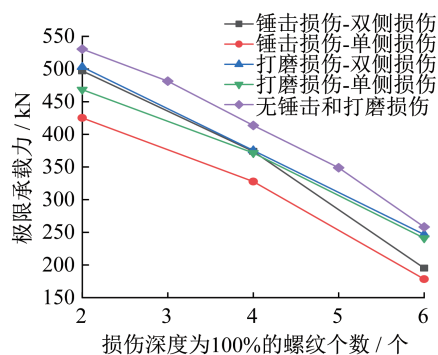


图 14 考虑拧入缺陷、锤击和打磨造成的螺纹损伤后的承载力变化曲线

Fig. 14 Variation curve of bearing capacity with thread damage caused by screw-in defects, hammering and grinding

观察表 6 发现, 仅试件 M27-8-8-40、JM-M27-8-8-40、JM-M27-4-4-80、JM-M27-8-4-80 的节点承载力满足《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》(GB/T 16939—2016)^[25] 要求的荷载范围 477~569 kN。

进一步分析发现, 对于锤击或打磨的单侧损伤, 当螺栓拧入深度相同, 锤击或打磨损伤深度相同, 锤击或打磨损伤长度不同时, 锤击或打磨损伤长度越大, 试件的承载力越低。而当其余条件相同时, 锤击或打磨的双侧损伤各 40% 比单侧损伤 80% 的试件承载力高, 推测其原因可能是单侧损伤使节点受力不均匀从而导致中性轴偏移, 削弱了承载能力。此外, 打磨损伤的试件承载力比锤击损伤的试件承载力更高, 推测其原因可能是打磨损伤时螺纹未发生明显变形, 仍然可以很好地啮合, 而锤击损伤时螺纹出现更严重的变形, 影响啮合从而影响了承载力。

2.5 试验结果综合分析

进一步对比表 5~6 发现, 拧入缺陷和锤击造成的综合损伤或者拧入缺陷和打磨造成的综合损伤对节点抗拉承载性能的影响, 与仅考虑拧入缺陷损伤对节点抗拉承载性能的影响相似。抗拉承载力随拧入缺陷损伤的增加均呈线性下降趋势。在拧入缺陷损伤的基础上, 锤击或打磨损伤对节点承载力的影响在 20% 范围内。

综合分析表 3~6, 可将螺栓球节点在循环利用过程中的设计使用建议简化如下: 拆装次数在 10 次以内且无其他损伤时, 节点可以视作无损节点重复使用; 拆装次数在 10 次以内且锤击损伤程度在 80% 以内时, 考虑螺纹损伤的节点循环使用时, 其设计承载力可考虑乘以 0.95 的安全系数进行折减; 当进一步考虑拧入缺陷造成的螺纹损伤时, 考虑锤击或打磨造成的螺纹损伤的节点循环使用时, 其设计承载力可考虑在 0.95 的基础上再乘以 0.80 进行折减, 拧入缺陷造成的螺纹损伤的影响系数可按拧入比例的线性在此基础上叠加。

综上所述, 工程中对螺栓球节点进行拆除及回用时, 须严格控制拧入缺陷造成的螺纹损伤并注意单侧锤击损伤。

3 结论

(1) 当持荷水平不大于高强螺栓承载力设计值的 90%、拆装次数不大于 10 次且锤击损伤程度不大于 80% 时, 反复拆装损伤对节点抗拉承载力的影响可忽略不计, 锤击损伤对反复拆装节点受拉极限承载力的影响可取 0.95 的安全系数进行折减。

(2) 不考虑锤击或打磨造成的螺纹损伤时, 节点抗拉承载力随拧入缺陷造成的螺纹损伤程度增加几乎呈线性下降; 螺纹完全损伤占比达到 60% 时, 节点受拉极限承载力下降了约 50%。

(3) 无论是否发生锤击或打磨损伤,节点抗拉承载力随拧入缺陷造成的螺纹损伤的增加几乎呈线性下降;在拧入缺陷造成的螺纹损伤的基础上,锤击或打磨损伤对节点承载力的影响在20%范围内。

(4) 其余条件相同时,锤击或打磨的螺纹双侧损伤各40%的节点抗拉承载力比单侧损伤80%的节点抗拉承载力高;打磨造成的螺纹损伤对节点承载力的削弱作用小于锤击造成的螺纹损伤对节点承载力的削弱作用。

(5) 与考虑反复拆装造成的螺纹损伤相比,考虑拧入缺陷造成的螺纹损伤对节点承载力的不利影响将增大;且拧入缺陷造成的螺纹损伤对承载力的不利影响大于锤击或打磨造成的螺纹损伤对承载力的不利影响,因此工程中对螺栓球节点进行循环利用时须严格控制拧入缺陷造成的螺纹损伤并注意避免单侧锤击损伤。

参考文献:

- [1] 徐巍,王玉泽,董晶,等.3D扫描逆向建模技术与MR设备在既有建筑球形网架拆除中的应用[J].施工技术,2017,46(22):133-136.DOI:10.7672/sjgs2017220133.
XU Wei, WANG Yuze, TONG Jing, et al. Application of 3D scanning reverse modeling technology and MR equipment in the existing building spheric steel grid demolishing [J]. Construction Technology, 2017, 46(22): 133-136. DOI: 10.7672/sjgs2017220133. (in Chinese)
- [2] 黄伯承. 沈海高速闽粤站网架结构网架收费棚拆除技术[J]. 福建交通科技, 2021(2): 126-130.
HUANG Bochong. Demolition technology of steel structure grid charging shed in Fujian-Guangdong Station of Shenhai Expressway [J]. Fujian Communications Technology, 2021(2): 126-130. (in Chinese)
- [3] 罗毅.“双碳”目标下绿色建筑的发展方向及技术应用[J]. 中国工程咨询, 2022(5): 74-79. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5829.2022.05.016.
LUO Yi. Development direction and technical application of green building under the goal of double carbon [J]. Chinese Engineering Consultants, 2022(5): 74-79. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5829.2022.05.016. (in Chinese)
- [4] 赵胤琦. 网架节点静动态力学性能数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
ZHAO Yinqi. Numerical simulation of static and dynamic mechanical properties of grid joints [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. (in Chinese)
- [5] 闫巍,陈志华,李砚波,等. 铝合金螺栓球节点螺纹轴向力分布研究[J]. 空间结构, 2023, 29(2): 43-52. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2023.02.043.
YAN Wei, CHEN Zhihua, LI Yanbo, et al. Research on axial force distribution of screw threads of aluminum alloy bolted ball joint [J]. Spatial Structures, 2023, 29(2): 43-52. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2023.02.043. (in Chinese)
- [6] 李峰,朱锐杰,张冬冬. 高强铝合金螺栓球节点轴向受力性能与初始刚度计算模型[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊2): 103-111. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.015.
LI Feng, ZHU Ruijie, ZHANG Dongdong. Calculation model of axial mechanical behavior and initial stiffness of high-strength aluminum alloy bolted ball joints [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Suppl. 2): 103-111. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.015. (in Chinese)
- [7] 曾强,郭小农,黄泽韡,等. Q235B钢螺栓球柱节点的受拉承载力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 1132-1142. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.19475.
ZENG Qiang, GUO Xiaonong, HUANG Zewei, et al. Uniaxial tension bearing capacity of Q235B steel bolted ball-cylinder joint [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(8): 1132-1142. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.19475. (in Chinese)
- [8] 喻晓晨,李会军,陈旭,等. 螺栓球节点力学性能研究及弯矩-转角关系式的建立[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(4): 57-65. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.008.
YU Xiaochen, LI Huijun, CHEN Xu, et al. Mechanical properties of bolt-ball joints and establishment of moment-rotation relation formula [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(4): 57-65. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.008. (in Chinese)
- [9] 曹正罡,周传波,严佳川. 80m球径螺栓球节点单层球面网壳地震响应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(6): 58-65. DOI: 10.11918/j.issn.036706234.201603155.
CAO Zhenggang, ZHOU Chuanbo, YAN Jiachuan. Seismic response analysis of an 80-meter span single-layer reticulated dome with bolt-ball joints [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(6): 58-65. DOI: 10.11918/j.issn.036706234.201603155. (in Chinese)
- [10] 曹正罡,严佳川,周传波. 80m球径螺栓球节点单层球面网壳强震失效机理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 39-44. DOI: 10.11918/j.issn.036706234.201603155.
CAO Zhenggang, YAN Jiachuan, ZHOU Chuanbo. Failure mechanism of an 80 meters span single-layer reticulated dome with bolt-ball joints subjected to severe earthquakes [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 39-44. DOI: 10.11918/j.issn.036706234.201603155. (in Chinese)
- [11] 应皎洁. 铝合金螺栓球节点封板连接低周疲劳性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
YING Jiaojie. Study on low-cycle fatigue performance of aluminum alloy bolted ball joint plate-sealing connection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [12] 张洁. 考虑节点刚度与塑性累积损伤影响的杆单元塑性铰计算模型研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.

- ZHANG Jie. Study on calculation model of plastic hinge of bar element considering the influence of joint stiffness and plastic cumulative damage [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 李绍鹏. 空间网格结构螺栓球节点抗冲击性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- LI Shaopeng. Study on impact resistance of bolted spherical joints with spatial grid structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [14] 谭志伦, 刘红波, 王小盾, 等. 锈蚀后螺栓球节点抗拉力学性能试验研究与数值模拟 [J]. 工业建筑, 2019, 49(8): 6-11. DOI: 10.13204/j.gyjz201908002.
- TAN Zhilun, LIU Hongbo, WANG Xiaodun, et al. Experimental study and numerical simulation of tensile mechanical properties of bolt-sphere joints after corrosion [J]. Industrial Construction, 2019, 49(8): 6-11. DOI: 10.13204/j.gyjz201908002. (in Chinese)
- [15] 高宇. 螺栓球节点三维腐蚀模拟及腐蚀后抗拉性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- GAO Yu. 3D corrosion simulation of bolted ball joints and research on tensile properties after corrosion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [16] 闫立兴, 陈冲, 孔德潮, 等. 氯盐侵蚀后螺栓球节点抗拉承载力试验研究与数值模拟 [J]. 工业建筑, 2024, 54(7): 147-152. DOI: 10.3724/j.gyjzG22081013.
- YAN Lixing, CHEN Chong, KONG Dechao, et al. Experimental study and numerical simulation of tensile bearing capacity of bolt-ball joints after chloride corrosion [J]. Industrial Construction, 2024, 54(7): 147-152. DOI: 10.3724/j.gyjzG22081013. (in Chinese)
- [17] 刘红波, 林思伟, 张高青. 高温下螺栓球节点螺栓连接抗拉性能试验研究 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(8): 862-866. DOI: 10.11784/tdxbz202108040.
- LIU Hongbo, LIN Siwei, ZHANG Gaoqing. Experimental study of the tensile performance of bolt-ball connections in bolt ball joint at high temperatures [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(8): 862-866. DOI: 10.11784/tdxbz202108040. (in Chinese)
- [18] 冯绍攀, 幸坤涛, 王新泉, 等. 钢网架螺栓球节点用高强度螺栓过火冷却后力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2): 198-205. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.c071.
- FENG Shaopan, XING Kuntao, WANG Xinquan, et al. Experimental study on mechanical properties of high strength bolts used in steel grid bolted spherical joints after fire [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2): 198-205. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.c071. (in Chinese)
- [19] 陈安阳, 邹小舟, 陈乐贤, 等. 无檩空间网格结构装配式螺栓球柱节点高温受压性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(7): 84-96. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.07.010.
- CHEN Anyang, ZOU Xiaozhou, CHEN Lexian, et al. A study on the compressive bearing capacity of prefabricated bolted ball-cylinder joints at elevated temperatures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(7): 84-96. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.07.010. (in Chinese)
- [20] 黄炳生, 付宜东, 陈焯, 等. 螺栓球节点高强度螺栓拧入深度试验研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(4): 28-32. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.04.005.
- HUANG Bingsheng, FU Yidong, CHEN Ye, et al. Experimental study on the depth of high strength bolt into bolt-sphere joint [J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(4): 28-32. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.04.005. (in Chinese)
- [21] 吴琼尧, 王化杰, 钱宏亮, 等. 拧入缺陷对螺栓球节点受力性能影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 53-59. DOI: 10.11918/j.issn.036706234.201703115.
- WU Qiongyao, WANG Huajie, QIAN Hongliang, et al. Study on influence caused by bolt-connection defect on mechanical properties of bolted ball joint [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 53-59. DOI: 10.11918/j.issn.036706234.201703115. (in Chinese)
- [22] 付宜东, 陈焯, 毛泽亮, 等. 高强度螺栓不同拧入深度对螺栓球节点受拉承载力的影响 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(1): 106-110, 119. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2017.01.017.
- FU Yidong, CHEN Ye, MAO Zeliang, et al. Effects of the screwed depth of high strength bolt to tension capacity of bolt-sphere joint [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39(1): 106-110, 119. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2017.01.017. (in Chinese)
- [23] 吴滨. 考虑拧入不足的螺栓球节点性能及单层网壳稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WU Bin. Study on performance of bolted spherical joints and stability of single-layer reticulated shell considering insufficient screw-in [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [24] 石庆洪, 刘应该, 王志宇, 等. 考虑中性轴偏移的半刚性螺栓球节点受力分析 [J/OL]. 宁夏大学学报(自然科学版), 1-8 (2023-06-08) [2023-08-01]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/64.1006.N.20230606.1610.002.html>.
- SHI Qinghong, Liu Yinggai, Wang Zhiyu, et al. Mechanical analysis of semi-rigid bolted sphere joints considering neutral axis offset [J/OL]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 1-8 (2023-06-08) [2023-08-01]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/64.1006.N.20230606.1610.002.html>. (in Chinese)
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢网架螺栓球节点用高强度螺栓: GB/T 16939—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and

- Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. High Strength Bolts for Joints of Space Grid Structures: GB/T 16939—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Space Frame Structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

向审稿人致谢

(以汉语拼音为序)

2024年, 承蒙以下专家热情、认真地为本刊审稿, 在此, 编辑部全体工作人员向他们表示衷心的感谢!

白伦华 白睿 班慧勇 边广生 蔡炎城 曹宝珠 曹芙波 曹君辉 曹轲 曹亮 曹正罡 查晓雄
 常鸿飞 陈博珊 陈博文 陈冬冬 陈伏彬 陈国 陈驹 陈娟 陈俊岭 陈康明 陈亮 陈林
 陈珍珠 陈满泰 陈桥生 陈清军 陈涛 陈伟 陈晓明 陈永盛 陈誉 陈云 陈振明 程国忠
 程卫红 程欣 初明进 崔闯 崔瑶 单波 邓恩峰 邓洪洲 丁发兴 丁阳 窦超 杜轲
 杜颜胜 杜运兴 范圣刚 范文亮 方成 方有珍 冯若强 冯晓东 冯玉龙 付朝江 高山 高振锋
 顾强 关富玲 管宇 郭宏超 郭兰慧 郭小康 郭小农 郭正兴 郝霖霏 贺佳 贺君 贺拥军
 侯超 侯和涛 侯炜 胡方鑫 胡红松 胡立黎 胡淑军 黄斌 黄宏 黄振宇 回忆 霍林生
 季俊 冀伟 贾良玖 江进 江黎明 江文强 姜健 姜绍飞 蒋彬辉 蒋欢军 解琳琳 金路
 康澜 康少波 柯珂 孔正义 匡亚川 赖柄霖 蓝小艺 黎燕文 李贝贝 李丹 李岷昌 李海锋
 李海汀 李红星 李会军 李江 李宁 李少鹏 李寿科 李涛 李威 李桅 李永进 李元齐
 李智 连鸣 梁佶 梁炯丰 廖飞宇 廖维张 林建平 刘发起 刘红波 刘红军 刘界鹏 刘敏
 刘思威 刘秀丽 刘艳芝 刘耀鹏 刘永健 刘占科 刘占省 刘祖强 龙跃凌 楼文娟 卢林枫 芦燕
 鲁军凯 鲁正 罗金辉 罗永峰 罗云标 吕学涛 马丹阳 马天雨 孟宝 聂少锋 潘建荣 潘月月
 强斌 强旭红 秦凤江 秦颖 邱灿星 曲慧 任庆新 任松波 戎翀 尚庆学 沈奇罕 石岩
 史庆轩 舒赣平 宋天诣 宋彦臣 宋振森 孙飞飞 孙国华 孙乐乐 孙瑛志 谭红梅 谭继可 谭清华
 汤轶群 陶慕轩 陶忠 田黎敏 田炜烽 童根树 完海鹰 汪明 汪皖黔 王斌 王春刚 王春林
 王广勇 王景玄 王静峰 王连华 王玲玲 王璐 王萌 王培军 王庆贺 王秋维 王涛 王伟
 王卫华 王文达 王秀丽 王宣鼎 王彦博 王彦超 王燕 王苑佐 王占飞 王志滨 王中兴 王佐才
 文波 闻洋 毋凯冬 吴丽丽 吴欣之 吴兆旗 伍凯 武大洋 武岳 夏军武 夏志远 谢甫哲
 谢靖中 邢信慧 邢遵胜 熊二刚 熊进刚 熊立红 熊明祥 徐金俊 徐蓉 徐莹璐 徐玉野 许斌
 薛暄译 闫西峰 闫翔宇 严加宝 严仁章 杨波 杨冬冬 杨风利 杨竞杰 杨俊芬 杨阳 杨应华
 杨有福 杨志坚 尧国皇 姚国文 叶勇 于金光 余红霞 余江滔 余鑫 余玉洁 虞终军 袁焕鑫
 袁辉辉 岳峰 曾翔 张超 张岗 张纪刚 张佳慧 张惊宙 张其林 张瑞甫 张素梅 张田忠
 张微敬 张文津 张有佳 张玉琢 张泽宇 张哲 章少华 赵宝成 赵必大 赵根田 赵鹤 赵俊贤
 赵雷 赵秋红 赵中伟 赵作周 郑宝锋 郑双杰 郑永乾 支旭东 郅伦海 钟炜辉 周锋 周观根
 周焕廷 周佳 周婷 周炬毅 周学军 朱爱珠 朱美春 朱劭骏 朱伟庆 朱翔 宗亮 邹琼
 邹昀