

带波纹盖板的高效螺栓连接抗滑移系数 影响因素试验研究

陈振明^{1,2}, 马琳², 高飞², 王综轶^{2*}

(1. 中建钢构股份有限公司, 广东 深圳 518118; 2. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为提升高强度螺栓摩擦型连接的连接效率, 本文提出了将硬金属波纹板与软金属进行组合的新型高效螺栓连接形式, 通过接触面间的犁沟效应和黏着效应, 可以显著提高螺栓连接的抗滑移系数。采用理论和试验相结合的研究方法, 阐明了该种高效螺栓连接形式的作用机理及影响因素, 设计并进行了27个抗滑移系数试验和4个表面硬度测试试验, 探究了不同表面处理方式、不同孔型对螺栓连接抗滑移系数的影响, 并与理论分析值进行对比。试验结果表明: 硬金属和软金属的硬度比是影响高效螺栓连接抗滑移系数的重要因素, 连接采用非标准孔将会降低抗滑移系数。所提出的新型高效螺栓连接形式抗滑移系数值最高可达0.89, 因而该连接形式能够显著提高高强度螺栓摩擦型连接的抗滑移系数, 大大提升单个螺栓的连接工作效率。

关键词: 波纹盖板; 高效螺栓连接; 表面硬度; 接触面处理方式; 犁沟效应; 黏着效应; 抗滑移系数

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)10-0032-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240516001

Experimental Study on the Factors Affecting the Anti-slip Coefficient of Efficient Bolted Connections with Corrugated Cover Plates

CHEN Zhenming^{1,2}, MA Lin², GAO Fei², WANG Zongyi^{2*}

(1. China Construction Steel Structure Co., Ltd., Shenzhen 518118, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

*Corresponding author: wangzongyi@hust.edu.cn

Abstract: In order to improve the connection efficiency of slip-critical high-strength bolt connections, an efficient bolt connection form by combining hard metal corrugated plate with soft metal is proposed, which can significantly improve the anti-slip coefficient of bolted connection through the furrow effect and adhesion effect between contact surfaces. Using a combination of theoretical and experimental research methods, the mechanism and influencing factors of efficient bolted connection form were clarified. A total of 27 anti-slip coefficient tests and 4 surface hardness tests were designed and carried out to investigate the influence of different surface treatments and hole types on the anti-slip

收稿日期: 2024-05-16

基金项目: 十四五国家重点研发计划(2023YFC3806603), 国家自然科学基金(52478176), 中国建筑科创平台课题(CSCEC-PT-004-2022-KT-1.1、CSCEC-PT-004-2022-KT-3.1)

作者简介:

陈振明(1975—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事钢结构建造方面的研究。E-mail: chenzm@cscec.com。

马琳(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事新型钢结构连接方面的研究。

通信作者:

王综轶(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构、新材料结构方面的研究。E-mail: wangzongyi@hust.edu.cn。

coefficient of bolted connection, and the results were compared with the theoretical analysis results. The test results show that the hardness ratio of hard metal and soft metal is an important factor affecting the anti-slip coefficient and the use of non-standard holes will reduce the anti-slip coefficient. The proposed efficient connection form can achieve an anti-slip coefficient value of up to 0.89, which can significantly improve the anti-slip coefficient of high-strength friction-type bolt connection, and greatly improve the efficiency of the connection of individual bolts.

Keywords: corrugated cover plate; efficient bolt connection; surface hardness; contact surface treatment; furrow effect; adhesion effect; anti-slip coefficient

螺栓连接是一种常用的连接方式,使用时只需在施工现场进行构件和螺栓的拼装,因而能够极大地缩短施工工期,较现场焊接具有更好的经济性和合理性。按照连接传力方式的不同,高强度螺栓连接可分为摩擦型和承压型两种方式。摩擦型高强度螺栓连接主要是通过高强度螺栓中的预紧力压紧构件接触面,并利用接触面的摩擦力来传递剪力,阻止相对滑移^[1]。承压型高强度螺栓连接则是依靠螺杆抗剪和孔壁承压传递剪力,从而将构件、部件或板件连成整体的连接方式^[1]。

相比于承压型螺栓连接,摩擦型高强度螺栓因具有安装简便、刚度大、变形小、整体性好、耐疲劳等优点,被广泛应用于工程实践。接触面之间的抗滑移系数作为影响高强螺栓摩擦型连接抗剪性能的重要因素之一^[2],受到了国内外学者的广泛关注。杜富强等^[3]对无处理的干净轧制表面进行抗滑移系数试验,发现抗滑移系数 μ 在0.34~0.38之间。陈学森等^[4]对两种人工除锈方式(钢丝刷除锈、砂轮打磨除锈)处理后的表面进行测量,发现钢丝刷除锈后的抗滑移系数(0.50)大于砂轮打磨除锈后的抗滑移系数(0.27)。MAIORANA等^[5]和李友志等^[6]通过试验发现表面进行抛丸处理、喷硬质石英砂后,抗滑移系数分别为0.60和0.59。钢材的锈蚀会进一步改变接触面之间的接触状态,进而降低抗滑移系数^[7]。为了减轻钢板的锈蚀情况,往往对处理后的表面采用喷涂无机富锌底漆等方式进行防锈处理,降低原有接触面的抗滑移系数^[8]。不同的接触面处理方式通过摩擦传递剪力的能力不同,螺栓连接抗滑移能力也不同,在现有的表面处理方式下,抗滑移系数大多集中在0.3~0.6之间,单个螺栓的抗剪承载力有限,螺栓连接效率不高。当受到较大外荷载作用时,往往需要较多螺栓,导致耗材增加,施工速度减缓。

当进行扩孔处理后,螺栓与板件之间的接触面积减小,接触应力就会增加,使得接触面变得光滑,进而影响螺栓连接的抗剪性能^[9]。李超华等^[10]通过试验发现扩孔不仅会影响抗滑移系数的大小,还会使栓孔周边的材料较易发生屈服,进而导致螺栓发生明显的松弛现象,影响螺栓预紧力的大小。虽然目前国内外就不同孔型对高强螺栓摩擦型连接抗剪性能的影响已有部分研究成果,但研究大多集中于传统的表面处理方式,对于新型接触面

处理方式的研究相对缺乏。

为了实现螺栓的高效连接,本文利用犁沟-黏着效应^[11]提出一种高效螺栓连接形式。该连接形式能够显著提高高强螺栓连接的抗滑移系数,提升单个螺栓利用率,显著减少节点处的螺栓使用量,大幅度加快施工进度,具有较大的发展空间。

1 摩擦系数理论计算方法

摩擦系数及抗滑移系数都能够描述接触面在法向荷载作用下,通过摩擦力抵抗外荷载作用能力的大小,但两者的计算方式有所不同。

摩擦系数 f 为两接触面之间滑动摩擦力 F 与法向荷载 N 之间的比值,如式(1),式中: N 为试验中固定荷载, F 为试验测得的滑动稳定时的荷载。

$$f = \frac{F}{N} \quad (1)$$

而抗滑移系数 μ 为摩擦型高强螺栓中滑动力与预紧力之和的比值,采用式(2)计算,式中: N_v 为栓接面开始发生滑移时的力,即抗滑移系数试验中所得的滑移荷载; n_f 为摩擦面数量; $\sum P$ 为滑移侧螺栓预紧力之和,按规范^[1]中为拧紧螺栓后作用在栓接面之间的压力。

$$\mu = \frac{N_v}{n_f \sum P} \quad (2)$$

显然,较大的接触面间摩擦系数表明该种摩擦面通过摩擦力抵抗外荷载作用较强,采用这种摩擦面的摩擦型高强螺栓连接的抗滑移系数也较大。张超^[12]对比同种处理方式下的摩擦系数与抗滑移系数,发现抗滑移系数会略大于摩擦系数。因此,提高接触面间的摩擦系数是提高抗滑移系数的重要方式。

根据Bowden的黏着摩擦理论^[13],摩擦力可以看作犁沟效应与黏着效应产生阻力的总和。其中,摩擦面黏着力指因紧密接触表面的分子活动性与分子作用力产生的滑移阻力;犁沟效应则包括表面粗糙峰间的啮合、碰撞和嵌入。

当接触对采用同等级钢材时,在法向荷载作用下,粗糙峰接触处应力逐渐增大直至达到材料受压屈服极限,两侧表面粗糙峰发生塑性变形,微接触点间接触面积增大,如图1所示。当受到剪切力作用时,通过微接触点之间的黏着力来抵抗外荷载作用,此时接触面之间的犁沟

力较小,基本可以忽略不计^[14]。

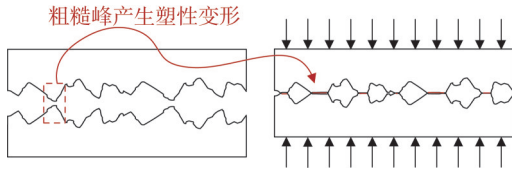


图1 钢材等级相同时摩擦面接触状态
Fig. 1 Contact state of friction surface under same steel grades

当接触对采用不同等级钢材时,在法向荷载作用下,往往较软的材料更先达到材料的屈服极限,发生塑性变形。当较硬金属在法向荷载作用下,能够在较软金属上实现微小嵌入,如图2所示。当受到剪切力作用时,除黏着力发挥外,软金属形成的沟槽同样会阻碍硬金属的相对运动,即犁沟力。

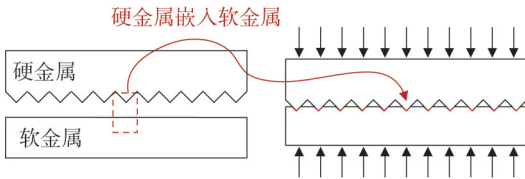


图2 钢材等级不同时摩擦面接触状态
Fig. 2 Contact state of friction surface under different steel grades

日本学者宇野暢芳等^[15]通过研究发现,硬度比(即硬金属与软金属维氏硬度的比值)和接触面之间接触压力比(即接触面平均接触压力与软金属抗拉强度的比值)是决定软金属阻碍硬金属相对运动能力大小和接触面破坏模式的重要因素。由图3可知,摩擦面间有三种破坏模式:硬金属剪切破坏、掘进破坏、软金属剪切破坏。

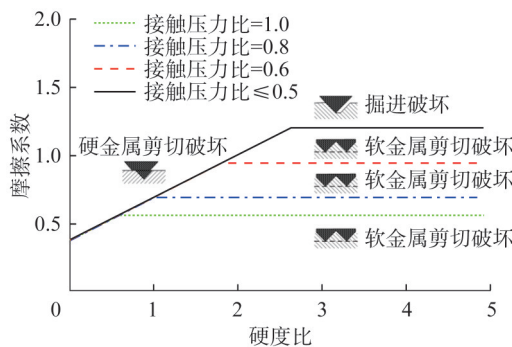


图3 不同接触压力比下摩擦系数与硬度比的关系曲线
Fig. 3 Relationship curves between friction coefficient and hardness ratio under different contact pressure ratios

当破坏模式为硬金属剪切破坏时,摩擦系数 f 与硬度比有关:

$$f = \frac{r_H}{1.5\sqrt{3}} \tag{3}$$

式中: r_H 为硬金属的维氏硬度与软金属的维氏硬度的比值,即硬度比。

当破坏模式为软金属剪切破坏时,摩擦系数 f 与接触压力比有关:

$$f = \frac{1}{\sqrt{3}(\sigma/\sigma_B^m)} \tag{4}$$

式中: σ/σ_B^m 为接触面平均接触压力(σ)与软金属抗拉强度(σ_B^m)的比值,即接触压力比。

当破坏模式为掘进破坏时,需要同时满足 $r_H \geq 3$ 、 $\sigma/\sigma_B^m \leq 0.5$,此时摩擦系数 f 为定值1.2。

2 试验研究

2.1 抗滑移系数试验

2.1.1 试验设计

高效连接形式由高强钢盖板、普通钢芯板和高强螺栓组成,高强钢盖板采用Q960钢,普通钢芯板采用Q355钢,其中盖板利用线切割技术处理得到特殊波纹,装配时应保证波纹方向与试件受力方向垂直,如图4所示。

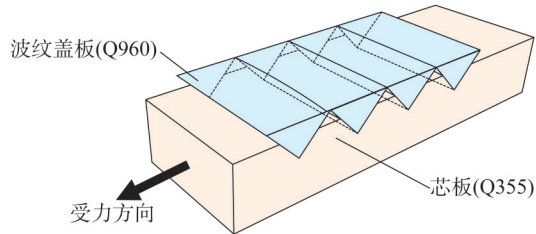
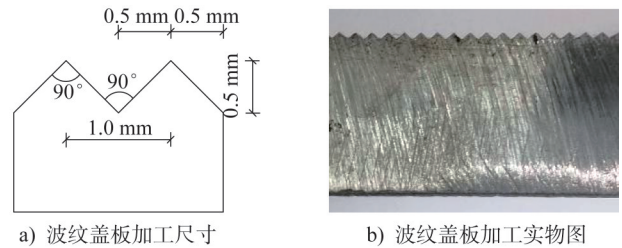


图4 高效螺栓连接示意图
Fig. 4 Schematic diagram of efficient bolt connection

依据规范^[1],试件采用双摩擦面双栓连接,选取盖板为10 mm厚Q960钢;芯板选取20 mm厚Q355钢,如图5所示。当采用与受力垂直的槽型孔时,为保证滑移前板件截面仍处于弹性状态,将试件宽度调整为116 mm。螺栓选取8.8级M22,使用电动扭矩扳手施加螺栓预紧力,并通过压力传感器对预紧力大小进行控制并记录螺栓预紧力的变化情况。

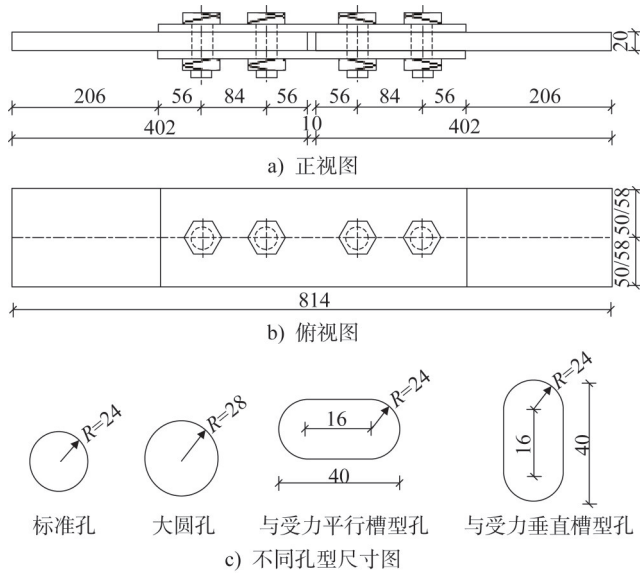


图5 抗滑移系数试验试件尺寸图(单位:mm)

Fig. 5 Dimensional drawing of specimen for anti-slip coefficient test(unit:mm)

对标准孔进行3次重复性试验,其余孔型进行2次重复性试验,当进行扩孔处理时,根据规范^[1]的要求仅对芯板进行处理,盖板仍使用标准孔。抗滑移系数试件设计如表1所示。试件编号采用“盖板处理方式/芯板处理方式-孔型-序号”的格式。其中A、B、C、D表示处理方式分别为波纹处理、抛丸处理、抛丸后喷涂无机富锌底漆、激光除锈;a、b、c、d表示孔型分别为标准孔、大圆孔、与受力平行槽型孔、与受力垂直槽型孔,如图5所示。如“AB-a-1”表示盖板进行波纹处理、芯板进行抛丸处理的采用标准孔连接的第一个抗滑移试件。

2.1.2 加载方式

采用100 t万能试验机进行抗滑移试验,同时采用摄影测量系统(DIC)测量试件变形量,试验装置如图6所示。

采用单向拉伸加载,保证荷载作用线与试件中心线重合后,将试件一端固定,另一端施加拉力直到破坏。加载分为两个阶段进行:第一阶段进行预加载,加载至滑移荷载的10%左右,以校准试验机加载值,并消除一部分安装过程中产生的误差;第二阶段以0.4 mm·min⁻¹的速度缓慢增加荷载,直至试件发生滑移。

2.1.3 试验现象

当芯板采用不同表面处理方式后,螺栓连接试件滑移后接触面的磨损形态如下:

(1) 芯板进行激光除锈

如图7所示,当芯板进行激光除锈后,盖板的波纹在滑移侧螺栓孔周围发生塑性变形,波纹板尖端被磨平,同

表1 抗滑移系数试件设计
Table 1 Design of anti-slip coefficient specimens

试件编号	表面处理方式		芯板孔型
	盖板	芯板	
AD-a-1			标准孔
AD-a-2	波纹	激光除锈	标准孔
AD-a-3			
AD-b-1	波纹	激光除锈	大圆孔
AD-b-2			
AD-c-1	波纹	激光除锈	与受力平行槽型孔
AD-c-2			
AD-d-1	波纹	激光除锈	与受力垂直槽型孔
AD-d-2			
AB-a-1			标准孔
AB-a-2	波纹	抛丸	标准孔
AB-a-3			
AB-b-1	波纹	抛丸	大圆孔
AB-b-2			
AB-c-1	波纹	抛丸	与受力平行槽型孔
AB-c-2			
AB-d-1	波纹	抛丸	与受力垂直槽型孔
AB-d-2			
AC-a-1			标准孔
AC-a-2	波纹	抛丸后喷涂无机富锌底漆	标准孔
AC-a-3			
AC-b-1	波纹	抛丸后喷涂无机富锌底漆	大圆孔
AC-b-2			
AC-c-1	波纹	抛丸后喷涂无机富锌底漆	与受力平行槽型孔
AC-c-2			
AC-d-1	波纹	抛丸后喷涂无机富锌底漆	与受力垂直槽型孔
AC-d-2			

时可见螺栓孔附近有黑色的金属碎屑,说明在螺栓预紧力作用下,盖板上的波纹嵌入芯板,芯板表层金属发生破坏,螺栓孔周围可见较为清晰的波纹嵌入痕迹。

(2) 芯板进行抛丸处理

如图8所示,当芯板进行抛丸处理时,同样可以观察到盖板螺栓孔周围有波纹嵌入痕迹且盖板滑移侧波纹发生塑性变形,该部分波纹尖端同样被磨平,但波纹嵌入芯板深度和波纹塑性变形范围均小于芯板进行激光除锈时的波纹嵌入芯板深度和波纹塑性变形范围。

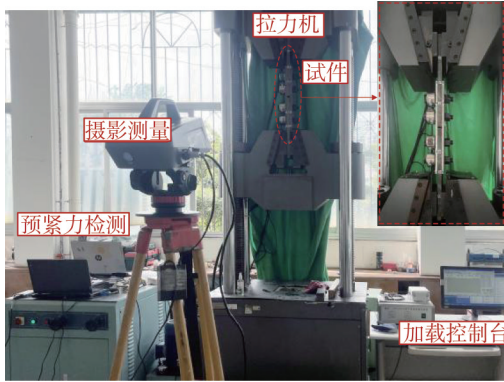


图6 试验装置
Fig. 6 Test setup

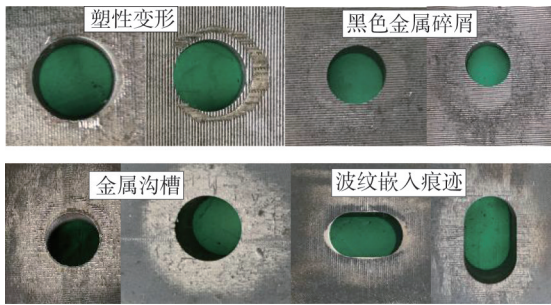


图7 芯板进行激光除锈时表面磨损形态
Fig. 7 Surface wear mode of core board during laser rust removal

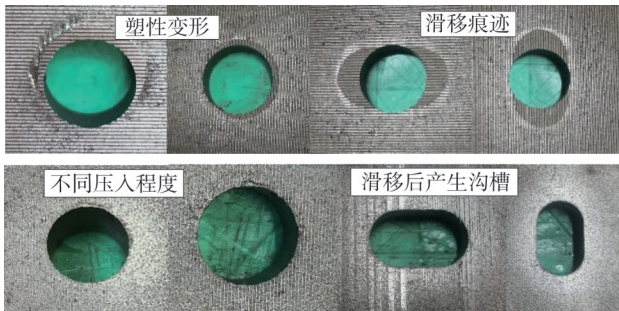


图8 芯板进行抛丸处理时表面磨损形态
Fig. 8 Surface wear mode of core board during shot blasting

(3) 芯板进行抛丸后喷涂无机富锌底漆

如图9所示,当芯板抛丸后喷涂无机富锌底漆时,盖板波纹发生塑性变形的范围更小,芯板上波纹嵌入痕迹更轻,可以观察到芯板表层白漆脱落。

综上,当盖板采用表面波纹板,芯板分别进行激光除锈、抛丸处理及抛丸后喷涂无机富锌底漆时,芯板表面出现了不同程度的波纹嵌入痕迹,同时滑移侧盖板上波纹发生塑性变形,波纹尖端被磨平,由此可知破坏模式均为硬金属剪切破坏。发生滑移时,荷载往往较大,多数试件一旦滑移,承载能力迅速下降,并发出“砰”的响声,同时拉力机因自我保护而停止。

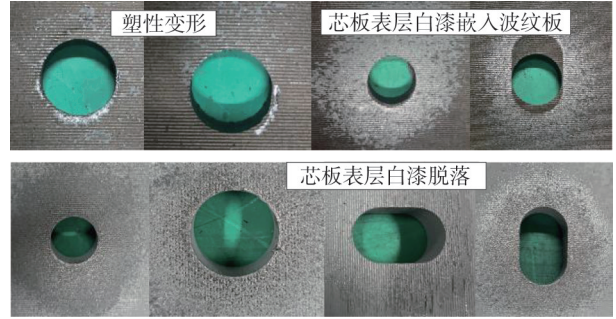


图9 芯板进行抛丸后喷涂无机富锌底漆时表面磨损形态
Fig. 9 Surface wear mode of core board after shot blasting and spraying with inorganic zinc-rich primer

2.2 表面硬度测量试验

当金属表面采用不同工艺处理时,往往会引起金属表面硬度的变化,进而影响高效螺栓连接的连接效率。

2.2.1 试验设计

从已处理的四种试样(Q960原始钢表面、Q355原始钢板面、Q355激光除锈面、Q355抛丸面)上切取小块,制作成5 mm×5 mm×5 mm的小块样品,并利用镶嵌机镶嵌在透明圆柱块内,如图10所示。

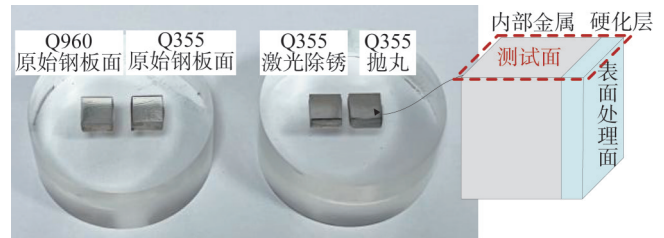


图10 显微硬度测量样品
Fig. 10 Microhardness measurement samples

按《金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法》(GB/T 4340.1—2009)^[16]中的规定进行测试时,试样表面应平坦光滑以保证测量精度,故选择图10所示测试面,防止因对粗糙表面进行表面处理时研磨抛光过度而导致强化层被磨掉。在进行显微硬度测试之前,对测试面进行研磨抛光处理,分别使用400目、800目和1200目的砂纸对测试面进行研磨,最后滴入抛光液进行抛光处理,直至表面没有明显坑洞和划痕。

2.2.2 测试方法

利用430SVD维氏硬度测试计测量试件表层60 μm左右内的显微硬度,试验设备如图11所示,试验测量中加载荷载为9.8 N,持荷时间为10 s,每一个试件测量5个数据点,作为一组数据,同时保证相邻测量点之间保持30 μm以上的距离,避免相邻测量点在试件表面产生的压痕或应力集中对测量结果产生影响。

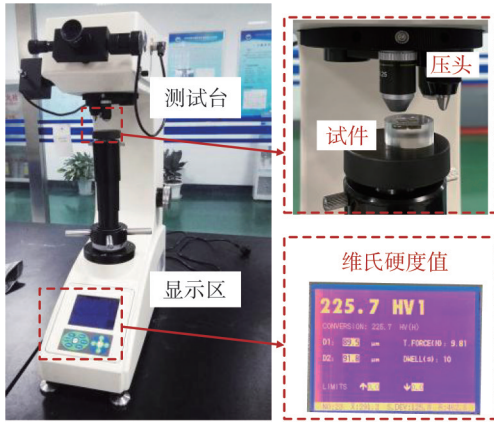


图11 430SVD 维氏硬度测试计

Fig. 11 430SVD Vickers Hardness Tester

3 结果分析

3.1 表面硬度值

将不同试件表面硬度测试结果汇总如表2所示。由表可知,激光除锈对金属表面硬度的提升有限,而抛丸处理可以显著增大金属表面硬度值,这是因为进行抛丸处理时,高速运动的钢丸反复冲击表面,改变了表层原有的晶粒组织,产生大量位错,形成表层加工硬化^[17]。

表2 不同接触面表面硬度结果

Table 2 Surface hardness results of different contact surfaces

试件类型	各测试点处硬度值/(kgf·mm ⁻²)					均值/(kgf·mm ⁻²)
	1	2	3	4	5	
Q960 原始钢表面	381.20	377.40	377.90	372.10	356.20	372.96
Q355 原始钢表面	158.80	152.20	155.50	153.00	155.20	154.90
Q355 激光除锈面	165.80	166.30	178.10	173.80	177.20	172.20
Q355 抛丸面	239.20	241.70	248.70	239.70	225.70	239.00

3.2 抗滑移系数

根据试验获取的数据,采用式(1)计算抗滑移系数的值,其中, N_v 为试验所得的滑移荷载; n_t 为摩擦面数量,本文中取2; $\sum P$ 为滑移侧螺栓预紧力之和,按规范^[1]取试验开始前压力传感器上的读数。计算结果如表3~表5所示。

从不同孔型及表面处理方式下的重复性试件中各取一组试验结果绘制荷载-位移曲线,其中AD系列试件选择AD-a-2、AD-b-1、AD-c-1、AD-d-1,AB系列试件选择AB-a-3、AB-b-1、AB-c-1、AB-d-1,AC系列试件选择AC-a-1、AC-b-1、AC-c-1、AC-d-1,试验结果如图12~14所示。由图中可见,绝大多数试件在滑移阶段时

表3 试件AD系列抗滑移系数试验结果

Table 3 Anti-slip coefficient test results of AD series specimens

试件编号	预紧力 P_1 /kN	预紧力 P_2 /kN	滑移荷载/ kN	抗滑移 系数 μ	抗滑移系 数均值
AD-a-1	151.17	151.14	546.93	0.90	
AD-a-2	152.52	152.66	549.91	0.90	0.89
AD-a-3	153.73	154.40	541.14	0.88	
AD-b-1	153.38	155.20	540.67	0.88	
AD-b-2	155.26	151.89	508.27	0.83	0.85
AD-c-1	152.66	152.33	517.77	0.85	
AD-c-2	150.42	153.22	498.37	0.82	0.83
AD-d-1	149.18	150.38	524.98	0.88	
AD-d-2	157.45	152.08	520.15	0.84	0.86

表4 试件AB系列抗滑移系数试验结果

Table 4 Anti-slip coefficient test results of AB series specimens

试件 编号	预紧力 P_1 /kN	预紧力 P_2 /kN	滑移荷载/ kN	抗滑移 系数 μ	抗滑移系 数均值
AB-a-1	152.46	154.60	394.25	0.64	
AB-a-2	153.61	152.31	375.23	0.61	0.61
AB-a-3	149.21	155.29	354.16	0.58	
AB-b-1	157.71	156.75	365.58	0.58	
AB-b-2	152.59	155.78	372.19	0.60	0.59
AB-c-1	152.25	156.56	365.58	0.59	
AB-c-2	157.21	157.43	372.19	0.59	0.59
AB-d-1	157.05	151.50	345.48	0.56	
AB-d-2	154.00	156.23	361.67	0.58	0.57

由于承载能力下降幅度较大,拉力机出于自我保护停止加载,此时可取陡降处的最大荷载作为滑移荷载;小部分试件出现较为平缓的滑移阶段,此时可取滑移阶段前的最大荷载作为滑移荷载。

(1) 芯板进行激光除锈

当芯板进行激光除锈时,试件的荷载-位移曲线及抗滑移系数计算结果如图12和表3所示。

(2) 芯板进行抛丸处理

当芯板进行抛丸处理时,试件的荷载-位移曲线及抗滑移系数计算结果如图13和表4所示。

(3) 芯板进行抛丸后喷涂无机富锌底漆

当芯板进行抛丸后喷涂无机富锌底漆时,试件的荷载-位移曲线及抗滑移系数计算结果如图14和表5所示。

表5 试件AC系列抗滑移系数试验结果

Table 5 Anti-slip coefficient test results of AC series specimens

试件编号	预紧力 P_1/kN	预紧力 P_2/kN	滑移荷载/ kN	抗滑移 系数 μ	抗滑移系 数均值
AC-a-1	153.90	151.68	278.19	0.46	
AC-a-2	153.95	151.95	269.56	0.44	0.45
AC-a-3	159.24	155.81	285.09	0.45	
AC-b-1	156.28	156.21	285.08	0.46	
AC-b-2	154.63	150.98	300.57	0.49	0.47
AC-c-1	153.94	154.84	273.02	0.44	
AC-c-2	155.38	156.46	252.11	0.40	0.42
AC-d-1	154.40	156.61	235.01	0.38	
AC-d-2	151.00	152.70	288.35	0.47	0.43

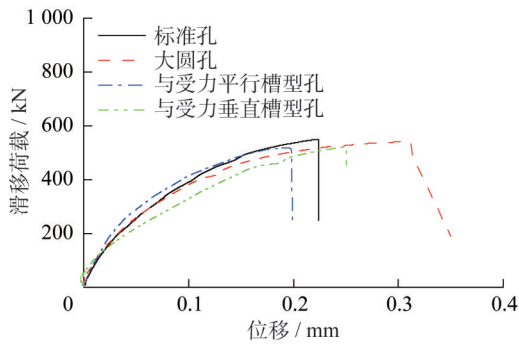


图12 试件AD系列荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of AD series specimens

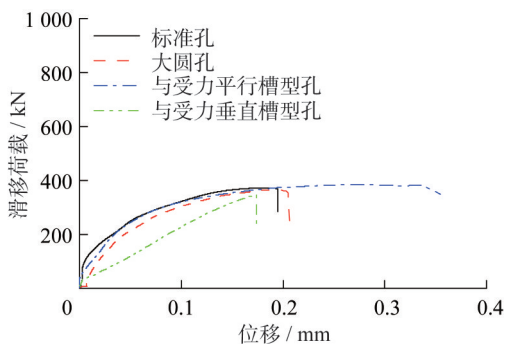


图13 试件AB系列荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of AB series specimens

3.2.1 芯板表面处理方式对抗滑移系数的影响

将表面显微硬度测试结果带入式(3),得到当芯板表面采用不同处理方式时理论摩擦系数的值,如表6所示。

由表6可知,芯板进行激光除锈处理以及抛丸处理时得到的抗滑移系数与理论摩擦系数的值基本吻合。

当芯板进行抛丸处理后喷涂无机富锌底漆时,盖板

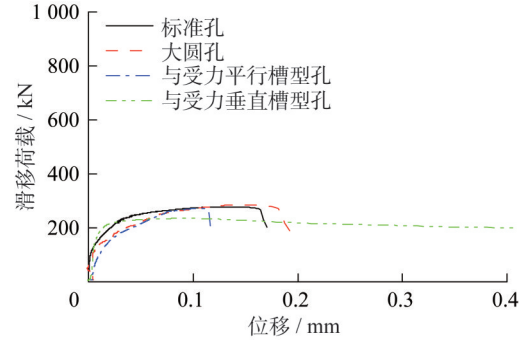


图14 试件AC系列荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves of AC series specimens

表6 不同接触对时的理论摩擦系数与试验抗滑移系数

Table 6 Theoretical friction coefficient and experimental anti-slip coefficient under different contact pairs

处理方式	盖板:Q960		芯板:Q355		理论摩 擦系数	抗滑移 系数值
	硬度/ ($kgf \cdot mm^{-2}$)	处理方式	硬度/ ($kgf \cdot mm^{-2}$)	处理方式		
波纹处理	372.96	激光除锈	154.94		0.93	0.89
波纹处理	372.96	抛丸	239.00		0.60	0.61

上的一部分波纹仅嵌入在表层涂漆中,并未深入金属内部,导致波纹利用率降低,因而其抗滑移系数最小,仅为0.45。

盖板采用Q960波纹板,芯板进行激光除锈时,抗滑移系数可达0.89,较传统连接形式抗滑移系数(0.3~0.6)显著提高,大大提升了摩擦型高强螺栓的连接效率。当盖板和芯板均为Q355钢材时,对接触面进行抛丸处理时,规范^[1]中规定其抗滑移系数为0.40;将盖板更换为Q960波纹板后,抗滑移系数提升至0.61,提升了52.50%。当对接触面进行抛丸处理后喷涂无机富锌底漆时,由于表面涂漆不利于波纹作用,此时更换盖板对提高抗滑移系数不明显。

3.2.2 孔型对抗滑移系数的影响

当施工中采用不同的孔型时,往往会对螺栓连接的抗剪能力产生影响,定义折减系数 k 为不同孔型螺栓连接的抗滑移系数值与标准孔螺栓连接的抗滑移系数值的比值,来衡量不同孔型对螺栓连接抗剪能力的折减效果,不同表面处理方式下折减系数 k 值如表7所示。

由表7可知,当进行扩孔处理后,滑移荷载会略微降低^[17],降低幅度在10%以内。当芯板进行抛丸后喷涂无机富锌底漆时,大圆孔的滑移荷载值大于标准孔,可能的原因是人工喷涂无机富锌底漆时,涂漆的厚度不均匀,不同试件的波纹利用率不同,抗滑移系数值离散性较大。

表7 不同孔型下的折减系数 k Table 7 Reduction factor k under different hole types

表面处理方式	孔型	k
盖板: 波纹处理 芯板: 激光除锈	标准孔	1.00
	大圆孔	0.96
	与受力平行槽型孔	0.93
	与受力垂直槽型孔	0.97
盖板: 波纹处理 芯板: 抛丸处理	标准孔	1.00
	大圆孔	0.97
	与受力平行槽型孔	0.97
	与受力垂直槽型孔	0.93
盖板: 波纹处理 芯板: 抛丸后喷涂 无机富锌底漆	标准孔	1.00
	大圆孔	1.04
	与受力平行槽型孔	0.93
	与受力垂直槽型孔	0.96

4 结论

本文对提高摩擦系数的机理进行系统梳理和扩展,验证了采用硬金属波纹板和软金属作为高强度螺栓连接的连接板来提高界面抗滑移系数的可行性,当接触面采用不同种金属材料时,根据软硬金属硬度比和接触面平均接触压力主要有三种破坏模式:硬金属剪切破坏、掘进破坏、软金属剪切破坏。本文通过试验分析得到如下结论:

(1) 当盖板采用Q960波纹板,芯板分别采用激光除锈、抛丸处理、抛丸后喷涂无机富锌底漆处理时,摩擦面破坏模式均为硬金属剪切破坏,且当芯板采用激光除锈时,抗滑移系数值最大,为0.89,远大于现有接触面处理方式的抗滑移系数值;当采用相同的螺栓个数时,节点所能承受的荷载远大于采用传统接触面处理方式时节点所能承受的荷载,即螺栓数量不变的情况下,连接节点的承载能力更强,节点承载效率提高。

(2) 不同的表面处理方式,可能改变金属表面硬度及波纹利用率,进而影响抗滑移系数。当芯板进行抛丸处理时,表面硬度增大,标准孔螺栓连接的抗滑移系数值略有降低,为0.61;当芯板进行抛丸后喷涂无机富锌底漆时,表面涂漆降低了波纹的利用率,标准孔螺栓连接的抗滑移系数较芯板为抛丸处理时标准孔螺栓连接的抗滑移系数有所降低,为0.45。

(3) 与采用标准孔相比,芯板采用大圆孔或长槽孔时,抗滑移系数降幅均不超过10%。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连

接技术规程: JGJ 82—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for High Strength Bolt Connections of Steel Structures: JGJ 82—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)

[2] 周燕, 雷宏刚, 李铁英. 摩擦型高强度螺栓抗剪连接研究进展及评述[J]. 建筑结构, 2019, 49(14): 62-68, 95. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.14.011.

ZHOU Yan, LEI Honggang, LI Tieying. Research progress and review of friction style high-strength bolted shear connections[J]. Building Structure, 2019, 49(14): 62-68, 95. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.14.011. (in Chinese)

[3] 杜富强, 刘晓刚, 郑云, 等. 高强耐蚀钢螺栓连接摩擦面抗滑移系数试验研究[J]. 钢结构, 2018, 33(10): 126-130. DOI: 10.13206/j.gjg201810026.

DU Fuqiang, LIU Xiaogang, ZHENG Yun, et al. Anti-sliding coefficient test for the friction surface of bolted connection of high strength corrosion resistant steel[J]. Steel Construction, 2018, 33(10): 126-130. DOI: 10.13206/j.gjg201810026. (in Chinese)

[4] 陈学森, 施刚, 陈玉峰. 高强钢螺栓连接电弧热喷铝接触面抗滑移系数试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(13): 87-92. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.13.013.

CHEN Xuesen, SHI Gang, CHEN Yufeng. Experiment study on slip coefficient of high strength steel bolt connection arc thermal spraying aluminum contact surface [J]. Building Structure, 2021, 51(13): 87-92. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.13.013. (in Chinese)

[5] MAIORANA E, ZAMPIERI P, PELLEGRINO C. Experimental tests on slip factor in friction joints: comparison between European and American Standards[J]. Frattura Ed Integrità Strutturale, 2018, 12(43): 205-217. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.43.16.

[6] 李友志, 季小莲, 吴耀华. 高强度结构钢高强度螺栓摩擦型连接节点试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(21): 21-24. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.21.004.

LI Youzhi, JI Xiaolian, WU Yaohua. Experimental study on high strength bolts slip-critical connection for high strength steel [J]. Building Structure, 2015, 45(21): 21-24. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.21.004. (in Chinese)

[7] 王彦博, 陈坤, 李国强. 超500 MPa级高强钢抛丸及抛丸后生赤锈表面抗滑移系数试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(7): 162-168. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.07.019.

WANG Yanbo, CHEN Kun, LI Guoqiang. Experimental investigation of slip factors of grit-blasted surface and rusted surface after blasting for high strength steel over 500 MPa grade [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(7): 162-168. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.07.019. (in Chinese)

[8] CRUZ A, SIMÕES R, ALVES R. Slip factor in slip resistant

- joints with high strength steel [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 70: 280-288. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.11.001.
- [9] 孙抒宇. 基于摩擦学原理浅析螺栓孔径和孔型对抗滑移系数的影响 [J]. *钢结构*, 2015, 30(7): 19-23. DOI: 10.13206/j.gjg201507005.
SUN Shuyu. Discussion on the effects of diameter and type of bolt-hole on anti-sliding coefficient based on principles of tribology [J]. *Steel Construction*, 2015, 30(7): 19-23. DOI: 10.13206/j.gjg201507005. (in Chinese)
- [10] 李超华, 闫月梅, 苏献祥. 钢结构中高强度螺栓连接形式相关问题的探讨 [J]. *钢结构*, 2008, 23(12): 16-18.
LI Chaohua, YAN Yuemei, SU Xianxiang. Exploration of problems related to high-strength bolt connection of steel structure [J]. *Steel Construction*, 2008, 23(12): 16-18. (in Chinese)
- [11] POPOV V L. Contact mechanics and friction: physical principles and applications [M]. Berlin: Springer, 2017: 97-116.
- [12] 张超. 高温环境下摩擦型高强螺栓连接节点受力性能的试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
ZHANG Chao. Experimental study for the performance of friction high strength bolt connection nodes in high temperature environment [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [13] 温诗铸, 黄平, 田煜, 等. 摩擦学原理 [M]. 5版. 北京: 清华大学出版社, 2018: 274-280.
WEN Shizhu, HUANG Ping, TIAN Yu, et al. Principles of tribology [M]. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2018: 274-280. (in Chinese)
- [14] 王彦博, 陈坤, 李国强. 高强度钢与普通钢混合连接抛丸表面抗滑移系数试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2018, 51(12): 21-27, 89. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2018.12.003.
- WANG Yanbo, CHEN Kun, LI Guoqiang. Experimental investigation of slip factors for shot-blasted surface of hybrid connections between high strength steel and mild steel [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(12): 21-27, 89. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2018.12.003. (in Chinese)
- [15] 宇野暢芳, 井上一朗, 志村保美, 等. 硬さが異なる鋼材間の摩擦係数に関する基礎的研究 [J]. *日本建築学会構造系論文集*, 1997, 62(494): 123-128. DOI: 10.3130/aajs.62.123_1.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 维氏硬度试验 第1部分: 试验方法: GB/T 4340.1—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Metallic Materials—Vickers Hardness Test—Part 1: Test Method: GB/T 4340.1—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [17] 孟晓欧, 吉泽升. 抛丸处理对ADC12合金挤压铸件表面硬度及粗糙度的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37(3): 280-283. DOI: 10.15980/j.tzzz.2017.03.013.
MENG Xiao'ou, JI Zesheng. Effects of shot blasting on hardness and roughness of surface of ADC12 alloy squeeze casting parts [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2017, 37(3): 280-283. DOI: 10.15980/j.tzzz.2017.03.013. (in Chinese)
- [18] 彭铁红, 侯兆欣, 文双玲, 等. 螺栓孔径与孔型对高强度螺栓摩擦型连接承载能力影响的试验 [J]. *钢结构*, 2007, 22(7): 30-34.
PENG Tiehong, HOU Zhaoxin, WEN Shuangling, et al. Experiment of effects of hole diameter and hole type on bearing capacity of high strength bolt frictional joints [J]. *Steel Construction*, 2007, 22(7): 30-34. (in Chinese)