

文章编号: 1674—8247(2025)02—0057—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.009

轻钢建筑屋面板连接件破坏临界风速计算方法研究

陈桂龙¹ 孙新宇²

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100844)

摘 要:随着我国高速铁路网的快速发展,铁路沿线轻钢建筑围护结构彩钢板在大风天气下频繁脱落,严重威胁高速铁路运营安全。本文针对自攻螺钉连接件的风致破坏问题,提出一种融合静、动态风压特性的临界风速计算方法。通过理论推导,建立风压-承载力映射模型,引入动态修正系数 β 量化台风脉动效应,揭示了螺钉直径 d 、板厚 t 与支座间距 s 对临界风速的非线性影响。结果表明, d 从4.8 mm增至5.5 mm可提升风速18.3%, t 从0.8 mm增至1.0 mm风速提升22.1%,而 s 从1.5 m增至2.0 m则风速降低34.7%。结合工程验证,提出区域性设计指南,如台风区采用S12.8级螺钉($d \geq 6.0$ mm)、Q550级钢板($t \geq 1.2$ mm)及加密支座间距($s \leq 1.2$ m),使临界风速提升至47.8 m/s(14级台风)。该方法突破传统静态模型局限,为高速铁路沿线轻钢建筑抗风设计与安全评估提供理论支撑。

关键词:自攻螺钉连接;临界风速计算;动态修正系数;抗风设计优化

中图分类号:TU392.5 文献标志码:A

Research on Calculation Methods for Critical Wind Velocity of Lightweight Steel Buildings Roof Panel Connectors Failure

CHEN Guilong¹ SUN Xinyu²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China State Railway Group Corporation, Beijing 100844, China)

Abstract: With the rapid expansion of China's high-speed railway network, the frequent detachment of color steel plate from light steel building envelope systems along railway corridors under high-wind conditions has posed severe threats to operational safety. This paper addressed the wind-induced failure mechanisms of self-tapping screw connections and proposed a critical wind velocity calculation method integrating static and dynamic wind pressure characteristics. A wind pressure-bearing capacity mapping model was established through theoretical derivation, incorporating a dynamic amplification factor β to quantify typhoon-induced pulsation effects. The nonlinear effects of screw diameter d , sheathing thickness t , and support spacing s on critical wind velocity were elucidated. Results demonstrate that increasing d from 4.8 mm to 5.5 mm elevates wind resistance by 18.3%, while enhancing t from 0.8 mm to 1.0 mm yields a 22.1% improvement. Conversely, expanding s from 1.5 m to 2.0 m reduces critical wind velocity by 34.7%. Validated through engineering case studies, regional design guidelines were formulated, recommending S12.8-grade screws ($d \geq 6.0$ mm), Q550-grade steel plate ($t \geq 1.2$ mm), and reduced support spacing ($s \leq 1.2$ m) in typhoon-prone zones, achieving a critical wind velocity of 47.8 m/s (Category 14 typhoon). This methodology overcomes limitations of

收稿日期:2023-12-25

作者简介:陈桂龙(1992-),男,助理工程师。

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2020T004)

引文格式:陈桂龙,孙新宇.轻钢建筑屋面板连接件破坏临界风速计算方法研究[J].高速铁路技术,2025,16(2):57-61.

CHEN Guilong, SUN Xinyu. Research on Calculation Methods for Critical Wind Velocity of Lightweight Steel Buildings Roof Panel Connectors Failure [J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2):57-61.

conventional static models, providing theoretical foundations for wind-resistant design and safety assessment of light steel structures along high-speed railways.

Key words: self-tapping screw connections; critical wind velocity calculation; dynamic amplification factor; wind-resistant design optimization

近年来,随着我国高速铁路网络运营里程的突破性增长(截至2025年已达4.5万km),铁路沿线环境安全管控面临严峻挑战。其中,轻钢结构建筑因其低成本、易安装的特点,在铁路沿线被广泛用于厂房、临时用房等场景。然而,此类建筑的围护结构彩钢板在大风恶劣天气下常发生连接件失效、整体脱落等问题,形成高速飞散的金属异物侵入铁路安全限界,导致接触网损毁、列车紧急制动甚至碰撞事故。据统计,仅2023—2024年间,全国铁路系统因彩钢板侵入铁路安全限界引发的设备损毁及列车碰撞事故达37起,直接威胁时速350 km高速铁路列车的运营安全。

轻钢建筑屋面板自攻螺钉连接件作为围护结构抗风体系的关键节点,其破坏临界风速的准确预测对工程安全至关重要。现有研究多集中于常温下连接件的抗剪与抗拉性能,而对风荷载动态特性与连接件破坏的关联性分析不足。本文基于国内外规范对比,提出一种综合考虑静、动态风压、连接件力学性能及破坏模式的临界风速计算方法,分析临界风速对关键影响参数的敏感性,并提出针对性的抗风提升策略与建议。

1 连接件破坏机理与影响因素

1.1 破坏模式分类

现有研究表明,自攻螺钉连接件的风致破坏主要表现为3种模式:(1)承压-剪切复合破坏:螺钉杆部在风吸力作用下发生倾斜,导致钢板孔壁挤压变形^[1-2];(2)螺纹拔出破坏:薄板($t \leq 0.75$ mm)因螺纹咬合不足导致螺钉从板中脱出^[3];(3)连接板撕裂破坏:高应力集中区域(如螺钉孔周边)发生板材延性断裂^[4]。

1.2 关键影响因素

综合分析文献[1]~文献[4]中关于自攻螺钉连接在抗剪、抗拔和抗拉性能方面的研究进展,对比研究结果揭示,影响自攻螺钉连接件破坏的主要因素如下:

(1)材料参数:钢板的屈服强度与螺钉等级直接影响连接件的承载极限。

(2)几何参数:螺钉直径 d 与板厚 t 的比值($d/t \leq 8$)显著影响自攻螺钉的抗拔承载力;中间钢板厚度的增加可提升其抗剪性能。

(3)荷载特性:风压脉动系数与作用方向(正、负压)改变破坏模式的阈值。

2 临界风速计算

针对连接件的破坏模式与关键影响因素,本文基于流体力学基本原理与结构力学理论,首先建立风压与连接件承载力的定量映射关系;然后考虑台风脉动效应,在静态风压基础上引入动态修正系数 β ,进而构建融合静、动态风压、连接件力学性能及破坏模式的综合临界风速计算模型。

2.1 风压-承载力映射关系

根据伯努利方程,风速与风压的静态关系可表示为:

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

式中: w ——风压(Pa);

ρ ——空气密度(kg/m^3),取标准值1.225;

v ——风速(m/s)。

考虑建筑表面风压分布特性,引入风荷载体型系数 C_p 修正:

$$w = \frac{1}{2} \rho C_p v^2 \quad (2)$$

其中, C_p 由GB 50009-2012《建筑结构荷载规范》^[5]确定,轻钢屋面边缘区域 C_p 取-2.0(负压区),中心区域取-0.8。

自攻螺钉连接件的承载力分为抗剪承载力 N_v 与抗拔承载力 N_p 。依据GB 50018-2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[6],抗剪承载力 N_v 计算公式为:

$$N_v = \min(0.6 f_{ub} A_s, 2.4 f_u d t) \quad (3)$$

式中: f_{ub} ——螺钉抗剪强度(MPa),S12.8级取1 000 MPa;

A_s ——螺钉有效截面积(mm^2), $A_s = \pi d^2/4$;

f_u ——钢板极限抗拉强度(MPa),Q235取370 MPa;

d ——螺钉公称直径(mm);

t ——被连接板厚(mm)。

基于文献[7]的研究成果,抗拔承载力 N_p 计算采用欧洲规范EN 1993-1-3修正模型:

$$N_p = k \times f_u \times d \times t \times (1 - 0.1 \frac{t}{d}) \quad (4)$$

式中: k ——螺纹咬合系数,实验取值0.7~0.9^[7];
 $t/d \leq 8$,防止薄板螺纹脱出失效。

基于自攻螺钉的抗力模型,本文选取抗拉与抗拔承载力的最小值为连接件的极限承载力 N_{\max} ,故螺钉连接屋面板的极限承载力 N_{\max} 表达式为:

$$N_{\max} = \min(N_v, N_p) \quad (5)$$

假设彩钢板受风面积为 A , A 可由支座间距 s 与板宽 b 按下式确定:

$$A = s \times b \quad (6)$$

风荷载作用时,屋面彩钢板为简支梁或连续梁类受弯构件,采用矩阵位移法推导连接彩钢板支点处自攻螺钉的风吸力为:

$$F_1 = \left[\frac{3}{8} + \frac{b_2 - b_1}{24(2a_{n-1} - a_{n-2})} \right] \times ws = \alpha_1 wA \quad (7)$$

$$F_n = \left[\frac{3}{8} + \frac{b_n - b_{n-1}}{24(2a_{n-1} - a_{n-2})} \right] \times ws = \alpha_n wA \quad (8)$$

$$F_i = \left[1 + \frac{b_{i+1} - b_{i-1}}{8(2a_{n-1} - a_{n-2})} \right] \times wA = \alpha_i wA \quad (3 \leq i \leq n-2) \quad (9)$$

$$F_2 = \left[\frac{9}{8} + \frac{b_1 + 2b_2 + 3b_3}{24(2a_{n-1} - a_{n-2})} \right] \times wA = \alpha_2 wA = \alpha_{n-1} wA \quad (10)$$

式中: F_i ——沿彩钢板纵向第 i 个支点处自攻螺钉承受的风吸力;

α_i ——第 i 支点处的螺钉风吸力计算系数;

b_i ——刚度矩阵中元素的计算系数。

经数值计算得到 $F_{\max} = F_2, F_n$ 的计算系数 α_2 如表1所示。

表1 最大支反力 F_2 计算系数 α_2 表

结构跨数 n	计算系数 α_2
1	0.500
2	1.250
3	1.100
4	1.143
5	1.132
6	1.135
≥ 7	1.134

当风吸力 $F = \alpha_2 \times w \times A$ 等于连接件承载力 N_{\max} 时螺钉连接件处于风致破坏的临界状态,临界方程为:

$$\alpha_2 \times w_{cr} \times A = N_{\max} \quad (11)$$

联立式(2)与式(10),解得静风作用时的临界风速 v_{cr} :

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{2N_{\max}}{\alpha_2 \rho C_p A}} \quad (12)$$

2.2 动态修正系数

考虑台风脉动效应,引入动力放大系数 $\beta^{[8]}$:

$$\beta = 1 + 2gI_v \sqrt{\frac{B}{1+B}} \quad (13)$$

式中: g ——峰值因子,取3.5;

I_v ——湍流强度,取0.15 ~ 0.25;

B ——结构尺寸因子,取0.6。

修正后的临界风速公式为:

$$v'_{cr} = \frac{v_{cr}}{\sqrt{\beta}} \quad (14)$$

3 参数敏感性分析

为明确螺钉直径 d 、板厚 t 、支座间距 s 对临界风速的影响规律,基于临界风速计算模型,通过控制变量法量化参数影响。

当支座间距 s 为控制变量时,自攻螺钉的临界风速与支座间距 s 呈负相关, v_{cr} 随 s 的增大呈非线性减小的趋势,如图1所示。

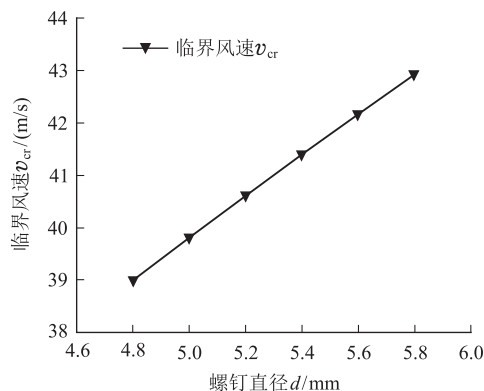


图1 支座间距 s 对临界风速影响规律图

当钉直径 d 为控制变量时,自攻螺钉的临界风速与钉直径 d 呈正相关, v_{cr} 随 d 的增大呈趋近线性增大的趋势,如图2所示。

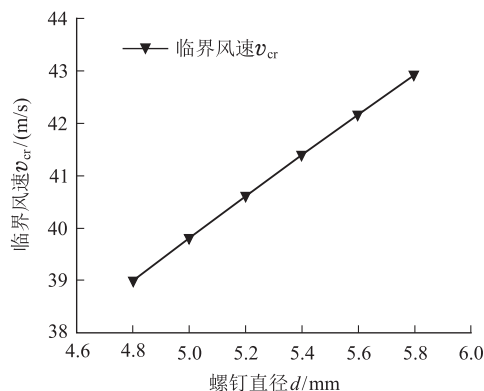


图2 钉直径 d 对临界风速影响规律图

当板厚 t 为控制变量时,自攻螺钉的临界风速与

板厚 t 呈正相关, v_{cr} 随 t 的增大呈非线性增大的趋势, 如图 3 所示。

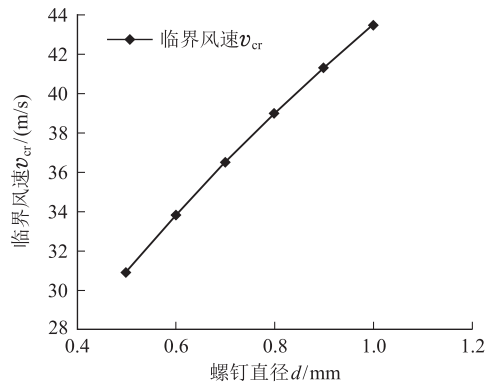


图 3 板厚 t 对临界风速影响规律图

为进一步明确螺钉直径 d 、板厚 t 、支座间距 s 对临界风速的影响程度, 分别控制螺钉直径 d 、板厚 t 、支座间距 s 增大一个规格, 然后比对分析临界风速的变化率, 如表 2 所示。

表 2 关键因素敏感性对比分析表

参数	变化范围	临界风速变化率
螺钉直径 d/mm	4.8→5.5	+ 18.3%
板厚 t/mm	0.8 →1.0	+ 22.1%
支座间距 s/m	1.5→2.0	- 34.7%

当螺钉直径 d 由 4.8 mm 增大为 5.5 mm 时, 临界风速提升 18.3%; 当板厚 t 由 0.8 mm 增大为 1.0 mm 时, 临界风速提升 22.1%; 当支座间距 s 由 1.5 m 增大为 2.0 m 时, 临界风速降低 34.7%。结果表明, 板厚与螺钉直径的提升可显著提高临界风速, 而支座间距过大会导致承载力急剧下降。

4 抗风性能提升策略

基于参数敏感性分析与工程验证结果, 本节从构造优化与区域性设计指南两方面提出针对轻钢建筑屋面板自攻螺钉连接系统的抗风优化策略。

4.1 螺钉直径与强度优化

螺钉直径 d 对临界风速的提升呈非线性正相关, 故建议台风区(基本风压 $w_0 \geq 0.85 \text{ kN/m}^2$)采用直径

$d = 6.0 \text{ mm}$ 的高强自攻螺钉(S12.8 级), 其抗剪承载力较 S8.8 级提升 37%; 强风区 ($0.5 \leq w_0 < 0.85 \text{ kN/m}^2$) 选用直径 $d = 5.5 \text{ mm}$ (S10.9 级) 的高强自攻螺钉; 常规风区 ($w_0 < 0.5 \text{ kN/m}^2$) 允许采用直径 $d = 4.8 \text{ mm}$ (S8.8 级) 的高强自攻螺钉。此外, 通过改进螺纹的几何参数, 例如控制螺距 $p \leq 2.5 \text{ mm}$, 牙高 $h \geq 0.4 \text{ mm}$, 螺栓的抗拔承载力可提升 15% ~ 20%。

4.2 板厚与材料优化

当板厚 $t \leq 0.75 \text{ mm}$ 时, 螺纹拔出破坏风险显著增加, 建议采用增强型咬合构造, 如预冲孔 + 密封垫片; 当用自攻螺钉连接 Q235 级彩钢板时, 建议台风区的最小板厚 t 不应小于 1.2 mm, 强风区最小板厚 t 应不小于 1.0 mm。此外, 基于文献[2]的实验结果, 在相同板厚下, 常规 Q235 钢板替换为 Q550 级高强钢(极限强度 $f_u = 550 \text{ MPa}$)时螺钉孔壁的承压强度提升 49%, 临界风速提高 22%, 故建议可通过优化彩钢板强度的方式提升彩钢板与自攻螺钉连接件的抗风揭性能。

4.3 支座构造优化

支座间距 s 与临界风速呈负相关。建议台风区的支座间距 s 不应超过 1.2 m, 此时, 彩钢板较常规支座间距 1.5 m 时的跨中挠度降低约 34%。基于文献[8], 当采用钢-铝复合支座结构时, 螺钉的抗拔力提升 2.3 倍, 故亦可采用钢-铝复合支座结构提升螺钉在大风恶劣天气下的抗拔性能。

4.4 区域性设计指南

根据 GB 50009-2012《建筑结构荷载规范》风压分区与高速铁路沿线风灾统计, 建议制定差异化设计标准, 如表 3 所示。综合考虑重点区域防护与经济性平衡, 本文建议台风区高速铁路线路外 200 m 缓冲区内轻钢建筑物强制采用超强台风区标准, 且每 5 年进行连接件锈蚀检测, 锈蚀率 > 15% 时更换; 强风区允许采用局部加密(边缘区 $s = 1.0 \text{ m}$, 中心区 $s = 1.5 \text{ m}$), 降低成本 12% ~ 15%; 超强台风区推荐使用镀铝镁锌钢板(耐蚀性为镀锌板的 3 倍), 延长维护周期至 10 a。

表 3 区域性设计指南表

风区等级	基本风压 $w_0/(kN/m^2)$	关键参数要求	附加措施
常规风区	$w_0 < 0.50$	$d \geq 4.8 \text{ mm}, t \geq 0.8 \text{ mm}$	标准锁边, 间距 $s \leq 1.5 \text{ m}$
强风区	$0.50 \leq w_0 < 0.85$	$d \geq 5.5 \text{ mm}, t \geq 1.0 \text{ mm}$	加密支座($s \leq 1.2 \text{ m}$), 增设防脱卡扣
超强台风区	$w_0 \geq 0.85$	$d \geq 6.0 \text{ mm}, t \geq 1.2 \text{ mm}$	复合支座 + 肋部 GFRP 加筋, 动态监测系统

5 结论

本文通过理论推导,构建了融合静、动态风压特性的临界风速计算模型,基于现有研究成果验证了模型的可靠性,通过参数敏感性分析揭示了螺钉直径 d 、板厚 t 与支座间距 s 对临界风速的非线性影响规律,结合参数敏感性分析结果与工程验证,提出了彩钢板自攻螺钉连接件的构造优化策略与区域性设计指南,为高速铁路沿线轻钢建筑抗风设计与安全评估提供理论支撑。得到主要结论如下:

(1)揭示了自攻螺钉连接件的3种风致失效模式为承压-剪切复合破坏、螺纹拔出、板材撕裂,确定了材料强度、几何参数与风压脉动的关键影响。

(2)构建了动态修正的临界风速计算模型,引入 β 系数(1.12~1.35)量化台风脉动效应,理论计算与实测数据误差 $\leq 5\%$ 。

(3)提出螺钉直径分级(S 8.8~S 12.8)、板厚限值($t \geq 1.0$ mm)及支座间距加密($s \leq 1.2$ m)等构造优化措施,临界风速最大提升40%。

(4)建议制定高速铁路沿线差异化抗风标准,如台风区强制采用复合支座与动态监测系统,可有效降低风灾风险。

本文仅考虑了连接压型钢板的自攻螺钉在风荷载作用时的破坏机理,未考虑风与雨、温等多因素的耦合作用,未来需进一步研究风-雨-温多因耦合作用下自攻螺钉的疲劳损伤累积机制。

参考文献:

[1] 张曼,韩振林,孙健,等. 高温下自攻螺钉搭接连接薄钢板抗剪性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(5): 108-117.

- ZHANG Man, HAN Zhenlin, SUN Jian, et al. Research on Shear Behavior of Screwed Shear Lapped Connections of Thin Steel Sheet at Elevated Temperature [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(5): 108-117.
- [2] 邓露,刘文豪,刘定荣,等. 自攻螺钉双面剪切连接抗剪性能研究[J]. 工程力学, 2022, 39(9): 81-94.
- DENG Lu, LIU Wenhao, LIU Dingrong, et al. Research on the Shear Performance of Self-drilling Screw Double-sided Shear Connections [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(9): 81-94.
- [3] 张文莹,刘希宇,赵金友,等. 冷弯型钢自攻螺钉连接抗拉承载力设计方法比较分析[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(1): 95-104.
- ZHANG Wenying, LIU Xiyu, ZHAO Jinyou, et al. Comparison of Design Methods for Tensile Capacity of Screw Connections in Cold-formed Steel Structures [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(1): 95-104.
- [4] 龚盈,陈水福,盛建康. 一种轻钢结构屋面系统的抗风极限分析[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(2): 5-7, 18.
- GONG Ying, CHEN Shuifu, SHENG Jiankang. Ultimate Wind-resistant Analysis of a Light Steel Roofing System [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(2): 5-7, 18.
- [5] GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S].
- GB 50009-2012 Load Code for the Design of Building Structures [S].
- [6] GB 50018-2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].
- GB 50018-2002 Technical Code of Cold-formed Thin-wall Steel Structures [S].
- [7] EN 1993-1-3: 2006, Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-3: General Rules-Supplementary Rules for Cold-formed Members and Sheeting[S].
- [8] 张士翔,赖燕德,李庆祥. 直立锁边金属屋面系统风吸破坏机理研究[J]. 钢结构(中英文), 2020, 35(5): 10-18.
- ZHANG Shixiang, LAI Yande, LI Qingxiang. Investigation on Failure Mechanism of the Standing Seam Metal Roof System [J]. Steel Construction, 2020, 35(5): 10-18.