

# 浅析环槽铆钉连接接头强度评估方法

左世斌<sup>1</sup> 贾云龙<sup>1</sup> 黄波涛<sup>2</sup> 邓涛<sup>1</sup> 王兴亿<sup>1</sup>

(1 眉山中车紧固件科技有限公司 四川 眉山 620032; 2 中车眉山车辆有限公司 四川 眉山 620032)

**摘要:** 与传统螺栓相比, 环槽铆钉独立的圆弧型锁紧槽及安装方式, 使其具有轴力一致性好, 防松性能优良、疲劳寿命优异、免于维护等优点, 目前广泛应用于轨道交通、重卡、矿山机械、钢结构等领域。本文介绍了VDI 2230-Part1 中螺栓连接接头强度评估方法与DVS-EFB 3435-2 技术公告中环槽铆钉连接接头强度评估方法的差异, 简单分析了产生差异的原因。

**关键词:** 环槽铆钉连接; 结构强度评估; VDI 2230

## 0 引言

环槽铆钉由于其独立圆弧型锁紧槽和轴向拉伸铆钉、径向挤压套环的安装方式, 使其具有受力性能好、防松性能优异、连接可靠性高、耐疲劳、安装不受环境影响等优点, 在机械连接领域应用前景广阔, 尤其是在连接强度高、受冲击、动载荷的工况下, 环槽铆钉连接相比螺栓连接更具有优势, 如何评估环槽铆钉连接接头强度是正确使用环槽铆钉的关键。德国焊接协会针对环槽铆钉连接接头开展了一系列仿真分析和试验研究, 在技术公告DVS-EFB 3435-2<sup>[1]</sup>中提出了基于EN 1993和VDI 2230-Part1<sup>[2]</sup>的环槽铆钉连接接头强度评估方法。本文对比分析了VDI 2230-Part1 中高强度螺栓连接接头强度评估方法与DVS-EFB 3435-2 中基于VDI 2230-Part1 环槽铆钉连接接头强度评估方法的差异, 并分析了产生差异的原因。

## 1 基于VDI 2230-Part1 螺栓连接接头强度评估方法简介

VDI 2230-Part1 是德国工程师协会通过大量理论计算和试验总结出的关于螺栓连接接头设计和评估的标准指南, 在机械、车辆工程等领域广泛应用。通过单个螺栓所受的动、静载荷, 从螺栓规格等级、施加预紧力大小、最大工作负载、交变载荷、安装方式等多个方面来合理地设计和评估螺栓连接接头。VDI 2230-Part1 中同心夹紧螺栓连接接头的设计和评估分为14步:

(1) 根据单个螺栓所受外载荷情况, 参考表A7

初步确定螺栓的公称直径和性能等级 $\alpha_A$ 。

(2) 根据螺栓的安装方式, 确定拧紧系数 $\alpha_A$ 。

(3) 根据螺栓受外载荷后预紧力的减少及螺栓连接接头不失效的条件, 确定最小需求预紧力 $F_{Kerf}$ 。

(4) 根据螺栓和被连接件的柔度, 计算载荷因子 $\phi$ , 计算螺栓的附加工作载荷 $F_{SA}$ 和被连接件的工作载荷 $F_{PA}$ 。

(5) 考虑因嵌入、温度引起的预紧力变化, 确定螺栓预紧力的损失 $F_Z$ 、 $\Delta F_{Vth}$ 。

(6) 在获取最小需求预紧力, 预紧力损失、载荷因子的情况下, 确定最小安装预紧力 $F_{Mmin}$ 。

(7) 根据确定的最小安装预紧力 $F_{Mmin}$ 及螺栓安装方式对应的拧紧系数 $\alpha_A$ 计算最大安装预紧力 $F_{Mmax}$ 。

(8) 根据螺栓最大允许装配应力 $\sigma_{red,M}$ 计算螺栓允许的最大装配预紧力 $F_{Mzul}$ , 通过与最大安装预紧力 $F_{Mmax}$ 对比, 校核步骤1选定的螺栓公称直径和性能等级是否满足要求。

(9) 计算螺栓工作应力 $\sigma_{red,B}$ , 校核螺栓的工作应力不应超过螺栓公称屈服强度。

(10) 计算螺栓工作时的交变应力 $\sigma_a$ , 校核螺栓的交变应力 $\sigma_a$ 不应超过螺栓许用疲劳应力幅。

(11) 计算最大装配预紧力时被连接件与螺栓之间接触面的表面应力 $P_{max}$ , 校核表面应力 $P_{max}$ 不应超过被连接件表面许用压应力。

(12) 当螺栓与内螺纹孔连接时, 基于螺栓最大拉伸断裂力小于螺栓或螺母螺纹滑牙的力的原则, 确定最小的螺纹啮合长度 $m_{eff min}$ 。

(13) 校核被连接件之间接触面的抗滑移能力。

首先,校核外载荷作用后螺栓最小残余夹紧力  $K_{KRmin}$  须大于被连接件之间接触面发生相对滑移所需的夹紧力  $K_{KQerf}$ ;其次,当外载荷超过被连接件接触面之间的静摩擦力时,被连接件之间发生相对滑移,校核螺栓承受的剪切应力不应超过其许用剪切强度,同时被连接件承载力不应超过其孔壁承压力。

(14) 确定装配转矩  $M_A$ 。

## 2 环槽铆钉连接接头强度评估方法

环槽铆钉连接和高强度螺栓连接的作用原理及作用方式非常相似,均为将被连接件连接在一起,以防止被连接件出现滑移或分离,因此 VDI 2230-Part1 中螺栓连接接头的部分设计和强度评估原则适用 8.8 级及 10.9 级拉断型和短尾型环槽铆钉连接接头,拉断型和短尾型环槽铆钉结构型式如图 1 所示。德国焊接协会在技术公告 DVS-EFB 3435-2 中详细介绍了同心夹紧环槽铆钉连接接头的设计及评估方法。

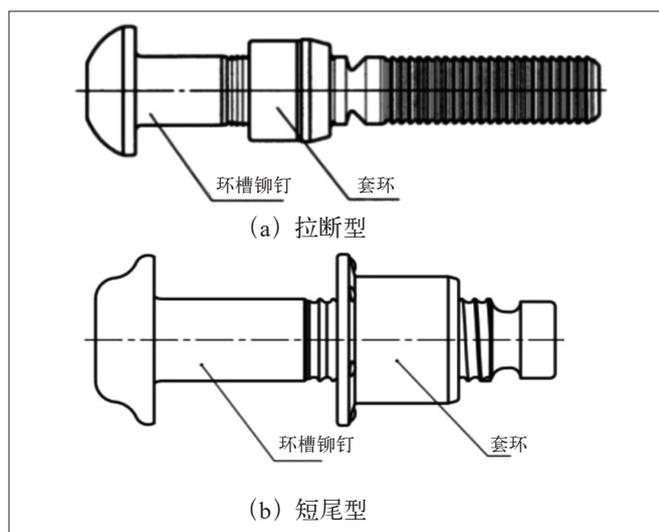


图 1 环槽铆钉结构型式

### 2.1 确定最小夹紧力 $K_{Kerf}$

环槽铆钉连接接头不失效的最小夹紧力为  $K_{Kerf} \geq \max(F_{KQ}; F_{KP})$ , 其中,通摩擦传递横向载荷不发生滑移失效条件:

$$F_{KQ} = F_{Qmax} \cdot S_G / q_F \cdot \mu_{Tmin} \quad (1)$$

式中:  $F_{Qmax}$  — 环槽铆钉连接最大横向外载荷;

$S_G$  — 安全系数,参考 VDI 2230-Part1 静载荷工况取 1.2,动载荷工况取 1.8;

$q_F$  — 摩擦面数量;

$\mu_{Tmin}$  — 连接面最小摩擦系数。

纵向拉伸不发生分离失效条件:

$$F_{KP} = A_D \cdot P_{imax} \quad (2)$$

式中:  $A_D$  — 拉伸应力截面积;

$P_{imax}$  — 最大拉伸强度。

### 2.2 拧紧系数 $\alpha_A$

环槽铆钉的拧紧系数为环槽铆钉安装后夹紧力的离散率指数。由于环槽铆钉安装过程不受表面状态、环境等因素的影响,其安装后的夹紧力一致性高,离散率小,试验研究表明<sup>[3]</sup>,环槽铆钉安装后夹紧力的离散率在 5% 以内,参考 VDI 2230-Part1 表 8 中拧紧系数对应的离散率,环槽铆钉的拧紧系数取 1.05。

### 2.3 初步确定环槽铆钉直径和性能等级

为了初步确定环槽铆钉的直径和性能等级,首先粗略计算环槽铆钉连接接头的最大需求夹紧力  $F_{Mmax}$ ,在最大需求夹紧力工况下计算环槽铆钉需求应力截面积  $A_{Serf}$ ,并与不同等级环槽铆钉的设计应力截面积对比,即可初步确定环槽铆钉的直径和性能等级,具体计算如下:

$$F_{Mmax} = \alpha_A \cdot F_{Mmin} = \alpha_A \cdot [F_{Kerf} + (1 - \phi) \cdot F_A + F_Z + \Delta F_{Vth}] \quad (3)$$

其中:

$$F_{Mmin} = A_{Serf} \cdot v \cdot R_{p0.2} \quad (4)$$

将式 (4) 带入式 (3) 计算出最大需求夹紧力工况下环槽铆钉需求应力截面积:

$$A_{Serf} = \alpha_A \cdot [F_{Kerf} + (1 - \phi) \cdot F_A + F_Z + \Delta F_{Vth}] / v \cdot R_{p0.2} \quad (5)$$

式中:  $\phi$  — 载荷因子,参考《螺纹紧固件联接工程》<sup>[4]</sup> 碳钢被连接件取 0.2,铝合金被连接件取 0.5;

$v$  — 环槽铆钉设计夹紧力对应强度与环槽铆钉公称屈服强度的比值。

表 1<sup>[1]</sup> 为不同等级环槽铆钉公称抗拉强度、公称屈服强度、夹紧力强度 / 公称屈服强度比值和剪切强度 / 公称抗拉强度比值。

表 1 环槽铆钉公称抗拉强度、公称屈服强度、夹紧 / 屈服比和剪切 / 抗拉比

性能等级	公称抗拉强度 $R_m$ /MPa	公称屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	夹紧 / 屈服比 $v$	剪切 / 抗拉比 $\tau / R_m$
8.8	800	1000	0.775	0.55
10.9	640	900	0.688	0.55

### 2.4 计算实际载荷因子 $\phi'$ 、工作载荷 $F_{SA}$ 、 $F_{PA}$

根据初步选定的环槽铆钉直径和性能等级,计算环槽铆钉连接接头的实际载荷因子  $\phi'$ 、环槽铆钉附加工作载荷  $F_{SA}$ 、被连接件工作载荷  $F_{PSA}$ 。计算方法与 VDI 2230 中螺栓连接一致,将环槽铆钉连接接头转换成类似 VDI 2230-Part1 中螺栓连接接头的变形

锥,环槽铆钉视为拉紧弹簧,被连接件视为压缩弹簧,载荷因子 $\phi' = \delta_p / (\delta_{SRB} + \delta_p)$ ,其中 $\delta_p$ 为被连接件的柔度, $\delta_{SRB}$ 为环槽铆钉的柔度,施加外载荷后环槽铆钉的附加工作载荷 $F_{SA} = \phi' \cdot F_A$ ,被连接件的工作载荷为 $F_{PA} = (1 - \phi') \cdot F_A$ 。

## 2.5 计算实际夹紧力的损失 $F'_Z$ 、 $F'_{Vth}$

考虑因嵌入、温度引起的预紧力变化,确定实际夹紧力的损失 $F'_Z$ 、 $F'_{Vth}$ ,环槽铆钉连接接头夹紧力的损失主要受被连接件的塌陷、环槽铆钉和被连接件热膨胀系数等的影响,其计算方法与螺栓一致。

## 2.6 计算实际最小需求夹紧力和最大需求夹紧力

在获得接头不失效的最小夹紧力 $F_{Kerf}$ ,实际载荷因子 $\phi'$ 、夹紧力损失 $F'_Z$ 、 $\Delta F'_{Vth}$ 等的情况下,计算环槽铆钉连接接头实际最小需求夹紧力,如式(6)所示:

$$F'_{Mmin} = F_{Kerf} + (1 - \phi') \cdot F_{Amax} + F'_Z + \Delta F'_{Vth} \quad (6)$$

进一步计算获得环槽铆钉连接接头实际最大需求夹紧力:

$$F'_{Mmax} = \alpha_A \cdot F'_{Mmin} \quad (7)$$

在获得环槽铆钉连接接头实际最大需求夹紧力后,根据选定环槽铆钉的直径和性能等级,计算选定环槽铆钉的设计夹紧力 $F_{Mzul} = v \cdot A_s \cdot R_{p0.2}$ ,当 $F_{Mzul} \geq F'_{Mmax}$ 表明初步选定环槽铆钉满足要求,否则应更换直径更大的环槽铆钉或提高性能等级以满足要求。

## 2.7 工作应力校核

环槽铆钉在工作状态下轴向最大的载荷 $F_{Smax}$ 如式(8)所示:

$$F_{Smax} = F_{Mzul} + \phi' \cdot F_{Amax} - \Delta F'_{Vth} \quad (8)$$

进一步计算环槽铆钉在公称应力截面积下的工作应力,如式(9)所示:

$$\sigma_{Zmax} = F_{Smax} / A_s \quad (9)$$

在获取工作应力情况下,工作应力安全系数应满足式(10)的要求。

$$S_F = R_{p0.2} / \sigma_{Zmax} \geq 1.1 \quad (10)$$

## 2.8 疲劳强度校核

环槽铆钉的疲劳强度校核与螺栓一致,即环槽铆钉工作时,外载荷作用产生的交变应力需小于环槽铆钉的许用疲劳应力幅。环槽铆钉的交变应力 $\sigma_a$ 可由式(11)计算获得,DVS-EFB 3435-2中给出了不同型式、不同等级环槽铆钉的许用疲劳应力幅。

$$\sigma_a = 0.5 \cdot (F_{Smax} - F_{Smin}) / A_s \quad (11)$$

## 2.9 被连接件表面应力校核

环槽铆钉与被连接件之间的接触面受到轴向载荷作用可能导致接触面被压溃,因此需要校核环槽铆钉连接接头在安装过程和工作状态下接触面产生的应力不超过被连接件的表面许用压应力。由于环槽铆钉在安装过程中夹紧力的峰值会超过环槽铆钉的设计夹紧力 $^{[5]} F_{Mzul}$ ,为了保证安装过程中环槽铆钉与被连接件之间的接触面不被压溃,安装过程中接触面最大压力取 $F_{Anz} = 0.95 \cdot A_s \cdot R_{p0.2}$ ,对应安装过程接触面的最大应力 $P_{Mmax} = F_{Anz} / A_{pmin}$ ,其中: $A_{pmin}$ 取环槽铆钉头部和套环与被连接件接触面面积较小者。环槽铆钉连接接头工作状态接触面的应力 $P_{Bmax} = (F_{Vmax} + F_{Smax} - \Delta F'_{Vth}) / A_{pmin}$ ,环槽铆钉与被连接件之间接触面不被压溃的条件是被连接件表面抗压强度 $P_G \geq \max(P_{Mmax}; P_{Bmax})$ 。

## 2.10 校核接触面的抗滑移能力

校核接触面抗滑移能力方法与螺栓相同。首先,当被连接件界面之间通过静摩擦力防止滑移时,需要校核外载荷作用后最小残余夹紧力 $F_{KRmin}$ 大于被连接件界面之间相对滑移需要的夹紧力 $F_{KQerf}$ ;其次,外载荷超过被连接件界面之间的静摩擦力导致被连接件之间发生相对滑移,需要校核环槽铆钉承受的剪切应力不超过其许用剪切强度,同时校核被连接件受力不超过其孔壁承压压力。

## 3 评估方法的差异及其原因

环槽铆钉连接接头和螺栓连接接头基于VDI 2230进行设计和评估的原则均为:根据单个环槽铆钉或螺栓的受力工况,考虑安装方式、预紧力损失等多个因素,选择合适的规格和性能等级,确保环槽铆钉或螺栓在工作时不发生屈服、疲劳,被连接件不发生滑移、压溃。环槽铆钉因其结构、安装方式等与螺栓不同,评估方法存在一定的差异,主要差异如下。

### 3.1 直径和性能等级的确定及校核

螺栓公称直径和性能等级的确定是根据VDI 2230中表7的经验数据初步确定,然后计算在外载荷作用下螺栓最大的安装预紧力,再与90%螺栓公称屈服强度对应轴向载荷进行对比,确定最终的公称直径和性能等级。环槽铆钉直径和性能等级的确定:首先,初步估算连接接头最大需求夹紧力对应的环槽铆钉应力截面积,并与不同等级环槽铆钉的设计应力截面积进行对比,初步确定环槽铆钉的直径

和性能等级；其次，根据选定的环槽铆钉的直径和性能等级计算实际最大需求夹紧力，确保其小于环槽铆钉的设计夹紧力。

### 3.2 拧紧系数

螺栓的拧紧系数是变化的，VDI 2230 中表 8 给出了不同安装方式对应的拧紧系数，而环槽铆钉由于其技术原理和安装方式的不同<sup>[6]</sup>，拧紧系数是唯一确定的。

### 3.3 工作应力的校核

螺栓在工作载荷下的应力的安全系数  $S_F \geq 1$ ，而环槽铆钉由于套环强度远小于铆钉，在工作载荷接近铆钉公称屈服强度时，套环可能发生屈服塌陷，导致夹紧力损失<sup>[5]</sup>，为了保证连接的可靠性，环槽铆钉工作应力不应大于其公称屈服强度的 90%，即安全系数  $S_F \geq 1.1$ 。

### 3.4 被连接件表面应力校核

螺栓预紧力在转矩作用下逐步增加至设定值，安装过程中，螺栓与被连接件之间接触面的最大载荷为螺栓最大装配预紧力，校核安装过程中接触面应力取螺栓最大装配预紧力对应的应力。环槽铆钉安装采用轴向拉伸铆钉、径向挤压套环的安装方式，安装过程中动态夹紧力达到某一峰值后下降至设计夹紧力，因此安装过程中被连接件接触面的最大轴向载荷将超过环槽铆钉最大需求夹紧力；试验显示<sup>[7]</sup>环槽铆钉安装过程中最大动态夹紧力不大于 95% 环槽铆钉公称屈服强度对应的轴向力，因此校核环槽铆钉安装过程中被连接件的最大表面应力取 0.95% 环槽铆钉公称屈服强度对应的接触面应力。

## 4 结语

环槽铆钉连接和高强度螺栓连接的作用原理及

作用方式相当。本文详细介绍了 DVS- EFB 3435-2 中环槽铆钉连接接头基于 VDI 2230-Part1 的强度评估方法及步骤，并与 VDI 2230-Part1 中螺栓连接接头的强度评估方法进行对比，分析了两者的差异及产生原因，对根据 DVS-EFB 3435-2 进行环槽铆钉连接接头设计和强度评估的设计人员有一定的指导作用。

### 参考文献：

- [1]DVS-EFB 3435-2.Lockbolt systems-calculation of connections according to Eurocode 3 and VDI 2230-Part 1[R].German Welding Society,2017.
- [2]VDI 2230-1-2015.Systematic calculation of highly stressed bolted joints-joints with one cylindrical bolt[S].Berlin:German Society for Science and Technology,2015.
- [3]易志宏,刘浪,田波,等.环槽铆钉在公路桥梁中应用的试验研究[J].公路,2022(01):104-108.
- [4]酒井智次,柴之龙.螺纹紧固件联接工程[M].北京:机械工业出版社,2016:16.
- [5]Glienke R,Schwarz M,Ebert A.Joints with lockbolts in steel structures-Part 1:Lockbolt technology[J].Steel Construction,2020(02):120-127.
- [6]张钦,贾云龙.风电机组用新型紧固连接技术疲劳性能试验研究[J].东方汽轮机,2020(04):55-58.
- [7]Schwarz M,Glienke R,Wegener F,et al.Calculation of lockbolt joints in mechanical engineering[J].Materials Science & Engineering Technology,2020(03):267-283.