

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.06.021

波形护栏板冷弯成型机组传动轴断裂失效分析及对策研究

范亮¹,王江²,王文斌¹,韩建华¹,李树强¹

(1. 甘肃路桥新锐交通科技有限责任公司,甘肃 兰州 730100; 2. 兰州理工大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:针对波形梁钢护栏板冷弯成型机组在运行过程中轧辊传动轴突然发生断裂失效问题,对传动轴宏观断口形貌、成型辊道次、成型弯曲角度分配以及成型过程进行有限元模拟研究,分析了轧辊传动轴断裂的原因。结果表明,成型辊道次和成型弯曲角度分配设计合理,轧辊传动轴断裂属于应力过载失效。断裂部位位于轧辊传动轴 $\phi 60$ mm 与 $\phi 65$ mm 轴台阶过渡圆角根部,在强弯扭应力作用下发生断裂失效。针对以上结论,给出了相应的解决方案,减少了停机次数,提高了波形梁钢护栏板生产效率。

关键词:波形护栏板;冷弯成型;传动轴;有限元分析;状态监测

中图分类号:TB124 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0077-04

Fracture Failure Analysis and Countermeasure Research on Transmission Shaft of Cold Bending Forming Unit with Corrugated Guardrail

FAN Liang¹, WANG Jiang², WANG Wenbin¹, HAN Jianhua¹, LI Shuqiang¹

(1. Gansu Highway and Bridge Xinrui Transportation Technology Co., Ltd., Lanzhou 730100, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To tackle the trouble of sudden breaking of roller drive shaft in the process from cold bending to machine forming, discussion on corrugated beam steel guardrail plate, the macro-fracture morphology of the drive shaft, the pass times of the forming roller, the distribution of the forming bending angle and the finite element simulation of the forming process is conducted and reasons for the breaking is analyzed. The results show that the distribution of roll passes and bending angle is reasonable, but the fracture is due to stress overload failure. With the fracture position located at the root of the step transition fillet between $\phi 60$ mm and $\phi 65$ mm on the roller drive shaft, the breaking occurs under the action of strong bending and torsion stress. For the above conclusions, the corresponding solutions are given to reduce the downtime and improve the production efficiency of corrugated beam steel guardrail plate.

Keywords: corrugated guardrail; cold-forming; drive shaft; finite element analysis; condition monitoring

0 引言

波形梁钢护栏板冷弯成型设备主要用于钢板成型作业,其工况复杂、工作强度大^[1]。该设备传动轴属于冷弯成型设备的关键传动部件,主要功能是将电机的转动和力矩传递到工作机架的轧辊上^[2]。传动轴的可靠性对波形梁钢护栏板冷弯成型过程中的安全性至关重要,传动轴一旦出现断裂故障,则会造成生产线停机或生产安全事故发生,会给企业带来巨大的经济损失。甘肃某公司在生产三波形梁钢护栏板过程中,冷弯成型设备传动轴发生断裂失效,其使用寿命远低于其设计寿命。

国内外学者对传动轴的失效进行了大量研究。XIA M 等^[3]建立了传动轴的力学模型,解决了结构在交变应力和冲击载荷下的动态响应问题。张锦光等^[4]针对设计传动轴振型问题,通过 Abaqus 有限元软件进行了理论计算,得到了传动轴振型图像以及振幅数值。赵颖^[5]运用最小二乘估计法对设备运行状态进行定量分析,并开发了

冷弯成型设备故障诊断系统,进行冷弯成型设备运行状态识别和故障分析。

以上研究主要从三维建模仿真方面对传动轴断裂失效进行了分析,忽略了成组设备相互间的影响。针对三波形梁钢护栏板冷弯成型设备传动轴断裂失效故障,本文从成型轧辊道次、成型角度分配以及其受力等多角度对传动轴受力影响因素进行研究,分析了该传动轴发生断裂失效的原因,并提出有效对策,避免再次发生传动轴断裂事故。

1 传动轴断裂情况

波形梁钢护栏板冷弯成型机组整体尺寸为 12 022×2 313(mm×mm),总承重 30 t,总功率为 190 kW,共装有 18 道次成型轧辊。第一道次为进料辊,后十七道次为三波形梁钢护栏板成型道次。在实际生产作业中,传动轴发生断裂失效的部位位于轴颈与轴台阶过渡圆角根部位置,如图 1 所示。该传动轴系外圆直径为 65 mm,所用材料为 45 钢,整体调质处理。

第一作者简介:范亮(1982—),男,甘肃天水人,高级工程师,本科,研究方向为生产系统工程。

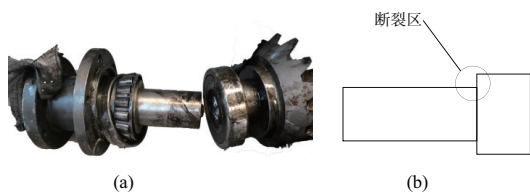


图1 传动轴失效断裂位置图

2 传动轴断裂原因分析

传动轴断裂的因素很多,包括本身的因素,即传动轴设计所受的局限性以及设计的不合理都会导致传动轴断裂;外部因素包括冷弯成型设备工作辊和支撑辊的设计以及是否过载、成型轧辊道次、成型角度分配等。因此本文对传动轴断口、轧辊工作时的状态、成型轧辊道次和成型角度分配进行分析。

2.1 宏观断口分析

冷弯成型设备传动轴的左侧断口宏观形貌如图2所示。由图2可以看出,传动轴断裂部位位于 $\phi 60\text{ mm}$ 与 $\phi 65\text{ mm}$ 轴台阶过渡圆角根部,传动轴断口呈扭转塑性变形。传动轴断口根据表面特征不同分为两个区域,断口1#区和断口2#区。1#区为瞬断区,位于断口中心且粗糙,呈亮灰色凸起;2#区呈星形状沿扭转变形方向发生变形。整个断口为典型的扭断断口,说明断口的应力过大,判断失效是由于应力过载造成。

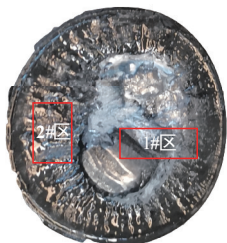


图2 传动轴断口宏观图

2.2 成型轧辊道次分析

成型道次的多少直接影响着机组设备的使用性能和产品质量。小奈弘^[1]根据板料成型各种断面形状和成型道次数的关系,提出了对称断面成型道次数确定方法和非对称断面成型道次数确定方法,并建立了成型道次数与形状因子函数的曲线。

该企业生产的三波形梁钢护栏板断面图如图3所示,

属于对称断面图。根据文献[1]的对称断面成型道次数确定方法和对称断面的形状因子函数曲线图,为分析冷弯成型道次数合理性提供了参考依据。对称断面的形状因子与成型道次图如图4所示。

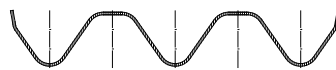


图3 三波形梁钢护栏板断面图

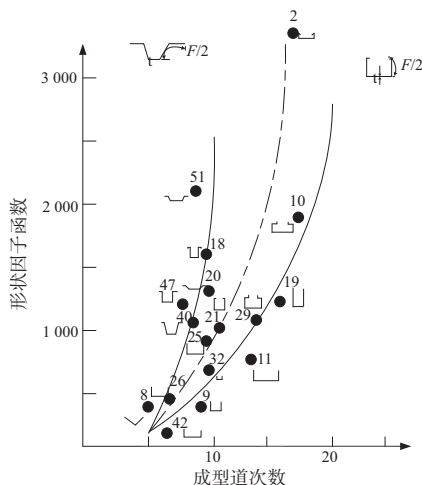


图4 对称断面的形状因子与成型道次

对称断面的形状因子函数 φ_1 为

$$\varphi_1 = F \cdot n \cdot t \quad (1)$$

式中: F 为立边长度,mm; n 为成型弯角数量; t 为板胚厚度,mm。

在计算立边长度时,不考虑不参与变形的腹板宽度。由公式(1)、三波形梁钢护栏板截面形状和图5可知,波形梁钢护栏板成型道次数 $N=18$,与实际设备成型道次数吻合。故成型轧辊道次设计合理,不会造成传动轴断裂。

2.3 弯曲角度分配分析

弯曲角度的分配是否合理对产品质量好坏和设备平稳运行有直接的影响。因此弯曲角度的分配一定要符合弯曲角度大小的分配总规律^[6]。对三波形梁钢护栏板成型过程中各弯曲角以及弯曲边进行如图5所示的定义。三波形梁钢护栏板冷弯成型工艺中,为实现胚料钢板咬入成型道次,在冷弯生产线头部设置一个夹送道次,通过夹送辊推动胚料钢板顺利咬入成型道次轧辊辊缝,之后每一道次弯曲角度逐渐增大。

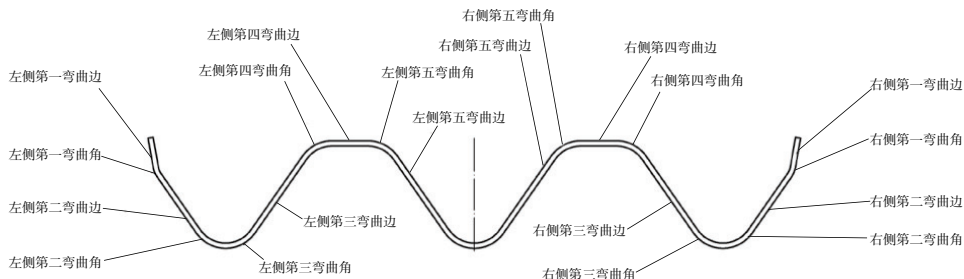


图5 各弯曲边及弯曲角定义示意图

根据文献[1]提出的弯曲角度分配方案,结合三波形梁钢护栏板断面形状,采用对称截面的弯曲角度分配公式:

$$\cos\theta_i = 1 + (1 - \cos\theta_0) \left[2 \left(\frac{i}{N} \right)^3 - 3 \left(\frac{i}{N} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: θ_0 为断面的最终成型角度, ($^\circ$); i 为成型道次,取 $i = 1, 2, \dots, 18$; θ_i 为每道次的成型角度, ($^\circ$)。

三波形梁钢护栏板冷弯成型总道次为 18, 并且为等间距成型, 可得到 $\theta_i = 0^\circ, 8^\circ, 18^\circ, \dots, 80^\circ$ ($i = 1, 2, \dots, 18$)。成型角度分配如表 1 所示。根据生产现场实践经验, 对于冷弯成型机组, 前三道会采用闭孔式, 弯曲角不超过 20° , 所以设计的弯曲角度符合要求。

表 1 冷弯成型各道次与成型角度分配

道次	成型角	弯角成型角度/ $^\circ$
第一道次	无	0
第二道次	左侧第五弯曲角, 右侧第五弯曲角	8
第三道次	左侧第五弯曲角, 右侧第五弯曲角	18
第四道次	左侧第五弯曲角, 右侧第五弯曲角	32
第五道次	左侧第五弯曲角, 右侧第五弯曲角	42
第六道次	左侧第五弯曲角, 右侧第五弯曲角	51
第七道次	左侧第一弯曲角, 右侧第一弯曲角	13
第八道次	左侧第五弯曲角, 右侧第五弯曲角	57
第九道次	左侧第四弯曲角, 右侧第四弯曲角	18
第十道次	左侧第四弯曲角, 右侧第四弯曲角	31
第十一道次	左侧第四弯曲角, 右侧第四弯曲角	42
第十二道次	左侧第四弯曲角, 右侧第四弯曲角	51
第十三道次	左侧第三弯曲角, 右侧第三弯曲角	57
第十四道次	左侧第二弯曲角, 右侧第二弯曲角	57
第十五道次	左侧第三弯曲角, 右侧第三弯曲角	54
第十六道次	左侧第一弯曲角, 右侧第一弯曲角	81
第十七道次	左侧第一弯曲角, 右侧第一弯曲角	80
第十八道次	左侧第一弯曲角, 右侧第一弯曲角	80

2.4 冷弯成型过程有限元模拟及分析

1) 有限元模型建立

使用三维软件建立板料和上下轧辊三维图模型。根据国家标准^[7], 三波形梁板采用 750 mm 宽的薄型钢板连续滚压成型, 其尺寸规格为 4 320 mm×506 mm×85 mm×4 mm。上下辊尺寸为 245 mm、机架间距为 750 mm, 第一机架为导入辊, 没有孔型。在模拟过程中选取第二机架作为实际轧制机架, 其轧辊工作转速为 35 r/min。根据实际工作情况, 上辊和下辊为工作辊。工作辊以恒定的转速旋转, 板料以一定恒定的初速度向辊缝运动, 进入辊缝后, 靠摩擦力带动板料运动, 完成弯曲变形过程。

2) 模拟及分析

考虑到多道次冷弯成型计算规模大且为薄板轧制, 并

且传动轴断裂部位位于机组前几道次, 故对第二道次进行模拟分析, 按有限元模型进行计算, 计算条件如表 2 所示。轧辊采用刚性辊, 轧辊和板料采用 SOLID164 单元划分网格, 网格尺寸为 10×10 。板料成型有限元模拟过程如图 6 所示。

表 2 冷弯成型过程模拟计算参数

屈服强度/ MPa	弹性模量/ Pa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	速度/ (r/min)
刚体	2.1×10^{11}	7 820	0.3	35
235	1.8×10^3	7 850	0.3	—

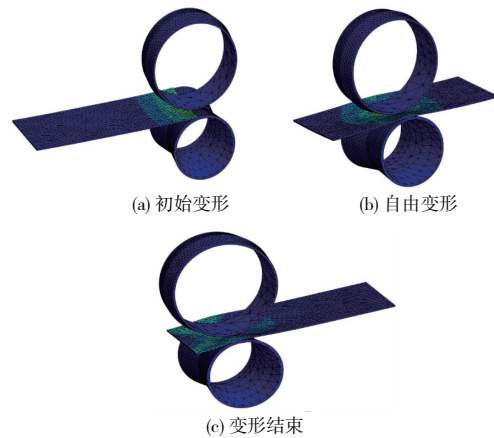


图 6 板料冷弯成型过程有限元模拟

通过对板料成型有限元模拟过程进行分析可以得出: 在模拟过程中, 板料以一定恒定的速度向辊缝运动, 板料成形状态稳定, 没有出现边波以及翘边等现象, 与实际变形规律相符。

图 7 为板料有限元模型在各阶段成形的等效力图。从图中可以看出, 板料从初始进入到退出这个过程中, 板料所受的最大应力均出现在板料与轧辊接触的弯角处, 其各阶段的最大应力分别为 114.9 MPa、141.1 MPa 和 140.6 MPa; 板料在不同阶段受力变化呈现为先增大后趋于平稳趋势; 与板料的屈服强度作对比发现, 各阶段所受的最大应力小于额定屈服强度。因此板料与轧辊传动轴在工作中都不会出现断裂失效现象, 设计合理。

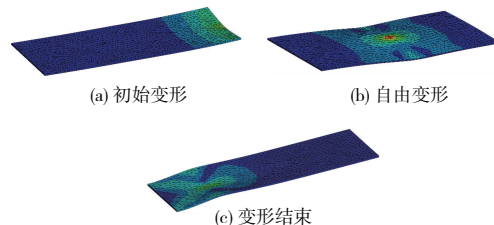


图 7 板料成形等效力图

根据得到的板料成形过程应力数据, 处理得到的应力-位移曲线图如图 8 所示。由图 7 和图 8 可以看出, 整个过程应力最大处位于自由变形区, 最大的 Von Mises 等效应力为 141.1 MPa, 出现在自由变形区板料与工作辊弯曲接触区域。

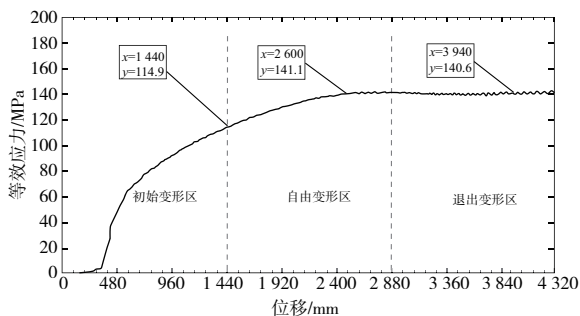


图8 应力-位移曲线图

根据轧机的电机额定功率 P 为 110 kW, 电机的额定转速 n 为 1 000 r/min, 得出传动轴的额定转矩 T 为

$$T = 9\,549 \times \frac{P}{n} = 9\,549 \times \frac{110}{1\,000} = 1\,050.39 \text{ (N} \cdot \text{m)}。$$

轧辊传动轴的材料为 45 钢, 通过查阅手册^[8] 得到传动轴材料的屈服极限为 345 MPa, 最大抗拉强度为 740 MPa。根据分析可知, 板料成型过程中的 Von Mises 等效应力远小于传动轴的额定转矩和传动轴材料的屈服极限 345 MPa, 满足第四强度要求条件, 传动轴的材料选取和设计是符合实际要求的, 不会造成传动轴断裂失效。

3 结果分析

通过研究分析, 发现成型轧辊道次设计和成型角度分配合理, 符合设计要求和实际运用; 冷弯成型过程中板料和传动轴所受最大应力均在设计的安全范围之内, 能满足生产的需要; 在正常的运行情况下, 都不会造成传动轴突然断裂。传动轴突然断裂是由于应力过载造成的。在传输过程中, 因为板料较薄可能粘着在一起, 两块板料直接进入导向辊, 导致后道次传动轴转矩迅速升高, 从而造成了传动轴的突然断裂。在实际生产过程中也验证了导致传动轴突然断裂的主要原因是两块板料粘附在一起同时进入辊缝, 导致应力增大超过了额定值。

4 改进措施与效果

为防止三波形梁钢护栏板冷弯成型设备传动轴断裂故障, 应避免过载和应力过大, 为三波形梁钢护栏板冷弯成型设备提出了一套解决方案: 在传动轴上布置转矩传感器, 利用无线传输技术动态获取传动轴的实时转矩信息; 采用信号处理技术, 在上位机上及时对机组运行趋势做出预测。当传动轴的实际转矩超过额定转矩时, 报警并停机

检查, 防止机组传动轴发生损坏, 减少了非正常停机次数。

随着状态监测系统的实施, 三波形梁钢护栏板冷弯成型设备的故障发生率大幅度降低, 异常停机次数减少 91%, 日均产量提升 9.6%, 生产效率大幅提高, 维修成本降低, 经济效益明显提升。

5 结语

1) 针对传动轴的断裂失效, 构建了冷弯成型过程有限元模型, 对传动轴宏观断口、成型轧辊道次、成型角度分配以及冷弯成型过程进行了有限元模拟研究分析。研究表明, 成型轧辊道次设计合理、成型角度分配合理、板料与轧辊传动轴受力合理。

2) 从宏观断口形貌检查发现传动轴的断裂失效位置集中于直径为 $\phi 60$ mm 与 $\phi 65$ mm 轴台过渡圆角根部, 此处不仅承受最大剪切力, 还存在应力集中, 在强转矩作用下突然断裂。验证了波形梁钢护栏板冷弯成型机组传动轴断裂属于应力过载失效。

3) 提出了一套完整的解决方案。设计了一套状态监测系统, 在传动轴上合理布置了转矩传感器, 实时获取与显示传动轴的转矩, 在转矩超过临界值时提前预警并停机检查。通过生产实践证明, 发现此方案能够降低故障发生率, 经济效益明显提升。

参考文献:

- [1] 小奈弘, 刘继英. 冷弯成型技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 庞宇江. R2 轧机主传动轴的力学分析[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- [3] XIA M, ZHAO K L, ZHAO H X, et al. Study on failure of transmission shaft based on finite element and fracture analysis technology[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1043(5): 052033.
- [4] 张锦光, 韩会永, 马祥禹, 等. 碳纤维复合材料汽车传动轴设计与振动特性分析[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 49-52.
- [5] 赵颖. 冷弯成型设备故障诊断智能系统的构建研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2014.
- [6] 叶奔. 冷弯轧辊设计与工艺参数优化的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.
- [7] GB/T 31439.2—2015 波形梁钢护栏 第 2 部分: 三波形梁钢护栏[S].
- [8] 成大先. 机械设计手册(3)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

收稿日期: 2021-05-14