DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2022.12.1901

热轧大规格角钢精轧断辊分析与改进

Analysis and Improvement of Broken Roll during Finishing Roll for Large Size Hot Rolled Angle Steel

供稿|王君珂，刘杨，孙少华，刘凯，苏磊，杨春生，王浩川，张海生 / WANG Junke, LIU Yang, SUN Shaohua, LIU Kai, SU Lei, YANG Chunsheng, WANG Haochuan, ZHANG Haisheng

内容导读

在大规格角钢热轧生产中，角钢精轧孔型一般使用蝶式孔进行轧制。受蝶式孔型槽深度不同的影响，实际轧槽受力并不均匀，曾发生断辊事故，造成严重的质量与安全隐患。轧辊断裂于孔型凹槽最小直径处，断口呈完全切断状，这种断裂与角钢轧辊的使用状态、受力状态有关。本文从轧制过程对大规格角钢轧辊断裂事故进行分析，研究了温度、轧制规程、轧辊状态等因素对精轧辊断裂的影响，并提出改进方案。

大规格角钢主要用于电力铁塔、塔基及各类大型支撑结构中。其热轧过程采用闭口式切分粗轧孔+蝶式孔+成品孔的设计思路[1]，通过切分孔与蝶式孔配合将矩形坯轧制成蝶形钢料，再经过精轧成型精确控制断面尺寸，最终进入成品孔轧出角钢。实际热轧过程中轧辊处于复杂的应力状态，工作环境恶劣。为保障最终成品形状，精轧蝶形孔型顶尖角度已接近 90°，见图 1。导致实际生产过程中顶角疲劳磨损速度明显大于其他位置，甚至偶发轧辊断裂事故，因此有必要研究其断裂发生的原因，采取有针对性的措施，避免轧辊断裂事故发生。

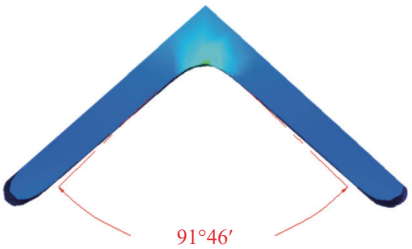


图 1　孔型顶角示意

角钢精轧辊的断裂形式

在角钢的生产过程中，轧辊断裂事故时有发生，因生产工艺条件的差异，轧辊的断裂形式也有所不同，常见的角钢轧辊断裂形式见表 1。

角钢精轧辊常见断裂为形式 3，孔型槽深处平直切断，在精轧 200 mm×20 mm 角钢过程中突然出现轧辊孔型断裂，轧辊断裂位置为上轧槽凹槽处，见图 2。轧辊断裂面整齐，断裂面切断整个轧辊，切断处有 2 mm 左右锈蚀层，未发现明显夹杂或砂眼，见

作者单位：河钢唐钢中厚板公司，河北　唐山　063000

表 1　常见角钢轧辊断裂形式

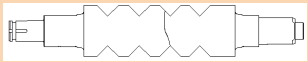
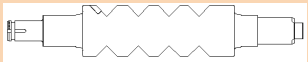
序号	断裂示意	断裂特征
1		轧辊沿孔型槽不规则断裂，端口位置附近有明显裂纹。
2		产生与孔型槽位边部，呈块状脱落。
3		断裂于孔型凹槽最深处，整齐断裂，断口平直。
4		沿辊颈断裂，经过槽位断孔型最深处。

图 3。轧辊断口宏观形貌符合应力脆断特点，即在轧辊表面，存在过高的应力作用，在轧辊表面首先产生疲劳微裂纹并逐渐向内扩展，使芯部承受更大应力，导致轧辊突然断裂[2]。

图 2　轧辊断裂状态

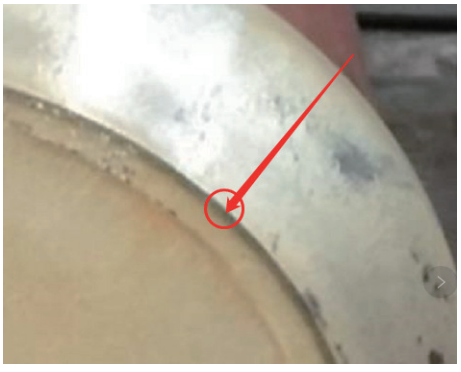


图 3　轧辊断面层

角钢轧辊受力状态

断裂原因需要对轧辊的受力状态进行分析，轧辊主要受 3 方面力的作用：

（1）轧辊与钢料之间的作用力，此部分应力主要为轧辊与钢料之间的摩擦力，可以保障钢料顺利延伸。该部分摩擦力是使轧件运动的驱动力，当摩擦力过大时会加速轧辊疲劳磨损。同时，因孔型形状不同，孔型各位置的摩擦力并不相同，会产生不均匀磨损疲劳。

（2）轧辊与热钢料间会产生摩擦热应力，同时热钢料还会将热量传递至轧辊。轧辊温度快速升高，而后在经过冷却水时产生不均匀热应力使轧辊疲劳和磨损[3]。

（3）在轧制过程中，为得到理想钢料形状，会产生压下力。一般角钢热轧孔型就是利用压缩和弯折变形的原理使金属在各道蝶式孔中基本趋于均匀变形，最终保持尺寸的稳定。

轧辊在以上 3 种力的长期交互作用下，产生表面疲劳微裂纹。裂纹受轧制力、扭矩驱使，迅速沿工作层表面向芯部扩展，当超出材料本身屈服极限后，最终造成辊身断裂事故[4]。

角钢轧辊断裂影响因素分析

确认轧辊断裂原因需结合轧辊实际使用状态，精轧 200 mm×20 mm 角钢断裂轧辊蝶式孔型布置于操作侧，见图 4。针对断辊发生时温度、轧制规程及轧辊状态等关键工艺参数进行分析。

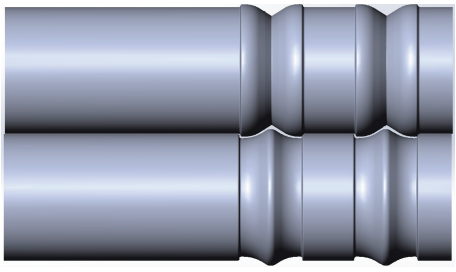


图 4　闭口蝶式孔型

温度影响

在轧制温度方面，20#角钢正常生产时开轧温度一般控制在 1100±30 ℃，而断辊时 BD1、BD2 粗轧机顺利轧制未出现时间耽误，开轧温度在 1090~1020 ℃ 属于正常范围。

在轧辊冷却方面，轧辊在周期性地承载、卸载、加热、冷却过程中承受着接触疲劳和热疲劳，当循环应力超过轧辊材料的疲劳强度时，表面层将引发裂纹并逐渐扩展，最后使裂纹区的材料断裂剥

落，即发生疲劳磨损[5]。精轧机轧辊冷却水管使用单排浇槽式进行冷却，见图 5。通过现场实验发现在水管开度小于 30% 时冷却水无法均匀覆盖到孔型全部表面，而查询生产数据记录确认断辊时水管开度仅为 25%，导致轧辊出现冷却不均匀和冷却效果差。这种不均匀的冷却会引起轧辊内部产生热应力，进而加速轧槽的疲劳过程，并可能诱发疲劳裂纹的形成。这些裂纹随着时间的积累，可能成为轧辊断裂的直接原因之一。

图 5　单排冷却水管

轧制规程影响

轧制规程的变化对轧辊所承受的负载影响极大，轧辊磨损主要影响因素有轧制力、接触位置等因素[6]。角钢轧辊轧制力主要受轧制辊缝及轧制状态方面影响。在正常轧制过程中不同孔型间不仅要均匀各道次压下量还要保障孔型达到良好的充满度，这与轧制规程的调整密不可分。断辊时轧制 200 mm×20 mm 规格角钢轧制规程见表 2。

表 2　200 mm×20 mm 轧制规程

轧机架次	道次	辊缝/mm	宽度/mm	咬钢转速/(r/min)	轧制转速/(r/min)	抛钢转速/(r/min)
BD2	1	28	313	50	60	60
	2	23	317	50	60	60
	3	14	320	50	60	60
F1	1	6	322	50	60	60

轧辊的疲劳磨损是随着相对压下量增大和辊间接触压力增大而增大[7]。在轧制压下量调整方面，根据轧制规程 BD2 末道次与 F1 精轧机组的辊缝差值应控制在正常标准范围内，即 5±2 mm。在实际生产操作中，测量得到 BD2 末道次的辊缝为 14 mm，而 F1 精轧机组的辊缝为 6 mm，这导致辊缝差值达到 8 mm，超出了规定的正常标准范围。这种超出标准范围的辊缝差值会导致相对压下量增加，F1 精轧机孔型承受负载将更大，可能成为轧辊断裂的直接原因之一。为了准确评估断辊事件中轧辊所承受的压力状况，本研究对断辊前的压力数据进行了分析，断辊前轧辊压下电流与轧辊防卡缸压力曲线见图 6。

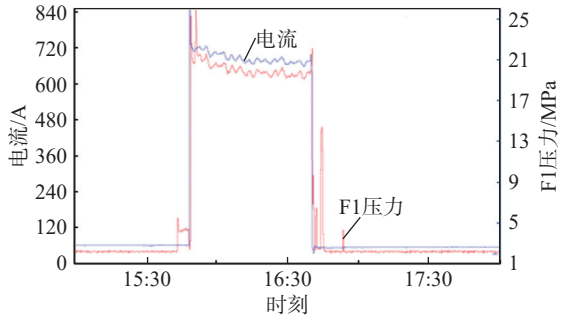


图 6　F1 轧制电流与防卡缸压力

从图中确认轧制电流最大值为 822 A，此时防卡缸压力最大值为 25.4 MPa，主要为钢料咬入冲击产生。待钢料顺利脱出精轧槽后电流稳定在 600 A，防卡缸压力稳定在 20 MPa，断辊前最大防卡缸压力操作侧高于传动侧 3.6 MPa，轧辊操作侧的轴向负载明显增大，见表 3。

表 3　轧机电流与防卡缸压力

项目	F1主电机实际电流/A	防卡缸DS（传动侧）压力/MPa	防卡缸OS（操作侧）压力/MPa
最小值	0.72	11.4	11.2
最大值	822.13	21.8	25.4

为了研究轧辊产生明显压力差的规律，根据孔型在轧辊中的配置特点，对比正常连续轧制状态下不同规格两侧防卡缸的压力，见图 7。

对比图 7(a) 和 7(b)，规格相同时，当轧制孔型配置更靠近操作侧时，蝶形孔操作侧防卡缸承受负载越大，孔型两侧所受负载压力越不均匀，对轧辊产生不利影响。长期作用下可能导致疲劳裂纹产生，是造成轧辊断裂的原因之一。由图 7(a) 与 7(c)，图 7(a) 与 7(d) 对比可知规格越大的角钢轧辊所承受负载越大。

轧辊状态影响

断裂轧辊为边辊环直径 883 mm 的轧机适配最小轧辊，其断裂处直径为 752 mm。由于轧辊孔型的深度不同，特别是在蝶形孔的顶角处，辊径已经显著

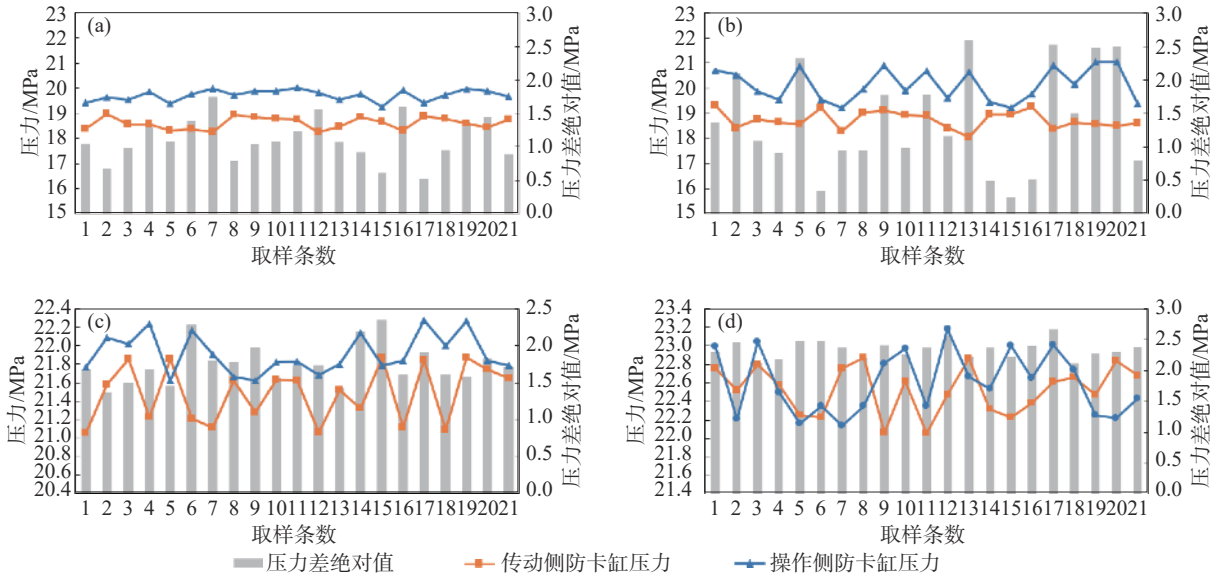


图 7　不同槽位防卡缸压力：(a) 200 mm×16 mm，孔型距离操作侧 735 mm；(b) 200 mm×16 mm，孔型距离操作侧 321 mm；(c) 200 mm×20 mm，孔型距离操作侧 735 mm；(d) 250 mm×16 mm，孔型距离操作侧 815 mm

小于正常所需的适配辊径。小辊径导致轧辊在抗扭强度和抗弯曲强度方面无法满足设计要求，从而增加了轧辊在运行过程中发生断裂的风险。

角钢轧槽磨损具有其特殊性，精轧孔型的侧壁和圆弧处磨损较其他部位明显[8]。这种现象主要是由于轧制过程中孔型的深度不一，导致角钢在孔型的腿端和顶角位置的线速度存在差异。在轧制过程中受压下力的影响，顶角位置的磨损更为迅速，这种疲劳磨损随着时间的推移而加剧，见图 8。

图 8　角钢上辊孔型磨损

在分析顶角所受压力时，可将压下力分解为沿 X 轴轴向力与沿 Y 轴径向力，见图 9。Y 轴方向上的力作用于压下螺丝，而 X 轴方向的力将会在蝶形槽的两端产生相互拉扯的效果，这种力最终集中作用于顶端凹槽附近。轧辊凹槽处受到冲击载荷、摩擦热应力等影响，长时间的应力负载下会将疲劳层撕裂形成微裂纹，该微裂纹逐步扩展 1~3 mm 左右达到疲劳断裂极限，这是轧辊断裂的一个重要原因[9]，见图 10。

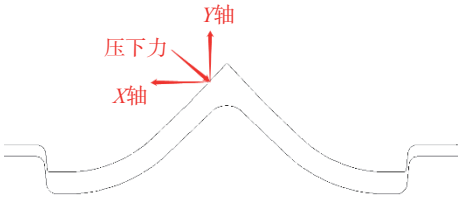


图 9　蝶式孔顶角受力状态

图 10　轧辊断面层

角钢轧辊防断裂改进措施

（1）针对温度原因造成的轧辊断裂，通过加强

轧辊冷却方式进行改善。轧辊表面在轧制过程中迅速升高，但内部温度变化不大，导致轧辊在绕轴旋转过程中由表及里产生温差，必将引起热应力和热应变[10]，通过改进轧辊冷却装置，增加多角度冷却水嘴使轧槽各位置冷却水接触充分，保障轧辊在使用过程中有良好且均匀的冷却，见图 11。

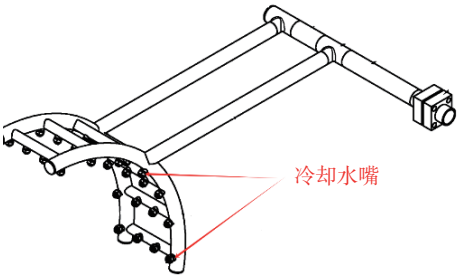


图 11　改进轧辊冷却水

（2）在轧制规程方面，在轧制较大规格的角钢过程中，对各道次压力差变化需严密监控。依据标准规程对各道次压力进行适当的调整，防止因单道次压力过大而引发轧辊的异常磨损。针对孔型配置位置不合理造成的负载压力不均匀，结合实际生产设备情况将负载较大的精轧道次孔型调整配置于轧辊中心附近，尽可能均衡轧辊的负载。

（3）针对轧辊辊径过小导致的断裂，可通过管理手段标准化小辊径轧辊使用。降低角钢 F1 精轧辊小辊径时的最大轧制力。在小辊径轧辊使用过程中如需要调整轧制规程时，必须将上一道次规程同样进行相应调整，避免出现因钢料匹配不当造成轧辊负载增加。

（4）针对压力负载导致轧辊断裂，可通过优化孔型系统尽量保障压下受力均匀。因精轧孔型为闭口式孔型需要对腿长进行有效控制，在保障轧槽不过充的情况下，适当增加腿端压下量减少顶角应力集中问题，优化前后模拟受力情况见图 12。同时，为了避免出现顶角应力集中产生疲劳裂纹，将顶角直角改为圆角过度，降低磨损。

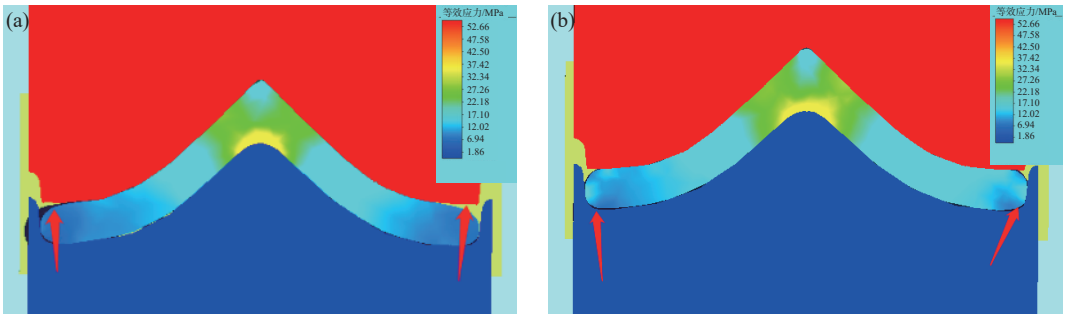


图 12　优化前后腿端受力情况分布图：(a) 优化前；(b) 优化后

（4）为尽可能控制疲劳层产生，在轧辊车削过程中提高对轧辊凹槽处的车削精度要求。如出现顶角磨损严重时增加车削量，将疲劳层全部车削掉。同时，根据角钢实际辊径可开发角钢轧辊激光合金化工艺，轧辊在激光表面合金化后拥有更好的表面组织和更高的耐磨性[11]，减少因轧槽深度不同造成的硬度梯度，提高轧辊使用寿命。

结论

从轧制过程方面，综合分析导致轧辊断裂因素，确定轧辊断裂是由于轧槽冷却不到位、蝶形轧槽两侧负载差较大、使用轧辊辊径过小及孔型凹槽部应力集中综合作用所致。针对以上问题通过优化后，未再发生过轧辊异常断裂事故。

参考文献

[1] 杨洋，訾文胜，吴功军. 28 号角钢孔型设计. 金属世界，2017(2)：69
[2] 王德宝，牟祖茂，杨峥，等. 热轧板带轧机高速钢复合轧辊断裂失效分析. 轧钢，2021，38(1)：74
[3] 何沛贤，马彦峰，尹强. 高铬热轧轧辊的热疲劳特性分析. 机械研究与应用，2021，34(6)：56
[4] 唐天博，孟伟，周勇. 本钢 1880 产线轧辊在机失效的管控研究. 金属世界，2023(2)：62
[5] 黄华贵，郑加丽，胡淇伟，等. 热轧工作辊磨损模型与运维策略研究进展. 河北冶金，2022(9)：1
[6] 陈晨，孙建林，谭耘宇. 热轧轧辊磨损及补偿控制//第十二届中国钢铁年会论文集——11. 冶金自动化与智能化. 北京：冶

金工业出版社，2019：6
[7] 庞志锋，彭艳，吴海森. 板带轧机轧辊磨损及其预报模型研究//2006 中国金属学会青年学术年会，无锡，2006
[8] 郭平，张明海，谢海深. 型钢轧辊磨损规律分析与研究//第十二届中国钢铁年会论文集——3. 轧制与热处理，北京：冶金工业出版社，2019：6
[9] 黄杨. 棒材 800 开坯机堆焊轧辊断裂原因分析及改进措施. 金属材料与冶金工程，2022，50(1)：59
[10] 郎志超. 轧辊疲劳裂纹扩展的有限元方法模拟. 包头：内蒙古科技大学，2013
[11] 秦翔，杨军，邹德宁，等. 轧辊再制造及其表面强化技术的研究进展. 材料保护，2019，52(2)：119

作者简介：王君珂（1993—），男，辽宁省本溪市人，主任工程师。2016 年毕业于辽宁科技大学大学金属材料工程专业，主要研究方向：型钢轧制。曾获河北省科学技术奖，“全国青年岗位能手”称号。通信地址：河北省唐山市海港开发区唐山中厚板材有限公司；E-mail：369308903@qq.com。