DOI:10.11973/lhjy-wl202403012

40Cr钢棒材剪切开裂原因

徐政新，杨 娥，周 杨，曹 广

（大冶特殊钢股份有限公司 高品质特殊钢湖北省重点实验室，黄石 435001）

摘 要：某公司生产的40Cr钢棒材在冷剪切下料过程中发生开裂。采用宏观观察、化学成分分析、扫描电镜分析、金相检验等方法分析了该棒材开裂的原因。结果表明：棒材表面局部存在加工硬化层，导致棒材发生了剪切开裂；加工硬化层的产生原因是棒材在精整过程中，矫直及砂轮扒皮工艺不当。

关键词：40Cr钢棒材；剪切开裂；加工硬化；矫直；加工硬化组织

中图分类号：TB31；TG115.2 **文献标志码**：B **文章编号**：1001-4012(2024)03-0049-03

Reason for shear cracking of 40Cr steel bars

XU Zhengxin, YANG E, ZHOU Yang, CAO Guang

(Hubei Key Laboratory of High Quality Special Steel, Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China)

Abstract: A certain company produced 40Cr steel bars that cracked during the cold shear cutting process. The cause of cracking in the bar was analyzed using methods such as macroscopic observation, chemical composition analysis, scanning electron microscopy analysis and metallographic examination. The results show that there was a localized work hardening layer on the surface of the bar, which led to shear cracking of the bar. The reason for the formation of work hardening layer was improper straightening and grinding wheel peeling process during the finishing process of the bar.

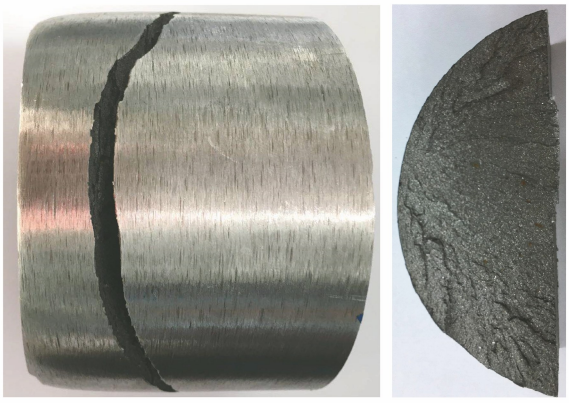
Keywords: 40Cr steel bar; shear cracking; work hardening; straightening; work hardening structure

40Cr合金结构钢是机械制造业应用最广泛的钢种之一，经调质处理后其具有良好的低温冲击韧性及切削加工性能，主要被用于制造中速、承受中等载荷的零件，如汽车转向节、后半轴、花键轴等[1]。某公司在对40Cr钢棒材进行剪切下料的过程中，发现部分料段有开裂现象，该批次40Cr钢棒材的生产加工工艺为：电炉连铸→连轧成直径为40 mm圆棒→矫直→表面砂轮扒皮→剪切下料。笔者采用一系列理化检验方法对该棒材开裂的原因进行分析，以避免该类问题再次发生。

1 理化检验

1.1 宏观观察

开裂棒材的宏观形貌如图1所示。由图1可知：棒材表面为扒皮状态，砂轮扒皮残留的痕迹明显；开裂部位与剪切面有一定距离，裂纹沿料段横向裂开；将开裂部位进一步打开，在横截面处可见裂纹起源于棒材表面。



a) 表面 b) 横截面

图1 开裂棒材的宏观形貌

1.2 化学成分分析

在开裂棒材上取样，对试样进行化学成分分析，

收稿日期：2023-12-11

作者简介：徐政新(1975—)，男，硕士，工程师，主要从事特钢轧制工艺研究，xuzhengxin@citicsteel.com

结果如表 1 所示。由表 1 可知：该开裂棒材的化学成分满足 GB/T 3077—2015《合金结构钢》的要求。

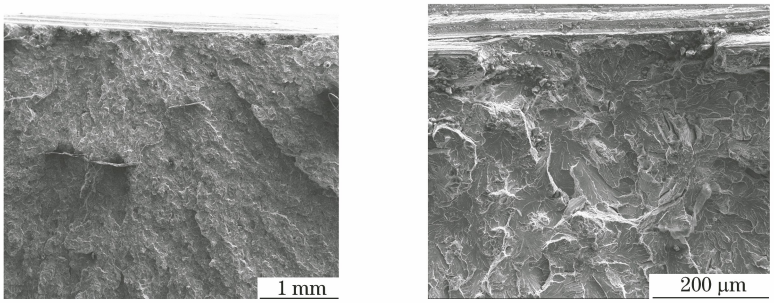
表 1　开裂棒材的化学成分分析结果　　%

项目	质量分数								
	C	Mn	Si	Cr	P	S	Cu	Ni	Mo
实测值	0.37	0.62	0.28	1.01	0.019	0.011	0.06	0.27	0.02
标准值	0.37～0.44	0.50～0.80	0.17～0.37	0.80～1.10	≤0.030	≤0.030	≤0.30	≤0.30	≤0.10

1.3　扫描电镜(SEM)分析

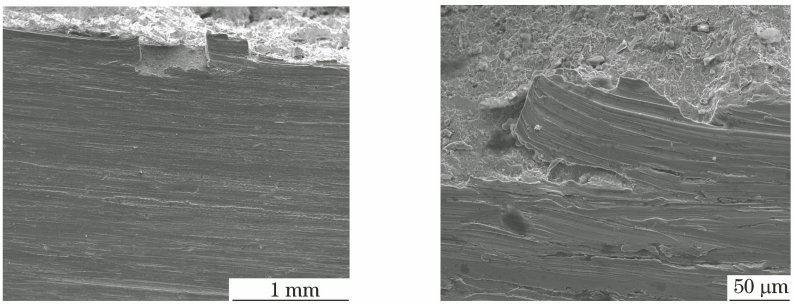
在棒材断口处取样，将试样进行超声波清洗后，用扫描电镜观察其微观形貌，结果如图 2 所示。由图 2 可知：开裂起源于表面，呈河流状解理断裂特征，未见夹杂物、陈旧性裂纹等冶金缺陷。

在棒材起裂源表面处取样，对试样进行 SEM 分析，结果如图 3 所示。由图 3 可知：起裂源表面呈撕裂特征，未见明显的冶金缺陷。



a) 形貌1　b) 形貌2　c) 形貌3　d) 形貌4

图 2　断口处 SEM 形貌



a) 低倍　b) 高倍

图 3　起裂源表面 SEM 形貌

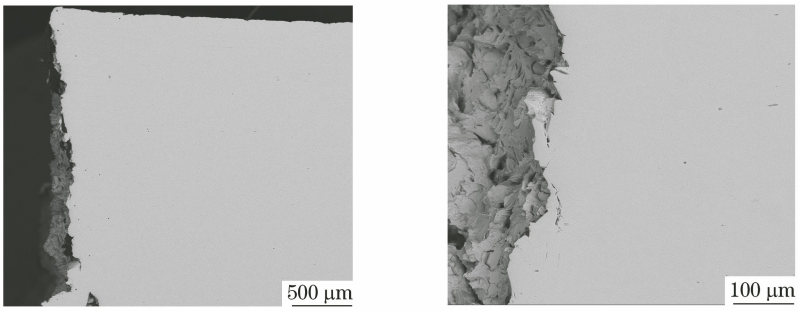
1.4　金相检验

沿起裂源部位剖开试样，在试样纵截面上取样，对试样进行金相检验。结果如图 4 所示。由图 4 可知：裂纹断口边缘呈锯齿状，未见氧化铁、非金属夹杂物等缺陷，说明裂纹产生于剪切过程。

试样的显微组织形貌如图 5 所示。由图 5 可知：起裂源附近表面有一层异常组织，该层组织有明显的金属流变线；内部组织为铁素体＋珠光体，为正常的热轧状态组织。

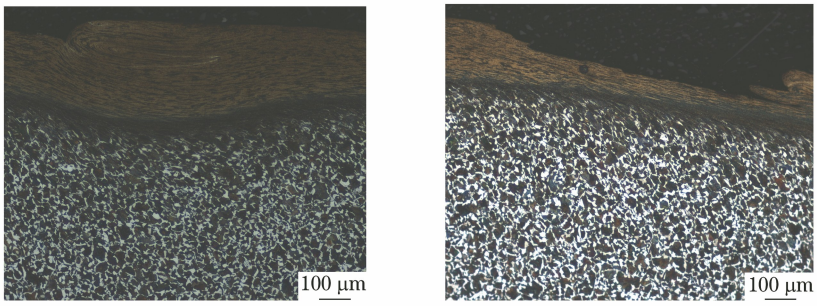
2　综合分析

综合上述理化检验结果可知，该开裂棒材的化



a) 低倍　　b) 高倍

图 4　裂纹源处纵截面的微观形貌



a) 形貌1　　b) 形貌2

图 5　试样的显微组织形貌

学成分满足标准要求。棒材表面可见金属光泽，且有沿棒材圆周方向分布的机械加工痕迹，该类痕迹为棒材热轧之后，采用砂轮机进行表面扒皮后留下的加工痕迹；裂纹起源于棒材表面[2]。断口呈解理断裂特征，未见非金属夹杂物、陈旧性裂纹等缺陷，说明剪切开裂与钢中的夹杂物及棒材表面开放性缺陷无关，裂纹产生于剪切过程[3]。起裂源附近表面组织存在明显异常，有明显的金属流线，属于冷加工过程中形成的加工硬化组织，内部组织为铁素体＋珠光体，为正常的热轧组织。

表面异常的加工硬化组织为棒材发生剪切开裂的主要原因。结合该棒材的生产工艺流程可知，矫直及砂轮打磨工序均属于冷加工，异常的加工硬化组织应形成于这两个工序过程中。

热轧钢材加热后的原料存在一定的内外温度差、上下表面温度差，且轧制过程降温不均匀、压下控制不合理等均会造成轧件延伸不均匀，从而导致棒材的平直度较差。为了保证棒材的出厂质量，必须对热轧棒材进行矫直。根据棒材的规格及钢种可选择不同的矫直机及矫直方式。实际生产过程中，采用两辊矫直机对开裂棒材进行冷矫直。在矫直过程中，两辊矫直机依靠两辊缝内部弯曲的曲率变化达到将棒材矫直的目的，因此在矫直过程中棒材承受了很大的矫直力，从而导致其表面形成加工硬化层。设置合理的参数可避免矫直后棒材表面形成异常的加工硬化层。

砂轮打磨精扒皮可快速、高效地去除表面的脱碳层、裂纹等缺陷，达到较好的精度和粗糙度，但是不合理的打磨速率会导致钢材内部晶粒产生位错滑移过变形，发生过度的冷加工硬化现象，从而造成钢材的硬度、强度显著提高，塑性、韧性显著降低，甚至出现细微裂纹等缺陷[4-6]。

3　结论及建议

该棒材发生了剪切开裂，裂纹起源于表面的解理断口，未见夹杂等缺陷，起裂源附近表面组织为冷加工过程中形成的加工硬化组织，表明表面异常的加工硬化组织为导致棒材发生剪切开裂的主要原因。

在对棒材进行矫直时，应选用合适的辊缝、角度及打磨速率，避免棒材表面形成加工硬化层。在对棒材进行砂轮打磨精扒皮时，应注意控制砂轮的打磨速率，避免因打磨过快或者过慢而使棒材表面产生过加工硬化现象。

参考文献：

[1]　张鹏，种法国，袁淑君，等. 40Cr 合金钢国内外标准技术指标的对比分析[J]. 山东冶金，2020，42(5)：19-21.

（下转第 55 页）

被抽走用于供热，导致进入低压缸的蒸汽流量很低且随载荷频繁发生变化。当进入低压缸蒸汽流量为 20～120 t/h 时，叶片的颤振会更剧烈，颤振的频率与叶片固有频率一致时就会产生共振，从而引起叶片的疲劳断裂。

断裂叶片为汽轮机侧低压转子次末级叶片，叶型较长，中间无拉筋固定。此外，现场检查发现低压转子正向和反向的次末级叶片普遍存在叶根与叶根槽装配不紧密、松动等问题。在超低载荷及调峰等灵活性运行工况下，叶根松动会加剧叶片的颤振，进而引发叶片的疲劳损伤。叶片断裂的起裂区位于叶片出汽侧边缘，该位置为叶片几何弦长方向上尺寸最薄的区域，该区域抵抗疲劳开裂的能力也最弱，在颤振引发的交变疲劳载荷作用下叶片易发生开裂。断裂叶片及其他次末级叶片表面未见明显的腐蚀坑或机械损伤等缺陷。此外，起裂区的能谱分析结果显示，未发现腐蚀性 Cl^- 的存在，因此可以排除应力腐蚀导致损伤开裂的因素。

断口上大部分区域呈“海滩状”疲劳条带形貌，扩展区面积占比约为 70%，且疲劳条带尺寸及间隙细小，说明在汽轮机运行过程中叶片承受的载荷较小，叶片的断裂形貌为典型高周低应力疲劳断裂。

在高比例波动性新能源大规模接入的背景下，当前火电机组普遍采用超低载荷及调峰等灵活性运行方式[9-11]，使抽汽式汽轮机低压缸的进汽量减少，特别是在深度调峰运行工况下，低压转子长叶片易发生异常颤振。

3　结论与建议

在超低载荷及调峰等灵活性运行工况下，机组承受的载荷频繁发生变化；供热抽汽造成低压缸进汽量减少、汽流大幅波动，导致末端的长叶片发生颤振；次末级叶片的叶根尺寸与叶根槽不匹配，使叶根松动、叶片晃动，加剧了恶劣工况下叶片的颤振；在两种因素的共同作用下，在叶片出汽侧近叶根部位的应力集中区域萌生了疲劳裂纹；在叶片颤振产生的交变应力作用下，裂纹以疲劳的形式不断扩展，最终导致叶片整体断裂。

建议更换低压转子正向和反向的次末级叶片，改变次末级叶片叶根与叶根槽的装配方式，使之形成紧固的过渡配合或过盈配合。在整圈叶片间增设拉筋设计，以保障运行状态下叶片的相对稳固，尽可能减弱叶片的颤振。优化机组运行的策略，避免灵活性运行工况产生的汽流变化对低压转子末端长尺寸叶片造成损伤。

参考文献：

[1] 张元，方毅，孟维歌，等. 某电厂汽轮机叶片断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册)，2019，55(7)：474-477.

[2] 张涛，田峰，贺飞雄，等. 300 MW 汽轮机低压转子动叶片断裂分析[J]. 内蒙古电力技术，2014，32(5)：41-44.

[3] 付星星，张梅，卢柳林. 汽轮机叶片断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册)，2017，53(11)：812-817.

[4] 陈志军. 某电厂汽轮机中压转子动叶片开裂的原因[J]. 理化检验(物理分册)，2021，57(11)：33-36.

[5] 张国滨，宁玫，周欣欣. 钢中非金属夹杂物分析[J]. 理化检验(物理分册)，2021，57(12)：1-7.

[6] 姜伟，谢诞梅，陈畅，等. 基于时域分析法的汽轮机末级叶片颤振预测及分析[J]. 振动与冲击，2015，34(11)：194-199.

[7] 刘万琨. 汽轮机末级叶片颤振设计[J]. 东方电气评论，2007，21(4)：7-13.

[8] 赵文胜，王鹏飞，李燕辉，等. 汽轮机末级叶片振动特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2016，44(8)：8-12.

[9] 武昭原，周明，王剑晓，等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J]. 中国电机工程学报，2022，42(21)：7746-7764.

[10] 刘铸，宋建成，马素霞，等. 2×300 MW 热电联产机组灵活性供热控制策略研发[J]. 动力工程学报，2022，42(4)：387-392.

[11] 郭通，李永刚，徐姗姗，等. 考虑多主体博弈的火电机组灵活性改造规划[J]. 电工技术学报，2020，35(11)：2448-2459.

(上接第 51 页)

[2] 孙智，任耀剑，隋艳伟. 失效分析：基础与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

[3] 张栋. 失效分析[M]. 北京：国防工业出版社，2004.

[4] 王晓强，徐少可，崔凤奎，等. 轴承套圈表面超声滚挤压加工硬化模型[J]. 塑性工程学报，2019，26(3)：231-237.

[5] 惠亚军，吴科敏，许克好，等. 500 MPa 级高延性方管用钢的开发及加工硬化行为[J]. 钢铁，2020，55(2)：131-138.

[6] 林晏民，孙福猛，方健，等. SWRCH6A～10A 系列冷镦钢加工硬化影响因素[J]. 理化检验(物理分册)，2022，58(10)：34-37.