·应用与服役·

谐波减速器服役过程中柔轮断裂失效原因分析与工艺改进

穆晓彪[1]，张永奇[2]，高明艳[1]，杨国强[1]，张朝磊[2]
（1 北京中技克美谐波传动股份有限公司，北京 101318；2 北京科技大学 材料科学与工程学院，北京 100083）

摘　要：通过显微组织的观察分析、断口形貌的观察和硬度测定，分析造成柔轮疲劳断裂失效的原因。结果表明，失效柔轮的显微组织为回火屈氏体，柔轮上存在较严重的3级带状组织。虽然存在MnS和Al_2O_3夹杂物引起的4.42 μm微孔，但由于其尺寸和数量较小，不是导致其断裂的主要原因。样品的晶粒整体上较粗大，断口裂纹处晶粒更粗大且更不均匀，断口裂纹处的晶粒尺寸是远离断口晶粒的1.4倍。晶粒粗大使晶界面积减小，导致塑性变形不均匀，易产生应力集中，从而产生初生裂纹，同时也不利于阻碍裂纹的扩展，导致样品发生断裂失效。因此，原奥氏体晶粒粗大是导致柔轮疲劳断裂主要原因。可通过循环热处理或增加正火预处理，达到细化晶粒的作用。

关键词：谐波减速器；柔轮；断裂失效
DOI：10.20057/j.1003-8620.2023-00118　　**中图分类号：**TG115

Fracture Analysis of Toughness Fracture Failure on Flexspline of Harmonic Reducers During the Service

Mu Xiaobiao[1], Zhang Yongqi[2], Gao Minyan[1], Yang Guoqiang[1], Zhang Chaolei[2]
(1 Beijing CTKM Harmonic Drive Co., Ltd., Beijing 101318, China; 2 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The reasons of the fatigue failure of flexspline are analyzed by observation analysis, observation and hardness determination of fracture morphology of microstructure. The results show that the micro-structure of the flexspline of the failed harmonic reducer are tempered troostite, and there is more severe grade 3 banded structure on the flexspline. Although the 4.42 μm micropores caused by MnS and Al_2O_3 inclusions exist, they are not the main cause of breakage due to its small size and number. Meanwhile the overall grain size of the sample, especially the grain size at fracture crack, is coarse, and the grain at the fracture crack is thicker and more uneven. the grain size at the fracture crack is 1.4 times that away from the fracture grain. The coarse grain assembly leads to smaller grain boundary area, which not only leads to more uneven plastic deformation, but also more prone to stress concentration, which causes primary cracks, and is difficult to hinder crack expansion, resulting in fracture failure of the sample. Therefore, the primary austenite grain is the main cause for fatigue fracture of flexspline. The grain refinement can be achieved by circulating heat treatment or adding normalizing pretreatment.

Key Words: Harmonic Reducer; Flexspline; Fracture Failure

至2022年，国内的工业机器人市场已经连续九年位居世界第一，而应用于工业机器人的机器人关节的机械传动系统是其关键技术之一[1-2]。通常制造一台工业机器人需要4～6台减速器，其中谐波减速器是一种通过控制波发生器使柔轮产生可控弹性变形，由柔轮与刚轮的周期性啮合来传递动力的传动装置，其占用的空间更小，传动更平稳，精度更高[3-7]。目前，90%的谐波减速器应用于机器人等要求精密传动的领域中，已成为现代工业生产和产业升级中重要的机械部件[8-9]。

谐波减速器在传动过程中，波发生器迫使柔轮发生周期性弹性变形，在长轴处拉伸成椭圆，在短轴附近产生径向的压缩变形，使柔轮内齿与刚轮外齿完全脱开[10-11]。复杂的受力情况要求柔轮具有较高的韧性和一定的强度[12-13]。柔轮特殊的受力情况使柔轮成为最容易发生疲劳失效的零件，据统计，由疲劳断裂导致的柔轮失效占总失效形式的60%以上，是谐波减速器失效的主要形式[14-16]。因此，如何提高柔轮的疲劳寿命是谐波减速器的主要问题，研究柔轮疲劳断裂机理对延长谐波减速器服役寿

作者简介：穆晓彪（1986—），男，工程师；　E-mail：17864287700@163.com；　收稿日期：2023-06-13
通信作者：张朝磊（1984—），男，博士，副教授；　E-mail：zhangchaolei@ustb.edu.cn

命具有积极的意义。

本文以失效柔轮的顶部失效位置和桶壁位置的样品作为研究对象,对其不同位置的显微组织进行对比分析,旨在找出导致柔轮断裂失效的主要原因,为提升柔轮及谐波减速器的疲劳寿命提供理论分析和数据支持。

1　实验材料及方法

某公司生产的柔轮断裂失效样品,原材料为40CrNiMoA,化学成分见表1,热处理工艺为调质处理,如图1所示。在常温大气环境下服役几个月后发生断裂,失效形式为柔轮顶部较薄处与较厚处过渡区域发生断裂,使柔轮底部的法兰整体脱离。

表 1　40CrNiMoA 钢的化学成分(质量分数)

Table 1　Chemical composition of 40CrNiMoA steel %

C	Si	Mn	Cr	P	S	Mo	Ni
0.41	0.24	0.74	0.81	0.011	0.009	0.17	1.46

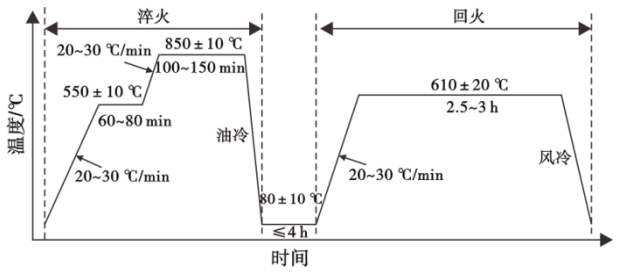

图 1　热处理工艺流程图

Fig. 1　Flow diagram of the heat treatment process

在失效柔轮断口和柔轮桶壁附近切取2块样品,如图2所示。经磨抛和4%硝酸酒精溶液侵蚀后,采用蔡司 Axio Scope.A1 光学显微镜和 ZEISS-Gemini-500扫描电子显微镜(SEM)观察显微组织形貌,利用EDS能谱分析侵蚀后组织中的夹杂物。为观察其金相组织,使用饱和苦味酸水溶液显示原奥氏体晶界,采用Nano Measurer图像分析软件测定原奥氏体晶粒的尺寸及其平均标准偏差,以评价其大小和均匀性。采用SEM观察柔轮断口形貌,采用EDS能谱分析夹杂物。采用LEICA VMHT30M显微维氏硬度计测定柔轮顶部的硬度,施加载荷为200 g,并保持15 s。

2　实验结果与分析

2.1　失效柔轮显微组织分析

对柔轮断口附近及柔轮桶壁的显微组织形貌进行观察,如图3所示。可以发现,不同位置的组织

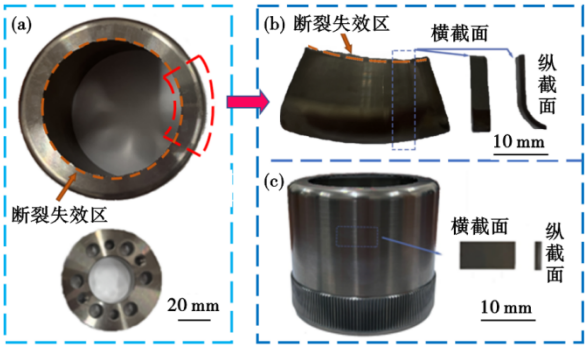

图 2　失效柔轮取样位置:(a)宏观形貌,(b)断口取样,(c)桶壁取样

Fig. 2　Sampling location of the failure flexspline (a) Macroscopic morphology; (b) Sampling near the fracture of flexspline; (c) Sampling at the barrel wall of flexspline

形貌无明显区别,组织均为回火屈氏体组织,且无异常组织。在断口附近的纵截面中发现了夹杂物引起的微孔,对其进行能谱分析,如图3(d)所示。

根据测量结果可判断主要为MnS和Al_2O_3夹杂物,夹杂物尺寸较小,平均尺寸约为4.42 μm。Al_2O_3夹杂物硬度高,不易产生变形,容易在组织内产生应力集中,但由于其尺寸较小且数量较少,无法导致柔轮发生失效断裂。根据GB/T 10561—2005中对夹杂物的评级规定,夹杂物尺寸均小于最高评级要求。

观察发现,在桶壁纵截面、柔轮正常位置及断口处,均存在较严重带状组织,如图4所示。根据GB/T 34474.1—2017中对带状组织等级的规定,100倍视场中有两条以上贯穿整个视场连续的带状组织为3级。而柔轮桶壁和断口处组织均存在带状组织,故带状组织应不是导致柔轮失效的原因。

柔轮断口处显微组织如图5(a)所示。断口边部存在多处断裂,裂纹向心部延伸,但断裂源处未发现明显夹杂物,对其进行能谱分析,也未找到夹杂物。同时,在断口中发现了韧窝,并对韧窝中夹杂物疑似点进行能谱分析,如图5(b)所示。根据能谱分析结果,所选取的两处夹杂物疑似点均未发现元素异常,与金属基体的元素差距较小。因此,在韧窝中未发现明显夹杂物。

2.2　原奥氏体晶粒度

对断口附近组织以及柔轮顶部中间位置的原始奥氏体形貌进行观察,如图6所示。测定奥氏体晶粒平均直径和直径的平均标准偏差,见表2。测得断口附近、远离断口处、断口裂纹处的晶粒尺寸分别为18.00、17.60、12.70 μm,晶粒度分别为8.5、9.0、10.0级。发现越靠近断口的位置,晶粒尺寸越

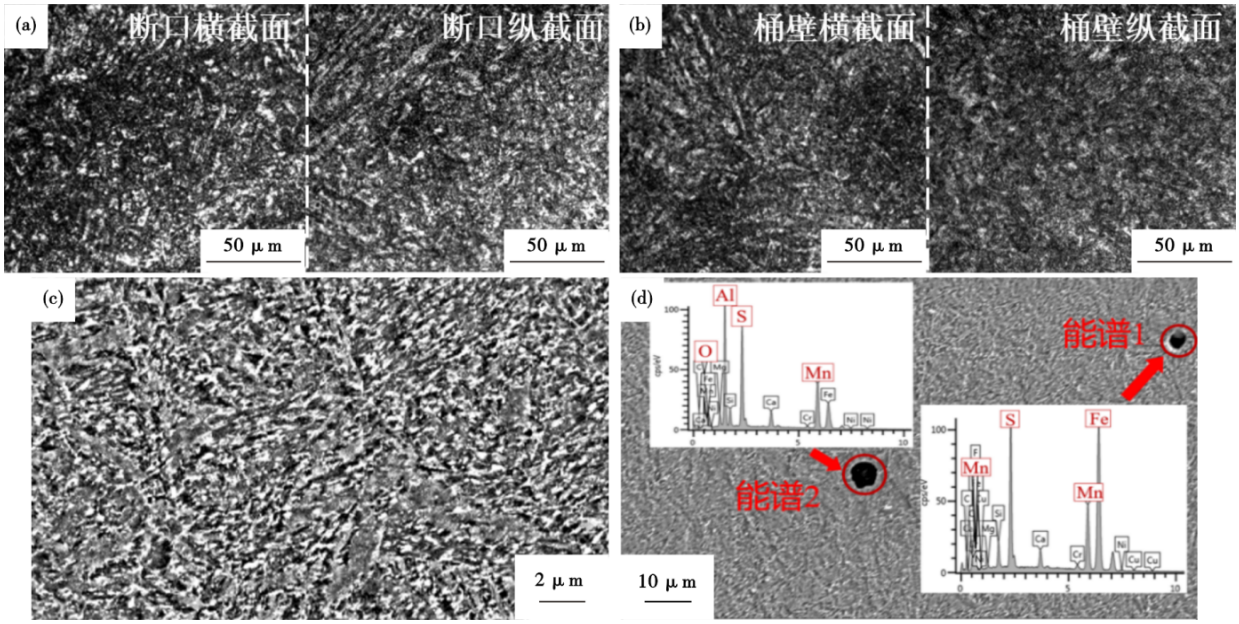

图 3 失效柔轮的显微组织图:(a,b) 失效柔轮不同位置显微组织 500×;(c) 断口横截面显微组织,2000×;(d) 断口附近组织的夹杂物分析

Fig. 3 Microstructures of the failure flexspline : (a , b) microstructures of different position under 500 times field of view; (c) microstructures under 2000 times field of view; (d)analysis of the inclusions near the fracture

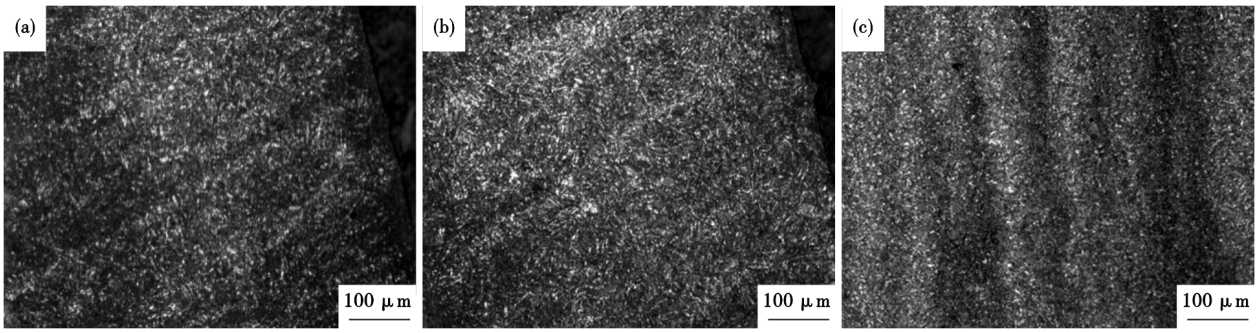

图 4 不同位置带状组织:(a)桶壁纵截面,(b)桶壁横截面,(c)断口处裂纹纵截面

Fig. 4 Banded structure images at different positions : (a) longitudinal section of the barrel wall, (b) transverse section of the barrel wall, (c) longitudinal section of the crack at the fracture

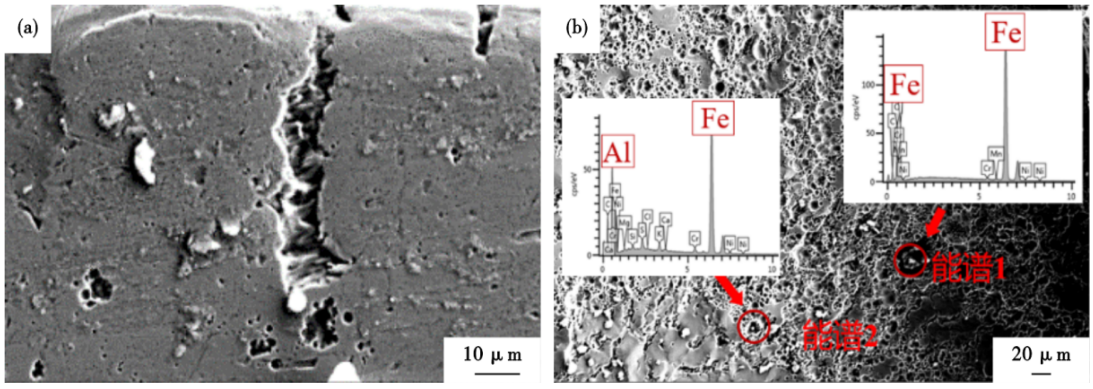

图 5 断口组织观察图:(a)柔轮断口处显微组织,(b)断口韧窝 SEM 形貌

Fig. 5 Observation diagram of the structure near the fracture : (a) microstructure at the fracture of the flexible, (b) morphology of fracture toughness and dimples by SEM

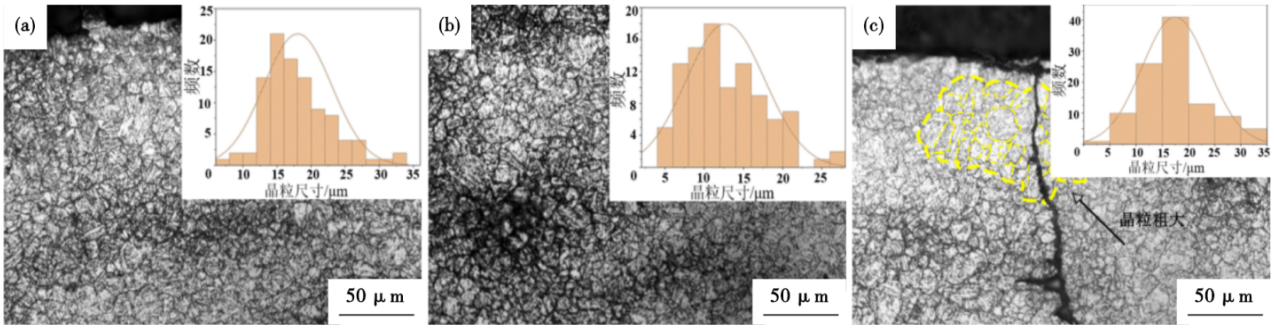

图 6　不同位置的原奥氏体晶粒度:(a)断口附近,(b)远离断口处,(c)断口处裂纹处

Fig. 6　Original austenite grain size at different positions : (a) near the fracture surface, (b) stay away from the fracture, (c)crack at the fracture

表 2　不同位置的晶粒尺寸及等级

Table 2　The size and grade of the grains at different positions

分类	断口附近	断口裂纹处	远离断口处
平均晶粒尺寸/μm	18.00	17.60	12.70
晶粒度等级/级	8.50	9.00	10.00
标准偏差	5.99	6.17	5.03

大,且更不均匀,断口处的晶粒尺寸是远离断口处的1.4倍。各位置的晶粒度均小于10级,而日本哈默纳科的谐波减速器柔轮晶粒度为11.5级[17]。因此,判断该柔轮晶粒整体上较粗大,且断口附近晶粒更粗大且更不均匀。

2.3　硬度检测

对柔轮顶部纵截面进行维氏硬度的检测,发现柔轮顶部断口附近纵截面硬度平均值为295.9HV,极差为37.8HV。而柔轮顶部远离断口位置硬度平均值为298.2HV,极差为40.4HV。相比远离断口位置,断口附近硬度低了2.3HV,极差低了2.6HV,两个位置的硬度差距不大,但均存在硬度波动较大、不均匀的问题。

3　改进工艺

通过对失效柔轮不同位置的组织性能对比分析,发现导致柔轮断裂的原因主要为晶粒尺寸较大。可通过循环热处理或添加正火预处理,抑制晶粒长大,达到细化效果。而断裂的位置为薄厚部分的过渡区,不同位置的加工程度不同,会导致加工过程发生不均匀变形,使得最终的晶粒分布不均匀。在调质处理前,较高温度的等温正火和较低温度的普通正火,或经过两次淬火,均可获得均匀且细小的柔轮晶粒[18]。

柔轮不同位置均存在较严重的带状组织,虽然带状组织并非导致柔轮失效的主要原因,但会降低材料各项性能。带状组织的本质是钢材原材料的偏析,因此,可通过连铸工艺优化,控制成分偏析的程度,从而降低带状组织的等级。

4　结论

(1)断口附近和桶壁侧壁组织均为回火屈氏体,无异常组织,但柔轮正常位置及断口处均存在3级带状组织。在断口处发现MnS和Al_2O_3夹杂物引起的4.42 μm微孔,其尺寸较小且数量较少,不是导致柔轮断裂失效的主要原因。

(2)断口边部存在多处断裂,且存在韧窝,但断裂源处和韧窝中均未发现明显夹杂物。断口处和远离断口处的硬度差距不大,但均存在硬度波动较大的问题。

(3)样品的晶粒整体上较粗大,晶粒度均小于10级。断口裂纹处晶粒更粗大且更不均匀,断口裂纹处的晶粒尺寸是远离断口晶粒的1.4倍,偏差是1.2倍。晶粒粗大使晶界面积减小,导致塑性变形不均匀,产生应力集中,产生初生裂纹,同时也不利于阻碍裂纹的扩展,导致样品发生断裂失效。因此,原奥氏体晶粒较粗大是导致柔轮疲劳断裂主要原因。

(4)可通过循环热处理或增加正火预处理,抑制晶粒长大,达到细化效果。可通过连铸工艺优化减轻带状组织。

参考文献

[1] Mahanto B S, Sahoo V, Maiti R. Effect of cam insertion on stresses in harmonic drive in industrial robotic joints[J]. Procedia

Computer Science, 2018, 133: 432-439.
[2] 向珍琳, 李 霆, 杨 林, 等. 谐波减速器研究现状及问题研究[J]. 机械传动, 2020, 44(7): 151-162.
[3] 穆晓彪, 邵洙浩, 郝春辉, 等. 谐波减速器柔轮与柔性轴承断裂失效分析[J]. 机械传动, 2023, 47(3): 100-104.
[4] 王 浩, 胡青凤, 张朝磊, 等. 谐波减速器柔轮疲劳断裂失效分析[J]. 河北冶金, 2021(7): 68-70.
[5] Xiang Q, Yin Z N. Investigation of temperature effect on stress of flexspline [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(6): 791-798.
[6] 王 洋, 王 欢, 张朝磊, 等. 谐波减速器柔轮用特殊钢RL40的组织特性[J]. 特殊钢, 2021, 42(3): 76-78.
[7] Pacana J. The impact of the structural form on the stress distribution in a flexspline of a hermetic harmonic driver [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020(4): 1049-1060.
[8] 叶南海, 邓 鑫, 何 韵, 等. 谐波柔轮力学分析与疲劳寿命研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 18-25.
[9] 詹如月, 彭来湖, 祖洪飞, 等. 谐波减速器柔性效应对机械臂末端精度的影响[J]. 机电工程, 2022, 39(4): 488-494.
[10] Zhang C X, Song Z Q, Liu Z F, et al. Tribological properties of flexspline materials regulated by micro-metallographic structure [J]. Tribology International, 2018, 127: 177-186.
[11] 王 敏, 郭志强. 控制20CrMnTiH齿轮钢氧含量和夹杂物的生产试验[J]. 特殊钢, 2020, 41(2): 18-20.
[12] 刘 斌, 陶孟仑, 母 慢, 等. 谐波减速器柔性轴承疲劳寿命及其力学特性分析[J]. 机械传动, 2023, 47(2): 131-136.
[13] 邓通武. 钒对25 CrMnB钢履带板耐磨性能的影响[J]. 特殊钢, 2019, 40(5): 67-70.
[14] Xing J C, Yang Z X, Ren Y B. Analysis of bifurcation and chaotic behavior for the flexspline of an electromagnetic harmonic drive system with movable teeth transmission[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 112: 467-485.
[15] 王亚晖, 刘积昊, 管恩广, 等. 谐波减速器疲劳失效特征分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(23): 159-164.
[16] 田 浩, 韩念琛, 郭文亮. 谐波减速器柔轮结构改善与分析[J]. 机械传动, 2019, 43(3): 145-148+155.
[17] 张朝磊, 魏 旸, 方 文, 等. 谐波减速器特殊钢材质柔轮的组织和力学性能分析[J]. 材料导报, 2018, 32(16): 2842-2846.
[18] 陈正周, 罗凯宇. 热处理对40CrNiMoA钢柔轮显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(2): 103-112.

版权声明

根据《中华人民共和国著作权法》,作者向《特殊钢》编辑部投稿(或接受约稿),全体作者同意,上述提交本刊发表的作品一经本刊录用,作者即将作品整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从作品中提取部分的全部版权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权、改编权,在著作权保护期内转让给《特殊钢》编辑部。本刊所付一次性稿酬已包含上述各种稿酬,若编辑部再以其他形式在任何地点出版该论文,将不再支付作者稿酬。

作者应保证论文是作者独立创作的原创性作品,未曾发表;不涉及侵权和泄密问题;保证论文没有一稿多投;保证论文的署名权无争议,若发生问题,一切责任由作者承担,文责自负。

如有异议,请在投稿前说明,本刊即时处理。