车辆悬架螺旋弹簧断裂失效行为研究

张强宏¹,陈科仲²,付扬帆¹,王长朋¹,陈大军¹,梅华生¹, 刘正涛¹,代野¹,丛大龙¹

(1.西南技术工程研究所,重庆 400039; 2.陆军装备部驻重庆地区军事代表局驻重庆地区第六军事代表室,重庆 400052)

摘要:目的 判定车辆悬架螺旋弹簧失效的原因,提出改进措施。方法 通过分析和测试其化学成分、氢含 量、非金属夹杂物、力学性能、金相组织、断口形貌等,研究车辆悬架螺旋弹簧的失效行为。结果 试件弯 曲变形内侧的剪切应力值最大,容易引起应力集中。材料最后断裂区为韧窝和沿晶的混合断裂,且断后伸 长率偏低。喷九并未完全去除脱碳层及表层的其他原始缺陷,表层形成疲劳缺陷的可能性增高。喷九造成 螺旋弹簧表层存在较深的凹坑,凹坑边缘形成明显凸起棱边,引起应力集中,且材料表层存在折叠缺陷。 在循环应力作用下,凹坑处折叠缺陷端部首先成为裂纹萌生点,在循环应力作用下,裂纹持续扩展,最终 疲劳断裂。结论 减小钢丸粒径,降低喷丸压力,以避免过深的凹坑及尖锐的凸起棱边,并适当增加喷丸过 程的表层去除深度;调整热处理工艺,适度降低材料强度、提高韧性,使断后伸长率大于 10%。改进轧制 工艺,消除材料的折叠缺陷,加强材料缺陷检测。 关键词:螺旋弹簧;失效;喷丸;折叠;疲劳断裂

中图分类号: TG115 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)08-0100-07 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.08.017

Study on Failure Behavior of Spiral Spring for Automotive Suspension System

ZHANG Qiang-hong¹, CHEN Ke-zhong², FU Yang-fan¹, WANG Chang-peng¹, CHEN Da-jun¹, MEI Hua-sheng¹, LIU Zheng-tao¹, DAI Ye¹, CONG Da-long¹

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

2. The Sixth Military Representative Office of the Amy Equipment Department in Chongqing, Chongqing 400052, China)

ABSTRACT: In order to put forward improvement measures, the causes of the failure of spiral springs for vehicle suspension are researched. The failure behavior of spiral spring is concluded based on the analysis of several tests such as chemical component test, hydrogen content test, non-metallic inclusion test, mechanical property test, fracture morphology analysis and microstructure analysis. The maximum shear stress is in the inner side of the specimen, where the stress concentration is easily caused. The elongation after fracture is low, and the brittle fracture can be seen. The decarburized layer and other original defects on the

收稿日期: 2021-06-20; 修订日期: 2021-07-16

Received: 2021-06-20; Revised: 2021-07-16

作者简介:张强宏(1971—),男,高级工程师,主要研究方向为金属材料。

Biography: ZHANG Qiang-hong (1971-), Male, Senior engineer, Research focus: metal materials.

通讯作者: 付扬帆(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为先进制造。

Corresponding author: FU Yang-fan (1987---), Male, Master, Senior engineer, Research focus: advanced manufacturing.

引文格式:张强宏,陈科仲,付扬帆,等. 车辆悬架螺旋弹簧断裂失效行为研究[J]. 装备环境工程,2021,18(8):100-106.

ZHANG Qiang-hong, CHEN Ke-zhong, FU Yang-fan, et al. Study on failure behavior of spiral spring for automotive suspension system[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 100-106.

surface are not completely removed by shot peening, so the possibility of forming fatigue defects on the surface is increased. Due to shot peening, there are deep pits on the surface of the spiral spring, and obvious convex edges are formed on the edge of the pits, resulting in stress concentration. Under the action of stress, the end of the fold defect in the pits becomes the crack initiation area. Under the action of cyclic stress, the crack continues to expand and finally causes fatigue fracture. The shot size and pressure should be reduced, to avoid deep pits and sharp convex edges. In addition, the removal depth of surface layer in shot peening process should be increased appropriately. The heat treatment process should be adjusted to reduce the strength and improve the toughness of the material, so that the elongation after fracture can be more than 10%. The rolling process should be improved to eliminate the folding defects, and the detection of material defects also should be strengthened.

KEY WORDS: spiral spring; failure; shot peening; folding defect; fatigue fracture

螺旋弹簧是车辆独立悬架的重要组成部分,是使 车架与车桥弹性联系,并承受和传递垂直载荷,缓和 及抑制车辆行驶冲击的关重件,其对车辆的行驶安全 性、平稳性、舒适性起着重要作用。为强化螺旋弹簧 表层,提高其疲劳寿命,进行喷丸处理是其后处理工 艺中的标准工序之一^[1-2]。因为螺旋弹簧需在反复高 频、高扭矩、强冲击等恶劣工况下使用,长期服役过 程中存在着较大的失效风险^[3-6]。车辆悬架螺旋弹簧 在弯曲变形台架中断裂,为判定其失效原因,文中通 过分析其化学成分、硬度、金相组织、断口形貌等, 研究失效螺旋弹簧的材质、力学性能、断裂形式等, 进而分析其失效行为,并提出改进措施。

1 试验

1.1 试件

试件为大型车辆悬架螺旋弹簧,材质为中温回火 55CrMn钢,试件表面喷丸处理后,喷涂黑色环氧树 脂基耐蚀涂料,涂层厚度为15~30μm。试件经85000 次的弯曲变形台架试验,发生断裂。

1.2 试验过程

参照 GB/T 20123—2006《钢铁总碳硫含量的测定高频感应炉燃烧后红外吸收法(常规方法)》^[7],采用 HCS-140 型高频红外碳硫分析仪,分析试件裂纹源临近区域的 C、S 元素含量。参照 GB/T 20125—2006《低合金钢多元素含量的测定电感耦合等离子体原子发射光谱法》^[8],采用 ARCOS 型电感耦合等离子体发射光谱分析仪,分析试件裂纹源临近区域的 Si、Mn、P、Cr、Ni、Cu 元素含量。参照 GB/T 223.82—2018《钢铁氢含量的测定惰气脉冲熔融-热导或红外法》^[9],采用 LECO-RHEN 602 定氢仪,分析试件裂纹源临近区域表层及试件基体心部的 H 元素含量。

参照 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》^[10],采用 MTS 万能试验拉伸 机,测试同批随炉材料的强度与断后伸长率。参照 GB/T 230.1—2018《金属材料洛氏硬度试验第 1 部分: 试验方法》^[11],采用 HR-150DT 洛氏硬度计,测试试 件基体心部硬度。

参照 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含 量 的测定标准评级图显微检验法》^[12],采用 Observer.A1m型金相显微镜,在 100 倍放大条件下对 裂纹源临近区域的非金属夹杂物进行评级。参照 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》^[13], 采用 80 ℃饱和苦味酸溶液腐蚀试样 30 s 后,用 Observer.A1m型金相显微镜,在 100 倍放大条件下测 定试样的晶粒度。采用 4%硝酸酒精溶液腐蚀试样 5~ 8 s,采用 Observer.A1m 型金相显微镜,分析试件的 金相组织,并参照 GB/T 224—2008《钢的脱碳层深 度测定法》^[14],对裂纹源临近区域的脱碳层深度进行 测定。采用 QUANTA 200 扫描电镜,分析试件断口 微观形貌。

2 试验结果

2.1 断口宏观形貌

试件断口的宏观形貌如图 1 所示。可见,断口分为明显的裂纹起始区、裂纹扩展区及最后瞬断区等 3 个区域。其中,裂纹起始于弯曲变形的内侧,呈放射 状扩展,裂纹源有裂纹扩展相遇形成的台阶纹,裂纹 起始面涂层完整,无撞击、划伤、磨损等痕迹。裂纹 扩展区约占整个断口面积的 40%~50%,早期断裂形 式为疲劳断裂。

2.2 化学成分

试件裂纹源临近区域化学成分检测结果见表 1。 可见,化学成分符合 GB/T 33164.2—2016《汽车悬架 系统用弹簧钢第 2 部分:热轧圆钢和盘条》^[15]中 55CrMn 材料的化学成分技术要求,材质中 P、S 元 素含量控制在极低水平,显示出优良的精炼水平。

2.3 氢含量

试件裂纹源临近区域表层及试件基体心部氢含 量检测结果见表 2。可见,氢含量在表层与心部无差 异,均符合 GB/T 33164.2—2016 中 55CrMn 材料的氢 含量技术要求。





图 1 试件断口宏观形貌 Fig.1 Macro-appearance of fracture area

	表 1	化学成分检测结果
Tab.1	Chem	ical component test results

				Ĩ				%
元素	С	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Р	S
技术要求	0.52~0.59	0.17~0.37	0.70~1.00	0.70~1.00	≤0.25	≤0.25	≤0.020	≤0.015
实测值	0.55	0.31	0.94	0.94	0.128	0.091	0.004	0.004

表 2 氢含量检测结果 Tab.2 Hydrogen content test results

	2		mg/m	ı ³
检测位置	表层		心部	
技术要求		≤20		
实测值	0.5		0.5	

2.4 力学性能

实测值

同批随炉材料的强度与断后伸长率检测结果见表 3。可见,抗拉强度、规定塑性延伸强度均符合GB/T 33164.2—2016 中 55CrMn 材料的强度与韧性技术要求。断后伸长率虽符合GB/T 33164.2—2016 规定,但其数值相对较低,显示材料韧性一般。

	表 3 力	字性能检测结果					
Tab.3 Mechanical performance test results							
检测项目	抗拉强度 <i>R</i> _m /MPa	规定塑性延伸 强度 <i>R</i> _{P0.2} /MPa	断后伸长率 A/%				
技术要求	≥1400	≥1250	≥6.0				

1375

7.0

试件基体心部硬度检测结果见表 4。可见,硬度 满足产品规定的 55CrMn 材料心部硬度 42~49HRC 的 技术要求。

表 4 硬度测试结果(HRC) Tab.4 Hardness test results (HRC)

测试位置	心部
技术要求	42~49
实测值	46.5

2.5 非金属夹杂物及晶粒度

1490

试件裂纹源处垂直于断口面的非金属夹杂物评

定图见图 2,该件心部平均晶粒度评定图见图 3。依据 图 2 对材料非金属夹杂物的评定结果见表 5。可见,非 金属夹杂物符合 GB/T 33164.2—2016 中 55CrMn 材料 1 组细系的非金属夹杂物技术要求。显示其非冶炼过 程非金属夹杂控制良好。



图 2 非金属夹杂物评定图 Fig.2 Non-metallic inclusion assessment diagram



图 3 平均晶粒度评定图 Fig.3 Average grain size assessment diagram

表 5 非金属夹杂物评定结果 Tab.5 Non-metallic inclusion test results							
种类	A 类(细系)	B 类 (细系)	C 类(细系)	D 类(细系)	DS 类(细系)		
技术要求	≤2.0级	≤1.5 级	≤1.0级	≤1.0级	≤1.5 级		
实测等级	0.5 级	0.5 级	0.5 级	0.5 级	1级		

通过图 3 与标准评级图对比,可知其晶粒度为 8 级,高于 GB/T 33164.2—2016 规定的 6 级要求,显示其冶炼与热处理等过程未导致晶粒异常长大。

2.6 金相组织及晶粒度

试件的金相组织如图 4 所示。由图 4a 可见,试件 心部为回火屈氏体+极少量铁素体,组织均匀、细小^[16]。 由图 4b 可见,试件表层有轻微脱碳,脱碳层深度约 0.08 mm,表层有较明显的喷丸凹坑。由图 4c 可见, 表层有明显的伸向基体内侧的线性缺陷。结合其两侧 脱碳不明显、无明显球状氧化物等特征,分析其应为 多道次轧制过程形成的折叠缺陷^[10]。折叠处金属被喷 丸带出,而呈半脱落状态。由图 4d 可见,表层凹坑处 有多处折叠,折叠末端有向心部延伸的细小裂纹。



图 4 试件的金相组织 Fig.4 Metallographic structure of fracture sample: a) core; b)-d) surface

2.7 能谱

能谱取样位置如图 5 所示,其中,A、B、C 点 均为折叠缺陷处,D 点为钢基体。能谱分析结果见 表 6。可见,折叠缺陷处较钢基体 C 元素含量略有 升高,钢基体未检测出 O 元素,而折叠缺陷处均检 测出 O 元素,其中 C 点 O 元素的质量分数高达 6.37%。沿着折叠缺陷也未检测出钢材成分以外的其 他合金元素。分析认为,该折叠缺陷是因为前道次 轧制中,高温加热过程在钢的表层产生过充满、划 痕、沟状形状等缺陷导致的,为非外来夹杂造成的 折叠缺陷^[17]。



图 5 能谱分析取样位置 Fig.5 Sampling positions of EDS test

表 6 能谱分析结果 Tab.6 EDS test results							
							70
Fe	С	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	О
94.12	0.79	0.19	0.84	0.7	0.09	0.05	3.22
95.73	0.73	0.21	0.96	1.15	0.14	0.07	1.01
90.35	0.8	0.39	0.86	0.94	0.29	0	6.37
96.98	0.53	0.27	0.9	0.99	0.12	0.11	0
	Fe 94.12 95.73 90.35 96.98	Fe C 94.12 0.79 95.73 0.73 90.35 0.8 96.98 0.53	末6 Tab.6 E Fe C Si 94.12 0.79 0.19 95.73 0.73 0.21 90.35 0.8 0.39 96.98 0.53 0.27	表 6 能谱分析结射 Tab.6 EDS test result Fe C Si Mn 94.12 0.79 0.19 0.84 95.73 0.73 0.21 0.96 90.35 0.8 0.39 0.86 96.98 0.53 0.27 0.9	表 6 能谱分析结果 Tab.6 EDS test resultsFeCSiMnCr94.120.790.190.840.795.730.730.210.961.1590.350.80.390.860.9496.980.530.270.90.99	表 6 能谱分析结果 Tab.6 EDS test resultsFeCSiMnCrNi94.120.790.190.840.70.0995.730.730.210.961.150.1490.350.80.390.860.940.2996.980.530.270.90.990.12	表 6 能谱分析结果 Tab.6 EDS test resultsFeCSiMnCrNiCu94.120.790.190.840.70.090.0595.730.730.210.961.150.140.0790.350.80.390.860.940.29096.980.530.270.90.990.120.11

2.8 断口微观形貌

试件断口的微观形貌如图 6 所示。由图 6a 可见,裂纹在弯曲变形的内侧表层凹坑内圆弧处萌生,裂纹源断口为撕裂和准解理的混合断裂形式,未发现 原始裂纹及非金属夹杂,但有明显的凹陷、分层。 由图 6b 可见,扩展区断口为准解理断裂,有典型的 疲劳贝壳纹。由图 6c、d 可见, 瞬断区断口以韧窝 的韧性断裂为主,局部可见沿晶断裂特征及二次裂 纹^[18]。

图 7 为褪去漆膜后的断口形貌。可见,裂纹起 始位置表面喷丸凹痕较深,凹痕边缘形成明显凸起 棱边。



图 6 试件断口微观形貌 Fig.6 Fracture micro topography of sample: a) crack source; b) crack expansion area; c)-d) instantaneous fracture area



图 7 褪漆后的断口形貌 Fig.7 Fracture micro topography of sample without paints

3 分析与讨论

试件化学成分、氢含量等均符合 GB/T 33164.2— 2016 的规定。非金属夹杂物明显优于 GB/T 33164.2— 2016 的 1 组细系要求。钢基体金相组织为均匀、细 小的回火屈氏体+极少量铁素体,组织未见异常。脱 碳层深度约为 0.08 mm,在 GB/T 33164.2—2016 的要 求范围内,且实践表明,该脱碳层深度可满足使用要 求。结合试件抗拉强度、规定塑性延伸强度、断后伸 长率、基体硬度等性能指标,基本可排除材质成分、 氢脆、热处理缺陷等导致失效的可能性。

试件断口裂纹扩展区约占整个断口面积的 40%~

50%,表明试件所受名义应力不大。断口未见明显疲劳台阶纹,显示并未发生应力幅剧烈变化的情形。因此,基本可排除试验过程异常导致的应力剧烈波动条件下的瞬时或短时破坏^[19]。

台架试验过程中,试件弯曲变形的内侧所受的剪 切应力最大。因此,该处表层一旦出现极为微小的缺 陷,也会引起显著的应力集中,导致材料的晶格产 生极大的扭曲破坏,形成疲劳核心,且随着应力的 不断循环,该疲劳核心将逐渐扩展,最终造成疲劳 断裂。分析认为,本试件虽然经喷丸处理,理论上, 高速喷射钢丸冲击后,材料表面受冷加工作用而强 化,且表面原始拉应力会被部分抵消,疲劳强度会 有所增加^[20-24]。但结合试件金相及断口微观形貌可 知,试件表面仍有约 0.08 mm 的脱碳层,即脱碳层并 未完全被喷丸清除。由此可以进一步推断,材料表面 的其他原始缺陷也并未在喷丸工艺中被完全去除。此 外,试件表面脱碳后的铁素体组织在喷丸过程中容易 屈服变形,或形成局部脱落等,造成原始表面缺陷, 即形成疲劳缺陷的可能性增高。此外,试件表面喷丸 凹痕尺寸较大, 且较深, 在凹痕边缘形成明显的凸起 棱边, 而凸起棱边易引起局部应力集中, 即具备了形 成疲劳核心的条件。表层喷丸凹坑有多处折叠缺陷, 折叠末端有向心部延伸的细小裂纹,推断认为,在较 大的循环应力作用下,折叠缺陷端部存在明显的应力 集中,进而产生裂纹源,即折叠的产生进一步增加了 疲劳核心形成的可能性[25-27]。此外,考虑到试件断口 裂纹扩展区为准解理断裂,最后断裂区为韧窝和沿晶 的混合断裂,说明试件仍有一定的脆性倾向。在疲劳 核心形成后,阻碍裂纹扩展的能力降低,最终,上述 多因素共同导致试件在 85 000 次的台架弯曲变形试 验中发生断裂。

4 结论

 1)试件弯曲变形内侧的剪切应力值最大,其表 层一旦出现极为微小的缺陷,也会引起应力集中,从 结构上看,其疲劳断裂风险大。

2)试件最后断裂区为韧窝和沿晶的混合断裂, 试件断后伸长率虽满足国标技术要求,但仍较低,说 明样品仍有一定的脆性。

3)喷丸并未完全去除脱碳层及表面的其他原始 缺陷,表层形成疲劳缺陷的可能性增高。

4) 喷丸造成表层存在较深的凹坑,凹坑边缘形 成明显凸起棱边,引起应力集中。材料表层存在折叠 缺陷,在较大的循环应力作用下,折叠缺陷端部,尤 其是凹坑处折叠缺陷端部首先成为裂纹萌生点,在循 环应力的作用下,早期裂纹持续扩展,最终导致疲劳 断裂。

因试件喷丸所用钢丸直径较大,且喷丸压力较

大,形成较大的凹痕和明显的凸起棱边,容易引起应 力集中。因此可适当减小钢丸直径和喷丸力,并可适 当增加喷丸过程的表层去除深度。因最后断裂区出现 脆性断口,说明样品仍有一定的脆性,且试件抗拉强 度、规定塑性延伸强度和硬度较高,而断后伸长率虽 满足国标技术要求,但仍偏低。因此可适当调整热处 理工艺,降低材料强度,提高材料韧性。将抗拉强度 控制在 1250~1400 MPa,规定塑性延伸强度控制在 1000~1200 MPa,使断后伸长率大于 10%。改进轧制 工艺,消除材料的折叠缺陷,加强材料缺陷检测。

参考文献:

- 周长城.车辆悬架设计及理论[M].北京:北京大学出版社,2011.
 ZHOU Chang-cheng. Vehicle suspension design and theory[M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
 [2] 王霄锋.汽车底盘设计[M].北京:清华大学出版社,
- [2] 土肖律. 汽牛瓜盘反灯[M]. 北京: 淯华入字出版社, 2010.
 WANG Xiao-feng. Automotive chassis design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [3] 胡跃均, 陈麒琳, 张海均, 等. 汽车悬架螺旋弹簧断裂 分析[J]. 热加工工艺, 2021, 50(12): 156-159.
 HU Yue-jun, CHEN Qi-lin, ZHANG Hai-jun, et al. Fracture analysis of automotive suspension coil spring[J]. Hot working technology, 2021, 50(12): 156-159.
- [4] 李树梅, 阎平. 螺旋弹簧断裂分析及预防措施[J]. 金属 热处理, 2012, 37(11): 130-132.
 LI Shu-mei, YAN Ping. Fracture analysis of spiral spring and its countermeasures[J]. Heat treatment of metals, 2012, 37(11): 130-132.
- [5] 王仁智,姜传海. 圆柱螺旋弹簧的正断/切断型疲劳断 裂模式与提高其疲劳断裂抗力的途径[J]. 中国表面工 程, 2010, 23(6): 7-14.
 WANG Ren-zhi, JIANG Chuan-hai. Normal and shear fatigue fracture modes of circular coil spring and the approach of improving fatigue fracture resistance[J]. China surface engineering, 2010, 23(6): 7-14.
- [6] HU Zhi-zhong, MA Li-hua, CAO Shu-zhen. A study of shear fatigue crack mechanisms[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 1992, 15(6): 563-572.[LinkOut]
- [7] GB/T 20123—2006, 钢铁总碳硫含量的测定高频感应 炉燃烧后红外吸收法(常规方法)[S].
 GB/T 20123—2006, Steel and iron-determination of total carbon and sulfur content infrared absorption method after combustion in an induction furnace (routine method)[S].
- [8] GB/T 20125—2006, 低合金钢多元素含量的测定电感 耦合等离子体原子发射光谱法[S]. GB/T 20125—2006, Low-alloy steel-determination of multi-element contents-Inductively coupled plasma atomic emission spectrometric method[S].

 [9] GB/T 223.82—2018, 钢铁氢含量的测定惰气脉冲熔融-热导或红外法[S].
 GB/T 223.82—2018, Steel and iron-determination of hy-

· 106 ·

drogen content-thermal conductivity/infrared method after fusion under inert gas[S].

 [10] GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室 温试验方法[s].
 GB/T 228.1—2010, Metallic materials-Tensile test-

ing—Part 1: Method of test at room temperature[S].

- [11] GB/T 230.1—2018, 金属材料洛氏硬度试验 第1部分: 试验方法[S].
 GB/T 230.1—2018, Metallic materials-Rockwell hardness test—Part 1: Test method[S]
- [12] GB/T 10561—2005, 钢中非金属夹杂物含量的测定标 准评级图显微检验法[S]. GB/T 10561—2005, Steel-determination of content of nonmetallic inclusions-micrographic method using standards diagrams[S].
- [13] GB/T 6394—2017, 金属平均晶粒度测定方法[S]. GB/T 6394—2017, Determination of estimating the average grain size of metal[S].
- [14] GB/T 224—2008, 钢的脱碳层深度测定法[S]. GB/T 224—2008, Determination of depth of decarburization of steels[S].
- [15] GB/T 33164.2—2016, 汽车悬架系统用弹簧钢 第 2 部 分:热轧圆钢和盘条[S].
 GB/T 33164.2—2016, Spring steels for automotive suspension system—Part2: Hot rolled round steel bar and wire rod[S].
- [16] 李炯辉, 施友方, 高汉文. 钢铁材料金相图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
 LI Jiong-hui, SHI You-fang, GAO Han-fang. Metallographic atlas of iron and steel materials[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technology Publishers, 2004.
- [17] 覃业军,郭泽尧. 大盘卷冷镦钢表面折叠、裂纹的判别 及形成原因分析[J]. 金属材料与冶金工程, 2009, 37(6): 14-17.

QIN Ye-jun, GUO Ze-yao. Distinguishing on surface laps and cracks of cold heading steel for big size coils and analyzing on their forming causes[J]. Metal materials and metallurgy engineering, 2009, 37(6): 14-17.

- [18] 姜锡山,赵晗.钢铁显微断口速查手册[M].北京:机械工业出版社,2010.
 JIANG Xi-shan, ZHAO Han. Manual for quick inspection of steel micro fracture[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.[LinkOut]
- [19] 王国凡. 材料成形及失效[M]. 北京: 化学工业出版 社,2002.

WANG Guo-fan. Material forming and failure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

- [20] 王帅. 喷丸残余应力和表面粗糙度对疲劳寿命的综合 影响研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
 WANG Shuai. Research on the comprehensive effect of shot-peening residual stress and surface roughness on fatigue life[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [21] 秦海迪, 张亚龙, 刘海鹏, 等. 喷丸对 25CrNi₂MoV 钢 滚动接触疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 222-229.
 QIN Hai-di, ZHANG Ya-long, LIU Hai-peng, et al. Effect

of shot peening on rolling contact fatigue properties of 25CrNi₂MoV steel[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 222-229.

[22] 王建明, 赵莉莉, 吕鹤婷. 喷丸残余应力对裂纹扩展疲劳寿命的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(4):
 608-613.
 WANG Jian-ming, ZHAO Li-li, LYU He-ting. Effect of

shot peening residual stress on crack growth fatigue life[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(4): 608-613.

- [23] 王锐坤,郑志军,高岩.表面喷丸工艺对 Super304H 奥氏体耐热钢组织与性能的影响[J].中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 903-909.
 WANG Rui-kun, ZHENG Zhi-jun, GAO Yan. Effect of surface shot peening on microstructure and properties of Super304H austenitic heat-resistant steels[J]. Journal of central south university (science and technology), 2017, 48(4): 903-909.
- [24] ZHANG Ji-wang, LI Wei, WANG Hua-qiang, et al. A comparison of the effects of traditional shot peening and micro-shot peening on the scuffing resistance of carburized and quenched gear steel[J]. Wear, 2016, 368-369: 253-257.
- [25] 彭大暑. 金属塑性加工原理[M]. 第2版. 长沙: 中南大 学出版社, 2014.
 PENG Da-shu. Principles of metal forming processes[M].
 Second edition. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [26] 刘静, 付扬帆, 周富. 汽车用后稳定杆失效分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(11): 79-83.
 LIU Jing, FU Yang-fan, ZHOU Fu. Failure analysis of rear stabilizer rod for automobile[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(11): 79-83.
- [27] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
 CHEN Chuan-yao. Fatigue and fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.