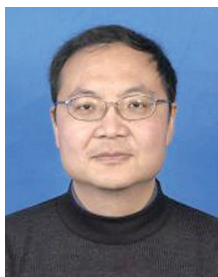


1050 车轮钢组织和力学性能各向异性的研究

张青松¹, 李国栋², 戴光泽¹, 李秋泽², 朱振宇¹, 冯 健¹

(1. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031)

(2. 中车长春轨道客车股份有限公司 转向架研发部, 吉林 长春 130062)



戴光泽

摘 要: 研究了 1050 车轮钢组织和力学性能的各向异性, 在经热处理后的 1050 钢冷轧棒材上并与轧制方向成 0°、30°、45°3 个不同方向取标准圆棒拉伸试样, 在室温条件下进行拉伸试验, 在 0°、15°、30°、45°4 个不同方向取标准 Charpy-U 型冲击试样进行冲击试验, 并观察断口形貌。结果表明: 随着与轧制方向角度的增加, 试样显微组织的均匀性逐渐变差; 拉伸性能随着试样与轧制方向角度的增加而降低, 其中屈服应力与抗拉强度下降比例分别为 10.3%、7.4%, 断口都是韧性断裂; 冲击韧性随着试样与轧制方向角度的增加而降低, 冲击吸收功下降的比例为 27%。随着与轧制方向角度的增加, 1050 车轮钢的强度、塑性与韧性逐渐降低, 综合力学性能降低, 会导致车轮承受多向应力时失圆并出现偏轴磨损现象, 加速车轮的磨损失效。

关键词: 1050 钢; 轧制; 力学性能; 各向异性; 断裂

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)06-0461-06

Investigation on Anisotropic Microstructure and Mechanical Properties of 1050 Wheel Steel

ZHANG Qingsong¹, LI Guodong², DAI Guangze¹, LI Qiuze², ZHU Zhenyu¹, FENG Jian¹

(1. School of Material Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(2. Bogie Developing Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: This article investigated the anisotropic microstructure and mechanical properties of 1050 wheel steel. The tensile test for standard round bar specimens with 0°, 30° and 45° three different angles to rolling direction of heat treated cool rolling 1050 steel round bar were carried out at room temperature. And the impact toughness test for Charpy-U notched specimens with 0°, 15°, 30° and 45° four different angles to rolling direction were carried out at room temperature. The results showed that the homogeneity of microstructure decreased with the angle to rolling direction increasing. The tensile properties decreased with increasing angle to rolling direction. The decrease percentages for yield strength and tensile strength were 10.3% and 7.4% respectively and all fractures were ductile fracture. The impact toughness decreased with increasing angle to rolling direction and the decrease percentage for impact absorbing energy was 27%. The strength, plasticity, impact toughness of 1050 wheel steel decreased with the angle to rolling direction increasing, which results in out of circularity and abnormal wear of wheels, and the wheels' wear failures are speeded up.

Key words: 1050 wheel steel; rolling; mechanical property; anisotropy; fracture

1 前 言

车轮是铁路车辆运行传输动力的重要部件, 也是影

响铁路车辆行车安全的重要部件之一。随着高速重载运行的发展, 对车轮的安全性和可靠性提出了更高的要求。运行速度的提高以及轴重的增加, 轮轨动态作用力以及接触应力增加, 轮轨之间存在冲击载荷, 列车车轮磨损损伤问题严重, 加速车轮圆周方向多边形磨损, 即车轮失圆现象, 并发生偏轴磨损。1998 年德国 ICE 型高速列车由于弹性车轮行车过程中发生多边形化问题, 轮箍在车轮不圆激励作用下引起疲劳断裂, 导致列车脱轨。车轮在运行过程中, 有直线、曲线、道岔以及制动 4 种载荷工况, 尤其是在曲线与道岔载荷工况

收稿日期: 2016-03-18

基金项目: 西南交通大学 2015 年研究生创新实验实践项目 (YC201509102)

第一作者: 张青松, 男, 1991 年生, 博士研究生

通讯作者: 戴光泽, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师,

Email: g. dai@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.06.10

时, 车轮不仅承受轮轨垂向力, 还要承受轮轨横向力, 使得车轮承受多向应力。辗钢车轮由铸坯经过压轧、热处理、机加工等工序制造而成, 其中轧制是成形的重要工步之一, 轧制成形后车轮机械性能的好坏直接关系到车轮服役性能。车轮成形后力学性能的各向异性将会直接影响服役过程中多轴应力的疲劳性能。

对于钛合金板材, 在与板料轧制方向成 0° 和 90° 两个方向上的加工硬化指数以及拉伸性能有明显差异, 而且钛合金板材垂直于轧制方向的疲劳极限和疲劳寿命均高于平行于轧制方向的。对于金属、层压板、纤维等材料, 随着偏轴角度的增加, 材料的拉深性能、加工硬化指数、加工性能、疲劳强度等性能逐渐降低。过共析钢在冷轧过程中珠光体组织变得不均匀。因此, 轧制成形的各向异性对材料服役性能有很大的影响。

迄今为止, 对于车轮服役性能的研究主要集中于服役条件、摩擦磨损、夹杂物、热应力、残余应力等因素对车轮滚动接触疲劳性能的影响。典型车轮用钢 SAE 1050 广泛应用于国外高速车轮以及货车轮, 研究者对其疲劳性能、超高周疲劳性能等进行了相关研究。然而, 关于车轮用钢各向异性的研究报道较少。本文主要研究了冷轧态 1050 车轮钢组织和力学性能的各向异性, 揭示车轮钢各向异性的规律性, 以期对车轮服役过程中承受多向应力时性能评价提供理论基础, 并为车轮结构安全性、可靠性以及抗各向异性设计提供必要的依据。

2 试验材料与方法

试验所用材料为 SAE 1050 碳素结构钢, 供货状态为 $\phi 60$ mm 冷轧态圆棒, 其化学成分如表 1。

表 1 1050 钢化学成分

Table 1 Chemical composition of 1050 steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.53	0.24	0.60	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01

为了获得均匀的铁素体+珠光体组织, 将冷轧态圆棒进行热处理, 以 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度加热至 850°C , 保温 50 min, 然后空冷至室温。所有试样均取于热处理后棒材, 在沿着与轧制方向成 0° 、 15° 、 30° 、 45° 4 个方向进行切割取样, 并在 VK-9710K 型彩色 3D 激光显微镜下观察试样显微组织。

在与轧制方向成 0° 、 30° 、 45° 3 个方向截取标准圆棒拉伸试样, 标距直径为 10 mm, 标距长度为 55 mm, 按照 GB/T 228-2002《金属材料室温拉伸试验》在 CMT-5305 型电子万能试验机上进行拉伸试验, 拉伸速

率为 $5\text{ mm}/\text{min}$, 每个方向用 3 个标准拉伸试样, 结果取平均值。

在与轧制方向成 0° 、 15° 、 30° 、 45° 4 个方向截取标准 Charpy-U 型缺口冲击试样, 试样长度均沿着角度方向, 按照 GB/T 229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》在 JBW-300 型示波冲击试验器上进行冲击试验, 测量车轮钢的冲击吸收功 A_k , 每个角度用 3 个标准冲击试样, 结果取平均值。

将与轧制方向成不同角度的拉伸试样与冲击试样断口在 VHX-1000C 立体测量显微镜下进行断口形貌观察。

3 试验结果与讨论

3.1 显微组织

与轧制方向成不同角度的试样的显微组织如图 1 所示, 显微组织为铁素体+珠光体组织, 其中黑色部分为珠光体, 白亮色部分为铁素体。与轧制方向成 0° 和 15° 方向组织较为相似, 铁素体与珠光体均匀分布, 珠光体组织细小; 30° 方向珠光体轻微长大, 分布较为均匀; 45° 方向, 组织分布不均匀, 珠光体组织明显增大, 铁素体局部集中。随着与轧制方向角度的增加, 珠光体组织逐渐变得粗大, 组织均匀性逐渐降低。沈晓辉等的研究表明, 对于立式环形轧制车轮, 轧制最大变形分布在辐板与轮辋连接处及轮辋外端靠近踏面处, 轮辋外端变形明显大于轮辋内端变形, 轮辋中心变形较难深透。车轮轧制变形不均匀, 造成热成形后显微组织晶粒尺寸及分布的不均匀性。车轮经过轧制并热处理后的强度和韧性与原始组织晶粒尺寸有明显关系, 原始晶粒越细, 热处理后的性能越好。因此车轮轧制过程中组织的不均匀性对车轮的服役性能具有重要影响。

3.2 拉伸性能

图 2 为与轧制方向成不同角度试样的拉伸力-位移曲线, 拉伸性能列于表 2。由图 2 和表 2 可知, 延伸率随着与轧制方向角度的增大没有明显的变化, 只有轻微下降的趋势; 而屈服强度、抗拉强度以及断面收缩率随着与轧制方向角度的增大而明显降低。其中由 0° 方向到 30° 方向屈服强度变化不大, 由 0° 方向到 45° 方向屈服强度降幅为 46 MPa, 下降了约 10.3%; 由 0° 方向到 30° 方向的抗拉强度变化不大, 由 0° 方向到 45° 方向抗拉强度降幅为 56 MPa, 下降了约 7.4%; 断面收缩率由 0° 方向的 59.6% 下降到 45° 方向的 53.4%, 降幅约为 6.2%, 下降比例约为 10.4%; 而延伸率由 0° 方向的 24.0% 下降到 30° 方向的 20.6%, 降幅很小约 3.4%, 45° 方向相比 30° 方向, 延伸率变化不大。

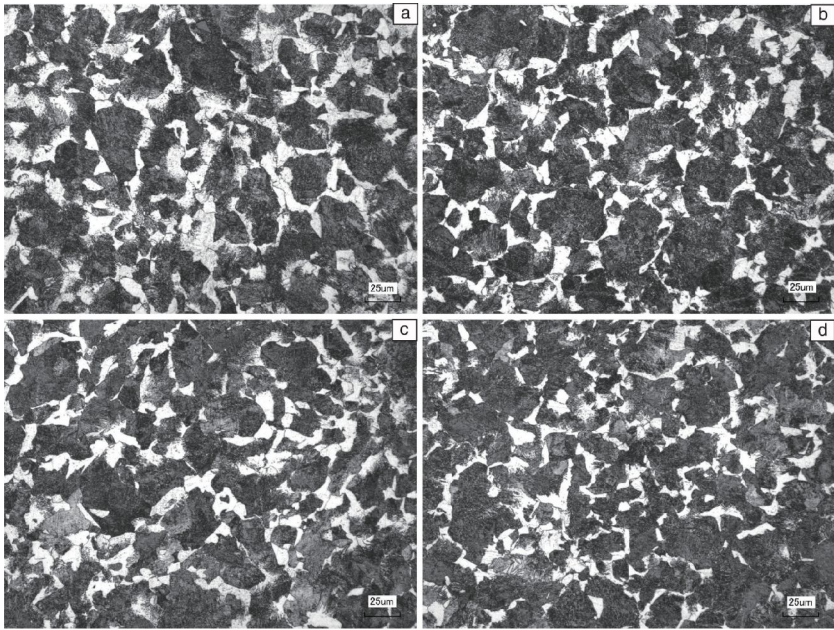


图 1 与轧制方向成不同角度的试样的显微组织：(a) 0°，(b) 15°，(c) 30°，(d) 45°
Fig. 1 Microstructures of samples with different angels to rolling direction；(a) 0°，(b) 15°，(c) 30°，(d) 45°

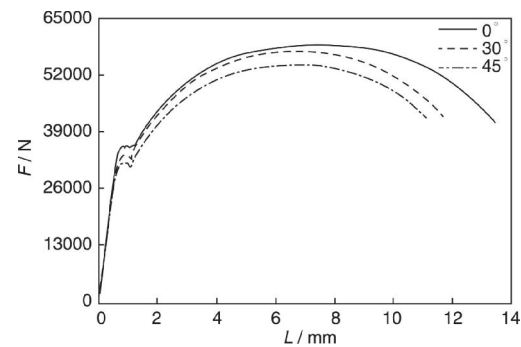


图 2 与轧制方向成不同角度试样的拉伸力-位移曲线
Fig. 2 Tensile force-displacement curves of samples with different angels to rolling direction

表 2 与轧制方向成不同角度的试样的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of samples with different angels to rolling direction

$\theta/(^{\circ})$	σ / MPa	σ / MPa	$A/\%$	$Z/\%$
0	448	762	24.0	59.6
30	432	748	20.6	55.0
45	402	706	20.4	53.4

3. 3 冲击性能

表 3 列出了与轧制方向成不同角度的试样的冲击试验结果，可以看出，冲击吸收功的平均值随着与轧制方向角度的增大而降低，由 0°方向的 48.28 J 降低到 45°

方向的 35.24 J，降幅约为 13.04 J，下降比例约为 27%。另外 0°与 15°方向的冲击吸收功相差较小，30°与 45°方向的冲击吸收功迅速下降。

表 3 与轧制方向成不同角度试样的冲击试验结果
Table 3 Impact test result of samples with different angels to rolling direction

$\theta/(^{\circ})$	No.	A / J	Average/J
0	1-1	45.89	48.28
	1-2	50.18	
	1-3	48.78	
15	2-1	47.65	47.43
	2-2	48.95	
	2-3	45.69	
30	3-1	40.28	39.62
	3-2	38.70	
	3-3	39.88	
45	4-1	35.41	35.24
	4-2	36.14	
	4-3	34.18	

3. 4 试样断口形貌

与轧制方向成不同角度试样的拉伸断口形貌如图 3 所示，可以看出，与轧制方向成 0°、30°、45°三个不同角度的试样拉伸断口形貌均为典型的杯锥状断裂，而且

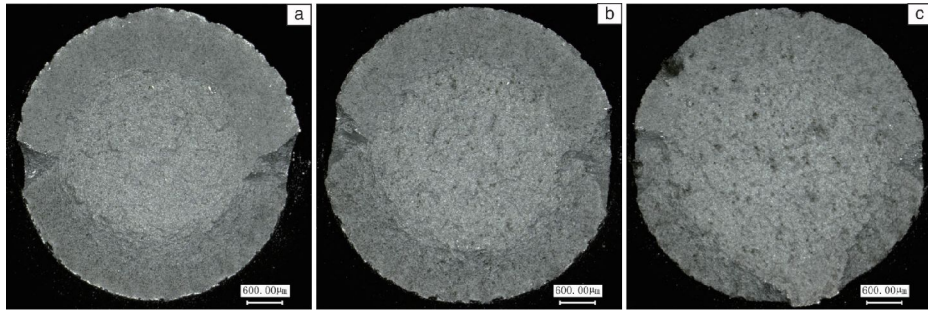


图 3 与轧制方向成不同角度试样的拉伸断口形貌: (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°

Fig. 3 Tensile fracture morphologies of samples with different angels to rolling direction: (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°

在试样断口心部均有韧窝的存在, 因此为微孔聚集型断裂, 表现出良好的韧性断裂性能。试样在承受拉伸应力的时候, 首先发生可恢复弹性变形, 试样被拉长; 当应力超过其弹性极限时, 试样开始发生不可恢复的塑性变形, 即明显屈服现象, 试样变形急剧增加; 当试样受力超过屈服极限后, 由于铁素体相与渗碳体相局部变形不一致引起材料内部产生微小的孔洞, 孔洞尺寸随着拉应力的增加逐渐聚集、长大, 当载荷超过拉伸曲线最高点后, 3 种不同角度试样均发生颈缩; 颈缩处实际应力不断提高, 塑性变形在试样中心部分产生横向应力, 导致微裂纹产生; 微裂纹扩展到一定程度后, 塑性变形产生的热量导致金属局部软化, 受平面应力状态的影响, 试样沿与拉伸应力成 45° 方向剪切脱开, 形成杯锥状断口。杯锥状断口分为 3 个区域, 在断口中央晶粒被拉长, 微小孔洞形成锯齿状形貌, 为纤维区, 是断裂的起始处; 当微裂纹形成后, 在纤维区缓慢扩展, 扩展到一定程度后, 裂纹尺寸变大并快速扩展, 形成放射区, 呈现纤维状放射条纹; 最后, 试样剪切断开, 形成剪切唇。断口各区域所占比例相差不大, 但 0° 方向断口纤维区较为平整, 故强度、塑性较高; 而 30° 与 45° 方向断口纤维区较为粗糙不平整, 断口中有较多的孔洞, 因此强度、塑性变差。随着与轧制方向角度的增加, 材料的强度与塑性均降低。

图 4 是与轧制方向成不同角度试样的冲击断口形貌, 可以看到, 冲击试样断口分为纤维区、放射区、剪切唇 3 个区域。这 3 个区域所占比例大小, 标志着材料韧性的优劣, 而冲击功主要消耗在经过塑性变形而形成的纤维状断口上。在实验条件一致的情况下, 纤维区和剪切唇越大, 则材料韧性越好。观察断口形貌, 可看到随着与轧制方向角度的增加, 表面无金属光泽的纤维状断口面积不断减小, 剪切唇区域面积也有轻微减小趋势, 而位于中心、齐平的、有金属光泽的结晶状断口, 即放射区面积不断增大。因此, 随着与轧制方向角度的

增大, 材料的韧性逐渐降低。0° 方向试样断口 (图 4a, b), 纤维区在试样 U 型缺口中部呈同心圆弧状, 所占区域面积较大, 而且剪切唇区域明显可见, 放射区较为平整; 15° 方向试样的断口形貌 (图 4c, d) 与 0° 方向的相差不大。30° 方向试样断口 (图 4e, f), 纤维区形状开始发生变化, 区域面积减小, 放射区平整度降低, 剪切唇宽度变窄且不均匀, 冲击韧性降低; 45° 方向试样断口 (图 4g, h), 纤维区形状发生显著变化, 由同心圆弧状变为长条状, 宽度变窄, 区域面积明显降低, 放射区不平整有凹陷或凸起部位, 剪切唇区域明显变窄, 在断口右下方局部出现无剪切唇现象, 冲击韧性显著降低。

3.5 分析与讨论

对于冷轧成形材料, 在轧制方向上组织呈等轴细长晶粒, 组织较为均匀, 综合性能较好, 在与轧制方向成不同角度的方位进行切割取样, 破坏了轧制等轴细长晶粒组织, 出现扁平晶粒, 组织的均匀性变差, 综合性能降低。在静拉伸试验以及冲击试验中, 与轧制方向平行的等轴细长晶粒在受力的过程中, 应力与轧制方向平行, 各个晶粒受力方向基本一致, 变形较为均匀, 抵抗变形与断裂的能力更强, 表现出更好的力学性能。与轧制方向成 30° 和 45° 的试样, 显微组织不再是等轴细长晶粒, 珠光体组织出现粗大现象, 在静拉伸以及冲击试验中, 试样受到应力作用时, 应力与轧制方向不再平行, 各个晶粒受力方向不一致, 变形不均匀, 综合力学性能显著降低。当角度在 30° 以内时, 晶粒在受到应力作用时, 发生缓慢变形, 晶粒之间相互影响较小, 因此屈服强度与抗拉强度相差较小。在冲击载荷下, 几乎是瞬时作用于试样上相当高的应力, 塑性变形难于充分进行, 而比较集中在某些局部区域, 又因为试样与轧制方向的角度不同, 组织均匀性不同, 塑性变形难度更大, 因此冲击韧性随着与轧制方向角度的增加而逐渐下降。当角度在 15° 以内时, 由于显微组织均匀性相差较小,

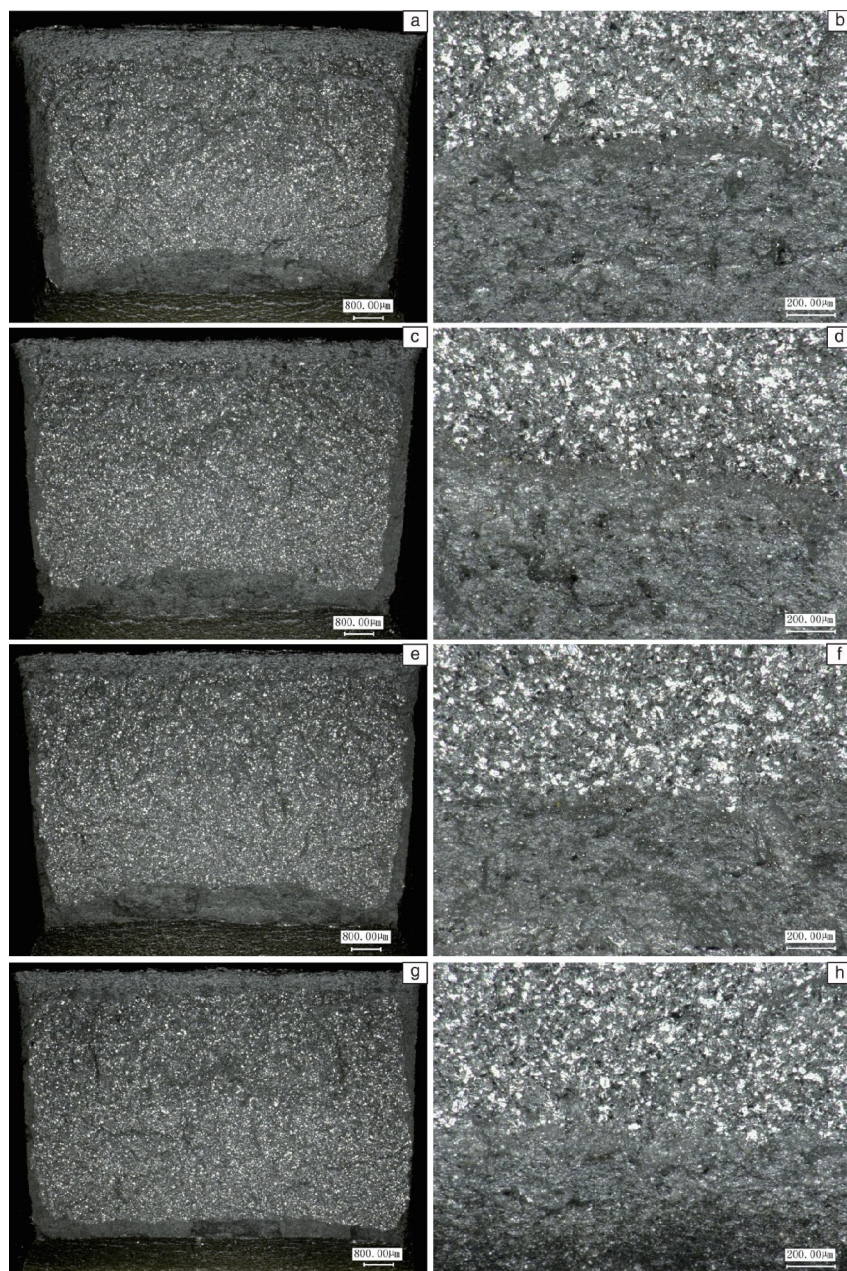


图4 与轧制方向成不同角度试样的冲击断口形貌: (a, b) 0°, (c, d) 15°, (e, f) 30°, (g, h) 45°

Fig. 4 Impact fracture morphologies of samples with different angels to rolling direction: (a, b) 0°, (c, d) 15°, (e, f) 30°, (g, h) 45°

因此冲击韧性相当。随着与轧制方向角度的增加, 车轮钢强度、塑性与韧性均逐渐降低, 综合力学性能降低。由于车轮钢偏轴方向力学性能降低, 车轮在实际运行环境中承受多向应力时的服役性能降低, 促使车轮失圆出现偏轴磨损现象, 并加速车轮的不均匀性磨损。

4 结 论

(1) 与轧制方向成不同角度试样的拉伸性能存在

各向异性, 随着角度的增加, 拉伸性能逐渐降低。角度在 45° 以内时, 屈服强度与抗拉强度下降比例较大, 分别为 10.3%、7.4%; 当角度在 30° 以内时, 屈服强度与抗拉强度变化不大。拉伸断口形貌均为杯锥状, 具有良好的拉伸断裂韧性。

(2) 与轧制方向成不同角度试样的冲击性能各异, 冲击吸收功随着角度的增加逐渐降低, 在 45° 以内下降比例为 27%, 在 15° 以内冲击性能相当。随着角度的增

加, 试样冲击断口纤维区和剪切唇所占比例不断减小, 放射区所占比例相应增加。

(3) 随着与轧制方向角度的增加, 1050 车轮钢的强度、塑性与韧性逐渐降低, 综合力学性能降低, 会导致车轮承受多向应力时失圆并出现偏轴磨损现象, 加速车轮的磨损失效。

参考文献 References

- [1] Mi Guofa (米国发), Liu Yanlei (刘彦磊), Zhang Bin (张斌), *et al. Journal of the China Railway Society* (铁道学报) [J], 2010, 32 (04): 108–113.
- [2] Cong Tao (丛韬), Fu Xiuqin (付秀琴), Zhang Bin (张斌), *et al. Railway Locomotive & Car* (铁道机车车辆) [J], 2014, 34 (05): 24–27.
- [3] UIC510-5. *Technical Approval of Solid Wheels* [S]. 2003.
- [4] Wang Xing (王兴), Deng Jiabin (邓家彬), Wang Ruiqin (王瑞琴), *et al. Hot Working Technology* (热加工工艺) [J], 2015, 44 (17): 128–129+133.
- [5] Lv Wei (吕伟), Chen Lijia (陈立佳), Che Xin (车欣), *et al. Journal of Shenyang University of Technology* (沈阳工业大学学报) [J], 2012, 34 (05): 504–508.
- [6] Guo Guoyi (郭国谊). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [7] Liao Jian (廖建), Cao Zengqiang (曹增强), Dai Ying (代瑛), *et al. Journal of Plasticity Engineering* (塑性工程学报) [J], 2007, 14 (05): 67–70.
- [8] Zhang Xiuli (张秀丽), Xie Chaohui (谢朝晖), Zhang Heng (张恒). *China Mechanical Engineering* (中国机械工程) [J], 2009, 20 (21): 2617–2620.
- [9] Yang Chang (杨昌). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [10] Xiong Yi (熊毅), Jia Yuxin (贾玉鑫), Tian Zhanwei (田占伟), *et al. Hot Working Technology* (热加工工艺) [J], 2010, 39 (10): 10–12.
- [11] Bhattacharyya S, Adhikary M, Das M B, *et al. Engineering Failure Analysis* [J], 2008, 15 (5): 547–554.
- [12] Ekberg A, Kabo E. *Wear* [J], 2005, 258 (7–8): 1288–1300.
- [13] Zhou Guiyuan, He Chenggang, Wen Guang, *et al. Tribology International* [J], 2015, 91: 160–169.
- [14] Walther F, Eifler D. *International Journal of Fatigue* [J], 2007, 29 (9–11): 1885–1892.
- [15] Wagner V, Starke P, Kerscher E, *et al. International Journal of Fatigue* [J], 2011, 33 (1): 69–74.
- [16] Shen Xiaohui (沈晓辉), Yan Jun (阎军), An Tao (安涛), *et al. Iron and Steel* (钢铁) [J], 2006, 41 (03): 55–58.
- [17] Salishchev G A, Sugirbekov B A, Farkhutdinov K G, *et al. Metal Science and Heat Treatment* [J], 1995, 37 (5–6): 180–183.
- [18] Sakamoto H, Toyama K, Hirakawa K. *Materials Science and Engineering A* [J], 2000, 285 (1–2): 288–292.

(编辑 惠琼)