

## 终轧温度和晶粒度对非调质钢 JGF45V 冲击功的影响

韩怀宾<sup>1,2,3</sup> 宋建锋<sup>3</sup> 王清波<sup>3</sup> 白瑞娟<sup>3</sup> 王维<sup>2,3</sup> 虞学庆<sup>3</sup>

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819;

2 河南省特殊钢材料研究院有限公司, 济源 459000; 3 河南济源钢铁(集团)有限公司, 济源 459000)

**摘要** 对非调质钢 JGF45V 终轧 1 000 °C 热轧态和 860 °C 正火态冲击功试样进行金相分析和扫描电镜分析, 得出晶粒度是影响非调质钢 JGF45V 室温冲击功的重要参数。通过终轧温度由 1 000 °C 降低至 900 ~ 930 °C, 冷却速度为 0.3 °C/s 的工艺试验, 晶粒度级别由 5 提高到 7, 室温 U 型冲击功由 32 J 提高到 ≥55 J。

**关键词** 非调质钢 JGF45V 冲击功 晶粒度 终轧温度 冷速

## Effect of Finishing Rolling Temperature and Grain Size on Impact Energy of Non-Quenched-Tempered JGF45V Steel

Han Huaibin<sup>1,2,3</sup>, Song Jianfeng<sup>3</sup>, Wang Qingbo<sup>3</sup>, Bai Ruijuan<sup>3</sup>, Wang Wei<sup>2,3</sup> and Yu Xueqing<sup>3</sup>

(1 State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819;

2 Henan Special Steel Advance Materials Research Institute Co Ltd, Jiyuan 459000;

3 Henan Jiyuan Iron & Steel (Group) Co Ltd, Jiyuan 459000)

**Abstract** The impact energy samples of non-quenched-tempered steel JGF45V hot-rolled state by finishing rolling at 1 000 °C and normalized state by normalizing at 860 °C are analyzed by metallography and scanning electron microscope. It is obtained that grain size is an important parameter affecting room temperature impact energy of non-quenched-tempered JGF45V steel. Through process test of decreasing the finishing rolling temperature from 1 000 °C to 900 ~ 930 °C with the cooling rate being 0.3 °C/s, the grain size rating of steel increases from 5 to 7, and the room U-shaped impact energy increases from 32 J to ≥55 J.

**Material Index** Non-Quenched-Tempered JGF45V Steel, Impact Energy, Grain Size, Finishing Rolling Temperature, Cooling Rate

非调质钢是通过微合金化、控轧、控冷等方法, 取消调质处理, 性能达到调质钢要求的一种优质结构钢<sup>[1]</sup>, 活塞杆是用来支撑活塞做功的连接部件, 是一种运动较为频繁和技术要求较高的运动部件<sup>[2]</sup>。其中活塞杆用非调质钢 JGF45V, 用户要求室温环境下 U 型冲击检测结果 ≥35 J, 以保障活塞连接部件在支持活塞做功的过程中可以承受各种载荷, 并能保持稳定的状态且不产生变形、断裂或失效。济钢公司初期开发的活塞杆用非调质钢 JGF45V, 在检验过程中发现室温环境下 U 型冲击检测结果偏下限或低于下限, 严重阻碍了该钢种的开发, 为此对影响活塞杆用非调质钢冲击韧性的影响因素进行了深入研究。

### 1 试验材料及方案

非调质钢热轧 JGF45V 圆钢生产工艺为: 120 t 转炉冶炼-LF-RH-连铸(400 mm × 500 mm 方坯)-轧制-钢材缓冷。采用 Φ105 mm 规格的 JGF45V 圆钢进行试验研究, 化学成分见表 1, 其成分符合非调质钢 JGF45V 钢技术条件要求。

表 1 JGF45V 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of JGF45V steel /%

项目	C	Si	Mn	P	S	V
目标成分	0.40 ~ 0.48	0.15 ~ 0.35	0.80 ~ 1.40	≤ 0.035	≤ 0.035	0.06 ~ 0.15
实测成分	0.44	0.28	1.35	0.021	0.003	0.09

在同一支活塞杆用非调质钢 JGF45V 热轧圆钢试样上截取 Φ105 mm × 130 mm 试样 6 支, 将所取试样随机分成 2 组进行试验, 试验方案见表 2。在 6 支试样 1/2 半径处沿纵向取 10 mm × 10 mm × 55 mm U 型缺口冲击试样, 进行 U 型冲击对比测试。采用金相分析和扫描电镜等方法对试验钢的显微组织进行观察和分析。

### 2 试验结果和分析

从表 2 可以看出, 试验方案一的 3 个室温 U 型冲击检测结果, 一个处于标准下限, 两个低于标准要求, 试验方案二经过正火后的 3 个试样室温 U 型冲击功得到大幅提升, 达到了 60 J 以上, 符合标准要求。

### 2.1 宏观断口

金属材料的冲击断口由纤维区、放射区以及剪切唇区 3 部分组成,对应断裂过程中裂纹的形成区、扩展区和断裂区,断口的纤维区和剪切唇区域为试样断口的韧性区域,放射区则为断口的脆性区域,可通过衡量放射

表 2 试验方案和 U 型冲击检测结果

Table 2 Test scheme and U-shaped impact test results							
试验方案	试样状态	取样方式	取样位置	U 型冲击 取样数量	U 型冲击 试样编号	室温 U 型 冲击功/J	室温 U 型冲 击功标准/J
一	热轧态,终轧温度 1 000 °C	热轧态 取样	R/2 处	3	1,2,3	32,32,35	≥35
二	860 °C 正火	热处理后 取样	R/2 处	3	4,5,6	65,63,68	≥35

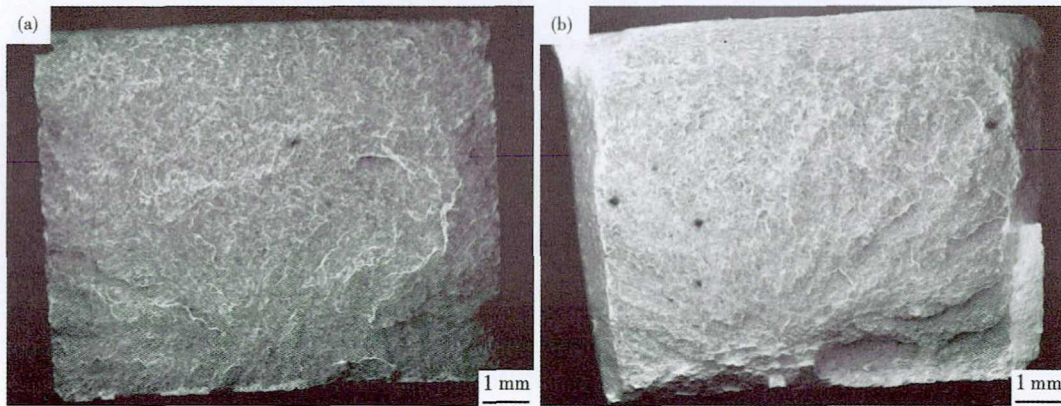


图 1 JGF45V 钢冲击断口宏观形貌图:(a)1 000 °C 终轧的热轧态;(b)860 °C 正火态

Fig. 1 Macro morphology of impact fracture of JGF45V steel: (a) hot rolled state by finishing rolling at 1 000 °C; (b) 860 °C normalized state

区或纤维区和剪切唇区域面积在整个断口面积中所占比例,即可间接判断材料韧性的好坏<sup>[3-4]</sup>。

两个试验方案对应冲击试样断口形貌见图 1,热轧态试样断口平齐光亮,呈结晶状,且断口有较强的金属光泽,无明显纤维区及剪切唇区,放射区几乎占据全部断口,断口无明显塑性变形。正火态试样冲击断口表面不平整,呈暗灰色,存在一定比例的纤维区及剪切唇区,放射区面积较热轧态试样断口面积缩小。

### 2.2 微观断口

在两试验方案中挑选 1# 和 4# 冲击断口试样使

用 EVO18 扫描电子显微镜进行扫描电镜分析。热轧态试样断口纤维区呈扇形花样,为解理断裂(图 2a);正火态试样断口纤维区由大小不一的韧窝密集分布(图 2b)。热轧态试样断口放射区为解理断裂,断口放射区可见解理台阶和解理刻面,解理刻面上有少量河流花样,解理刻面呈扇形(图 3a);相比较而言,正火态试样断口存在较高的解理台阶,解理面参差不齐,撕裂产生的裂口深度明显(图 3b),表现出材料具有一定的抗裂纹扩展能力。图 4 为不同方案试验断口剪切唇区形貌,从图 4 中可以看出,热轧态试样断口剪切唇区为韧窝特征和河流状花样特

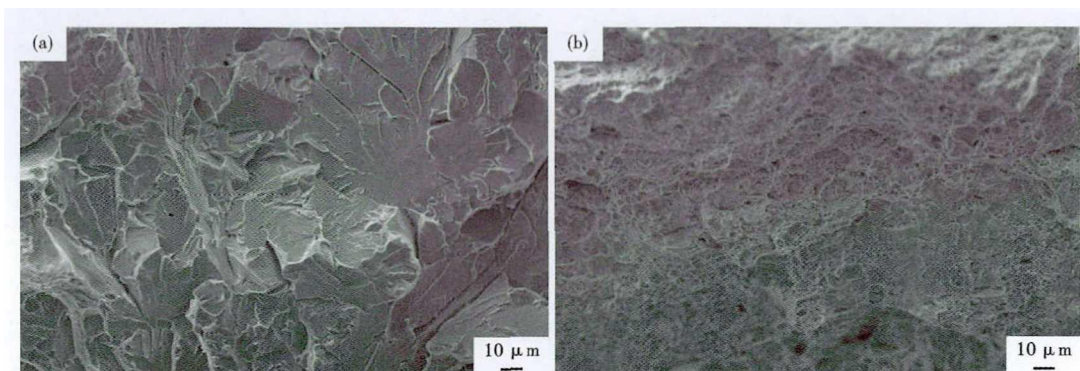


图 2 JGF45V 钢 1 000 °C 终轧的热轧态(a)和 860 °C 正火态(b)冲击断口纤维区微观形貌图

Fig. 2 Macro morphology of fiber zone in impact fracture of (a) 1 000 °C finishing rolling hot rolled state (b) 860 °C normalized state of JGF45V steel



布的珠光体 + 铁素体, 未见异常组织, 无明显带状组织。

(3) 按照 GB/T6394-2017《金属平均晶粒度测定方法》对 1~6 号试样晶粒度进行评定。由表 3 可见, 钢材正火后可使得钢材晶粒度得到显著提高。

检验结果表明, 6 支试样非金属夹杂物级别较低、钢材洁净度较高, 组织均正常, 无明显带状组织, 可以看出导致 JGF45V 钢室温冲击功偏低的原因与非金属夹杂物及带状组织无关。经过 860 °C 正火后钢材的晶粒得到细化, 在晶粒细化的同时冲击韧性显著提升。由此可以确定, 影响活塞杆用非调质钢冲击韧性的重要因素为晶粒度。

### 3 控轧控冷工艺实验

根据试验情况, 可以得出晶粒度是影响活塞杆用非调质钢室温冲击功的重要参数, 因此, 细化钢材晶粒成为工艺调整的重要方向。细化钢材晶粒的主要途径有: 微合金化、细化基体组织、降温轧制、加大冷却速度等<sup>[5-7]</sup>。根据生产实际情况, 连铸坯的成分及组织是一定的, 只能通过改善轧制及冷却方式进行试验。

Φ105 mm JGF45V 热轧圆钢正常轧制终轧温度控制在 1 000 °C 左右, 控制较低的终轧温度, 可细化晶粒, 有利于改善韧性<sup>[8]</sup>。轧后冷速对钢材性能影响很大, 合理的快冷工艺可通过析出强化和细化晶粒改善钢材的性能<sup>[9]</sup>。根据轧钢车间的设备现状制定控轧控冷试验方案, 见表 4。

结果表明, 3 种试验轧制方案对活塞杆用非调质钢热轧圆钢微观组织的影响一致, 组织均为均匀

分布的珠光体 + 铁素体, 无异常组织, 无明显带状组织。其中采用低温轧制两种工艺的试样晶粒度与普通轧制工艺相比得到显著细化, 晶粒度达到 6.0 级以上, 尤其是将终轧温度控制在 900 ~ 930 °C、冷却速度为 0.3 °C/s 时, 晶粒度达到 7.0 级, 在保证钢材力学性能的同时, 冲击韧性得到显著提高, 达到 55 J 以上, 满足了室温环境下 U 型冲击功 ≥ 35 J 的技术要求。

### 4 结语

(1) 影响活塞杆用非调质钢室温冲击韧性的重要参数为晶粒度。

(2) 结合生产实际, 采用控轧控冷工艺, 控制非调质钢钢材终轧温度为 900 ~ 930 °C, 冷却速度为 0.3 °C/s 的生产工艺, 在细化晶粒度的同时可以显著提升室温冲击韧性, 是生产活塞杆用非调质钢热轧圆钢最佳的生产控制工艺。

### 参考文献

- [1] 中国钢铁工业协会. GB15712-2016 非调质机械结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [2] 陈定方. 现代机械设计师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [3] 王立民, 彭梦都, 雷玖芳. 45CrMoV 钢冲击断口形貌[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(1): 133-136.
- [4] 彭梦都, 时捷, 崔冰, 等. 高氮奥氏体钢的冲击断口形貌研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(2): 240-245.
- [5] 李冰, 张磊, 孙艺凡. 活塞杆用中碳微合金化钢晶粒度的控制[J]. 特钢技术, 2017, 23(2): 33-46.
- [6] 周红岩. 低温轧制对 Φ50 mm 45 钢显微组织的影响[J]. 河北冶金, 2010, (2): 15-18.
- [7] 魏立群, 柳谋渊, 陈汉辉, 等. 42CrMo 合金棒材降温轧制工艺研究[J]. 钢铁, 2009, 44(9): 53-57.
- [8] 刘献达, 郝彦英, 刘运娜, 等. 49MnVS3 曲轴用非调质钢控轧控冷工艺技术研究及应用[J]. 特殊钢, 2019, 40(4): 31-33.
- [9] 陈思联, 惠卫军, 邵成伟, 等. 控制冷却对中碳高钒非调质钢组织性能的影响[J]. 钢铁, 2015, 50(8): 77-82.

韩怀宾(1982-), 男, 博士生(东北大学), 高级工程师, 2005 年安徽工业大学(本科)毕业, 非调质钢开发。

E-mail: 15239718910@126.com

收稿日期: 2020-11-28

表 4 控轧控冷试验方案及检验结果

Table 4 Test scheme and test results of controlled rolling and cooling

试验方案	轧制方案	终轧钢材温度/°C	冷速/(°C·s <sup>-1</sup> )	晶粒度/级	室温 U 型冲击功/J
一	正常轧制 (980 ~ 1 010 °C)	1 000	0.3	5.0	35, 32, 36
二	低温轧制 (950 ~ 970 °C)	960	0.3	6.0	40, 42, 45
三	低温轧制 (900 ~ 930 °C)	920	0.3	7.0	55, 58, 57