

加热与热处理

## 38MnVS 非调质钢活塞锻后控制冷却工艺

刘江<sup>1,2</sup>, 徐皓<sup>1,2</sup>, 杨德行<sup>1</sup>, 徐逸非<sup>2</sup>

(1. 重庆工程职业技术学院 智能制造与交通学院, 重庆 402246; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 对 38MnVS 非调质钢活塞进行锻后冷却处理并探讨了不同冷却工艺对非调质钢活塞的影响规律。首先, 分析了不同冷却速率对非调质钢活塞的组织性能和力学性能的影响, 可知, 在冷却速率为  $50\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  下, 非调质钢析出珠光体及铁素体时各方面的性能最优。然后, 利用分选装置对非调质钢活塞锻件进行预选, 挑选出达到合格锻造温度的活塞, 并在 4 种不同的冷却工艺下进行冷却处理。冷却过程中, 锻件首先进入冷却速率为  $50\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的第 1 冷却装置, 冷却至  $740\sim 760\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 之后通过输送单元使活塞进入冷却速率为  $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的第 2 冷却装置, 冷却至  $290\sim 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。工艺验证结果表明, 这一冷却系统能够很好地满足使用方对活塞合格率的要求, 得到的活塞锻件的性能稳定、品质优良。

**关键词:** 非调质钢; 活塞; 冷却工艺; 冷却速率; 分选装置

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.026

**中图分类号:** TG315.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 01-0180-06

## Controlled cooling process of 38MnVS non-quenched and tempered steel piston after forging

Liu Jiang<sup>1,2</sup>, Xu Hao<sup>1,2</sup>, Yang Dehang<sup>1</sup>, Xu Yifei<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing and Transportation, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402246, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** 38MnVS non-quenched and tempered steel piston was cooled after forged, and the influence laws of different cooling processes on non-quenched and tempered steel piston were discussed. First, the influences of different cooling rates on the microstructure and mechanical properties of the non-quenched and tempered steel piston were analyzed, and it was concluded that the 38MnVS non-quenched and tempered steel had the best properties in all sides when pearlite and ferrite were precipitated at a cooling rate of  $50\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Secondly, the non-quenched and tempered steel piston forgings were pre-selected by a sorting device, and the pistons with qualified forging temperature were sorted out. Under four different cooling processes, the pistons were cooled. during the cooling process, the pistons were placed into the first cooling device with a cooling rate of  $50\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  and cooled to  $740\sim 760\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Then, through the conveying unit, the pistons were entered into the second cooling device with a cooling rate of  $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  and cooled to  $290\sim 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The process verification results show that the cooling system can meet the requirement of the qualification rate for pistons of users, and the piston forgings obtained have stable performances and good qualities.

**Key words:** non-quenched and tempered steel; piston; cooling process; cooling rate; sorting device

活塞是汽车发动机的“心脏”, 在发动机中最恶劣的环境下工作, 承受高温、高压、高速的工作

条件, 因此, 对活塞各方面性能的要求特别高<sup>[1]</sup>。而非调质钢具有优良的耐热性、使用周期长等突出优点, 得到了大范围应用<sup>[2]</sup>。早在七八十年代初期西德就开始非调质钢的开发, 他们在中碳碳素钢 CK50 的成分基础上添加微量钒, 研制出 49MnVS3 非调质微合金锻件钢。随后, 英国、法国和意大利等也研制了不同牌号的非调质微合金钢。英国钢铁公司建立了 Vanard 不同强度等级的钢种系列。法国 SAFE 公司自 1978 年以后开展了一系列 METASAFE 钢的研制。日本非调质钢发展最为活跃的各大钢铁公

收稿日期: 2020-12-22; 修订日期: 2021-02-23

基金项目: 重庆市教委项目 (KJQN202103409, KJQN202003406, JG201002, Z211014)

作者简介: 刘江 (1982-), 女, 硕士, 讲师, 工程师

**E-mail:** xuhaolj@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 徐皓 (1979-), 男, 博士, 教授, 正高级工程师, 高级技师

**E-mail:** 379280626@163.com

司也都建立了自己的非调质钢体系，但他们都是以钒为主要微合金的相似物。日本丰田公司早在 1982 年就将所有热处理件的 16.1%的成分改用非调质钢<sup>[3]</sup>。

非调质钢能够避免调质热处理过程中所产生的各种缺陷，并且还具有降低成本、节能环保、易切削和生产周期短等优点。非调质钢的设计原理主要是通过添加钒来实现的，钒（V）、钛（Ti）、氮（N）等元素在锻造后通过控制冷却速率进行冷却处理。通过沉淀硬化各种元素，可获得所需的综合力

学性能<sup>[4]</sup>。本文探讨了冷却工艺对非调质钢活塞的影响规律，给出了冷却控制的关键要点。

1 实验材料

本实验采用 38MnVS 钢，该钢是一种可不使用淬火以及回火调质处理，但其力学性能可达到合金钢调质后的性能的一种材料。表 1 为 38MnVS 钢的化学成分表<sup>[5]</sup>。

表 1 38MnVS 钢的化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of 38MnVS steel（%，mass fraction）

元素	C	Si	Mn	S	P	V	Cr	B
技术要求	0.35~0.40	0.3~0.6	1.1~1.5	0.02~0.05	≤0.025	0.08~0.12	0.2~0.4	≤0.003

2 非调质钢活塞的技术要求及工艺设备

由于活塞形状薄厚不均，因此，在加工过程中需要同时满足孔深和薄壁的要求。如果冷却工艺选择不当，则在非调质钢活塞加工过程中则易产生活塞厚裙边硬度不达标、活塞表面硬度和芯部硬度差别大、马氏体和贝氏体组织过多、晶粒等级低等问题<sup>[6]</sup>。

2.1 非调质钢活塞技术要求

在对锻件进行冷却处理时，通常要对锻件不同位置的硬度、力学性能、金相组织有一个具体的技术参数要求。活塞锻件终锻温度为 980~1120℃、抗拉强度≥900 MPa、活塞外径≤Φ145 mm、硬度为 260~310 HBW、晶粒度≥4 级、金相组织为珠光体+铁素体，并且不允许有裂纹、折叠、气孔、杂质等锻造缺陷。

2.2 冷却速率对非调质钢的影响

温度和冷却速率是获得合理的热锻组织和力学性能的重要参数<sup>[7]</sup>。控制冷却速率对获得合金的组织性能具有重要意义。通常，在锻造后，钢的强度随着冷却速率的提高而提高，但珠光体和铁素体型的非调质钢，并不适用这样的规律<sup>[8-10]</sup>。实验采用切线法来测量 38MnVS 钢的化学成分。在真空环境中，在不同冷却速率（150、100、80、60、40、8.3、3.3 和 1.7℃·min<sup>-1</sup>）下将其冷却。测出相变的开始点和结束点，并将其在温度/时间坐标轴上表示出来，通过连接具有相同物理意义的点，测绘出 38MnVS 钢的 CCT 曲线（图 1）<sup>[11]</sup>。可知，获得优质力学性能的关键是控制锻后温度在 500~800℃区段的冷却速率。通常情况下，在合理的冷却速率范围内，冷却速率越快，活塞锻件硬度越高。但是，

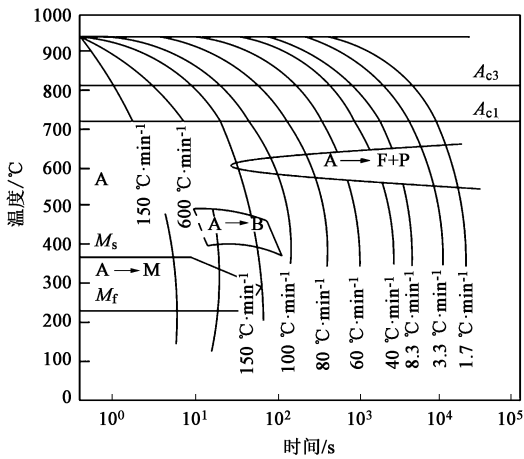


图 1 非调质钢的连续冷却转变 CCT 曲线  
Fig. 1 CCT curves of continuous cooling transformation for non-quenched and tempered steel

冷却速率太快会导致共析铁元素减少，珠光体层片细小，造成锻件硬度提高，但韧性不够。反之，若冷却速率太慢，将引起共析铁元素增多，而珠光体层片粗大，还会出现魏氏组织，使得材料的硬度不够，但韧性提高。通过实践总结得出，非调质钢冷却速率在 50~90℃·min<sup>-1</sup> 时各方面的性能最优。

2.3 锻造活塞生产工艺流程

活塞的锻造生产工艺为：下料→加热→制坯→预锻→终锻→切边/精整→冷却处理（专用冷却装置）→抛丸清理→磁粉探伤→硬度检测→成品检验→防锈包装→入库（图 2）<sup>[12]</sup>。使用 1250 kW 预热机加热锻件，再通过 4000 t 压力机进行预锻和终锻。对锻件进行冷却处理时，首先进行分选，然后通过冷却装置、风机和输送链，冷却时选择不同的冷却速率，从而实现对非调质钢活塞的冷却处理。

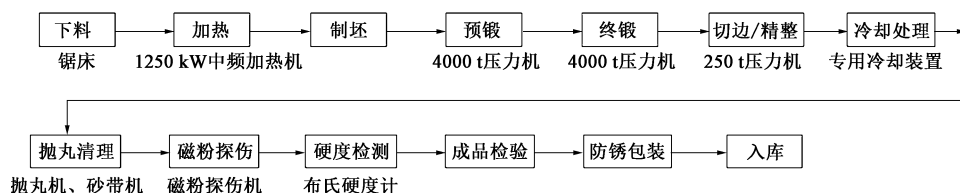


图2 锻造活塞生产工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart of forging production for piston

### 3 冷却工艺和实验方法

#### 3.1 冷却工艺

实验按以下4种冷却工艺进行：（1）工艺1，环境温度为 $-10\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，锻后加热温度为 $1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，输送链速度为 $1.2\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ，风机转速 $\leq 300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ；（2）工艺2，环境温度为 $1\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，锻后加热温度为 $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，输送链速度为 $1.0\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ，风机转速为 $300\sim 450\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ；（3）工艺3，环境温度为 $11\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，锻后加热温度为 $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，输送链速度为 $0.9\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ，风机转速为 $450\sim 600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ；（4）工艺4，环境温度为 $26\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，锻后加热温度为 $1120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，输送链速度为 $0.8\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ，风机转速为 $600\sim 900\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

#### 3.2 实验方法

冷却装置如图3所示，完成锻造工序后，将活塞锻件置于输送带上，输送带上自带红外感应装置和控制系统，可对锻后活塞进行温度检测。未达到

$980\sim 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的不合格锻件进入冷却装置的周转箱，进行正常冷却，防止锻件产生裂纹，便于锻件后续切削加工。对于终锻温度达到 $980\sim 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的锻件，可通过进料口进入冷却系统，并在传动输送装置作用下首先进入第1冷却系统，冷却速率为 $50\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ，调节第1输送带的输送速度为 $0.8\sim 1.2\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ，第1风机的转速为 $300\sim 900\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，冷却至 $740\sim 760\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，再通过电器控制系统进入第2冷却系统，冷却速率为 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ，冷却至 $290\sim 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，以保证活塞芯部组织的硬度均匀，减少贝氏体出现。后将活塞传送至周转箱中，冷却至室温。

### 4 实验结果

#### 4.1 冷却速率与时间的关系

通过4种不同冷却工艺实验，绘制出图4活塞锻件的温度-时间折线图。由图4可知，工艺4冷却处理的冷却速率最大，所需冷却时间最短。故在合理的冷却速率范围内，冷却速率越快，冷却时间越短，可以有效地节约能源、减轻污染。

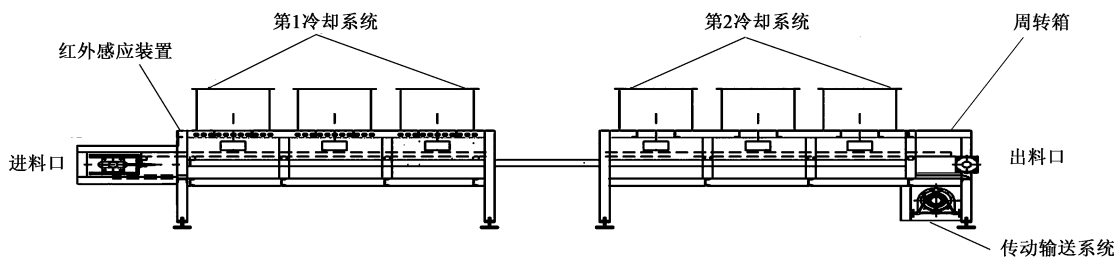


图3 冷却装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cooling device

#### 4.2 金相组织

工艺4在 $1120\sim 740\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间采取快冷，输送链速度为 $0.8\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ，风机转速为 $600\sim 900\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。由于奥氏体区停留时间较短，过冷度相应增大，相对晶粒度较细。在 $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下采取缓冷，珠光体开始逐渐析出<sup>[13]</sup>。进入第2冷却系统（冷却速率为 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$ ），冷却至 $290\sim 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，确保珠光体片间距相对较大，硬度不会偏高，活塞各截面温度在

冷却时也相对均匀。金相组织如图5所示，组织为珠光体+铁素体，锻件硬度均匀，晶粒度等级为5~7级，为细晶粒体。所获得活塞锻件的晶粒度好，金相组织均为珠光体+铁素体，且锻件硬度高、韧性强。

#### 4.3 力学性能

根据3.1给出的4种冷却工艺，采用38MnVS钢材，生产直径 $\leq \Phi 145\text{ mm}$ 的活塞。由表2可知：工艺1的抗拉强度为 $979\text{ MPa}$ ，断面收缩率 $>10\%$ ，

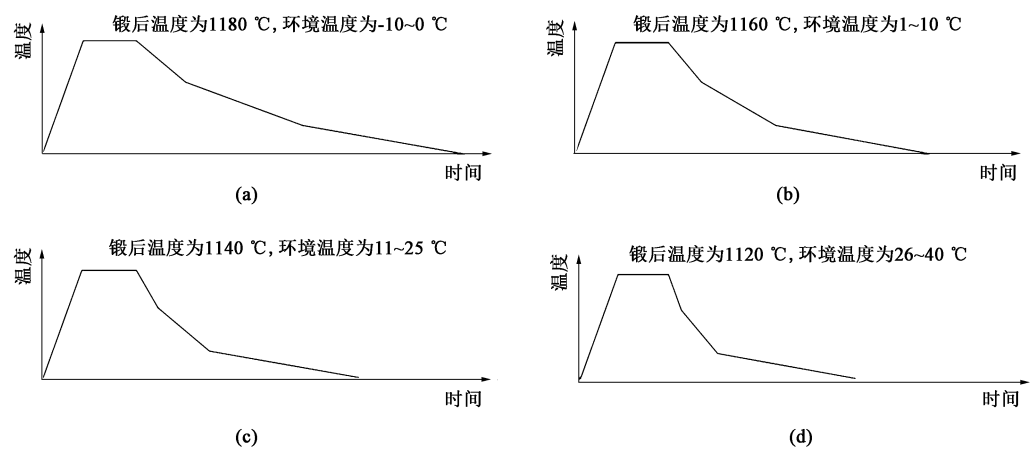


图 4 活塞锻件的温度-时间曲线  
(a) 工艺 1 (b) 工艺 2 (c) 工艺 3 (d) 工艺 4  
Fig. 4 Temperature-time curves of piston forgings  
(a) Process 1 (b) Process 2 (c) Process 3 (d) Process 4

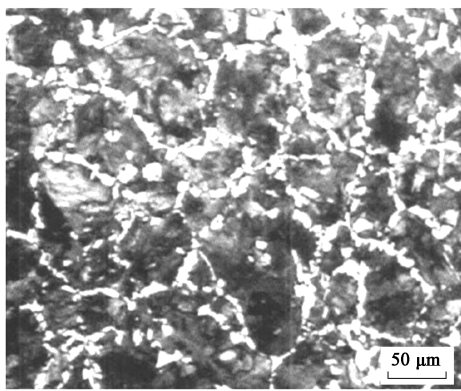


图 5 活塞锻件金相组织  
Fig. 5 Metallographic structure of piston forgings

表 2 活塞锻件的力学性能和组织状态  
Table 2 Mechanical properties and microstructure states of piston forgings

冷却 工艺	抗拉强度/ MPa	断面收缩率/ %	金相组织	晶粒度/ 级
1	979	>10	珠光体+铁素体	6~8
2	962	>10	珠光体+铁素体	6~8
3	926	>10	珠光体+铁素体	5~7
4	924	>10	珠光体+铁素体	5~7

晶粒度等级为 6~8；工艺 2 的抗拉强度为 962 MPa，断面收缩率>10%，晶粒度等级为 6~8；工艺 3 的抗拉强度为 926 MPa，断面收缩率>10%，晶粒度等级为 5~7；工艺 4 的抗拉强度为 924 MPa，断面收缩率>10%，晶粒度等级为 5~7。故在合理的冷却速率范围内，材料的抗拉强度大、晶粒度等级

高<sup>[14-15]</sup>。

4.4 硬度

通过现有检测方法对不同冷却工艺处理的活塞锻件进行硬度测量（表 3）。硬度检测点见图 6a 和图 6b。其中，1、6 表示活塞头部燃烧部位，2、7 表示活塞芯部，4、5 表示活塞薄裙部，3 表示活塞销控。由表 3 可知，工艺 1 下的芯部硬度在 277~304 HBW，工艺 2 下的芯部硬度在 269~299 HBW，工艺 3 下的芯部硬度在 255~294 HBW，工艺 4 下的芯部硬度在 256~297 HBW。由实验可知，锻件硬度均匀、波动小，有效地防止了工件变形、开裂，减少了贝氏体的出现，方便后续切削加工。

表 3 活塞锻件不同位置的硬度检测（HBW）  
Table 3 Hardness testing at different locations of piston forgings (HBW)

冷却 工艺	1	2	3	4	5	6	7
1	290	285	298	277	291	290	304
2	288	269	291	269	289	291	299
3	269	255	289	258	285	279	294
4	270	258	280	256	276	280	297

5 结论

- （1）锻后加热温度在 980~1120 °C、冷却速率在 50~90 °C·min<sup>-1</sup> 时，活塞能获得较好的力学性能。
- （2）在合理的冷却速率范围内，冷却速率越

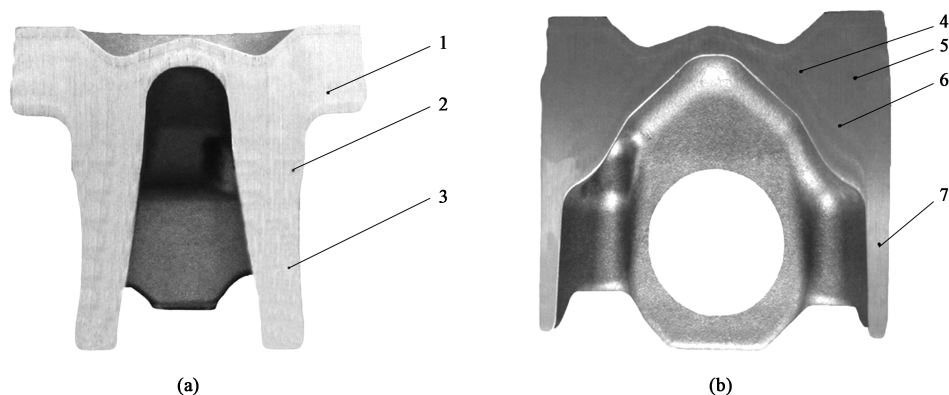


图 6 锻造活塞内部组织剖面图

(a) 纵向剖面图 (b) 横向剖面图

Fig. 6 Profile diagrams of internal structure for piston forgings

(a) Longitudinal profile diagram (b) Horizontal profile diagram

快, 所需冷却时间越少, 能有效节省能源、减轻污染。

(3) 活塞锻造后, 在适当的冷却速率范围内, 冷却速率越快, 活塞锻件的晶粒等级越高, 晶粒越细, 锻件强度越高。

(4) 非调质钢活塞在进行冷却处理前先进行预选, 通过红外温度检测仪使达到终锻温度的锻件进行冷却处理, 生产率大大提高。

(5) 采用上述控制冷却系统对非调质钢活塞进行冷却处理, 各项力学指标及性能完全达到生产要求, 符合产品质量要求。

#### 参考文献:

- [1] 郭全喜, 宋文平, 赵国华, 等. 汽车发动机活塞的绿色铸造 [J]. 内燃机与动力装置, 2015, 32 (1): 64-69.  
Guo Q X, Song W P, Zhao G H, et al. Green casting of automotive engine piston [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2015, 32 (1): 64-69.
- [2] 徐皓, 刘江. CH1018 转向节锤锻模具设计实例 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 179-183.  
Xu H, Liu J. Example of optimal design of steering knuckle hammer forging die of CH1018 [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 179-183.
- [3] 刘攀, 刘荣佩, 方萍. 微合金非调质钢的研究与发展 [J]. 材料导报网刊, 2011, 6 (2): 1-4.  
Liu P, Liu R P, Fang P. Research advance of alloyed non-quenched tempered steels [J]. Materials Review, 2011, 6 (2): 1-4.
- [4] 汪炜, 张先彬, 宋加兵. 非调质活塞锻后余热处理的组织和性能 [J]. 金属热处理, 2007, 30 (2): 91-92.  
Wang W, Zhang X B, Song J B. Microstructure and properties of the non-quenched-tempered steel pistons heat treated from forging heat [J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 30 (2): 91-92.
- [5] 陈云龙, 黄军峰, 孙叶, 等. 非调质钢在履带链轨节锻造中的应用 [J]. 金属加工: 热加工, 2017, (3): 49-50.  
Chen Y L, Huang J F, Su Y, et al. Application of non-tempered steel in forging track link [J]. MW Metal Forming, 2017, (3): 49-50.
- [6] 杨伟光, 刘年富, 董凤奎, 等. 非调至钢活塞销孔内壁缺陷原因分析及控制措施 [J]. 南方金属, 2018, (5): 53-56.  
Yang W G, Liu N F, Dong F K, et al. Analysis and control measures for inner wall defects in pin hole of piston of non-quenched and tempered steel [J]. Southern Metals, 2018, (5): 53-56.
- [7] 岳海军. 不同锻造冷却工艺对 C70S6 连杆质量的影响 [J]. 锻造与冲压, 2014, (7): 38, 40, 42.  
Yue H J. Influence of different forging cooling process on quality of C7056 connecting rod [J]. Forging & Metalforming, 2014, (7): 38, 40, 42.
- [8] 李海波, 刘宏玉, 陈浩. 钒氮非调至钢的组织细化 [J]. 材料热处理学报, 2012, 33 (4): 85-90.  
Li H B, Liu H Y, Chen H. Microstructure refinement in a non-quenched and tempered vanadium nitrogen steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33 (4): 85-90.
- [9] 刘宏玉, 刘建华, 李海波, 等. 热变形后冷却速率对钒氮非调质钢显微组织的影响 [J]. 机械工程材料, 2009, 33 (8): 7-9.  
Liu H Y, Liu J H, Li H B, et al. Effect of cooling rates after hot deformation on microstructure of vanadium nitrogen non-quenched and tempered steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33 (8): 7-9.
- [10] 李芸, 周小明, 卢明霞, 等. 锻后冷却工艺对 HN2154 非调质钢组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2010, 35 (7): 51-53.  
Li Y, Zhou X M, Lu M X, et al. Influence of forging process on microstructure and properties of HN2154 microalloyed steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35 (7): 51-53.

(下转第 202 页)