

钒微合金化汽车钛合金的轧制工艺优化

孙 凤¹, 尹晓丽¹, 赵 达²

(1. 中国石油大学胜利学院机械与控制工程学院 山东 东营 257061; 北京理工大学材料科学与工程学院 北京 100081)

摘 要: 选用不同工艺进行了钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 的轧制试验, 并进行了力学性能的测试与对比分析。结果表明, 开轧温度和轧制变形量对试验合金力学性能产生明显影响。随开轧温度从 945 ℃ 逐步提高到 1 045 ℃ 时, 试验合金力学性能先提高后下降; 随轧制变形量从 59% 逐步增大到 75% 时, 试验合金的力学性能先急剧提高后缓慢提高。试验合金的开轧温度优选为 1 020 ℃、轧制变形量优选为 67%。与 945 ℃ 开轧温度相比, 1 020 ℃ 轧制时试验合金的抗拉强度增大 28 MPa、屈服强度增大 34 MPa, 断面收缩率减小 2.5%。与 59% 轧制变形量相比, 采用 67% 变形量轧制时试验合金的抗拉强度增大 23 MPa、屈服强度增大 27 MPa, 断面收缩率减小 1.5%。

关键词: 钛合金; 微合金化; 钒; 轧制工艺; 开轧温度; 轧制变形量

中图分类号: TF841.3, TG335.11

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2020)03-0059-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Rolling Process Optimization of Vanadium Microalloyed Automobile Titanium Alloy

Sun Feng¹, Yin Xiaoli¹, Zhao Da²

(1. School of Mechanical and Control Engineering, Shengli College, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Rolling tests of Ti-Al-Mo-Cr-V automobile titanium alloy microalloyed with vanadium were carried out by different processes, and the mechanical properties were tested and compared. The results show that the start-rolling temperature and rolling deformation have obvious effects on the mechanical properties of the tested alloys. The mechanical properties of the tested alloys first increase and then decrease with the increase of starting rolling temperature from 945 ℃ to 1 045 ℃. With the increase of rolling deformation from 59% to 75%, the mechanical properties of the alloys present a sharp increase followed by a slow increase. The optimum start-rolling temperature and rolling deformation of the tested alloy are 1 020 ℃ and 67%, respectively. Compared with those of alloy at the starting rolling temperature of 945 ℃, the tensile strength and yield strength of the tested alloy at 1 020 ℃ respectively increase by 28 MPa and 34 MPa, with the section shrinkage decreased by 2.5%. Compared with those of the alloy at 59% of rolling deformation, the tensile strength and yield strength of the alloy at 67% of deformation increase by 23 MPa and 27 MPa respectively, with the section shrinkage decreased by 1.5%.

Key words: automobile titanium alloy, microalloyed, vanadium, rolling process, starting rolling temperature, rolling deformation

收稿日期: 2019-10-07

基金项目: 山东省自然科学基金项目(编号: ZR2018PEE009), 山东省高校科技计划项目(编号: J17KA044)。

作者简介: 孙 凤(1984—), 女, 汉族, 山东淄博人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为机械制造、设备管理与质量控制。E-mail:

bssunfeng@126.com。

0 引言

近年来,迅速崛起的汽车业成为我国重要的支柱产业之一。早期的汽车以提高动力性为研究重点,世界能源危机促使汽车朝着轻量化和节能减排的方向快速发展^[1]。钛合金密度小、耐腐蚀性能好、比强度高,是理想的汽车轻量化材料,备受汽车业、航天工业、建筑业等领域的青睐^[2-5]。我国拥有丰富的钛资源,钛合金凭借优异的性能在汽车零部件方面具有巨大的应用潜力,如:阀门、阀簧、阀簧承座、连杆、弹簧、排气系统、半轴、紧固件、摇臂、活塞销、车档支架、离合器圆盘、变速按钮等。钛合金的使用可以有效减轻整车重量、提高汽车综合性能和安全系数,对汽车轻量化具有重要意义。目前市场化的高要求和应用趋势,对钛合金的轧制工艺和技术有了更高要求,然而钛合金变形系数小、切削性差、成本高,在一定程度上制约了钛合金的推广应用^[6-8]。因此,需要通过改善钛合金的加工性能,才能提供更优质的汽车轻量化材料,进一步推动钛合金在汽车工业中的应用。在金属中添加合金元素钒有助于提高金属的耐腐蚀性能,改善金属的力学性能、高温蠕变性能等^[8]。在钛合金中添加合金元素钒,钒可以作为强化剂和稳定剂,以提高钛合金的延

展性、蠕变性等综合性能^[1-5]。但是目前关于含钒汽车钛合金的研究还很少,尤其是含钒汽车钛合金的轧制工艺及性能研究还鲜有报道,难以为含钒钛合金在汽车零部件上的应用提供技术支持。为此,笔者以钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 为研究对象,采用不同工艺参数进行了该含钒钛合金的轧制试验,并研究和分析了轧制工艺参数对合金性能的影响,得到了具有工程化实用价值的优化轧制工艺参数,以期改善汽车钛合金的综合性能,推动汽车工业蓬勃发展。

1 试验材料和方法

选用真空自耗电极电弧熔炼获得制备而得的钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 铸锭为试验材料(简称试验合金),其化学成分如表 1 所示。为了与不添加钒的钛合金进行对比分析,同时制备了没有添加合金元素钒的 Ti-Al-Mo-Cr 钛合金试样(简称对比合金)。采用金相法进行试验合金和对比合金的相变点测试,测得试验合金和对比合金铸锭的相变点都为 990~996℃。试验合金和对比合金都先进行 3 道次等温锻造,等温锻造温度为 950℃、变形量 60%;然后再进行轧制试验。轧制坯料均为 $\varnothing 70$ mm 棒材。

表 1 试验合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of the testing alloys

Al	Mo	Cr	Si	V	Fe	Ti
5.5~6.5	2.0~3.0	1.0~2.0	0.15~0.4	0.3~0.7	0.2~0.5	bal.

在华南地区某企业钛合金轧制生产线上,采用三辊螺旋型轧机进行试验合金的轧制工艺优化工业试验,该三辊螺旋型轧机进包括轧辊、轧辊压下、相位角调节、轴向调节、机架等部分组成。由于开轧温度和轧制变形量是最重要的两个轧制工艺参数,所以保持轧制变形道次 6 道次、坯料预热温度 920℃、终轧温度 900℃ 等参数不变,仅改变开轧温度和轧制变形量,具体如表 2 所示。对比合金选择的轧制工艺参数为试验合金的最佳轧制工艺参数,即:轧制变形道次 6 道次、坯料预热温度 920℃、终轧温度 900℃、开轧温度 1 020℃、轧制变形量 67%。所有试验合金和对比合金在轧制后都进行了热处理:930℃×1 h 后 560℃×2 h 再空冷。选择抗拉强度、屈服强度和断面收缩率三个力学性能指标作为试验合金和对比合金的评价指标。

表 2 试验合金轧制工艺参数
Table 2 Rolling process parameters of testing alloys

试样编号	开轧温度/℃	轧制变形量/%	轧制后棒材直径/mm
1	1 073	67	40
2	970	67	40
3	995	67	40
4	1 020	67	40
5	1 045	67	40
6	1 020	59	45
7	1 020	63	42.5
8	1 020	71	37.5
9	1 020	75	35

在不同工艺轧制的钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 中间位置切取拉伸试样。拉伸试样尺寸如图 1 所示。拉伸试验在室温条件下进行,由电子万能试验机进行测试,拉伸速度选用 1.5 mm/min。拉伸断口形貌由 JSM6511 型扫描电镜拍摄。

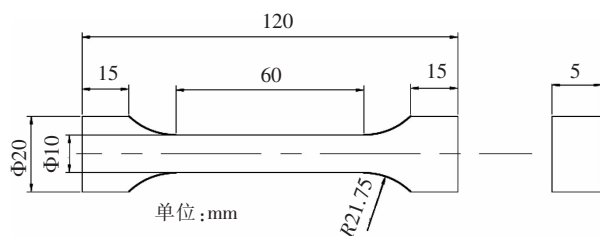


图1 试验合金的拉伸试样尺寸

Fig.1 Size of tensile specimen of the alloys

2 试验结果及讨论

2.1 开轧温度优化

当轧制变形量固定为 67% 时, 选用不同开轧温度获得的钼微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 力学性能测试结果, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 开轧温度对试验合金力学性能参数有较为明显的影响。当开轧温度从 945 °C 逐步提高到 1 045 °C 时, 试验合金的抗拉强度和屈服强度都表现出先增大后减小的变化趋势, 断面收缩率则表现出先减小后稍增大的变化趋势。在试验温度范围内, 当开轧温度低至 945 °C 时, 试验合金的抗拉强度和屈服强度均最低, 分别为 1 054、1 011 MPa, 断面收缩率为最大值 52.8%。与 945 °C 开轧温度相比, 1 020 °C 轧制时试验合金的抗拉强度增大 28 MPa、屈服强度增大 34 MPa, 断面收缩率减小 2.5%。由此可以看出, 对于试验合金而言, 开轧温度的高低选择对其力学性能影响较为明显。为了提高试验合金的力学性能, 开轧温度优选为 1 020 °C。

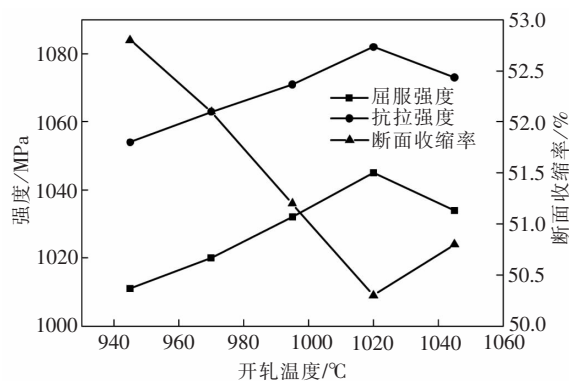
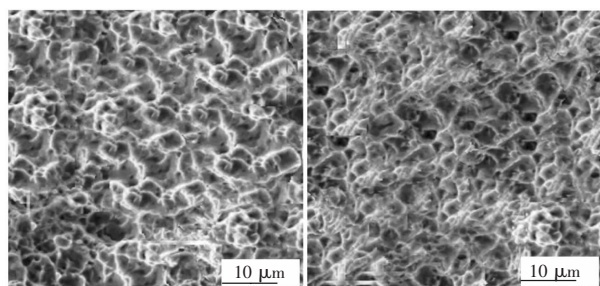


图2 不同温度开轧试验合金的力学性能测试结果

Fig.2 Mechanical properties of testing alloys at various initial rolling temperatures

当轧制变形量固定为 67% 时, 开轧温度分别为 945 °C 和 1 020 °C 时钼微合金化汽车钛合金 Ti-Al-

Mo-Cr-V 的拉伸断口形貌如图 3 所示。从图 3 可以看出, 当开轧温度选择偏低的 945 °C 时, 试验合金的拉伸断口中韧窝较为粗大、浅显; 当开轧温度选择适中的 1 020 °C 时, 试验合金的拉伸断口中韧窝更细小、深邃, 表现出更好的拉伸性能。



(a) 开轧温度 945 °C; (b) 开轧温度 1 020 °C

图3 不同温度开轧试验合金的拉伸断口形貌

Fig.3 The tensile fracture morphology of testing alloys at various initial rolling temperatures

2.2 轧制变形量优化

当开轧温度固定为 1 020 °C 时, 选用不同轧制变形量获得的钼微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 力学性能测试结果如图 4 所示。

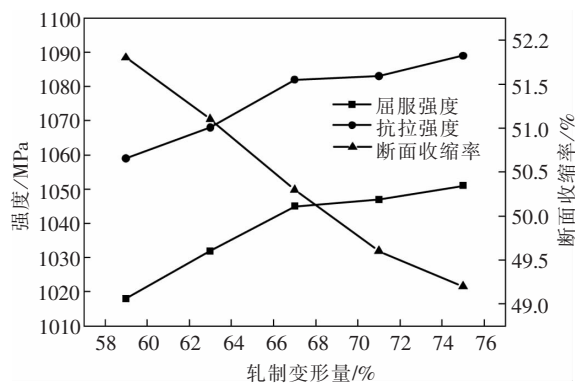


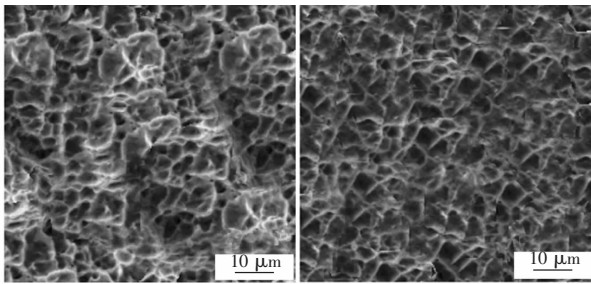
图4 不同变形量轧制试验合金的力学性能测试结果

Fig.4 Mechanical properties of testing alloys at various rolling deformations

从图 4 可以看出, 轧制变形量对试验合金力学性能影响明显。当轧制变形量从 59% 逐步增大到 75% 时, 试验合金的抗拉强度和屈服强度都表现出先急剧增大后缓慢增大的变化趋势, 断面收缩率则表现出逐渐减小的变化趋势。在试验的轧制变形量范围内, 当轧制变形量为 59% 时, 试验合金的抗拉强度和屈服强度均最低, 分别为 1 059、1 018 MPa, 断面收缩率为最大值 51.8%。与 59% 轧制变形量相

比,采用 67% 变形量轧制时试验合金的抗拉强度增大 23 MPa、屈服强度增大 27 MPa,断面收缩率减小 1.5%。由此可以看出,对于试验合金而言,轧制变形量的大小选择对其力学性能影响较为明显。综合考虑试验合金力学性能和轧制生产效率,轧制变形量优选为 67%。

当开轧温度固定为 1 020 ℃ 时,轧制变形量分别为 59% 和 67% 时钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 的拉伸断口形貌如图 5 所示。从图 5 可以看出,当轧制变形量选择偏小的 59% 时,试验合金的拉伸断口中韧窝较为粗大、浅显;当轧制变形量选择适中的 67% 时,试验合金的拉伸断口中韧窝更细小、深邃,表现出更好的拉伸性能。



(a) 轧制变形量 59%; (b) 轧制变形量 67%

图 5 不同温度轧制试验合金的拉伸断口形貌
Fig.5 The tensile fracture morphology of testing alloys at various rolling deformation

在上述优化轧制工艺参数下(开轧温度 1 020 ℃、轧制变形量 67%) 以及轧制变形道次 6 道次、坯料预热温度 920 ℃、终轧温度 900 ℃ 的情况下,对比合金与试验合金的力学性能测试结果,如表 3 所示。

表 3 试验合金轧制工艺参数
Table 3 Rolling process parameters of testing alloys

合金试样	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
对比合金	1 048	1 012	50.5
试验合金	1 082	1 045	50.3

从表 3 可以看出,与对比合金相比,试验合金的抗拉强度和屈服强度分别增大 34、33 MPa,断后伸长率基本不变,具有更好的力学性能。

2.3 讨论与分析

在钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 轧制过程中,开轧温度是一个极其重要的工艺参数。钛合金的热轧是在再结晶温度以上进行的轧制,所谓再结晶就是当退火温度足够高,时间足够长时,在变形

金属或合金的纤维组织中产生无应变的新晶粒(再结晶核心),新晶粒不断的长大,直至原来的变形组织完全消失,金属或合金的性能也发生显著变化的这一过程。热轧可以破坏铸锭中原有的铸造组织,细化金属内部的晶粒,并消除显微组织的缺陷,从而使金属内部组织密实,力学性能得到改善;这种改善主要体现在沿轧制方向上,从而使金属在一定程度上不再是各向同性体;浇注时形成的气泡、裂纹和疏松,也可在高温和压力作用下被焊合^[9]。

所以热轧作为一个热加工工艺过程,其开轧温度就称为其中一个尤其重要的工艺参数。如果开轧温度过低,难以充分满足试验合金的热塑性变形要求,导致出现内部微裂纹、边裂等缺陷,降低试验合金的力学性能;适当提高开轧温度,有助于为试验合金的热塑性变形提供足够的能量,减小变形抗力,从而获得更佳力学性能的轧制试验合金;但是开轧温度不是越高越好,过高的开轧温度容易导致试验合金过热,反而降低试验合金的力学性能^[9]。所以,钒微合金化汽车钛合金在轧制过程中,需要选择合理的开轧温度,不宜过高也不宜过低。对试验合金而言,开轧温度优选为 1 020 ℃。

除了开轧温度,轧制变形量也是钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 的一个重要工艺参数。轧制变形量是指试验合金在轧制前与轧制后的横截面积之差与轧制前横截面积的百分比,它表征了试验合金在轧制前后的变形大小^[10]。在试验合金轧制过程中,轧制变形量过小,容易导致试验合金变形程度小于临界变形程度,无法起到破碎晶界、细化晶粒的作用;增大轧制变形量更容易促使变形程度大于临界变形程度,使金属内部畸变能增加,更好地实现破碎晶界、细化晶粒^[10]。所以,对于试验合金而言,当轧制变形量从 59% 逐步增大到 75% 时,试验合金的力学性能先急剧提高后缓慢增加。为了获得理想的力学性能,对试验合金而言,轧制变形量优选为 67%。综上所述,对于钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 而言,轧制工艺优化对于试验合金性能产生重要影响。如果轧制工艺选择不当,将难以获得高质量的轧制合金产品。在实际的生产中,需要根据合金自身特点,选择适合合金的轧制工艺参数。

3 结论

1) 开轧温度和轧制变形量对钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 力学性能产生明显影响。开

轧温度从 945 ℃ 逐步提高到 1 045 ℃ 时,试验合金力学性能先提高后下降;轧制变形量从 59% 逐步增大到 75% 时,试验合金的力学性能表现出先急剧提高后缓慢提高的变化趋势。

2) 与 945 ℃ 开轧温度相比,1 020 ℃ 轧制时钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 的抗拉强度增大 28 MPa,屈服强度增大 34 MPa,断面收缩率减小 2.5%。

3) 与 59% 轧制变形量相比,采用 67% 变形量轧制时钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 的抗拉强度增大 23 MPa,屈服强度增大 27 MPa,断面收缩率减小 1.5%。

4) 钒微合金化汽车钛合金 Ti-Al-Mo-Cr-V 的开轧温度优选为 1 020 ℃、轧制变形量优选为 67%。

参考文献

- [1] Du Guangchao. Research progress of vanadium materials used in non-steel fields [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2015, 36(2): 49-56.
(杜光超. 钒在非钢铁领域应用的研究进展[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(2): 49-56.)
- [2] Feng Qiuyuan, Tong Xuewen, Wang Jian *et al.* Status quo and development tendency on the research of low cost titanium alloy [J]. Materials Review, 2017, 31(5): 128-134.
(冯秋元, 佟学文, 王俭, 等. 低成本钛合金研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 128-134.)
- [3] Li Yan, Zhang Xiaochen, Song Meihui *et al.* Research progress of processing method for titanium alloy [J]. Heilongjiang Science, 2018, 9(9): 158-159.
(李岩, 张晓臣, 宋美慧, 等. 钛合金成型方法的研究进展[J]. 黑龙江科学, 2018, 9(9): 158-159.)
- [4] Fei Youjing. Application analysis of titanium and titanium alloy materials [J]. Advanced Materials Industry, 2017, 21(3): 15-18.
(费有静. 钛及钛合金材料的应用分析[J]. 新材料产业, 2017, 21(3): 15-18.)
- [5] Wang Jian, Li Youhua, Li Meng *et al.* Effects of rolling procedure and annealing temperature on microstructure of TC4ELI titanium alloy thick-plate [J]. Nonferrous Materials and Engineering, 2018, 39(3): 32-35, 47.
(王俭, 李有华, 李蒙, 等. 轧制工艺和退火温度对 TC4ELI 钛合金厚板显微组织的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(3): 32-35, 47.)
- [6] Zhang Bin. Effects of sintering process on properties of titanium alloy auto parts [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(4): 53-57.
(张斌. 烧结工艺对钛合金汽车零件性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(4): 53-57.)
- [7] Zhao Fuli, Wang Yongjiang. Effect of friction stir processing on properties of titanium alloy for automobile [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(3): 59-62.
(赵福利, 汪永江. 搅拌摩擦加工对汽车用钛合金性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(3): 59-62.)
- [8] Wang Fei. Research progress on titanium alloy bar rolling forming [J]. Technology Innovation and Application, 2017, 9(5): 113.
(王飞. 关于钛合金棒材轧制成型的研究进展[J]. 科技创新与应用, 2017, 9(5): 113.)
- [9] Li Xuefei, Huang Lijun, Ding Xiaoming *et al.* Effect of rolling temperature on microstructure and mechanical properties of TB6 titanium alloy bars [J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(5): 30-32.
(李雪飞, 黄利军, 丁小明, 等. 轧制温度对 TB6 钛合金棒材组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2016, 33(5): 30-32.)
- [10] Zhang Weigang, Sun Xudong, Wang Peng *et al.* Effect of rolling deformation on microstructure and properties of TC6 titanium alloy bar with small size [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(15): 145-147.
(张卫刚, 孙旭东, 王鹏, 等. 轧制变形量对小规格 TC6 钛合金棒材组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 145-147.)

编辑 杨冬梅