● 材料改性 Material Propertiest ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.017

冷却工艺对高强度贝氏体钢组织和性能的影响

郭建良,程巨强,麻以林
(西安工业大学 材料与化工学院,陕西 西安 710021)

摘　要:研究了奥氏体化加热不同冷却工艺贝氏体钢棒料的组织和力学性能。试验结果表明,ϕ53 mm 棒料 920 ℃保温,水冷 200 ℃回火,R/2 处取样的抗拉强度为 1 654 MPa,A_{KV} 为 55.1 J,具有高强度和较低的韧性,组织为板条回火马氏体和少量的残余奥氏体。空冷及水冷 30 s-空冷 250 ℃回火,R/2 处取样的强度分别为 1 314 MPa 和 1 379 MPa,冲击值 A_{KV} 分别为 74.0 J 和 71.7 J,两者冷却方式具有较高的强度和高的冲击值,组织为贝氏体铁素体和奥氏体组织。ϕ53 mm 贝氏体钢棒料热处理空冷前进行 30 s 水冷的冷却工艺,可以细化棒料的组织,提高棒料的强度和冲击值。

关键词:贝氏体钢;冷却工艺;性能;组织
中图分类号:TG142.1; TG156　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)06-0509-04

Effect of Cooling Process on Microstructure and Properties of High Strength Bainite Steels

GUO Jianliang, CHENG Juqiang, MA Yilin
(College of Materials Science and chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of bainitic steel bars with different austenitizing heating and cooling processes were studied. The results show that ϕ53 mm bar is heated at 920 ℃ and cooled at 200 ℃. The tensile strength of the sample at R/2 is 1 654 MPa, and the A_{KV} is 55.1 J. The microstructure is lat tempered martensite and a small amount of residual austenite. The strength of the samples sampled at R/2 is 1 314 MPa and 1 379 MPa, and the impact value A_{KV} is 74.0 J and 71.7 J, respectively. The two cooling methods have high strength and impact value, and the microstructure is bainitic ferrite and austenite. The cooling process of water cooling for 30 s before air cooling of 53 mm in diameter bainite steel bars during heat treatment can refine the structure of bars and improve the strength and impact value of bars.

Key words: bainitic steel; cooling process; performance; organization

钢的热处理冷却工艺是指其奥氏体化加热保温一定时间后,以特定的冷却工艺进行冷却,以获得所需要的组织和性能的冷却工艺。热处理过程控制冷却工艺的目的是为了细化热处理件的组织,改善其力学性能,同时减少高温阶段冷却的停留时间以减少钢的高温氧化及晶粒长大。空冷贝氏体钢具有良好的强度和韧性,近几十年来,许多类型的贝氏体钢在工业生产中也得到了广泛的应用[1-2]。和相同强度级别的调质热处理结构钢相比,空冷贝氏体钢虽然具有热处理工艺简单,变形小等特点[3],但冷却过程获得贝氏体钢的组织类型及细化程度会影响贝氏体钢的力学性能[4-8],对于较大截面尺寸的贝氏体钢零件由于空冷冷速较慢,热处理件断面会存在力学性能不均匀的现象。对于直径大于 50 mm 零件,国家标准《钢及钢产品力学性能实验取样位置及试样制备》(GB/T2975-2018)要求力学性能检验取样位置为 1/2 半径(R/2)处。因此,有必要对贝氏体钢棒料热处理后不同位置的组织和力学性能进行研究,了解较大截面贝氏体钢截面的组织和力学性能。

1　实验材料及方法

试验钢为低碳贝氏体钢,w(C)0.20%,分别含有 Mn、Cr、Mo 等合金元素。生产过程采用电弧炉冶炼+钢包精炼+真空处理,浇注成铸锭,铸锭开坯,热轧成直径 ϕ53 mm 的棒料。热处理试样尺寸为 ϕ53 mm×110 mm,奥氏体化加热温度为 920 ℃,保温一定时间后,对试样分别进行水冷,空冷和水冷 30 s-空冷。最后空冷的试样进行 250 ℃回火,水冷试样进行 200 ℃回火,回火保温时间均为 3 h。拉伸试样经线

收稿日期:2021-04-12
作者简介:郭建良(1995—),河南安阳人,硕士研究生.研究方向:高强度钢铁材料研究与应用工作.
电话:15736986602,Email:411092398@qq.com
通讯作者:程巨强(1963—),陕西宝鸡人,教授.研究方向:金属材料的组织和性能的研究与应用工作.
Email:chengjuqiang@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

切割成 ϕ12 mm×110 mm 圆棒，然后机械加工成 ϕ8 mm 标准短拉伸试样。冲击试验经线切割加工为尺寸 10 mm×10 mm×55 mm 的标准 V 型缺口试样，缺口深度为 2 mm。

试样的拉伸试验在 DDL300 电子万能试验机上进行。冲击试验试验采用 JBD-300 型摆锤冲击试验机。采用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪进行物相分析。显微组织观察的腐蚀液采用 4%硝酸酒精溶液，试样进行深腐蚀后在型号为 QUANTA 400F 场发射扫描电子显微镜下观察显微组织。

2 实验结果及分析

2.1 试样不同热处理的力学性能

图 1 是 ϕ53 mm 棒料试样边部和 1/2 半径(R/2)处不同冷却方式抗拉强度的变化，从图 1 看出，随冷却的速度增加，实验材料的边部及 R/2 处的强度增加，空冷时试样的抗拉强度最低，边部为 1 323 MPa，R/2处为 1 314 MPa。水冷的试样抗拉强度最高，边部为 1 629 MPa，R/2 处为 1 654 MPa。水冷 30 s–空冷的试样边部为 1 472 MPa，R/2 处为 1 379 MPa，强度介于空冷与水冷之间。不同冷却工艺抗拉强度出现这种变化的原因与不同冷却速度有关，水冷及低温回火形成回火马氏体组织，具有较高的强度，水冷 30 s–空冷的棒料，高温阶段进行水冷，会阻碍奥氏体晶粒的长大，细化组织，和空冷相比，提高抗拉强度和韧性强度。

图 2 是不同冷却不同部位缺口冲击值的变化，从图可以看出，随冷却的速度增加，边部实验材料的缺口冲击值有降低的趋势，空冷条件下边部冲击值最高，为 89.1 J，水冷的边部冲击值最低，为 56.6 J。棒料 R/2 处和心部冲击值在水冷 30 s–空冷时最高，A_{KV} 分别为 74 J 及 70 J。棒料水冷冲击值最低，R/2 处和心部冲击值分别为 55.1 J 及 50.3 J，冲击值出现这种变化的原因与热处理时冷却速度的差别导致实验材料的组织类型及组织细化程度不同以及组织中奥氏体含量的不同有关。空冷边部与水冷及水冷 30 s–空冷相比，冷速较慢，组织中会出现较多的残余奥氏体，韧性较高，R/2 处水冷 30 s–空冷试样与空冷相比，提高冷速，组织细化，韧性提高。水冷获得马氏体组织，低温回火后强度提高，韧性有所降低。

2.2 试样不同热处理的 XRD 物相分析

图 3 是不同冷却方式的 XRD 衍射图谱，可以看出，不同冷却方式的衍射峰主要是铁素体峰和奥氏体峰，因此，空冷及水冷 30 s–空冷实验材料边部及心部的组织主要为贝氏体铁素体和残余奥氏体，属于无碳化物贝氏体组织[9]。水冷时实验材料边部及心部的组织为马氏体和残余奥氏体，与空冷及水冷 30 s–空冷相比奥氏体衍射峰强度较小，说明残余奥氏体量较少。

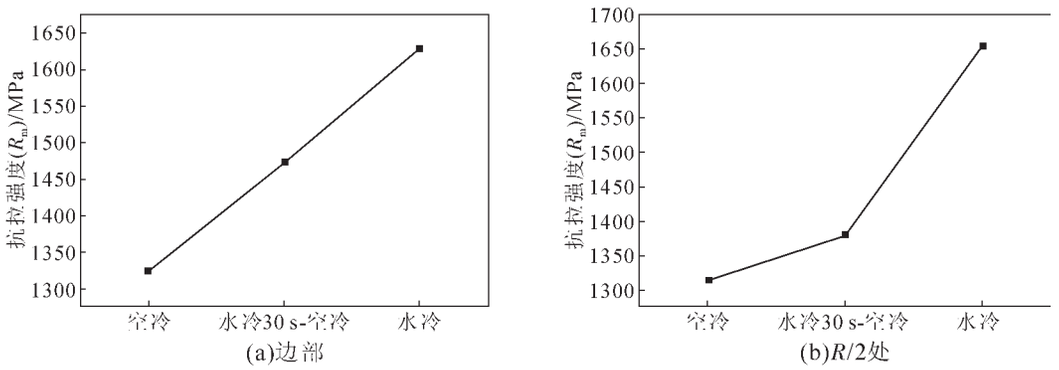


图 1 ϕ53 mm 棒料不同冷却工艺抗拉强度的变化

Fig.1 Variation of tensile strength of ϕ53 mm bar with different cooling processes

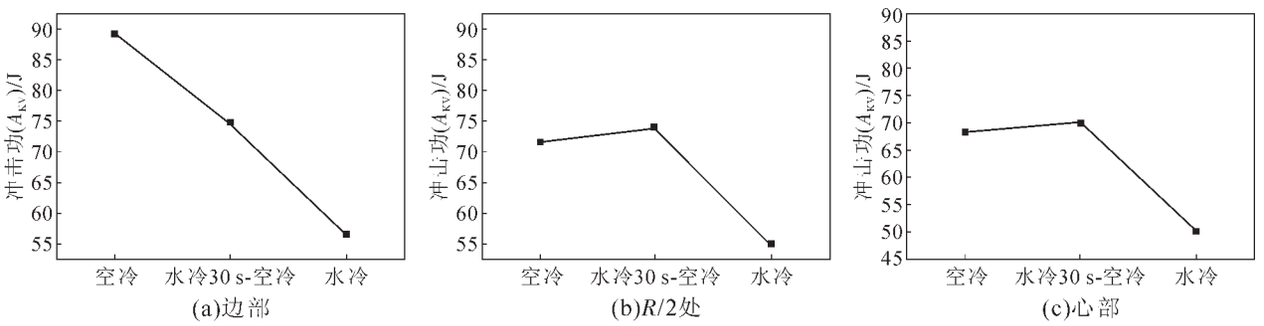
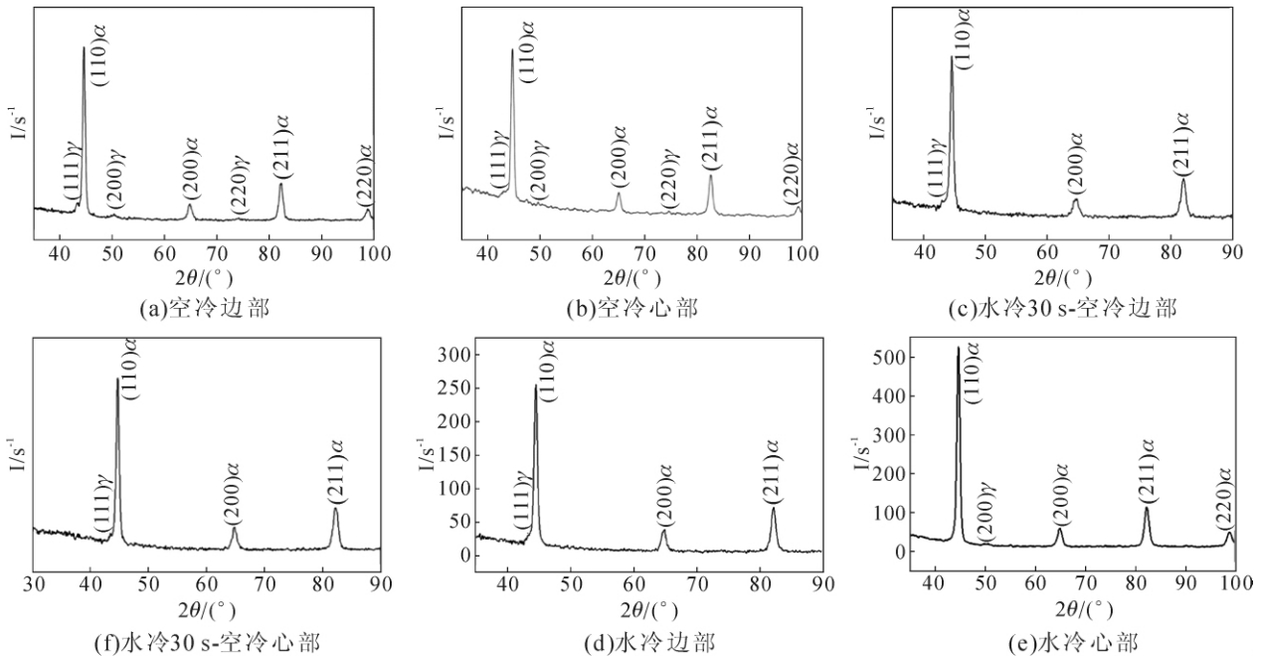


图 2 ϕ53 mm 棒料不同冷却工艺冲击值的变化

Fig.2 Variation of impact value of ϕ53 mm bar with different cooling process

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)空冷边部　(b)空冷心部　(c)水冷30 s-空冷边部

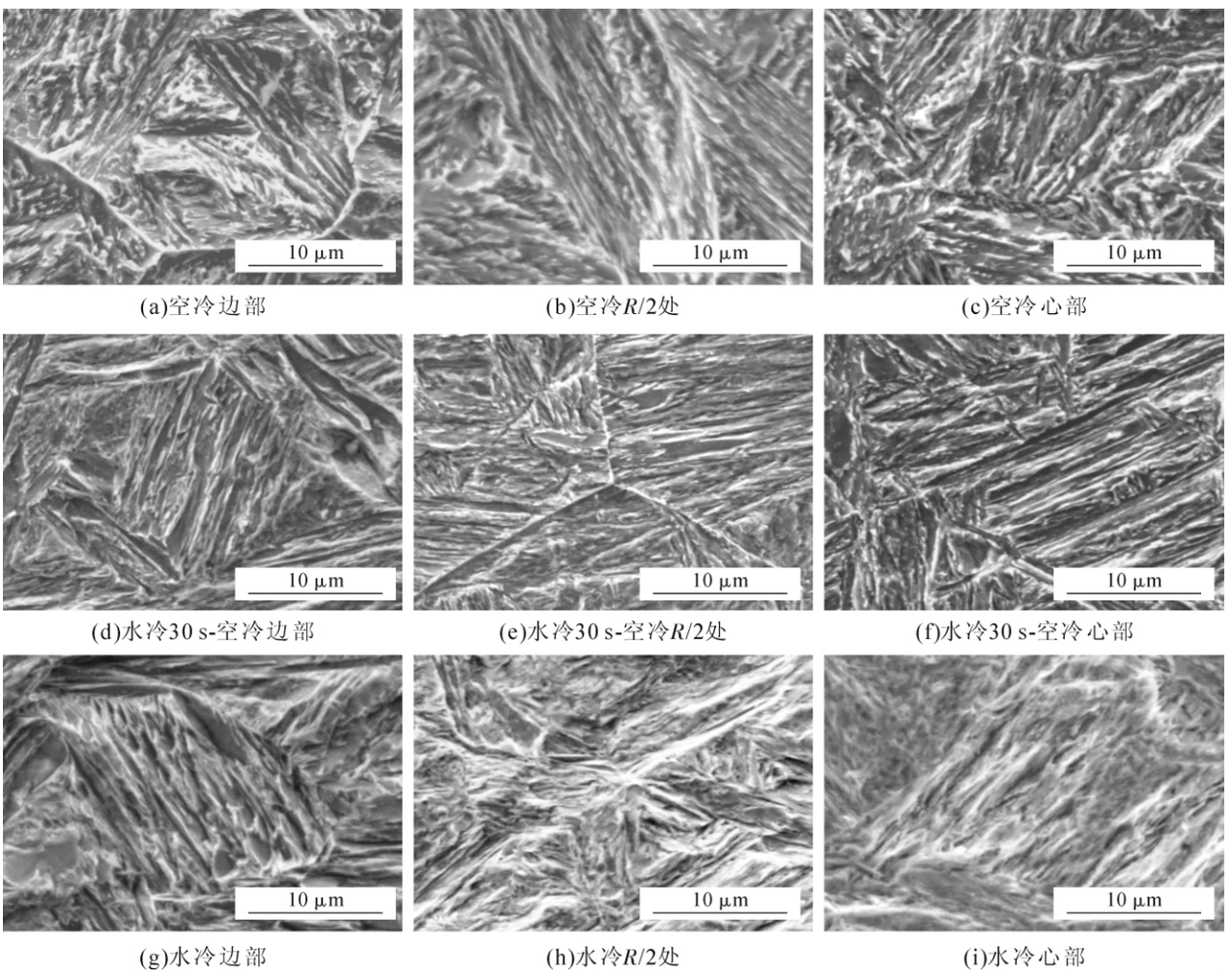
(f)水冷30 s-空冷心部　(d)水冷边部　(e)水冷心部

图 3 ϕ53 mm 棒料不同冷却工艺的 XRD 衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of ϕ53 mm bar with different cooling process

2.3 不同冷却工艺实验材料的组织

图 4 是 ϕ53 mm 棒料的不同冷却工艺、不同位置取样的扫描金相组织。从图可以看出,空冷、250 ℃回火不同部位的组织由贝氏体铁素体(灰深色)和残



(a)空冷边部　(b)空冷R/2处　(c)空冷心部

(d)水冷30 s-空冷边部　(e)水冷30 s-空冷R/2处　(f)水冷30 s-空冷心部

(g)水冷边部　(h)水冷R/2处　(i)水冷心部

图 4 ϕ53 mm 棒料不同冷却工艺的组织

Fig.4 Microstructures of ϕ53 mm bar materials with different cooling processes

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

余奥氏体(白色)组成,组织的分布状态主要有板条状及粒状。板条贝氏体铁素体之间分布有残余奥氏体组织,粒状贝氏体在贝氏体铁素体之上分布有岛状的马氏体和奥氏体（M-A 岛)。30 s 水冷–空冷、250 ℃回火的组织也是由贝氏体铁素体和少量残余奥氏体组成，和热处理空冷的组织相比,30 s 水冷–空冷组织中贝氏体板条束有所细化,板条的比例增加,较细的板条贝氏体铁素体之间分布有残余奥氏体组织。水冷、200 ℃回火不同部位组织均为板条状回火马氏体和少量奥氏体组成,板条回火马氏体之间分布有较细的奥氏体膜。

3 实验结论

(1)ϕ53 mm 贝氏体钢棒料,920 ℃加热水冷 200 ℃回火 $R/2$ 处取样的抗拉强度为 1 654 MPa, A_{KV} 为 55.1 J,具有高强度和较低的冲击值,水冷 30 s–空冷 250 ℃回火 $R/2$ 处取样的强度为 1379 MPa, A_{KV} 为 74 J,空冷 250 ℃回火 $R/2$ 处取样的强度为 1 314 MPa,A_{KV} 为 71.7 J。空冷及水冷 30 s–空冷棒料具有较高的强度和高韧性,贝氏体钢棒料热处理时进行 30 s 水冷–空冷的冷却工艺，可以提高棒料的强度和冲击值。

(2)ϕ53 mm 贝氏体钢 920 ℃加热空冷、水冷 30 s–空冷 250 ℃回火棒料不同位置的组织均为贝氏体铁素体和奥氏体,空冷前增加 30 s 水冷可以细化贝氏体组织板条及增加板条比例。水冷组织为板条回火马氏体和少量的残余奥氏体。

参考文献:

[1] 程巨强,康沫狂. 新型准贝氏体钢及工程应用[J]. 西安工业学院学报, 2000(1):43-48.
[2] 孙德勤,吴春京,谢建新. 贝氏体钢的研究开发现状与发展前景探讨[J]. 机械工程材料,2003(6):4-7.
[3] 乔志霞,刘永长. 低合金超高强度钢中的相变及组织控制[J]. 金属热处理,2015,40(1):12-22.
[4] 李洪波,刘向东,金宝士,等. 一种新型低碳贝氏体钢的研制[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2006(1):19-21.
[5] 康永林,陈庆军,王克鲁,等. 700 MPa 级低碳贝氏体钢的热处理工艺研究[J]. 材料热处理学报,2005(3):96-99,109.
[6] 王六定,朱明,陈景东,等. 低碳超高强度贝氏体钢的组织细化[J]. 材料热处理学报,2007(5):42-45.
[7] 方鸿生,刘东雨,徐平光,等. 贝氏体钢的强韧化途径[J]. 机械工程材料,2001(6):1-5,41.
[8] 聂燚,董文龙,赵运堂,等. 高强度低碳贝氏体钢工艺和组织对性能的影响[J]. 北京科技大学学报,2006(8):733-738.
[9] 郭建良,程巨强,麻以林. 水–空冷热处理贝氏体钢液冷时间对其组织性能的影响[J]. 铸造技术,2021,42(3)216-219.

(上接第 508 页)

合,中间无缝隙夹层现象;随机抽取蘑菇头缸套的缸体,进行解剖取小样分析,发现蘑菇头和铝合金融合有明显的缝隙,缸套(喷铝)相对于蘑菇头缸套,其微观的结合状态更好。

3 结论

(1)利用 FLOW-3D 可优化铝合金缸体压铸工艺方案,铝合金充型温度以 670 ℃以上为宜。

(2)缸套(喷铝)表面的铝合金涂层和铝合金缸体的本体能够完整熔合,不会因为高压高速的压铸工艺等导致镀铝层脱落而出现较大间隙,结合间隙比蘑菇头缸套的间隙要小。

(3)铝合金和缸套(喷铝)之间的结合强度均值可以达到 30.7 MPa;越靠近浇口侧,铝合金和缸套(喷铝)的结合强度越高。

参考文献:

[1] 王小兰. 近 5 年中国汽车轻量化进展探究 [J]. 汽车文摘,2021(2):30-34.
[2] 张楠. 浅谈中国商用汽车节能与轻量化的意义与愿景 [J]. 汽车文摘,2020(10):7-15.
[3] 屈光洪,尚珍. 汽车轻量化技术的应用[J]. 汽车实用技术,2020(10):64-66.
[4] VENCL A, MRDAK M, CVIJOVIC I. Microstructure and tribological properties of ferrous coating deposited by APS on AL-alloy substrate [J]. FME Transaction, 2006, 34:151-157.
[5] EDRISY A, PERRY T, ALPAS A T. Investigation of scuffing damage in aluminum engines with thermal spray coatings [J]. Wear, 2005, 259:1056-1062.
[6] RABIEI A, MUMM D R, HUTCHINSON J W, et al. Microstructure, deformation and cracking characteristics of thermal spray ferrous coatings [J]. Materials Science and Engineering, 1999, A269: 152-169.
[7] 张翼,王宏远,魏柳林,等. 影响铝合金缸体与铸铁缸套结合性能因素的分析[J]. 铸造,2010,59(2):178-181.
[8] 韩雄伟,冷真龙,杨金风. 铝合金压铸模浇注系统设计及充型凝固数值模拟[J]. 铸造技术. 2010,31(4):465-467.
[9] 梁民航,胡艺腾,潘家敬,等. 铝合金压力铸造过程的优化仿真[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2020,41(5):95-100.
[10] 李小华，谭家明. 基于 FLOW-3D 的压铸填充分析及模具设计//2011 重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆:机械工程学会铸造分会,2011:321-323.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net