DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.03.014

水-空冷热处理贝氏体钢液冷时间对其组织性能的影响

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 ϕ53 mm 贝氏体钢棒料 920 ℃奥氏体化后水-空冷冷却条件下,水冷时间对组织和力学性能的影响。结果表明,水冷 20 s 后空冷,力学性能最佳,边部 R_m 为 1 363 MPa,A_{KV} 为 76.5 J;1/2 半径处 R_m 为 1 361 MPa,A_{KV} 为 80.6 J;心部 A_{KV} 为 97.5 J。与空冷贝氏体钢相比,20 s 水冷-空冷,边部和 1/2 半径处拉伸强度和冲击性能提升幅度不大,但可以大幅度提高棒料心部的冲击值。20 s 水冷-空冷,组织为贝氏体+铁素体+残余奥氏体;50 s 以上水冷-空冷,组织为回火马氏体、贝氏体和少量的残余奥氏体。

关键词:贝氏体钢;水-空冷却;组织;性能
中图分类号:TG142.1; TG156　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)03-0216-04

Effect of Water Cooling Time on Microstructure and Properties of Water-air Cooled Bainitic Steel

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

Abstract: The effect of water cooling time on the microstructure and mechanical properties of diameter with 53 mm bainitic steel bars after austenitizing at 920 ℃ was studied. The results show that the best mechanical properties are obtained by air cooling after water cooling for 20 s, with edge Rm of 1 363 MPa and A_{KV} of 76.5 J. R_m and A_{KV} at 1/2 radius are 1 361 MPa and 80.6 J respectively, the A_{KV} at center is 97.5 J. Compared with the air-cooled bainite steel, the tensile strength and impact property at the edge and 1/2 radius of the 20 s water-cooled bainite steel are not greatly improved, but the impact value at the core of the bar can be greatly increased. For 20 s, the structure is bainite+ferrite+retained austenite; Over 50 s, the microstructure is tempered martensite, bainite and a small amount of residual austenite.

Key words: bainite steel; cooling rate; microsteucture; mechnical property

低碳、高硅、高锰的贝氏体钢热加工或热处理空冷过程奥氏体会组织转变贝氏体铁素体及少量的残余奥氏体,改善贝氏体钢的强韧性,目前各种低碳贝氏体钢已广泛应用于工程机械、压力容器、输油、输气管道等领域[1-4]。低碳贝氏体钢通过控制冷却速率与回火参数等能细化及稳定钢的组织,提高钢的强韧性[5-8]。低碳贝氏体钢热处理空冷时,对于截面尺寸较小的棒料可实现全断面的贝氏体组织,力学性能均匀性较高,对于大截面贝氏体钢棒料,由于表面和心部冷却速度的差异,会造成表面层和心部组织形态出现差异而导致冲击性能不满足要求[9],因此,研究控制冷却改善大截面空冷贝氏体钢的组织,提高结构件断面力学性能的均匀性,具有重要的应用价值。本文作者研究了高强度贝氏体钢棒料热处理水-空冷水冷时间对其组织和力学性能的影响,为高强度大截面贝氏体钢的热处理控制冷却提供理论依据。

1　实验材料及方法

试验材料的牌号为 20SiMn2Mo。生产过程为采用电弧炉冶炼+钢包精炼+真空处理,浇注成铸锭,铸锭开坯,热轧成 ϕ53 mm 的棒料。热处理的棒料尺寸为 ϕ53 mm×110 mm,加热温度 920 ℃,保温一定时间后,进行水-空冷却,空冷前水冷却时间分别为 10~80 s。所有水-空冷的棒料进行 250 ℃回火。拉伸试样经线切割成 ϕ12 mm×110 mm,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

收稿日期:2021-01-12
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)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

尺寸 10 mm×10 mm×55 mm 的标准 V 型缺口试样，缺口深度为 2 mm。拉伸试验在 DDL300 电子万能试验机上进行。冲击试验采用 JBD-300 型摆锤冲击试验机。洛氏硬度测试使用 HR-150A 型全洛氏硬度计，显微组织观察采用 Axio observer 7 m 型金相显微镜观察显微组织，组织的腐蚀液为 4%硝酸酒精。采用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪分析试验材料不同冷却的物相分析。

2　实验结果及分析

2.1　试样不同热处理的力学性能

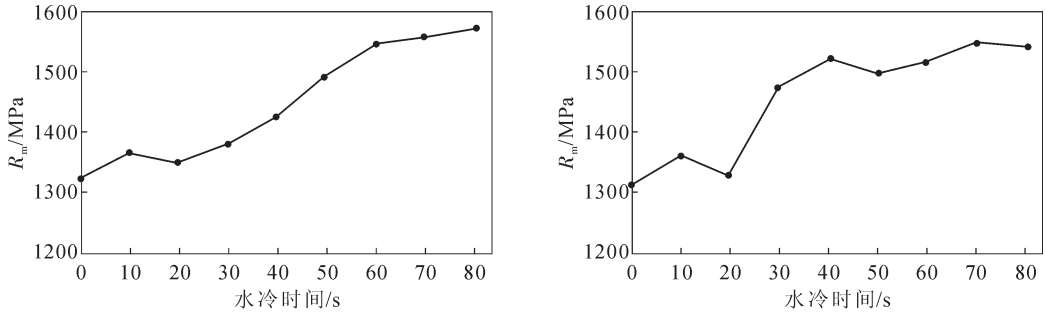
是水-空冷热处理贝氏体钢棒料水冷时间对 ϕ53 mm 不同部位抗拉强度影响曲线。从图 1 看出，棒料边部和 1/2 半径处取样的抗拉强度随水冷时间的增加有增加的趋势。棒料边缘的抗拉强度不水冷空冷时 R_m 1 323 MPa，20 s 水冷-空冷 R_m 1 349 MPa，80 s 水冷-空冷抗拉强度最高 R_m1 570 MPa。棒料1/2 半径处取样抗拉强度，不水冷空冷时 R_m 1 314 MPa，20 s 水冷-空冷 R_m 1 330 MPa，80 s 水冷-空冷抗拉强度最高 R_m 1 540 MPa。相同热处理状态棒料边部取样的强度高于 1/2 半径处抗拉强度，空冷前水冷处理可以提高棒料的抗拉强度。

贝氏体钢棒料热处理空冷前进行不同时间的水冷，强度出现这样变化的原因为，随空冷前水冷时间的增加，贝氏体钢棒料高温阶段冷却速度加快，冷却过程高温相奥氏体晶粒来不及长大，抑制奥氏体组织粗化，细化钢的组织，提高棒料的强度。

图 2 是 ϕ53 mm 棒料冲击值随空冷前水冷时间及取样位置的变化曲线。可以看出，随空冷前水冷时间的增加，棒料不同部位冲击值有先升高后降低的趋势。棒料边缘冲击值，不水冷空冷时 A_{KV}74.1，水冷 20 s 空冷 A_{KV}76.5 J，水冷 80 s 空冷冲击值最低 A_{KV}65.5 J。1/2 半径处冲击值，不水冷空冷时 A_{KV}71.7，水冷 20 s 空冷 A_{KV}80.6 J，水冷 70 s 空冷冲击值最低 A_{KV}70.8 J。心部取样冲击值，不水冷空冷时 A_{KV}65.3，水冷 20 s 空冷 A_{KV}97.5 J，水冷 40 s 空冷冲击值最低 A_{KV}57 J。冲击值出现这种变化原因为，水冷时间较短时，棒料出水温度较高，空冷后组织中奥氏体量含量增加，提高冲击韧度。随着水冷时间的增加，边部和 1/2 处冷速较快，韧性相对较高，但水冷时间较长时，棒料中会生成马氏体组织，强度提高，而韧性降低。心部冲击值在水冷时间在 30~40 s 时，由于心部冷速增加，棒料冷却组织中的残余奥氏体量减小，冲击值下降，水冷时间大于 40 s 后，由于水冷时间的增加，心部组织细化程度增加，冲击值升高。

2.2　试样不同热处理的 XRD 物相分析

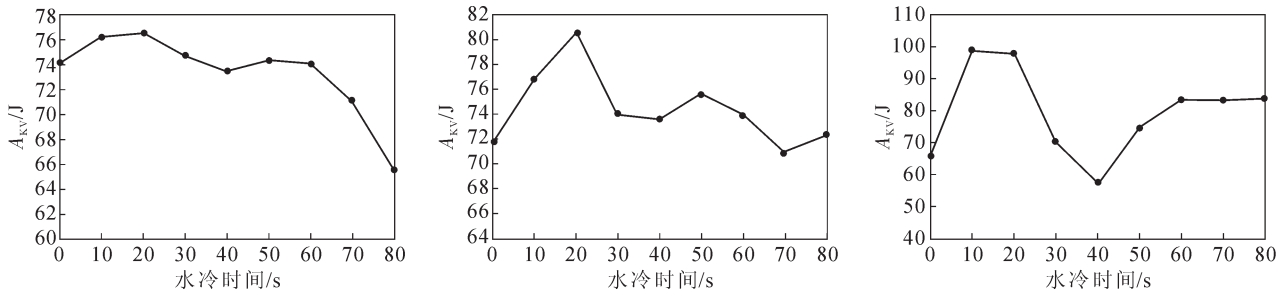
图 3 是 ϕ53 mm 棒料空冷前不同水冷时间 XRD 衍射图谱，从图中可以看出，不同冷却方式 X-射线衍射峰主要为铁素体峰和奥氏体峰，由于 10 s 水冷出水温度高于贝氏体转变开始点温度，因此、空冷和 10 s 水冷-空冷棒料的组织应该为贝氏体铁素体和残余奥氏体组成，为无碳化物贝氏体组织[10]。



(a)边部　　(b)1/2半径处

图 1　水-空冷热处理 ϕ53 mm 棒料不同水冷时间抗拉强度变化

Fig.1 Variation of tensile strength of water-air cooled ϕ53 mm bar with different water cooling time



(a)边部　　(b)1/2半径处　　(c)心部

图 2　水-空冷热处理 ϕ53 mm棒料不同水冷时间冲击值变化

Fig.2 Variation of impact value of water-air cooled ϕ53 mm bar with different water cooling time

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

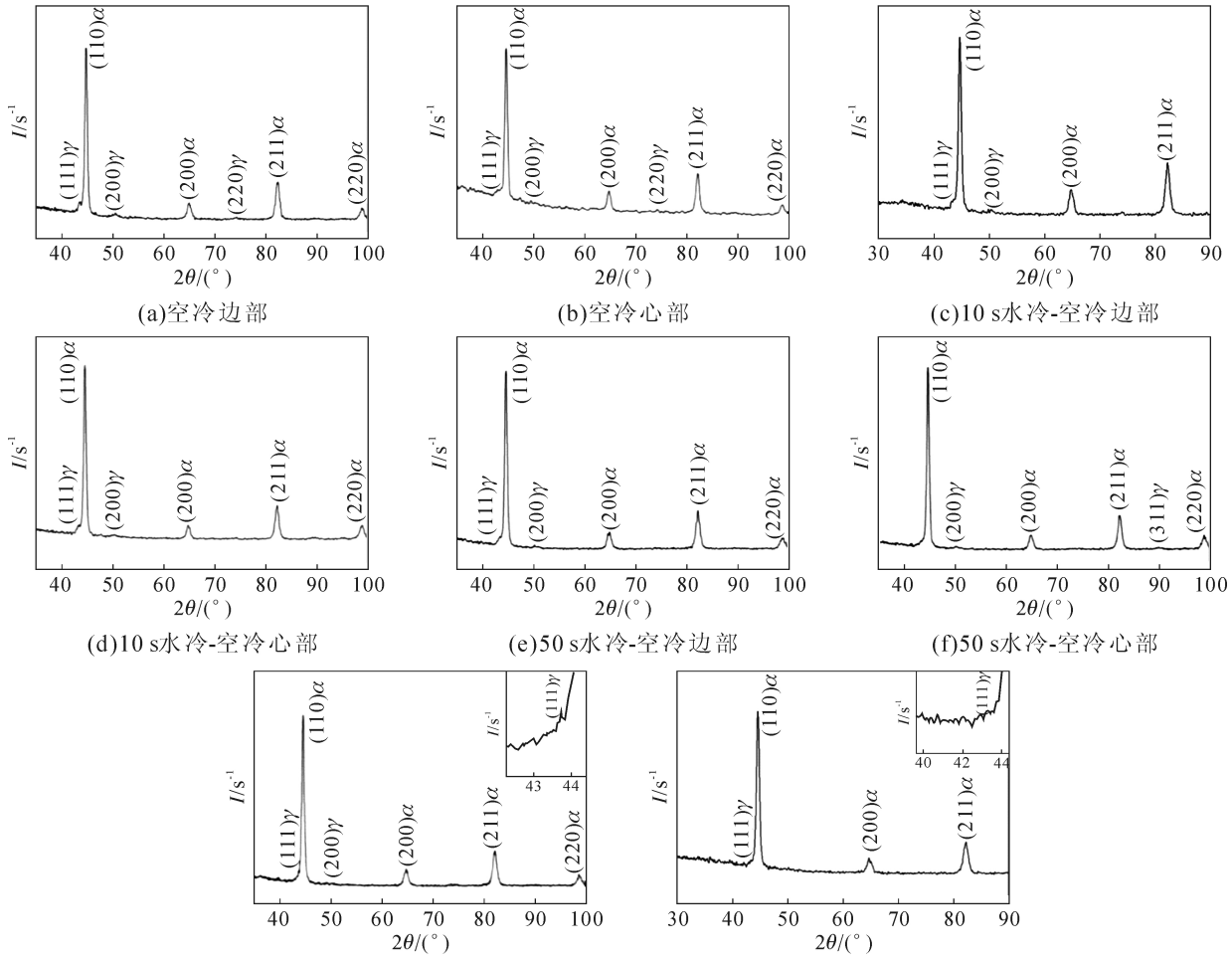


图 3 水–空冷热处理 ϕ53 mm棒料不同水冷时间 XRD 衍射图

Fig.3 XRD patterns of water-air cooled ϕ53 mm bar with different water cooling time

50 s 以上水冷–空冷，由于出水温度低于棒料马氏体转变温度，棒料的组织应该为回火马氏体、贝氏体和少量的奥氏体组织，棒料在高温阶段水冷时间延长，使得高温组织奥氏体长大时间较短，来不及长大而细化奥氏体转变的组织，组织中存在一定量的残留奥氏体可以提高钢的韧性[11]。

2.3 试样不同热处理的组织观察

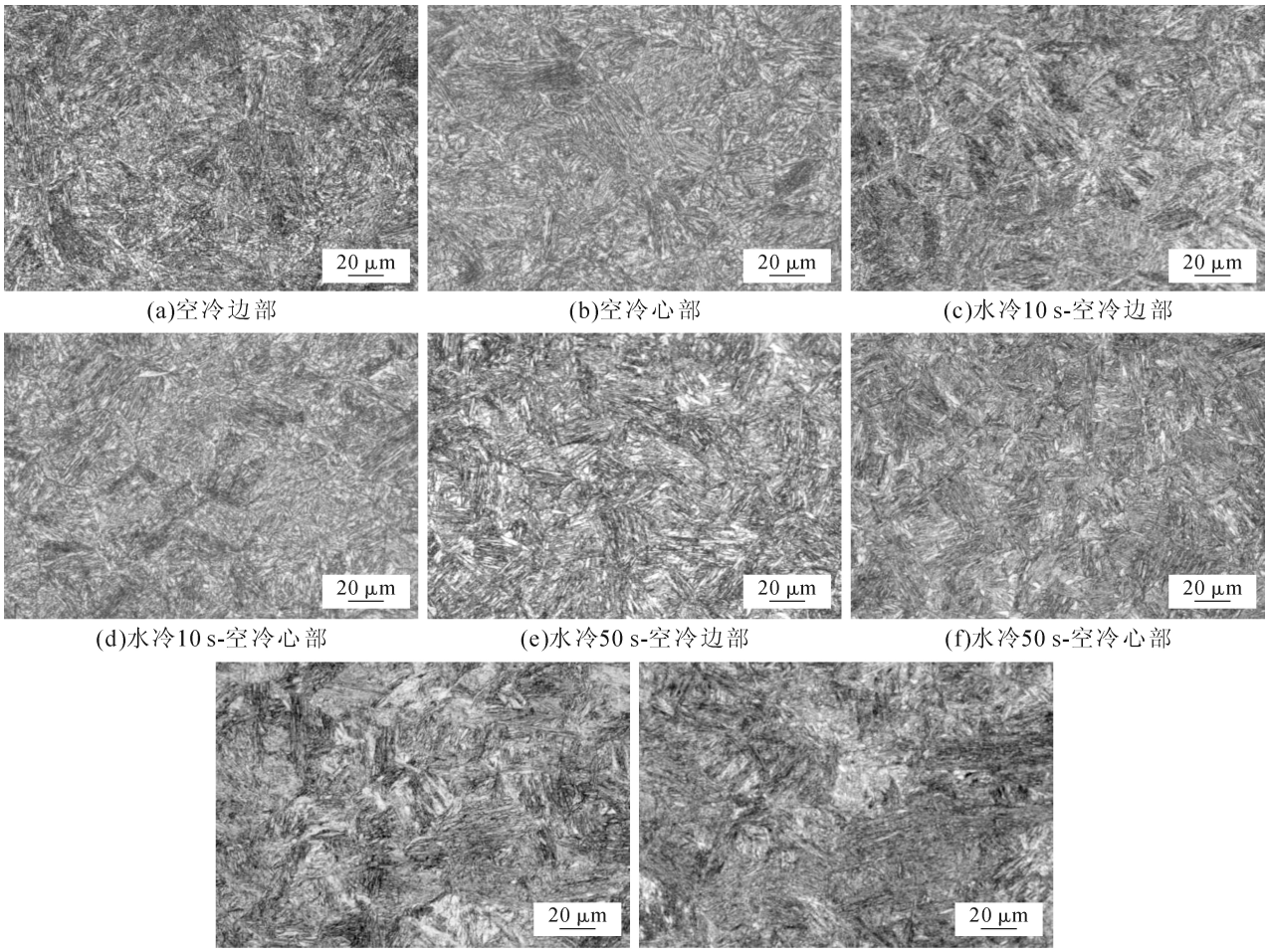
图 4 是 ϕ53 mm 棒料水冷–空冷冷却，不同的水冷时间及不同位置取样的金相组织。结合图 3 的 X 射线衍射物相分析，空冷棒料的组织为贝氏体铁素体和残余奥氏体组织，空冷棒料边部贝氏体板条束较细，长度较短(图 4a)，棒料心部贝氏体板条束有所粗化，长度较长(图 4b)。棒料 10 s 水冷–空冷，由于棒料 10 s 水冷出水温度为 455 ℃，高于实验材料的贝氏体转变温度 370 ℃，组织(图 4c、图 4d)和空冷的相同，但组织贝氏体板条比空冷短，组织细化。50 s 水冷–空冷时，由于棒料表面的出水温度为 240 ℃，低于实验材料的马氏体转变温度 310 ℃，边部的组织中出现马氏体，组织为马氏体、贝氏体和奥氏体组织(图 4e)，心部马氏体量减少(图 4f)。80 s 水冷–空冷棒料，表面出水温度为 125 ℃，温度低于马氏体转变温度，棒料边部和心部组织中均出现马氏体组织，组织为板条马氏体、贝氏体和少量残余奥氏体(图 4g、图 4h)。

3 实验结论

(1)直径 ϕ53 mm 贝氏体钢 920 ℃加热水–空冷却 250 ℃回火，随空冷前水冷时间的增加，棒料边部及其心部强度有上升的趋势，冲击值有先上升后下降的趋势。空冷前水冷时间在 20 s 贝氏体棒料具有较高的冲击值，为最佳水冷时间范围，获得力学性能为，边部强度为 1 363 MPa，冲击值 A_{KV} 为 76.5 J，$R/2$ 处强度 1 361 MPa，冲击值 A_{KV} 为 80.6 J，心部 A_{KV} 为 97.5 J。

(2)ϕ53 mm 贝氏体钢 920 ℃水–空冷却 250 ℃回火，随水冷时间延长组织有细化的趋势，水冷时间 20 s 以下棒料的组织为贝氏体铁素体和残余奥氏体组成，50 s 以上水冷–空冷棒料的组织为回火马氏体、贝氏体和少量的残余奥氏体组织。

(C)1994-2021 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10 s-空冷边部

(d)水冷10 s-空冷心部　(e)水冷50 s-空冷边部　(f)水冷50 s-空冷心部

(g)水冷80 s-空冷边部　(h)水冷80 s-空冷心部

图 4 水-空冷热处理 ϕ53 mm棒料不同水冷时间的微观组织

Fig.4 Microstructure of water-air cooled ϕ53 mm bar with different water cooling time

参考文献：

[1] 张红梅，刘相华，王国栋，等. 低碳贝氏体钢形变奥氏体的连续冷却相变研究[J]. 金属热处理学报，2000，21(4):35-40.

[2] 陈忠伟，张玉柱，杨林浩. 低碳贝氏体钢的研究现状与发展前景[J]. 材料导报，2006，20(10):84-86.

[3] 于庆波，孙莹，倪宏昕，等. 不同类型的贝氏体组织对低碳钢力学性能的影响[J]. 机械工程学报，2009，45(12):284-288.

[4] 贺信莱，尚成嘉，杨善武，等. 高性能低碳贝氏体钢的组织细化技术及其应用[J]. 金属热处理，2007，32(12):1-10.

[5] 尚成嘉，王学敏，杨善武，等. 高强度低碳贝氏体钢的工艺与组织细化[J]. 金属学报，2003，30(10):1019-1024.

[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，2007，28(5):42-45.

[7] 高宽，王六定，朱明，等. 低合金超高强度贝氏体钢的晶粒细化与韧性提高[J]. 金属学报，2007，43(3):315-320.

[8] 尚成嘉，杨善武，王学敏，等. 低碳贝氏体钢的组织类型及其对性能的影响[J]. 钢铁，2005，40(4):57-61.

[9] 程彦，程巨强，游人杰. 贝氏体钢模锻件冲击值偏低的原因分析[J]. 热加工工艺，2019，48(17):179-181.

[10] 程彦，程巨强，李振飞. 加热温度对无碳化物贝氏体截齿钢组织和性能的影响[J]. 煤矿机械，2019，40(2):62-64.

[11] 李晴，程巨强. 回火温度对无碳化物贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 铸造，2019，68(8):544-547.

（上接第 215 页）

[11] 胡志恒. AlCu5MnCdVA 铝合金的激光选区熔化成形熔凝行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

[12] ZHANG Hu, ZHU Haihong, QI Ting, et al. Selective laser melting of high strength Al-Cu-Mg alloys: Processing, microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science & Engineering A,2016 (656):47-54.

[13] WANG P, DENG L, PRASHANTH K G, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Cu alloys fabricated by selective laser melting of powder mixtures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735: 2263-2266.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net