低合金结构钢控轧控冷组织性能研究

岳祎楠[1,2],郭瑞华[1],杨 雄[2]

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 为了解低合金结构钢控轧控冷工艺下的组织及性能变化规律,以一种Mn-B-Cr-Nb-Ti系Q690低合金高强度结构钢为研究对象,通过改变控轧控冷工艺,分析不同工艺下组织性能的变化规律。试验结果表明:随着终冷温度的升高,实验钢的抗拉强度、屈服强度和屈强比均缓慢下降,伸长率上升,-20 ℃冲击阶段性下降。显微组织随终冷温度降低按铁素体、粒状贝氏体、板条贝氏体的规律变化,对材料性能产生了不同的影响。

关键词: 低合金结构钢;控轧控冷;力学性能;显微组织
中图分类号: TG335.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2018)06-0042-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.06.012

Study on Structure Properties of Controlled Rolling and Controlled Cooling for Low Alloy Structural Steel

Yue Yi-nan[1,2], *Guo Rui-hua*[1], *Yang Xiong*[2]

(1. *School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In order to understand the change rules for microstructure and properties of low alloy structural steel with controlled rolling and controlled cooling process, the Mn-B-Cr-Nb-Ti series of Q690 low alloy high strength structural steel was taken as the object of study, the change rules for structure properties with different processes are analyzed through changing the controlled rolling and controlled cooling process. The test results showed that the tensile strength, yield strength and yield ratio of the test steel were all decreased slowly, the elongation was increased and the impact energy at -20 ℃ was decreased periodically with the increase of finish cooling temperature. The microstructure was changed as the rules of ferrite, granular bainite and lath bainite as well as the effects on the properties of the material are different with the decrease of finish cooling temperature.

Key words: low alloy structural steel; controlled rolling and controlled cooling; mechanical properties; microstructure

高强工程机械用钢具有较高的强度和韧性,广泛应用于工程机械及煤矿机械等领域。低合金高强度结构钢的性能对提高工程机械的能力和效率、延长其使用寿命、减轻设备自重、降低能耗及原材料消耗、提高整体档次都有非常大的作用。高强度工程机械用钢已经发展成为当今钢铁领域的热点之一。

收稿日期: 2018-03-01
作者简介: 岳祎楠(1984-),男,内蒙古包头市人,在读硕士,工程师,现从事产品研发工作。

目前，强度级别在 Q690 及以上的工程机械用钢生产大多采用微合金化和热处理工艺，通过细晶强化、沉淀强化和贝氏体组织强化等手段，及控轧控冷 + 离线回火或是在线淬火 + 离线回火等工艺，以达到用户强度要求。为降低生产成本，采用低碳成分路线，通过控轧控冷工艺生产 Q690 高强工程机械用钢，提升了产品的附加值。我们以一种 Q690 高强工程机械用钢为研究对象，研究控制轧制和加速冷却过程中不同工艺下的组织性能变化，对实验钢的性能变化机理进行探讨分析，寻找钢板最优化综合机械性能，为生产工艺的优化控制提供实验及理论依据。

1　实验研究方案

从生产现场的连铸坯上面切取尺寸为 250 mm × 245 mm × 300 mm 的连铸坯试样，在实验室进行实验钢的轧制，实验室轧机规格为 Φ550 mm × 750 mm。化学成分见表 1。本实验中采用两阶段控制轧制，轧制工艺如下：实验钢板坯的出炉温度为1 210 ℃，一阶段开轧温度 1 150 ℃，二阶段开轧温度 900 ℃，待温厚度为 60 mm，终轧温度为 830 ℃，成品厚度为 20 mm，终冷温度分别选择 370 ℃、400 ℃、420 ℃、440 ℃、460 ℃、480 ℃、500 ℃进行研究。

表 1　实验钢化学成分(质量分数)　%

C	Si	Mn	P	S	Ti	Nb	V	Cr	B
≤0.13	≤0.5	≤1.7	≤0.02	≤0.01	≤0.2	≤0.07	≤0.10	≤0.4	≤0.003

在不同工艺得到的钢板上切取金相试样，经过研磨、抛光后置入 4% 硝酸 + 无水乙醇溶液中进行侵蚀，试样腐蚀好后使用 Axio observer D1m 蔡司光学金相显微镜观察侵蚀后的试样组织，采集不同工艺条件下的组织照片。按照拉伸性能检测国家标准 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸室温试验方法》[1] 的要求制备好拉伸试样，在万能拉伸试验机上进行常温下拉伸实验，测试抗拉强度、屈服强度、屈强比和延伸率。在实验钢上按照冲击吸收功检测国家标准 GB/T 229—2007《夏比摆锤冲击试验方法》[2] 的要求加工成尺寸为 55 mm × 10 mm × 10 mm 的冲击试样，在 -20 ℃条件下进行冲击实验，测试实验钢的冲击性能。

2　实验结果

2.1　力学性能检测结果

不同控轧控冷工艺得到的实验钢力学性能及对应的工艺参数见表 2。

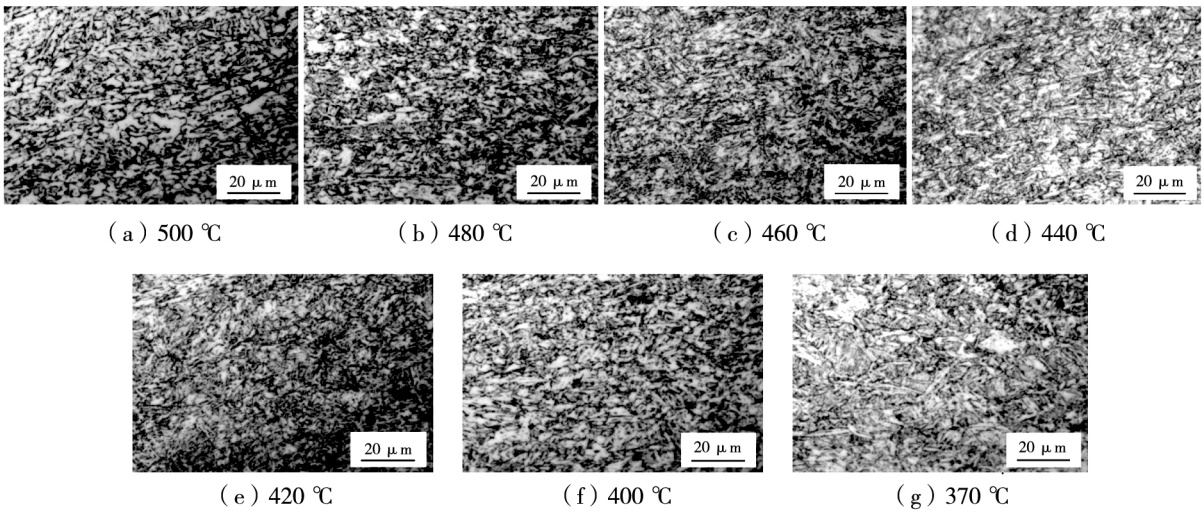
表 2　工艺参数与力学性能

终冷温度 /℃	冷却速度 /(℃·s^{-1})	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	屈强比	A /%	-20℃冲击值 /J
370	27	756	874	0.86	15.0	188 200 212
400	25	706	802	0.88	15.5	117 165 205
420	22	644	880	0.73	14.5	88 82 70
440	18	631	878	0.72	16.0	71 84 68
460	15	625	873	0.72	15.0	44 55 47
480	13	604	796	0.76	17.0	80 75 88
500	12	556	806	0.69	17.5	56 52 56

2.2　显微组织检测结果

实验钢采用 TMCP 工艺轧制后快速冷却，通过控制实验钢的最终冷却温度，使冷却后钢的显微组织产生不同的变化，实验钢显微组织如图 1 所示。随着终冷温度的降低，实验钢的显微组织的变化将按铁素体→粒状贝氏体→板条状贝氏体的组织转变规律进行转变。当终冷温度为 500 ℃时，实验钢的显微组织是由粒状贝氏体和铁素体组成，见图 1

(a)。随着终冷温度降低,铁素体减少,粒状贝氏体的量增加,在终冷温度为480 ℃时,实验钢的组织为粒状贝氏体加少量铁素体儿见图1(b)。终冷温度进一步降低时,组织中的铁素体消失,当终冷温度为460~420 ℃时,实验钢的组织均为粒状贝氏体组织,见图1(c)、(d)、(e)。当终冷温度为400 ℃时,实验钢中出现板条状贝氏体,其显微组织为粒状贝氏体和板条状贝氏体,见图1(f)。继续降低终冷温度到370 ℃时,此时钢板中板条贝氏体比例进一步增加,见图1(g)[3]。



(a) 500 ℃ (b) 480 ℃ (c) 460 ℃ (d) 440 ℃

(e) 420 ℃ (f) 400 ℃ (g) 370 ℃

图1 不同终冷温度对应的实验钢组织

3 力学性能与显微组织分析

3.1 拉伸性能规律分析

拉伸性能是最为重要的一项性能指标,这些性能包括钢的抗拉强度、屈服强度、伸长率。按标准要求在实验钢板板宽的1/4处取拉伸性能试样,在拉伸试验机上进行拉伸试验,并将拉伸试验结果中的抗拉强度、屈服强度和延伸率与控轧控冷工艺建立相关关系曲线,如图2所示。

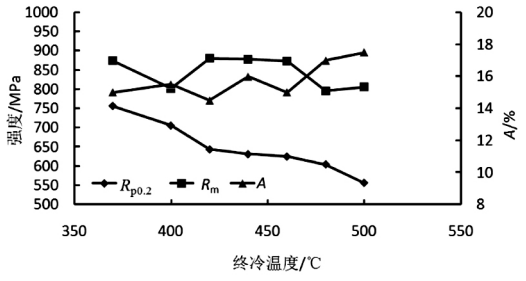


图2 终冷温度与拉伸性能的关系

从图2可以看出实验钢强度的变化趋势,随终冷温度的升高抗拉强度下降,但对应的曲线升降较平缓,变化幅度较小,屈服强度逐渐下降,伸长率缓慢上升,屈强比逐步下降。

终冷温度降到370 ℃时,实验钢的抗拉强度和屈服强度指标达到本实验的最佳综合性能。

3.2 冲击性能规律分析

金属材料的冲击韧性对材料内部组织结构、宏观缺陷及试验条件很敏感,因此,影响冲击试验结果的因素有很多,如缺口形状、化学成分、组织组成、晶粒度、夹杂物、实验温度等。这里缺口形状均为V型,化学成分和夹杂物也均相同,实验温度均为-20 ℃。按照标准在钢板的1/4处取样,在冲击试验机上进行冲击试验,并将-20 ℃的冲击功与终冷温度建立二者相关关系曲线如图3所示。

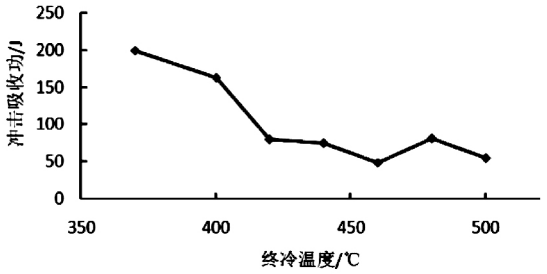


图3 终冷温度与冲击性能的关系

从图3终冷温度对实验钢-20 ℃冲击性能的

影响结果可以看出，随着终冷温度的降低实验钢 -20 ℃的冲击功是阶段性升高。终冷温度在 500 ~ 420 ℃时冲击性能比较平稳，变化幅度比较小。终冷温度降至 400 ℃时，冲击吸收功明显升高，370 ℃时冲击吸收功上升到 200 J 左右。终冷温度为 370 ℃时实验钢达到了本实验中的最佳的冲击性能。

3.3　显微组织分析

3.3.1　两相区轧制对组织的影响

本实验采用的是两相区轧制，由实验钢的显微组织结果可知在两相区轧制后的钢板组织形貌比较复杂。再结晶区的轧制是在轧制变形过程中使实验钢完成其再结晶过程，经过反复轧制和再结晶，使原始奥氏体的晶粒细化，而细晶强化是不降低韧性而大幅度提高强度的最佳强化方式。未再结晶区轧制，由于轧制温度比较低，在奥氏体轧制变形后不发生动态或静态再结晶行为。此时奥氏体晶粒被拉长，晶粒内产生大量变形带，位错密度增加，通过位错强化获得强度的提升，并且同时微合金碳、氮化物也会因为形变而诱导析出，为后续的相变形核提供了有利条件，使实验钢相变后的组织进一步得到细化。而钢中添加了 Mo、Cr、B 等元素，在冷却速度不是很高的情况下就能得到比较高比例的贝氏体组织。因此本实验中最终转变后的组织都是比较均匀细小的贝氏体组织，对提高钢的强度和韧性起到了重要作用。

3.3.2　不同工艺对组织和性能的影响

贝氏体组织是一种中温转变产生的组织，其形成温度介于马氏体和珠光体的形成温度之间。本实验中，在很大温度范围内均可以获得贝氏体组织，而在转变温度不同的情况下会形成不同类型的贝氏体组织。当终冷温度为 500 ℃，冷却速度为 12 ℃/s 时，组织主要由粒状贝氏体和铁素体构成。此时的铁素体晶粒比较细小，尺寸均在 7 μm 以下，形貌基本都呈针状均匀分布于组织各处。当终冷温度降低到 480 ℃时，组织中的铁素体比例进一步降低，粒状贝氏体比例升高，此时的组织为粒状贝氏体和微量的铁素体。这时由于组织中还存在一些铁素体，因此钢的屈服强度和抗拉强度均相对较低一些，而延伸率相对较高。终冷温度降低到 460 ℃时，组织中的铁素体彻底消失，此时组织演变为完全的粒状贝氏体组织。终冷温度降低到 400 ℃时，组织中出现板条状的贝氏体。当终冷温度进一步降低到 370 ℃时，组织中的板条贝氏体比例进一步增加。此时实验钢的组织为粒状贝氏体和板条贝氏体。

组织为粒状贝氏体组织时，大量呈长条状和颗粒状的 M/A 岛无序的弥散分布在基体之上，其最初的铁素体亚结构为细小的板条状，并且具有较高密度的位错，因此具有比较高的强度。由于细晶强化与位错强化的综合效应，此时相对于终冷温度在 500 ~ 480 ℃的粒状贝氏体加铁素体组织时的强度性能有明显上升。但由于其形成的温度相对比较高，粒状贝氏体会发生一定的回复，因此其位错密度会降低，并且 M/A 岛也会更加粗大。因此其屈服强度比更低温度形成的板条状贝氏体组织强度低一些。而且由于其 M/A 岛颗粒比较粗大且形态不均匀，当发生应变时，颗粒状或长条状 的 M/A 岛由于塑性变形能力比较差，因此容易在基体中产生应力集中，在受到冲击时容易成为裂纹源和裂纹扩展通道。因此对其冲击韧性的影响比较大，会导致冲击韧性的降低。板条状贝氏体组织形成时，细小的 M/A岛颗粒有序的排列在基体上。由于形成温度比较低，因此板条状的铁素体亚结构非常细小，且板条中聚集了大量的高密位错，细晶强化与位错强化效应明显。因此当实验钢中出现板条贝氏体时，屈服强度出现了上升。且由于板条贝氏体的 M/A 岛颗粒比较细小，因此在受到冲击时，相对不容易产生应力集中，不易萌发裂纹。在裂纹扩展过程中遇到板条状贝氏体时，由于其板条束之间为大角度界面，裂纹扩展需要更多的能量。因此实验钢组织中板条贝氏体的出现使冲击韧性得到了提高[4]。同时因为在此温度区间形成的粒状贝氏体，形成温度比较低，M/A 岛颗粒也相对比较细小，相对不易产生应力集中，板条亚结构回复程度较低，位错强化效应比较显著。因此较低温度范围内形成的粒状贝氏体加板条状贝氏体组织实验钢的屈服强度和冲击韧性均明显获得了提高。

4　结论

(1) 本实验中，伸长率随着终冷温度的降低而逐渐降低，抗拉强度随着终冷温度的降低而略有升高，但变化幅度比较小，屈服强度随着终冷温度的降低而缓慢的升高，冲击吸收功随着终冷温度的降低而升高，在降至 400 ℃时明显升高。

(下转第 82 页)

CO_2 保护气流量为 25 ~ 30 L/min，焊接电流为390 ~ 420 A，焊接电压为 42 ~ 43 V。

(9) 焊接线能量的选择(焊接线能量 $Q = IU/V$)。为减少焊接应力一般应采用较小的线能量进行焊接，否则会促使热影响区形成过热组织导致焊接接头塑性和韧性下降。但对于定位焊由于焊缝长度短，截面积小，冷却速度快，焊缝容易开裂。此时应选择较大的线能量焊接，以防焊缝开裂。

4.4 焊接方法和焊接顺序的选择

(1) 焊接过程应先焊立缝，后焊横缝，考虑到炉壳因焊接引起的收缩和变形的均匀最好同时焊接每带的所有立缝。

(2) 横焊的焊条电弧焊焊接方法：①按电焊工配置的数量把整个圆周焊缝在直径方向上分成若干个等分焊区，一般为 6 ~ 8 个焊工。而每个焊区又分成 500 ~ 600 mm 分段，焊接由中间的分段开始，并在各焊区同时内外两面进行轮流进行焊接。清根时必须采用碳弧气刨进行清根。②横焊：电弧长 2 ~ 4 mm。焊条的角度，横焊时焊条应向下倾斜，其角度应为 70° ~ 80°，防止铁水下坠。根据两焊件的厚度不同，可适当调整焊条角度，焊条与焊接前进方向成 70° ~ 90°。

(3) 横缝埋弧自动焊焊接要求：所有两面坡口的炉壳焊缝，应采用“分段分层退步反向焊及对称焊接法”进行焊接。为控制焊接变形，最理想的办法是两人在焊缝两面同时对称焊接。但是这种焊接方式受到具体条件的限制，可操作性不强。比较好的焊接方法是先在焊缝里口少焊几层，然后再焊外口，外口焊接层数比里口多，最好能一次把外口焊满，使它所产生的角变形抵消里口所产生的变形外并稍稍超过一点，然后再焊里口，将该面剩下的焊完。如焊接非对称型坡口时，应先焊接量小的一面，然后再焊接量大的一面。

4.5 焊接要求

在焊接过程中应测量并记录天气、温度、湿度和风速。有雨或风速超过 9 m/s 时，必须采取相应防护措施方可进行焊接工作。每条焊缝应连续一次焊完。若因故被迫中断，应根据工艺要求采取措施防止裂纹(采取焊后保温缓冷等措施)，重新施焊前必须进行检查，确认无裂纹后方可继续施焊[3]。

5 结束语

通过对炉皮更换整个过程进行回顾，指导我们有效、高速完成炉壳更换，使设备使用寿命延长，减少周期检修次数，减低成本提高产能。此操作规程通用于各大高炉检修施工，能高速、低耗完成任务，有效提高劳动效率、最大化利用空间作业面，使检修利用最大化。

参 考 文 献

[1] GB 50567—2010，炼铁工艺炉壳体结构技术规范[S].

[2] 熬海根. 2010 年高炉炉壳局部更换施工实践[J]. 江西冶金，2010，30(6)：16 - 20.

[3] GB 50017—2003，钢结构设计规范[S].

(上接第 45 页)

(2) 实验钢在适当的控轧控冷条件下，可以获得强度和韧性都比较高的组织。当微观组织为粒状贝氏体加板条状贝氏体时，钢材可以获得良好的综合力学性能。

(3) 综合考虑实验钢的性能，终冷温度为370 ℃时实验钢具有最佳的综合力学性能，可以满足 Q690 钢板的力学性能要求。

参 考 文 献

[1] GB/T 228.1—2010，金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法[S].

[2] GB/T 229—2007，夏比摆锤冲击试验方法[S].

[3] 沈冬冬，夏靖超，师静蕊，等. 终冷温度对 550 MPa 级抗震钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺，2016，45(23)：60 - 62.

[4] 周平，杨建勋，李艳，等. 冷却速率对 Q690D 高强钢低温冲击韧性的影响[J]. 轧钢，2011，28(06)：18 - 20.