控轧控冷对X80M钢强韧性的作用*

袁晓鸣[1],武利平[2],王少炳[1],谷海龙[3]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢金属制造有限责任公司,内蒙古 包头 014010;
3. 渤海装备华油钢管公司,河北 沧州 062658)

摘 要: 采用热模拟压缩试验和热膨胀试验研究了X80M钢奥氏体高温变形行为和连续冷却相变规律,制定了控轧控冷参数,进行了工业生产。研究结果表明:控轧控冷工艺中末道次变形量大于25%可发生完全再结晶,晶粒尺寸显著细化,冷却速率在20~25 ℃/s时,获得比例合适的针状铁素体+贝氏体。钢带屈强比为0.86左右,-20 ℃冲击功不低于370 J,-15 ℃落锤剪切面积不小于95%,夏比V型冲击韧脆转变温度为-45 ℃,保证焊管后具有低包辛格强度变化、低韧脆转变温度和优良的抗屈曲失稳特性。

关键词: X80M钢;控轧控冷;强韧性;包辛格效应;显微组织
中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)02-0006-06
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.02.002

Effects of Controlled Rolling and Controlled Cooling on Strength and Toughness of X80M Steel

Yuan Xiao-ming[1], *Wu Li-ping*[2], *Wang Shao-bing*[1], *Gu Hai-long*[3]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Baotou Steel Metal Manufacturing Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *CNPC Bohai Equipment North China Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Cangzhou* 062658, *Hebei, China*)

Abstract: The high-temperature deformation behavior and continuous cooling phase transformation law for austenite of X80M steel are studied with thermal simulation compression and thermal expansion tests as well as the parameters of controlled rolling and controlled cooling are formulated and the industrial production is carried out. The study results showed that the deformation in final pass of controlled rolling and controlled cooling process was greater than 25% and it could be with perfect recrystallization, grain size was significantly refined and acicular ferrite + bainite with suitable proportion was obtained when the cooling rate was 20~25 ℃/s, the yield ratio of steel strip was about 0.86, impact energy at -20 ℃ was not lower than 370 J, shearing area of drop-weight test at -15 ℃ was not smaller than 95% as well as ductile-brittle transition temperature of Charpy V test was -45 ℃ to ensure the welded pipe to be with low bauschinger strength varia-

* **收稿日期:** 2020-01-12
基金项目: 国家重点研发计划(21.4 mm X80低温管线钢钢带生产技术2017YFB0304903)。
作者简介: 袁晓鸣(1983-),男,内蒙古鄂尔多斯市人,硕士,高级工程师,现从事板带材新产品开发工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

tion and ductile – brittle transition temperature and excellent resistance to buckling instability.

Key words: X80M steel; controlled rolling and controlled cooling; strength and toughness; bauschinger effect; microstructure

石油天然气作为当今世界清洁能源物质，使用量逐年增加。2014 年 5 月，中俄双方有关企业签署了总价值超过 4 000 亿美元、年供气量 380 亿 m^3、期限长达 30 年的中俄东线天然气购销合同[1]。迫使国内输送管由 X60M、X65M 提升至 X70M、X80M 甚至更高级别[2-3]，向着大管径、高压力、高强度的方向发展，来提升管道输送能力。更考虑到输送钢管服役的安全性，要求钢带及焊管具有较高的强韧匹配性，极大推动高级别管线钢在工业领域的应用与发展[4-5]。

对于 X80M 管线钢，由于管道长期服役于地理环境复杂、气候条件低寒地带，并承载长距离运输成分复杂且含有腐蚀性的石油与天然气，焊管材料应具备优良强韧性和低包辛格强度变化，抵抗大载荷低温冲击和断裂风险。本文采取控轧控冷技术，试验确定了轧制阶段的温度控制及道次间的变形量，分析了钢带和焊管屈服强度、抗拉强度、延伸率、屈强比和低温韧性之间关系，开发出一种低包辛格强度变化、优良强韧性匹配和低韧脆转变温度的 X80M 管线钢材料来满足石油与天然气长期服役严苛工况的条件。

1　试验方法

采用热模拟压缩试验和热膨胀试验制定控轧控冷工艺。试验用 0.05C – 1.75Mn – Nb – Ti 系铸坯试样。其中单道次模拟试验过程为：试样加工成 Φ8 mm × 12 mm 的圆柱，在 Gleeble1 500D 热模拟试验机上进行试验，方案如图 1 所示。试样以 10 ℃/s 加热到 1 180 ℃，保温 300 s 以 5 ℃/s 的冷却速率冷却至 980 ℃ 进行压缩变形，变形量为 15%、20%、25%、30%、35%、40%，变形速率为 1 s^{-1}，然后快冷到室温，试验后沿轴线将试样切开观察显微组织。连续冷却试验过程为：将加工好试样以 10 ℃/s 的速度加热到 900 ℃ 后保温 300 s，之后以 0.5 ℃/s、1 ℃/s、2 ℃/s、5 ℃/s、10 ℃/s、15 ℃/s、20 ℃/s、30 ℃/s、40 ℃/s 的速度冷却到室温，方案如图 2 所示。

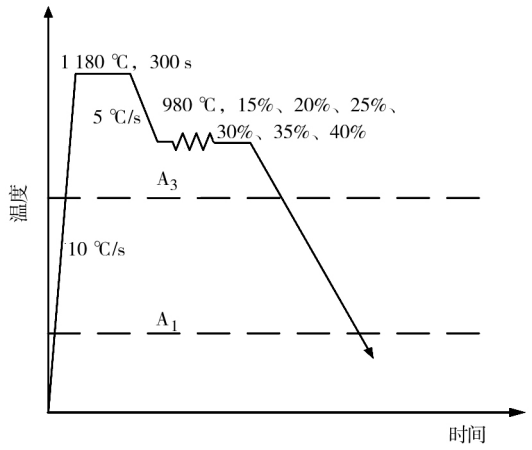


图 1　单道次压缩试验方案

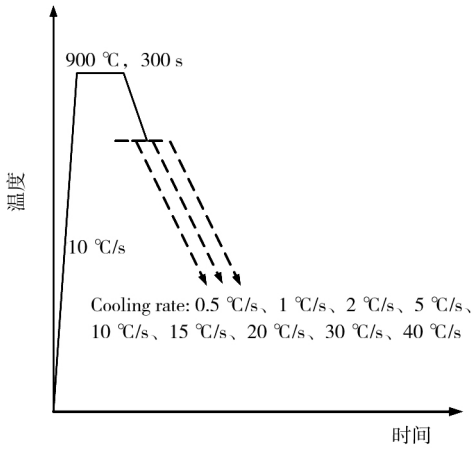


图 2　CCT 模拟试验方案

(1) 钢带取样。拉伸试样在板宽 1/2 处、沿轧制方向成 20°方向取样，试样尺寸为 Φ12.7 mm × 130 mm，采用型号为 CMT 5305 电子万能试验机检测；钢带冲击试样在板宽 1/4 处、沿轧制方向成 20°取样，试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 55 mm，采用型号为 CTW – 80T 的冲击试验机进行冲击性能检测；钢带落锤试样在板宽 1/4 处取一个矩形试样，取样方向沿轧向 20°，试样尺寸为 305 mm × 76 mm × 22 mm，采用型号为 JL – 10000 落锤试验机进行落锤性能检测，具体取样如图 3 所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

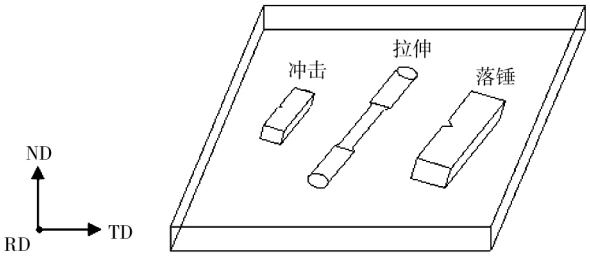


图3 钢带取样示意图

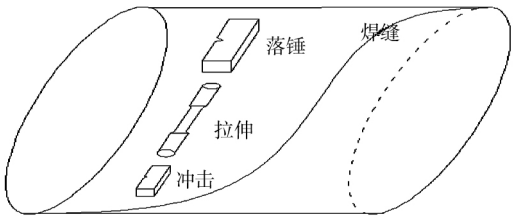


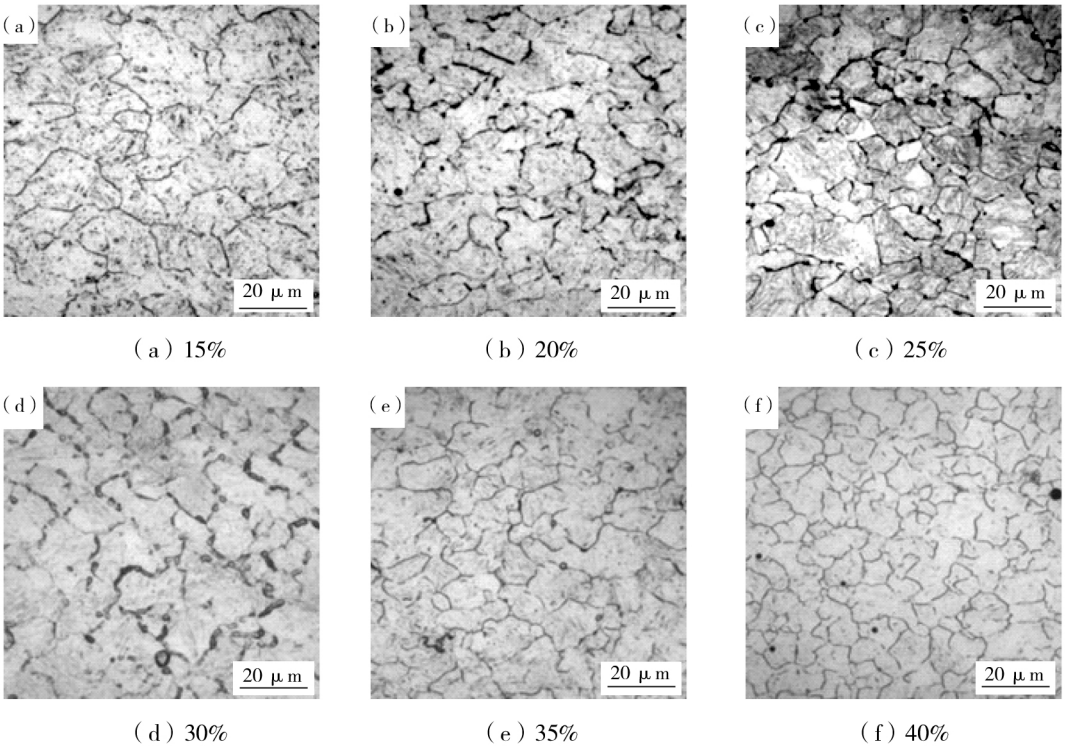
图4 钢管取样示意图

(2) 焊管取样。拉伸试样沿管体横向取样，试样尺寸为 Φ12.7 mm×130 mm；焊管冲击试样沿管体横向取样，试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm；焊管落锤试样沿管体横向取样，试样尺寸为 305 mm×76 mm×22 mm，具体取样如图4所示。

2 试验结果

2.1 奥氏体变形及冷却相变规律

采用不同压下率观察变形原始奥氏体显微组织如图5所示。随着变形量的增加，晶粒组织逐渐细化。结合2 250 mm产线设备的道次变形量能力，确定粗轧末道次的压下率大于25%，奥氏体晶粒可完全发生再结晶，晶粒显著细化。



(a) 15% (b) 20% (c) 25%

(d) 30% (e) 35% (f) 40%

图5 变形量对原奥氏体晶粒的影响

试验钢的动态连续冷却转变曲线如图6所示，冷却速率在20~30 ℃/s之间可获得理想的针状铁素体。因此，制定出X80M钢的关键的轧制温度和道次变形量，进行工业试制生产，并对钢带和焊管的力学性能进行检验分析。

2.2 拉伸性能

检测钢带试样的拉伸性能结果如表1所示，性能指标富余量适中。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

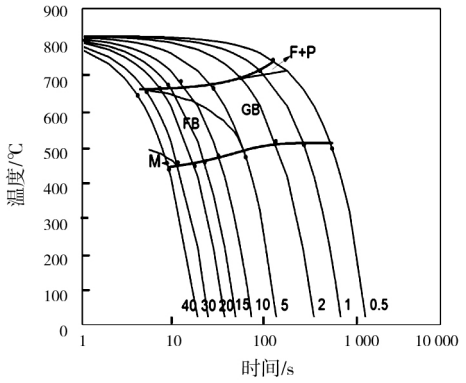


图 6　X80M 钢动态连续冷却转变曲线

表 1　钢带拉伸性能

编号	$R_{t0.5}$/MPa	R_m/MPa	$R_{t0.5}/R_m$	A_{50}/%
标准	555 ~ 675	625 ~ 765	≤0.93	≥16
1#	610	710	0.86	23
2#	610	705	0.87	24

将热轧钢带制成规格为 Φ1 219 mm × 22 mm 的螺旋焊管，水压试验后分别在 1#和 2#的头管（Head tube，简称 HT）、中管（Medium tube，简称 MT）、尾管（End tube，简称 ET）各取 6 组（头管 2 组、中管1 组、尾管 3 组）拉伸试样，检测结果如图 7 所示。

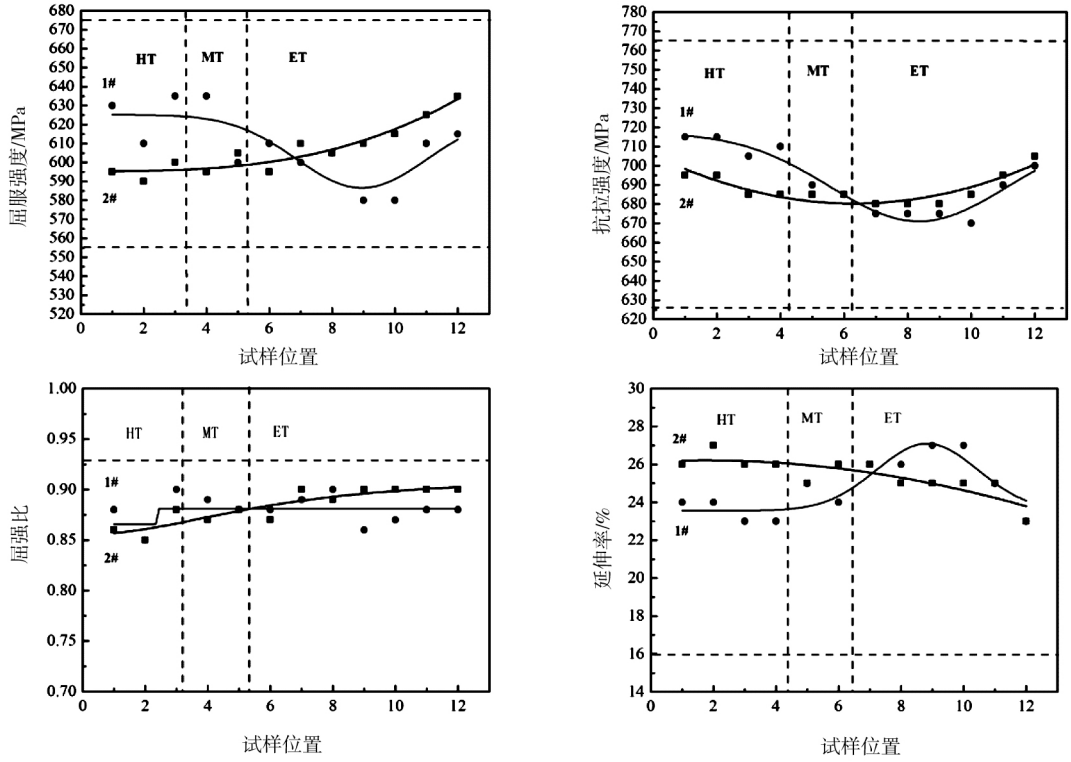


图 7　焊管拉伸性能

由表 1 和图 7 看出，X80M 材料的整体拉伸性能比较稳定，未因钢带工艺波动导致钢带焊管后大的包辛格变化，材料大的延伸率和低的屈强比可以抵抗大变形焊管过程的屈曲失稳。拉伸试验说明对于厚度 22.0 mm 及以上的 X80M 管线钢材料，轧制过程采取低温及大变形量控轧控冷工艺，焊管采取稳定的成型工艺，以满足厚规格 X80M 钢带焊管后优良的强、塑性指标。

2.3　冲击性能

X80M 钢强度不断提高，也要求材料具有较高的抗起裂性和止裂能力。随着管道向严寒、高纬度等严苛地带的铺设，要求其具有大的韧性储备。研究表明针状铁素体的晶体学方向各异，有利于抵抗裂纹的扩展，提高止裂韧性。钢带 −20 ℃的低温冲击性能如表 2 所示，冲击功富余量大、剪切面积稳定。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 钢带冲击性能

编号	试验温度/℃	冲击功/J				剪切面积/%			
		单值	单值	单值	均值	单值	单值	单值	均值
标准	-20	≥160	≥160	≥160	≥210	≥70	≥70	≥70	≥85
1#	-20	398.2	382.3	370.5	383.7	100	100	100	100
2#	-20	383.8	369.0	375.5	376.1	100	100	100	100

分别对1#和2#钢带试样进行系列温度冲击试验，拟合不同温度下冲击吸收功的变化值如图8所示。其中，冲击功曲线分为上平台(upper platform)、下平台(lower platform)和转变区(Ductile-Brittle Transition Area，简称DBTA)三个区域。系列温度冲击功上、下平台均值对应的温度常称为韧脆转变温度(Ductile-Brittle Transition Temperature，简称DBTT)，是衡量材料韧性水平的一个重要特征点。由图8中冲击功曲线看出X80M热轧钢带韧脆转变温度(DBTT)为-45 ℃，远高于标准要求，表明材料具有优良的低温韧性。

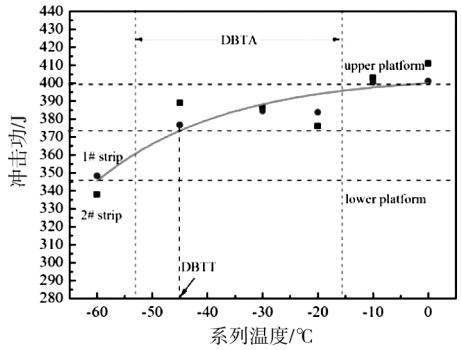


图8 钢带系列温度冲击功

将1#和2#钢带检测管体横向-60 ℃、-45 ℃、-30 ℃、-20 ℃、-10 ℃和0 ℃的系列冲击功如图9所示，焊管韧脆转变温度(DBTT)为-40 ℃，低温韧性稳定。

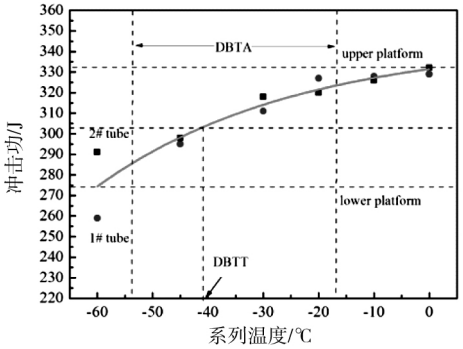


图9 焊管系列温度冲击功

综上，钢带和焊管材料的韧脆转变基本一致，确保产品具有安全的低温韧性指标。材料突然遭受外界冲击力时，韧性急剧降低，即由延性状态向脆性状态转变，若材料的韧性较低，将对工程项目带来毁灭性的灾难。

2.4 落锤性能

落锤撕裂试验是评价天然气输送管安全性的另一个指标。采用落锤或者摆锤对单侧缺口试样施加载荷并打断，测量纤维断面所占断口总面积的比率来评价材料的韧性。试验结果如表3所示，断面剪切率满足标准要求。

表3 钢带落锤性能

编号	试验温度/℃	剪切面积/%		
		单值	单值	均值
标准	-15	≥70	≥70	≥85
1#	-15	98	99	98
2#	-15	95	98	96

将焊管在横向和纵向取样，分别检测系列温度落锤性能指标，拟合后的系列落锤转变温度曲线如图10所示，可以看出管体韧脆转变温度为-20 ℃左右，产品的各向低温韧性稳定。

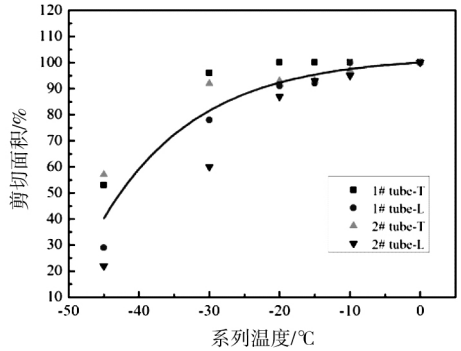


图10 焊管系列落锤温度曲线

3 讨论

X80M作为国内重要的天然气输送管道用材

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

料，应具备较高的强度和优良的低温韧性。基于控轧控冷技术，铸坯加热时应采取头尾差热烧钢，确保铸坯奥氏体均匀化，目标出炉温度 1 175 ℃，不得高于 1 200 ℃，有效避免奥氏体粗化；粗轧和精轧阶段采用大压下量低温轧制，粗轧首道次压下率不低于 12.5%，末道次压下率不低于 25%，精轧入口温度不得高于 970 ℃，以增加相变时铁素体的形核率，促进晶粒细化效果，同时各机架间变形抗力呈递增趋势，使钢带芯部和表层组织更加均匀；而终轧温度决定铁素体的类型和晶粒大小，终轧温度高，铁素体形核驱动力小，低的终轧温度抑制奥氏体中的位错缺陷回复，由轧制变形产生大的储存能为形核提供足够的驱动力；根据实验室模拟动态连续冷却转变曲线看出冷却速率在 20 ~ 25 ℃/s 可以获得针状铁素体组织，进一步提升材料的低温韧性指标，轧后采用控制冷却技术，设置卷取温度不得高于 400 ℃，提升轧后冷却组织的细小均匀性，保证钢带焊管后性能的稳定性。

钢带、焊管对应 1# 和 2# 试样显微组织分别如图 11、图 12 所示，主要由针状铁素体 + 贝氏体组成。材料显微组织直接决定屈服强度的波动，一般针状铁素体焊管后包辛格效应导致强度降幅较小，且可以有效阻止裂纹的扩展，提高材料的低温韧性指标，而多边形铁素体组织焊管后包辛格效应导致强度降幅较大。

图 11 和图 12 中形成细小的针状铁素体组织具有高的位错密度及大角度晶界，稳定钢带焊管后的强韧性匹配，减小了 X80M 钢包辛格效应的强度差异。而贝氏体组织也具有良好强韧性，其内部高密度的位错结构，使 X80M 材料具有较高的强度，在受到外力而发生断裂时阻碍裂纹扩展，平衡强韧性。即钢带金相组织中细小均匀的针状铁素体和贝氏体，保证了钢带焊管后较低的包辛格效应变化和材料优良的强韧性指标。

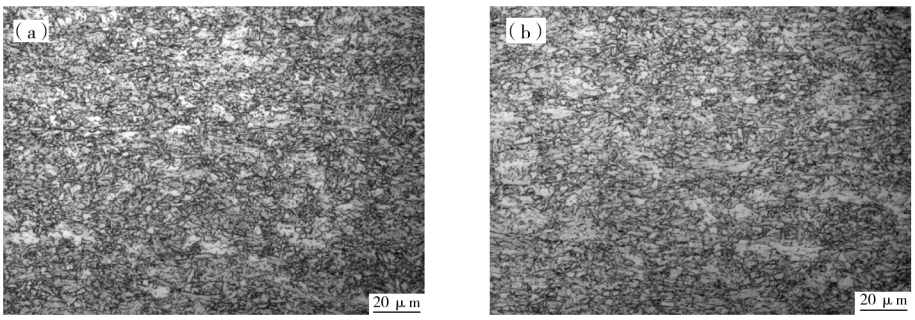


图 11　1# 钢带和焊管的显微组织

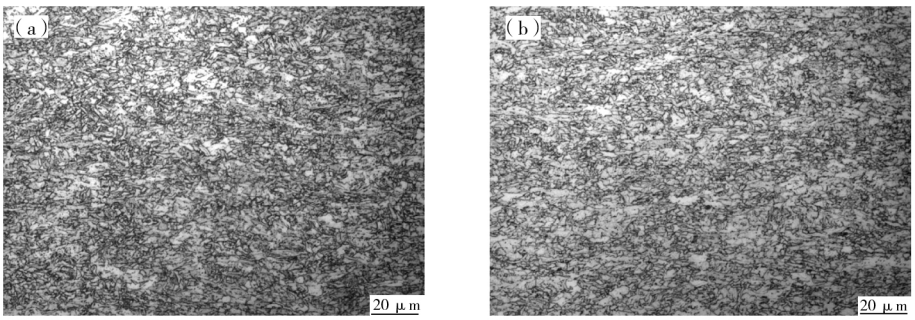


图 12　2# 钢带和焊管的显微组织

根据韧脆转变温度（Tc）与晶粒尺寸的关系式（1）可知，均匀细小的晶粒尺寸不仅可以降低裂纹扩展，且能够降低韧脆转变温度，使钢带焊管后具有良好的强韧性匹配，增加材料使用的安全性。

$$Tc = A - mD^{-1/2} \tag{1}$$

式中：A、m 为常数；D 为晶粒尺寸。

（下转第 57 页）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

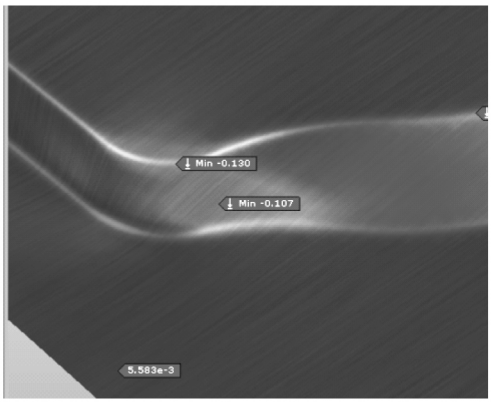


图 11　抗拉强度 300 MPa、粗糙度 0.1 时对应减薄情况

6　结论

(1) 本次模拟通过 Force control 来获取“钢厂 1”板材成形工况下的各项受力值代入 Spring control 的模拟方式，成功模拟出“钢厂 2”板料成形过程，准确表达板料恶化趋势。

(2) 通过模拟分析给出性能调整方向，提高抗拉强度并优化表面微观形貌以改善摩擦系数，后续供货使用性能得到改善，用户反馈良好。

参　考　文　献

[1] 李凯. 中厚板轿车摇臂件拉深成形数值模拟与分析 [D]. 长春: 吉林大学，2004.
[2] 罗亚军，杨曦，何丹农，等. 板料成形中的有限元数值模拟技术 [J]. 金属成形工艺，2000，18(6)：1－3，21.

(上接第 11 页)

通过制定控轧控冷工艺实现了工业化生产。X80M 热轧钢带屈强比控制在 0.86 左右，延伸率(A) 不小于 22%，－20 ℃的低温冲击功不小于 370 J，－15 ℃落锤剪切面积大于 95%，系列 V 型冲击韧脆转变温度为 －45 ℃；焊管系列温度韧脆转变温度为 －40 ℃，横、纵向系列温度落锤韧脆转变温度为 －20 ℃，材料各向韧性均一，各项性能指标控制稳定，使钢带焊管后获得优良强度及塑韧性匹配和遗传特性，增加了材料服役的安全性。

4　结论

(1) 控轧控冷过程奥氏体变形量不低于 25%，奥氏体发生完全再结晶，晶粒显著细化，冷却速率 20～30 ℃/s，得到合适比例的针状铁素体＋贝氏体，进一步降低钢带焊管后性能的波动。

(2) X80M 材料屈强比控制在 0.86 左右，延伸率不小于 22%，降低了钢带焊管后屈曲失稳风险；－20 ℃低温冲击功不小于 370 J，－15 ℃落锤剪切面积大于 95%，保证其优良强韧性匹配。

(3) 细小、均匀的针状铁素体和贝氏体组织，使 X80M 材料具有较低的 V 型缺口冲击韧脆转变温度，横纵向相同的低温落锤韧脆转变温度，可增加材料在服役过程的安全性。

参　考　文　献

[1] 陈小伟，嵇峰，白学伟，等. 中俄东线 X80 钢级 Φ1 422 mm × 30.8 mm 钢管理化性能研究 [J]. 焊管，2019，42(5)：10.
[2] 毕宗岳. 新一代大输量油气管材制造关键技术研究进展 [J]. 焊管，2019，41(7)：10.
[3] 金世铨，吴刚，刘志璞. 低成本 X80M 管线钢生产实践 [J]. 金属世界，2016，(5)：50.
[4] 安航航，包燕平，刘建华，等. X80 管线钢的生产实践 [J]. 钢铁研究，2010，38(1)：46.
[5] 冯耀荣，吉玲康，李为卫，等. 中国 X80 管线钢和钢管研发应用进展及展望 [J]. 油气储运，2020，39(6)：612.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net