

800 MPa 级汽车扭力梁用钢围管和焊缝 矫直开裂机理研究

李永亮¹, 邝 霜¹, 贾丽慧¹, 汪云辉¹, 陈 彤¹, 巨伟锋², 张玉文², 郑亚旭^{3,4}

(1. 唐山钢铁集团有限责任公司, 河北 唐山 063016; 2. 唐山不锈钢公司, 河北 唐山 063100; 3. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018; 4. 河北省材料近净成形技术重点实验室, 河北 石家庄 050018)

摘 要: 利用光镜、扫描电镜、透射电镜、EBSD、Thermo-Calc 热力学软件、JMatPro 软件研究了 Nb-Ti 复合微合金化 800 MPa 级扭力梁用钢热轧板在汽车扭力梁围管和焊缝矫直过程中的开裂原因。对三种不同成分的试验钢的显微组织和纳米析出相的研究结果表明, 围管和焊缝矫直开裂的主要原因为: 3[#]钢中添加了 Cr、Mo、V 元素, 使钢的 TTT 曲线右移, 提高了奥氏体的稳定性, 使轧后冷却过程中生成了大量的含有高密度位错的板条马氏体和板条铁素体等硬相组织, 而等轴铁素体的数量较少, 而且晶粒大小不均匀, 在力学性能上表现为抗拉强度偏高。由于板条铁素体和板条马氏体含有高密度位错, 降低了钢的塑韧性, 使其在围管和焊缝矫直过程中容易开裂。

关键词: 扭力梁用钢; Nb-Ti 微合金化; 开裂机理; 显微组织; 纳米析出相

中图分类号: TF76 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)01-0184-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.030

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

Research on cracking mechanism of girth and weld straightening of grade 800 MPa automobile torsion beam steel

Li Yongliang¹, Kuang Shuang¹, Jia Lihui¹, Wang Yunhui¹, Chen Tong¹, Ju Weifeng², Zhang Yuwen², Zheng Yaxu^{3,4}

(1. Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063016, Hebei, China; 2. Tangshan Stainless Steel Company, Tangshan 063100, Hebei, China; 3. School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 4. Hebei Key Laboratory of Material Near-net Forming Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China)

Abstract: The cracking mechanism of grade 800 MPa steel for automobile torsion beam during girth and weld straightening were studied by OM, SEM, TEM and EBSD. Thermo-Calc thermodynamic software and J Mat Pro software were used to calculate equilibrium precipitated phase in steel and TTT curves. The microstructure and nano precipitates of experimental steels with different compositions were observed. The results show that the main reasons for cracking of experimental steel during girth and weld straightening are as follows: the addition of Cr, Mo and V elements in the 3[#] steel makes the TTT curve of the steel shift to the right, improving the stability of austenite and generating a large number of lath martensite and lath ferrite with high density dislocation during cooling after rolling. However, the amount of equiaxed ferrite is less and the grain size is uneven, so the tensile strength is higher. High density dislocation in lath martensite and lath ferrite results in the decrease of plasticity and toughness, and then causing crack in girth and weld during straightening.

Key words: automobile torsion beam steel, Nb-Ti micro alloying steel, cracking mechanism, microstructure, nano precipitates

收稿日期: 2020-08-18

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金项目(YDZX20191400004587), 河北省教育厅科研计划(QN2019029)。

作者简介: 李永亮(1984—), 男, 石家庄人, 博士/所长, 从事高强度钢开发及生产工作, Email: liyongliang1984@qq.com。

0 引言

汽车底盘扭力梁式后悬架由于在车辆行驶过程中弯曲受扭,服役条件严苛,在开发及应用过程中容易发生疲劳开裂^[1-3]。唐钢在试生产 800 MPa 级汽车扭力梁用钢时,设计了三种成分体系,1[#]钢为 Nb-Ti 复合微合金化钢,2[#]钢在 Nb-Ti 复合微合金化基础上添加了 Mo 元素,3[#]钢在 Nb-Ti 复合微合金化基础上添加了 Mo、V 和 Cr 元素。热轧板生产工艺:高炉→铁水预处理→转炉→LF→RH→连铸→热轧。下游扭力梁用空心钢管加工工艺:热轧板纵剪分条→辊压成型→焊接→焊缝矫直→定尺切割→退火

矫直→成品包装。在热轧板辊压成型(围管)和焊缝矫直过程中 3[#]钢均发生了开裂,而 1[#]和 2[#]钢未发生开裂。笔者从热轧板显微组织和钢中 Nb-Ti 的纳米析出相两个方面分析 3[#]钢开裂的原因。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为唐钢生产的三个批次不同化学成分、厚度为 6 mm 的 Nb-Ti 复合微合金化热轧板。800 MPa 级汽车扭力梁用钢属于低碳微合金化钢,钢中含有微量的 Nb 和 Ti 元素,化学成分见表 1,力学性能见表 2。

表 1 化学成分

Table 1 Chemical compositions of used steels

编号	C	Mn	Si	Als	N	Nb	Ti	Mo	V	Cr
1 [#]	0.069	1.75	0.09	0.046	0.004	0.05	0.11	0	0	0
2 [#]	0.045	1.50	0.05	0.032	0.004	0.03	0.09	0.17	0	0
3 [#]	0.060	1.56	0.10	0.045	0.003	0.05	0.07	0.03	0.23	0.13

表 2 力学性能

Table 2 Mechanical properties of used steels

编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率 $A_{50}/\%$	开裂情况
1	828	767	22	未开裂
2	804	741	23	未开裂
3	838	753	27	开裂

1.2 试验方法

热轧板线切割成 10 mm×10 mm×6 mm 的小块,经机械磨抛后,使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,利用蔡司光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM, JSM-6701F)观察热轧板组织形貌;使用高分辨透射电镜(TEM, Tecrai G2 F20 S-TWIN)和能谱分析仪(EDS)对钢中 Nb 和 Ti 的纳米析出相进行观察和分析。采用热场发射 SEM 中集成的电子背散射衍射(EBSD)

系统检测钢中铁素体的晶体学取向、有效晶粒尺寸和不同取向差晶界分布,EBSD 扫描步长为 0.3 μm 。使用 Thermo-Calc 热力学软件中的 TCFE6 数据库对钢中的平衡析出相进行热力学计算,使用 JMat-Pro 软件计算试验钢的 TTT 曲线。

2 试验结果与分析

2.1 组织检测与分析

使用 JMat-Pro 软件计算试验钢的 TTT 曲线,相变温度见表 3。除了 Co 和 Al 以外,所有溶入奥氏体的元素都增加过冷奥氏体的稳定性,使 C 曲线右移,并且降低 Ms 点^[4-6]。由于钢中加入了不同含量的 Cr、Mo 和 V 元素使 1[#]、2[#]和 3[#]钢的 TTT 曲线依次向右移。

表 3 相变温度计算结果

Table 3 Calculated phase transition temperatures

试样	$F_s/^\circ\text{C}$	$P_s/^\circ\text{C}$	$B_s/^\circ\text{C}$	$M_s/^\circ\text{C}$	$M_f/^\circ\text{C}$
1 [#]	838.4	670.6	618.5	451.2	344.2
2 [#]	854.1	676.2	630.7	463.0	356.9
3 [#]	847.4	688.3	619.1	451.7	344.8

3[#]钢中添加了 V、Cr、Mo 使相变点温度比 1[#]钢高,2[#]钢的相变点温度最高。合金元素对奥氏体相区的影响:凡是扩大奥氏体相区的元素,如 Ni、Co、Mn 等,均使 A_3 线下降;凡是缩小奥氏体相区的元素,

如 Cr、W、Mo、V、Ti、Si 等,均使 A_3 线上升^[7-10]。

图 1~3 分别为三种钢光镜、扫描电镜和透射电镜组织形貌。3 个试样均有不同程度的带状偏析,其中 1[#]钢的带状偏析最严重,3[#]钢的组织形貌与 1[#]、

2[#]钢明显不同, 1[#]、2[#]钢中的铁素体晶粒大小比较均匀。图 2(c) 中 3[#]钢的 SEM 组织可以明显看出原奥氏体被拉长, 晶界处有大量的形变带, 形变奥氏体相变后并未形成大量的等轴铁素体。图 4(a)、(b) 分别为 1[#]、2[#]钢的 TEM 组织形貌, 1[#]钢中含有少量的 Nb 和 Ti, 无 Cr、Mo、V 合金元素, 因此 CCT 曲线靠近左侧, 热轧组织多为等轴状铁素体, 无明显的板条马氏体和板条铁素体。2[#]钢中含有少量的 Nb、

Ti 和 Mo 元素, 淬透性高于 1[#]钢, 热轧组织多为高密度位错的铁素体, 无明显的板条马氏体和板条铁素体。3[#]钢中添加了 Cr、Mo、V 元素, 使钢的 CCT 曲线右移, 提高了奥氏体的稳定性, 使轧后冷却过程中生成了大量的含有高密度位错的板条铁素体和板条马氏体, 而等轴铁素体的数量较少, 见图 3(d)。板条铁素体和板条马氏体含有高密度位错, 降低钢的塑性, 使其在围管和焊缝矫直过程中容易开裂^[11-13]。

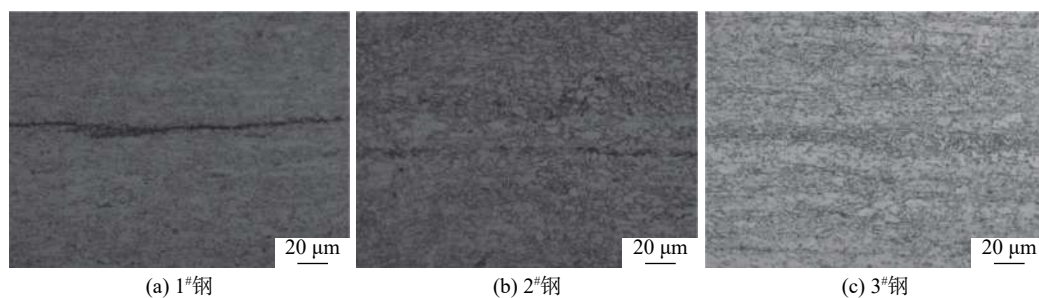


图 1 光镜组织形貌: (a) 1[#]钢; (b) 2[#]钢; (c) 3[#]钢
Fig. 1 Optical microscope morphology: (a) 1[#] steel; (b) 2[#] steel; (c) 3[#] steel

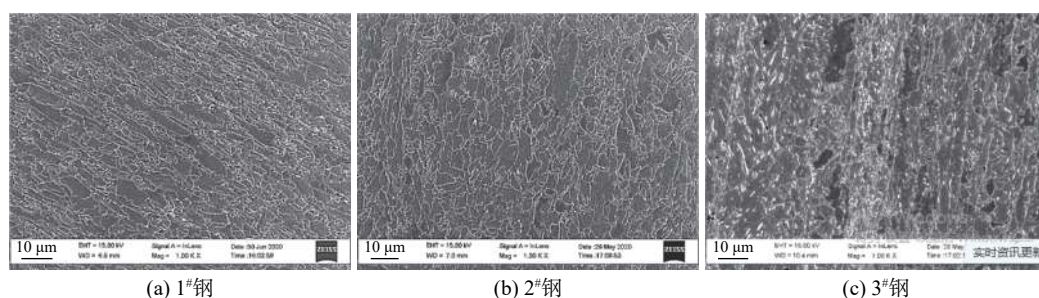


图 2 扫描电镜组织形貌: (a) 1[#]钢; (b) 2[#]钢; (c) 3[#]钢
Fig. 2 SEM microscope morphology: (a) 1[#] steel; (b) 2[#] steel; (c) 3[#] steel

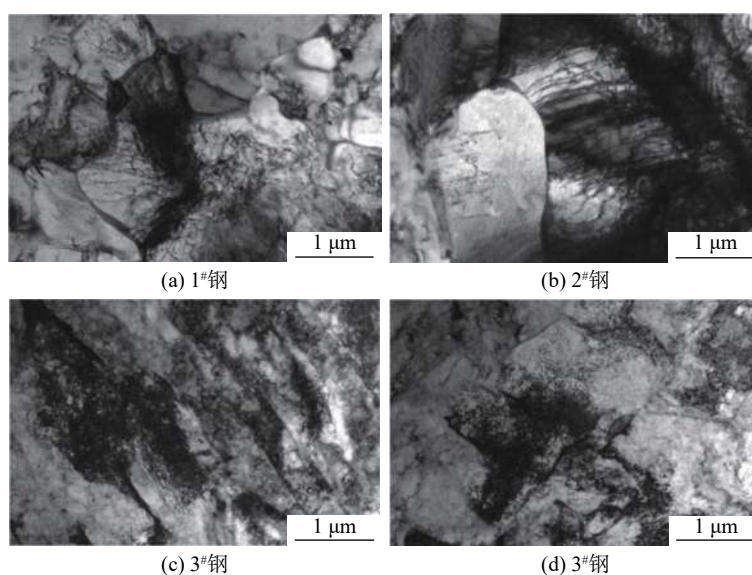


图 3 铁素体晶粒及位错的 TEM 形貌: (a) 1[#]钢; (b) 2[#]钢; (c)、(d) 3[#]钢
Fig. 3 TEM photos showing ferrite grains and dislocation: (a) 1[#] steel; (b) 2[#] steel; (c) 3[#] steel

图 4 为 EBSD 检测结果, 其中 (a)、(b)、(c) 为铁素体晶粒形貌, (d)、(e)、(f) 为晶界分布图, 蓝色线为 $>15^\circ$ 晶界, 绿色线为 $5\sim 15^\circ$ 晶界, 红色线为 $2\sim 5^\circ$ 晶界。1[#]钢的平均晶粒尺寸为 $4.38\ \mu\text{m}$, 2[#]钢为 $4.14\ \mu\text{m}$, 3[#]钢为 $6.12\ \mu\text{m}$ 。3[#]钢晶粒大小非常不均匀, 最大的晶粒达 $15\ \mu\text{m}$, 最小的晶粒 $1\ \mu\text{m}$ 。三种钢的残余奥氏体数量很少, 均 $\leq 0.1\%$ 。表 4 为相同扫描面积内不同取向角度的晶界长度比较, 3[#]钢由于晶粒尺寸大,

$>15^\circ$ 大角度晶界和 $<15^\circ$ 小角度晶界的长度均比 1[#] 和 2[#] 钢少很多。裂纹遇到大角度晶界会改变扩展方向而需要更多的能量, 因此大角度晶界在形变过程中让裂纹扩展变得困难, 从而提高材料的韧性。裂纹很容易沿着小角度晶界扩展, 只要偏转一点就能沿着下一个晶界扩展, 因此小角度晶界使韧性降低^[14-15]。1[#] 钢中大角度晶界数量少使其在围管和焊缝矫直过程中, 裂纹扩展更加容易而发生开裂。

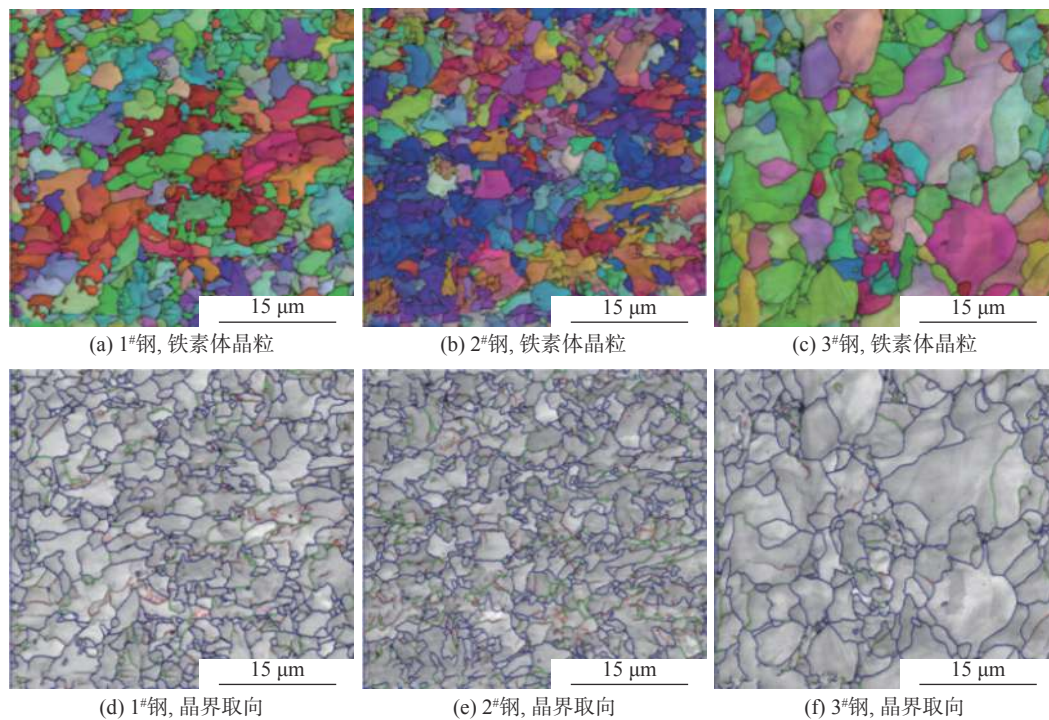


图 4 EBSD 组织形貌: (a)、(b)、(c) 铁素体晶粒; (d)、(e)、(f) 晶界取向

Fig. 4 EBSD microscope morphology: (a)、(b)、(c) ferrite grains; (d)、(e)、(f) grain boundary orientation

表 4 晶界长度
Table 4 Grain boundary length of three steels

钢种	晶界长度/ μm		
	$2\sim 5^\circ$	$5\sim 15^\circ$	$>15^\circ$
1 [#]	410.78	465.98	2010
2 [#]	454.95	586.41	2270
3 [#]	124.65	202.82	1450

2.2 析出相检测与分析

图 5 为 Thermo-Calc 热力学计算结果, 红色的线为 Nb 和 Ti 的碳化物析出曲线, 1[#] 钢中 Nb-Ti 的碳化物析出温度为 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$, 2[#] 钢为 $1\ 240\ ^\circ\text{C}$, 3[#] 钢为 $1\ 255\ ^\circ\text{C}$ 。2[#] 钢中由于添加了 Mo 元素, 平衡状态下会有含 Mo 碳化物 M_7C_3 和 MC 析出。3[#] 钢中由于添加了 Cr 和 Mo 元素, 平衡状态下会有 M_{23}C_6 、 M_7C_3 和 MC 碳化物析出。

图 6 为钢中析出相形貌和成分检测结果。1[#]

钢中含有 0.05% 的 Nb 和 0.11% 的 Ti, 其析出相均含有 Nb 和 Ti 元素, 而且几乎所有析出相中 $\text{Ti}/\text{Nb}>1$ 。2[#] 钢中含有 0.03% 的 Nb 和 0.09% 的 Ti, 其析出相只含有 Ti 元素而无 Nb 元素。钢中 Nb 元素含量较低, 大部分以固溶态存在于钢中, 并未析出。3[#] 钢中含有 0.05% 的 Nb、0.07% 的 Ti 和 0.03% 的 V, 其析出相均含有 Nb 和 Ti 元素而无 V 元素。V 元素含量较低, 大部分以固溶态存在于钢中, 并未析出。

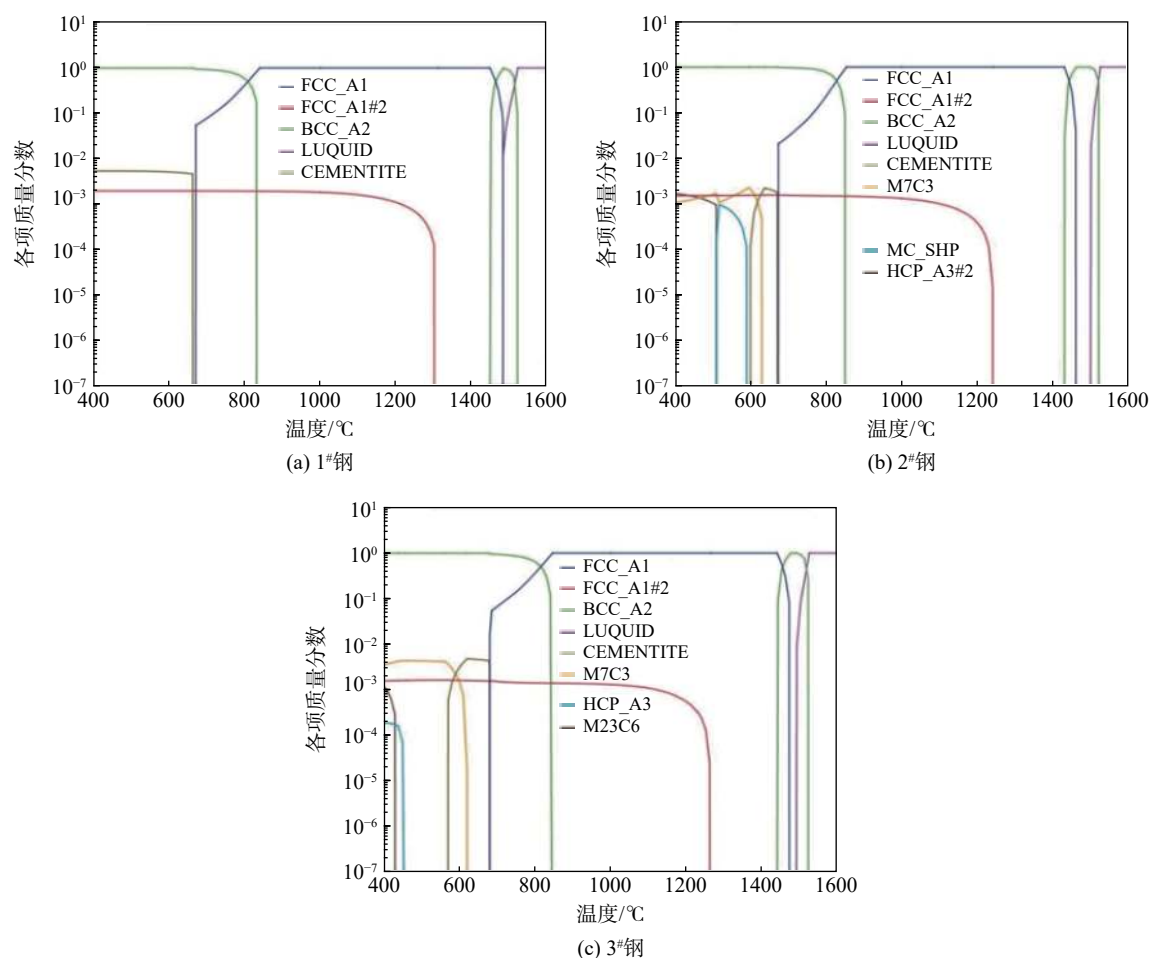


图5 热力学计算结果:(a)1[#]钢; (b)2[#]钢; (c)3[#]钢
Fig. 5 Calculation results by Thermo-Calc: (a)1[#] steel; (b)2[#] steel; (c)3[#] steel

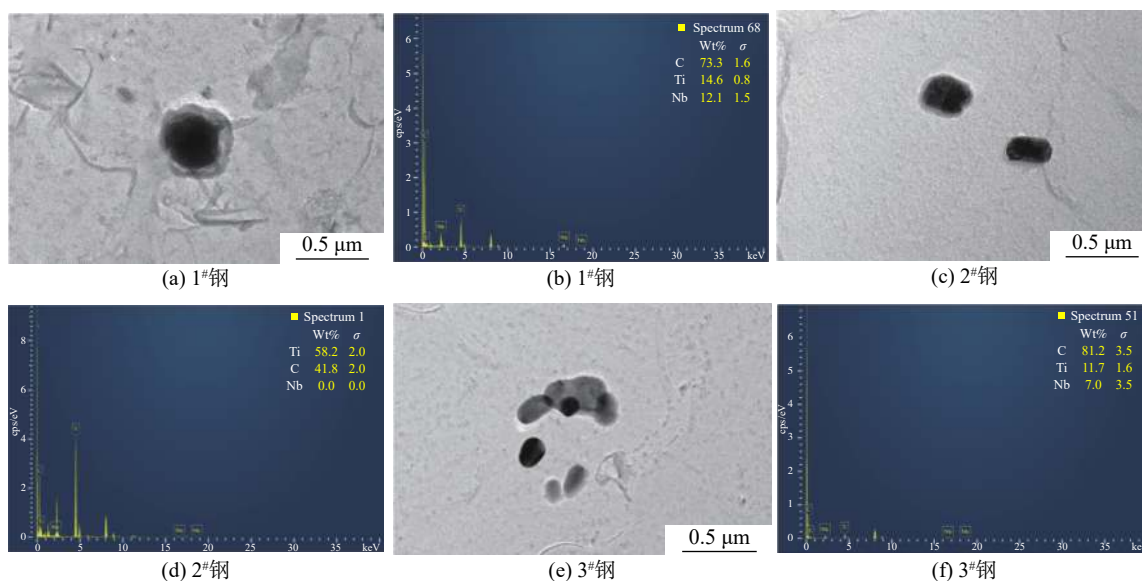


图6 钢中析出相形貌及成分: (a)、(b) 1[#]钢; (c)、(d) 2[#]钢; (e)、(f) 3[#]钢
Fig. 6 TEM photos showing and compositions of precipitates: (a) (b) 1[#] steel, (c) (d) 2[#] steel, (e) (f) 3[#] steel

由于钢中加入了一定量 Nb、Ti 微合金元素, 第二相粒子主要为细小、均匀弥散的碳氮化物, 未发

现微米级尺寸粒子, 也不存在第二相粒子大面积聚集现象。图7为钢中析出相尺寸比较, 1[#]钢中的析

出相尺寸最大, 2[#]钢中析出相尺寸居中, 3[#]钢中 20 nm 以下的纳米析出相数量最多, 但是 100 nm 以上的大尺寸析出相数量并不多。材料发生变形时, 位错会在第二相粒子界面堆积, 导致应力集中, 导致微裂纹萌生和扩展^[16-17]。但是, 一般认为导致裂纹萌生和扩展的第二相粒子临界尺寸多在 200 nm 以上, 尺寸较小的第二相粒子仅起析出强化和细晶强化作用, 对塑性影响不大^[18-20]。开裂和未开裂钢板析出相形态、尺寸和分布状态无明显差异, 可以排除粗大粒子导致的脆性开裂。所以析出相不是造成 3[#]钢开裂的原因。

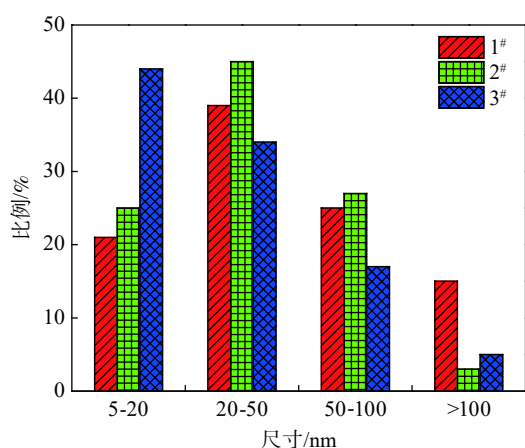


图 7 析出相尺寸分布

Fig. 7 Precipitates size distribution in steels

针对容易发生铁素体混晶、马氏体含量偏高导致围管开裂的 3[#]钢, 可以通过将层冷模式由均匀冷却改为前端集中冷却形式, 增加变形奥氏体的过冷度诱导铁素体形核来细化显微组织, 从而有效降低围管过程中产生的开裂风险。

3 结论

1) 3[#]钢中由于添加了 Cr、Mo、V 元素, 提高了奥氏体的稳定性, 使钢的 TTT 曲线右移, 使轧后冷却过程中生成了大量的含有高密度位错的板条马氏体和板条铁素体硬相组织, 而等轴铁素体的数量较少, 在力学性能上表现为抗拉强度高。

2) 3[#]钢的晶粒尺寸最大, 而且晶粒大小非常不均匀, 这也是开裂的一个原因。

3) 对析出相的分析结果显示: 3[#]钢中 20 nm 以下的纳米析出相数量最多, 但是 100 nm 以上的大尺寸析出相数量并不多, 所以大尺寸析出相不是造成 3[#]钢开裂的主要原因。

4) 针对容易发生铁素体混晶、马氏体含量偏高导致围管开裂的 3[#]钢, 可以通过将层冷模式由均匀冷却改为前端集中冷却形式, 增加变形奥氏体的过冷度诱导铁素体形核来细化显微组织, 从而有效降低围管过程中产生的开裂风险。

参考文献

- [1] Zhang Xiaoming Yin Shubiao, Yang Chunlei, *et al.* Reasons and improvement of K510L steel automobile crossbeam bending crack[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(5): 257-262.
(张小明, 阴树标, 杨春雷, 等. 汽车大梁K510L钢折弯裂纹成因及改进[J]. 热加工工艺, 2017, 46(5): 257-262.)
- [2] Liu Sheniu, Cheng Yonggu, Duan Yun. Analysis of 510L automobile Frames machining crack[J]. Henan Metallurgy, 2010, 18(6): 18-23.
(刘社牛, 程永固, 段云. 汽车大梁钢510L加工开裂的原因分析[J]. 河南冶金, 2010, 18(6): 18-23.)
- [3] Narayanasamy R, Parthasarathi N L, Narayanan C S. Effect of microstructure on void nucleation and coalescence during forming of three different HSLA steel sheets under different stress conditions[J]. Materials & Design, 2009, 30(4): 1310-1324.
- [4] Xiao Guangyao, Song Yingjin, Tian Yaqiang, *et al.* Experimental study on the behavior of compressive strength and peak strain of concrete under high strain rates[J]. Journal of Hebei United University (Natural Science Edition), 2012, 34(3): 71-74.
(肖广耀, 宋进英, 田亚强, 等. 硫化物夹杂及成分偏析对610L钢冷弯开裂的影响[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 71-74.)
- [5] Zhao Peilin, Sun Xinjun, Yong Qilong, *et al.* Crack analysis of super high strength steel plate during cold stamping process[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(7): 122-126.
(赵培林, 孙新军, 雍岐龙, 等. 超高强度热轧钢板冷冲压开裂原因及分析[J]. 金属热处理, 2012, 37(7): 122-126.)
- [6] Xu Liling. Microscopic analysis on cold bend fracture of BM510L beam steel plate[J]. Physics Examination and Testing, 2005, 23(5): 53-55.

- (徐礼玲. BM510L 汽车大梁钢板冷弯开裂的显微分析[J]. 物理测试, 2005, 23(5): 53–55.)
- [7] Song Zhuofei, Feng Yunli, Feng Runming, *et al.* Study on reason for low impact toughness and cold bending crack of 610L[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(2): 221–222.
(宋卓斐, 冯运莉, 冯润明, 等. 610L 汽车大梁钢冲击韧性低及冷弯开裂原因研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(2): 221–222.)
- [8] Sun Feng, Yin Xiaoli, Zhao Da. Rolling process optimization of vanadium microalloyed automobile titanium alloy[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 59–63.
(孙凤, 尹晓丽, 赵达. 钒微合金化汽车钛合金的轧制工艺优化[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 59–63.)
- [9] Hang Zidi, Feng Yunli, Cui Yan, *et al.* Mathematical modeling of the recrystallization kinetics of high Ti-microalloyed high strength steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(1): 141–146.
(杭子迪, 冯运莉, 崔岩, 等. 高Ti微合金高强度钢静态再结晶动力学模型[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(1): 141–146.)
- [10] Gao B, Chen X, Pan Z, *et al.* A high-strength heterogeneous structural dual-phase steel[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(19): 66–72.
- [11] Yang Yilei, Hui Yajun, Ju Xinhua, *et al.* Causes and control measures of stamping cracking of 700 MPa grade high strength beam steel[J]. China Metallurgy, 2019, 29(6): 77–80.
(杨一雷, 惠亚军, 鞠新华, 等. 700MPa级高强度大梁钢冲压开裂原因与控制措施[J]. 中国冶金, 2019, 29(6): 77–80.)
- [12] HuoXiangdong, Mao Xinping, Dong Feng. Effect of coiling temperature on the mechanical properties of Ti-microalloyed high strength steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(11): 1472–1477.
(霍向东, 毛新平, 董锋. 卷取温度对Ti微合金化高强度钢力学性能的影响机理[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(11): 1472–1477.)
- [13] Ghosh A, Ray A, Chakrabarti D, *et al.* Cleavage initiation in steel: Competition between large grains and large particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 561: 126–135.
- [14] Bu F Z, Wang X M, Yang S W, *et al.* Contribution of interphase precipitation on yield strength in thermomechanically simulated Ti-Nb and Ti-Nb-Mo microalloyed steels[J]. Materials Science & Engineering: A, 2014, (620): 22–29.
- [15] Xu Y, Zhang W, Sun M, *et al.* The blocking effect of interphase precipitation on dislocations' movement in Ti-bearing microalloyed steel[J]. Materials Letters, 2015, (139): 177–181.
- [16] Lv Yong, Peng Jun, Cai Changkun, *et al.* Rare earth Ce on thermodynamics of titanium containing inclusions in steel and its experimental research[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(3): 93–98.
(吕勇, 彭军, 蔡长焜, 等. 稀土铈对钢中含钛夹杂物析出行为的研究[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(3): 93–98.)
- [17] Shu Wei, Wang Xuemin, Li Shurui, *et al.* Influence of second-phase particles containing Ti on microstructure and properties of weld-heat-affected-zone of a microalloy steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(8): 997–1003.
(舒玮, 王学敏, 李书瑞, 等. 含复合第二相粒子对微合金钢焊接热影响区组织和性能的影响[J]. 金属学报, 2010, 46(8): 997–1003.)
- [18] Jung J, Park J, Kim J, *et al.* Carbide precipitation kinetics in austenite of a Nb–Ti–V microalloyed steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(16–17): 5529–5535.
- [19] Wang Z, Sun X, Yang Z, *et al.* Carbide precipitation in austenite of a Ti–Mo-containing low-carbon steel during stress relaxation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 573: 84–91.
- [20] Li Liming, Feng Yunli, Yang Lina. Thermodynamic calculation of Ti-containing second phase in Ti-microalloyed high strength steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(1): 118–122.
(李立铭, 冯运莉, 杨丽娜. 钛微合金化高强度钢含Ti第二相的热力学计算[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(1): 118–122.)

编辑 邓淑惠

乌克兰预计将吸引 100 亿美元开采钛、镍等矿产

(2021 年 01 月 27 日) 据国际文传电讯社报道, 乌克兰国家地质和底土局预计将吸引约 100 亿美元的投资, 用于开发关键和战略矿产的矿藏, 特别是锂、钛、铀、镍、钴等。

乌克兰有大量的有色金属矿藏, 特别是钛矿石探明储量居世界前十位。

摘自 https://www.cnfeol.com/tai/n_152052322487.aspx