



Nb 含量和热变形参数对纵向变截面耐候桥梁钢 变形抗力及组织的影响

林田子^{1,2}, 杨颖^{1,2}, 翟晓亮³, 王厚昕⁴, 郭爱民⁴, 梁智涛³

(1 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009;
3 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075; 4 中信金属股份有限公司, 北京 100004)

摘要:通过 Gleeble 3800 热模拟试验机, 对一种新型不同 Nb 含量纵向变截面耐候桥梁钢进行变形抗力试验, 测定了试验钢在变形速率为 1、5、10 s⁻¹, 变形温度为 750~1 000 °C, 变形量为 50% 等不同变形参数下的变形-应力曲线。并通过金相显微镜、扫描电镜和透射电镜等手段, 研究了试验钢在不同热变形参数下的显微组织变化。根据试验结果, 分析了变形参数和 Nb 含量对纵向变截面耐候桥梁钢的变形抗力和显微组织的影响。结果表明: 当 Nb 含量 ≥ 0.03% 时, 钢板的变形抗力显著增大, 组织明显细化, 添加一定量的 Nb 元素可提高钢板再结晶温度 50 °C 以上, 使 LP 耐候桥梁钢能够在变形温度为 850~950 °C 的高温区轧制, 以更好的保证 LP 钢板的板型和综合性能, 为 LP 钢板产品的试制提供了理论依据。

关键词:耐候桥梁钢; 纵向变截面; Nb 含量; 变形参数; 变形抗力; 显微组织

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00004 中图分类号: TG141

Effect of Nb Content and Thermal Deformation Parameters on Deformation Resistance and Microstructure of Weather- resistant Bridge Steel with Longitudinal Variable Section

Lin Tianzi^{1,2}, Yang Ying^{1,2}, Zhai Xiaoliang³, Wang Houxin⁴, Guo Aimin⁴, Liang Zhitao³

(1 State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, China; 2 Iron and Steel Research Institute, Anshan Iron and Steel Group, Anshan 114009, China; 3 CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 4 CITIC Metal Co., Ltd., Beijing 100004, China)

Abstract: The deformation resistance test of a new type of longitudinal variable section weather-resistant bridge steel with different Nb content was carried out by Gleeble 3800 thermal simulation tester. The deformation stress curves of the steel were measured at different deformation parameters, such as deformation rate of 1, 5, 10 s⁻¹, deformation temperature of 750-1 000 °C and deformation amount of 50%. The microstructure changes of the test steel under different thermal deformation parameters were studied by means of metallographic microscope, scanning electron microscope and transmission electron microscope. According to the test results, the influence principle and main reason of deformation parameters and Nb content on the deformation resistance and microstructure of longitudinal variable section were analyzed. The results show that when the content of Nb ≥ 0.03%, the deformation resistance of steel plate increases significantly, and the microstructure is obviously refined. The addition of certain Nb element can increase the recrystallization temperature of steel plate above 50 °C, so that LP weather-resistant bridge steel can be rolled in the high temperature range of deformation temperature between 850 °C and 950 °C, so as to better guarantee the profile and comprehensive properties of LP steel plate. It provides a theoretical basis for the trial production of LP steel plate.

Key Words: Weather-resistant Bridge Steel; Longitudinal Variable Cross-section; Nb Content; Deformation Parameter; Deformation Resistance; Microstructure

纵向变截面钢板, 又称 LP 钢板, 其厚度随钢板轧制方向发生变化^[1-4]。根据桥梁、建筑物、船舶等不同钢结构的具体使用条件, 轧制成不同的截面形状和尺寸, 因此, 具有节约钢材、提升焊接效率、优化结构设计等诸多优点^[5-7]。耐候桥梁钢可大幅减

少耐候涂层, 降低人工成本, 具有环保优势, 是国内高性能桥梁钢的重要发展方向, 在国外许多重点桥梁工程中已得到广泛应用。在自然环境下, 该钢种表面可以生成一种致密的锈层保护基体金属, 通过“以锈制锈”来延缓材料的腐蚀^[8]。

基金项目: 交通运输行业重点科技项目(2019-MS2-046); 中交第一公路勘察设计研究院有限公司科技研发基金项目(KCJJ2019-09); 中信金属-CBMM 微合金化技术中心 R&D 项目(D127/M1111)

作者简介: 林田子(1987-), 男, 硕士, 高级工程师; **E-mail:** aglintianzi@163.com; **收稿日期:** 2023-01-11

LP耐候桥梁钢可以进一步节省钢材、减少桥梁钢结构焊接时间,降低建造成本,使钢结构整体受力更加稳定。由于LP耐候桥梁钢需要具备良好的冲击性能,因其碳含量较低,通常添加Nb、Ti、Cr、Cu等合金元素以提高其强度和耐候性能^[9-10]。目前,国内相关企业及科研院所对耐候桥梁钢的研发工作较多,但是对LP耐候桥梁钢的生产、研发工作属于空白,LP耐候桥梁钢的生产工艺对其性能、组织影响等方面未有深入研究。

对于LP耐候桥梁钢,为了保证钢板的综合力学性能,如采用常规的两阶段轧制,轧制过程必须在较低的温度范围内进行,低温轧制不仅会大幅度增加钢板轧制过程中的轧制力,还会提高LP钢板的残余应力,不利于LP钢板板型的精准控制与后续加工。因此,加强LP耐候桥梁钢在铁素体区轧制的工作具有极其重要的现实意义,可以为大生产试制的工艺参数优化提供重要的数据支撑。

本文通过试验钢以Gleeble3800热模拟机进行两道次压缩试验,测量了不同Nb含量的LP耐候桥梁钢在不同变形参数下的应力-变形曲线。分析桥梁钢在热轧过程中的热变形行为,揭示了变形温度、变形速率等热变形参数和Nb含量对LP钢板变形抗力和显微组织的影响,为在LP桥梁钢制造生产过程中的板型控制、组织控制及获得优异的力学性能提供参考,填补了国内LP耐候桥梁钢热变形过程中变形抗力的变化规律及组织类型演变等研究空白。

1 试验材料及方法

试验按照GB/T 714-2015标准设计三组不同成分的Q345qDNH-LP耐候桥梁钢,每组试验钢的Nb含量不同,其化学成分见表1。

表1 三组LP耐候桥梁钢化学成分(质量分数)

Table1 Chemical composition of the three groups of LP weathering bridge steel										
试验钢	C	Si	Mn	S	P	Nb	Cr	Ni	Cu	I值
1 [#]	0.078	0.24	1.41	0.011	0.002	-	0.40	0.30	0.25	6.23
2 [#]	0.079	0.25	1.40	0.013	0.002	0.03	~	~	~	6.25
3 [#]	0.078	0.25	1.40	0.010	0.002	0.07	0.70	0.40	0.50	6.25

具体试验方案为:利用Gleeble3800热模拟实验机对三组试验钢进行双道次压缩试验,试样尺寸为Φ8 mm×12 mm,具体工艺模拟如图1所示。首先将试样加热至1 150 °C并保温5 min,以5 °C/s降温至1 050 °C,然后以变形量 ε 为30%、变形速率为5 s⁻¹

进行第一阶段变形。以10 °C/s分别降温至750~1 000 °C间不同试验温度,每次试验温度间隔50 °C,以变形量 $\varepsilon=60\%$ 、变形速率1、5、10 s⁻¹,进行第二阶段压缩。最后以1 °C/s冷速降至室温。试验结束后,用线切割机将试样沿压缩方向切成金相试样,用4%的硝酸酒精溶液腐蚀10~15 s,观察试样心部显微组织,通过ImageJ软件分析计算相对铁素体含量,采用截线法计算铁素体晶粒平均尺寸。对变形温度为750 °C和850 °C的试样进行电解双喷制成薄膜试样,用TecnaiG220透射电子显微镜对试验钢的超细显微组织及析出相进行分析观察。

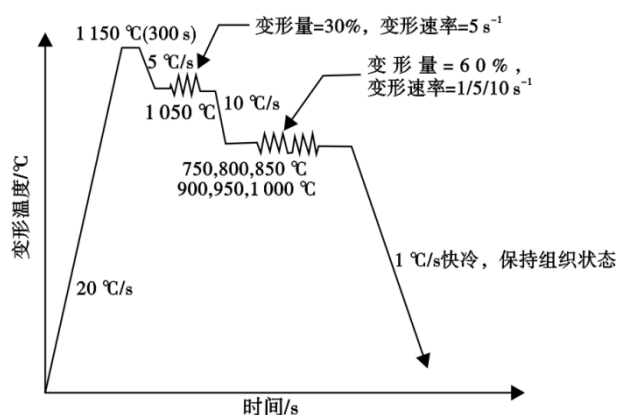


图1 工艺模拟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the process simulation

2 试验结果及分析

2.1 变形抗力的影响因素

2.1.1 变形温度对变形抗力的影响

利用LINSEIS L78 RITA相变仪测定三组试验钢平衡转变温度 Ar_3 和 Ar_1 ,分别为856~863 °C和795~802 °C。变形抗力与变形温度的关系曲线如图2所示。从这三组曲线的对比可以看出一个共同的规律:(1)在奥氏体区900 °C以上的变形温度,变形抗力随变形温度降低而升高;(2)在800~900 °C两相区间,变形抗力随着变形温度降低而升高的趋势明显变缓;(3)在800 °C以下铁素体区,变形抗力又随变形温度降低而恢复升高趋势。

通常情况下,轧制温度是影响钢板力学性能的主要因素^[11]。材料在高温下的变形主要是奥氏体回复与再结晶的动态过程^[12],钢中的奥氏体形核驱动力较强,动态回复软化过程完成的较为充分,可直接消除绝大部分因加工硬化产生的硬化效果^[13]。此外,高温下还有其他高温塑性变形机制,一些织

构也随着温度下降而停止演变,这些因素将影响奥氏体区抗变形能力随变形温度变化的趋势。随着变形温度降低,金属材料的外层电子与原子之间结合得更加松散,减少了滑移阻力。所以在 800~900 °C 两相区间的轧制温度虽然低于奥氏体区,但是相同变形量和变形速率下的 LP 耐候桥梁钢的变形抗力随变形温度降低而升高的趋势明显变缓。

在变形温度为 750~800 °C 时,奥氏体已完全转变为铁素体。在此阶段,变形温度的降低抑制了回复和再结晶的发生,加工硬化效果更加突出;同时,原子热震动幅度随着变形温度降低而减小,阻碍了位错和滑移的运动,加速了加工硬化进程,所以随着变形温度降低,试验钢在铁素体区的变形抗力随之升高。

2.1.2 变形速率对变形抗力的影响

试验钢变形速率与变形抗力的关系曲线如图 2 所示。在 700 °C 以上变形时,变形抗力随变形速率的提高而增大。这是由于一方面,变形速率的增加将明显减少动态回复和动态再结晶的相对时间,加工硬化不能完全消除,变形抗力增加^[14];另一方面,较大的变形速率会显著提升位错运动速度,导致剪切应力增大,变形抗力随之提高。而在 900 °C 以上时由于变形温度较高使得动态再结晶发生的速率变大。在低变形速率下,变形抗力随着变形温度变化趋势更加明显,变形速率对金属塑性变形过程中的抗力影响最为显著。

2.1.3 Nb 元素对变形抗力的影响

图 3 为三组试验钢在不同变形速率下的变形抗力与变形温度关系曲线。从这三组曲线的对比中可以看出:总体上,变形抗力随 Nb 含量的增加而增加,在相同的 Nb 含量和变形速率下,变形温度越高,变形抗力越低。然而,在较高的变形速率下,变形

抗力随着 Nb 含量增加的趋势不太明显。Nb 含量对变形抗力的影响主要是取决于 Nb 对晶粒的细化和抑制变形奥氏体再结晶作用。一方面,在变形过程中,位错密度随着 Nb 含量的增多而增加,奥氏体晶粒细化,导致变形阻力增大。另一方面,Nb 元素在形变诱导作用下析出的第二相分布在基体上,抑制了变形奥氏体的回复再结晶,使奥氏体不能通过再结晶恢复到原来的状态,在钢中形成了残余应变,变形抗力增大。如图 3(a)所示,1#试验钢的奥氏体非再结晶区在 $A_{r3} \sim 950$ °C 之间,在此温度区间变形的奥氏体晶粒被拉长,形成大量的位错和变形带,不能消除变形造成的加工硬化,变形抗力较高,当变形温度为 950 °C 以上时,钢中发生了再结晶软化过程,变形抗力显著降低。钢中加入适量 Nb 元素有效抑制了动态再结晶的进行,2#、3#试验钢在变形温度 1 000 °C 时仍具有较高的变形抗力,说明在此温度下,钢中奥氏体还未发生再结晶,0.03%Nb 元素可以至少提高试验钢再结晶温度 50 °C 以上。较高变形速率会使位错滑移的驱动力变大,变形抗力减小,而这种变形抗力的减小与加工过程中的加工硬化产生一定的抵消,所以 Nb 含量的增加对于钢板在高变形速率下的变形抗力影响较小。

为了保证钢板具有良好的强度和韧性,通常采用两阶段控轧轧制,第二阶段非再结晶区终轧温度一般控制在 850 °C 以下,但是 LP 钢板生产过程中需要对板型进行精准控制,当低温轧制时,钢板变形能力较差,轧机的轧制力较高,LP 板型极难控制。通过本实验分析表明,加入一定量的 Nb 元素可以显著提升形变奥氏体再结晶温度,使 LP 钢板在 1 000 °C 以下就可以进入到非再结晶区轧制,在较高的变形温度下实现了晶粒细化。根据试验结果,可以进一步提高 LP 钢板终轧温度,保证了 LP 钢板板型

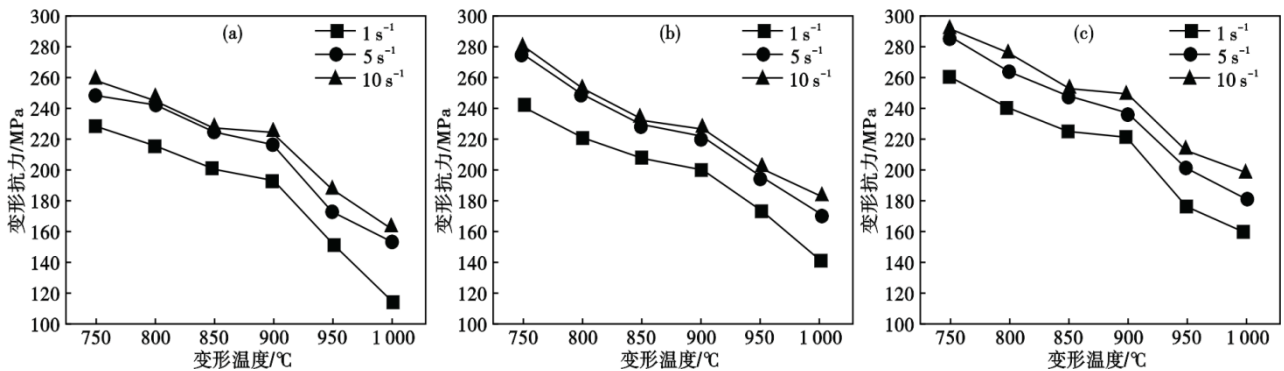


图 2 三组试验钢在不同变形温度下的变形抗力曲线:(a)1#, (b)2#, (c)3#

Fig. 2 Deformation resistance curves of three groups of tested steels at different deformation temperatures : (a) 1# , (b) 2# , (c) 3#

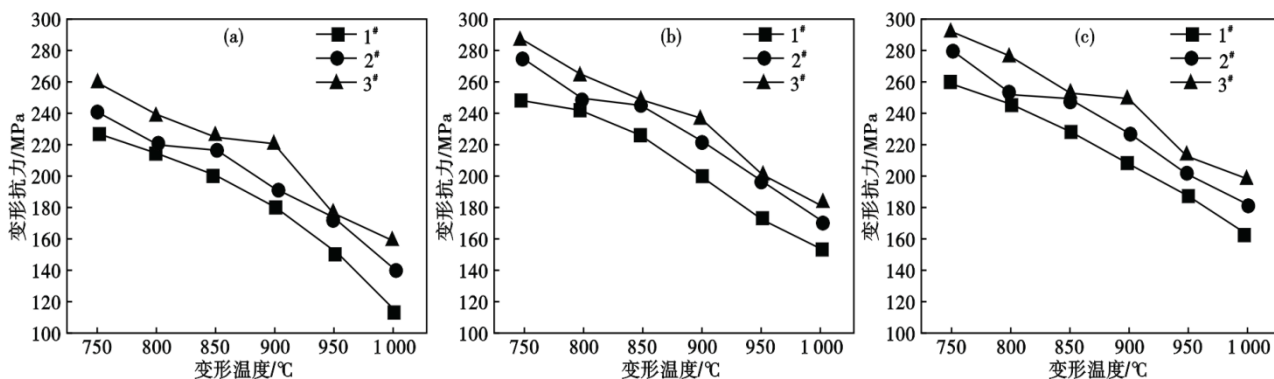


图 3 三组试验钢在不同变形速率下的变形抗力曲线:(a) 1 s^{-1} , (b) 5 s^{-1} , (c) 10 s^{-1}

Fig. 3 Deformation resistance curves of three groups of tested steels at different deformation rates : (a) 1 s^{-1} , (b) 5 s^{-1} , (c) 10 s^{-1}

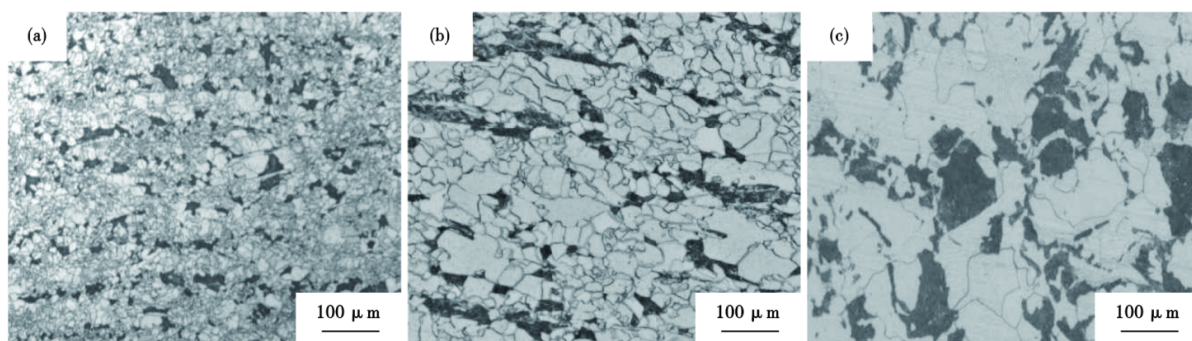


图 4 2#试验钢在不同二阶段变形温度下的金相组织:(a) $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $950\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 4 The metallographic structure of 2# tested steel at different two stage deformation temperatures: (a) $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $950\text{ }^{\circ}\text{C}$

控制,为大生产实际轧制工艺提供了理论指导。

2.2 显微组织的影响因素

2.2.1 变形温度对显微组织的影响

图 4 显示了 2# 试验钢在变形速率为 5 s^{-1} , 压下量为 20% 时, 不同变形温度下的金相组织, 可以看出, 在变形速率为 5 s^{-1} 、压下量为 20%、变形温度为 $750\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LP 耐候桥梁钢的组织全部为铁素体+珠光体。铁素体含量和晶粒尺寸随变形温度变化明显, 具体对应关系如图 5 所示。

由图 4、图 5 可知, 2# 试验钢的铁素体含量随变形温度升高而降低, 晶粒尺寸逐渐增大。当变形温度为 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 铁素体晶粒尺寸一般为 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$, 平均晶粒尺寸在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 铁素体含量在 75% 左右, 并伴有少量的珠光体。当变形温度为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 珠光体组织明显增多, 铁素体晶粒尺寸明显增大, 平均直径在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上。当变形温度升至 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 组织全部为块状铁素体和珠光体组织, 铁素体晶粒平均尺寸超过 $25\text{ }\mu\text{m}$, 铁素体含量减少至 60%, 组织变化较为明显。

图 6 显示了 2# 试验钢在不同变形温度下的透射

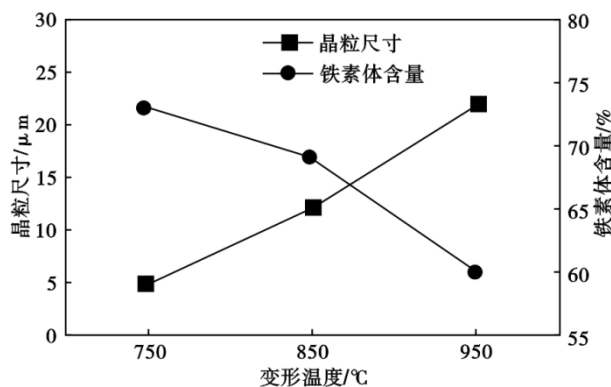


图 5 不同变形温度对 2# 试验钢铁素体含量和晶粒尺寸影响
Fig. 5 Effect of different deformation temperature on the content and grain size of 2# tested steel

试样组织。当变形温度为 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 其组织主要为内部具有大量高密度位错的铁素体, 如图 6(a, b), 渗碳体析出较少。当变形温度为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 试验钢组织为多边形铁素体, 如图 6(c), 位错密度显著减少, 如图 6(d)。 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下轧制属于非再结晶区轧制, 奥氏体随着轧制方向被拉伸, 轧制过程中奥氏体发生较大变形, 内部缺陷明显增加, 在晶界处具

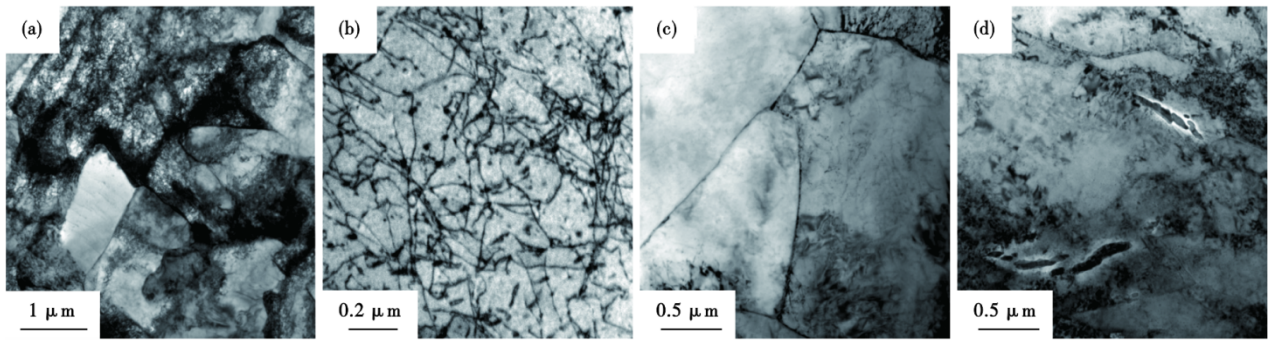


图6 2#试验钢在不同变形温度下的TEM照片:(a,b)750 °C ;(c,d)850 °C

Fig. 6 TEM photos of 2# tested steel at different deformation temperatures:(a, b) 750 °C ;(c, d) 850 °C

有较高的驱动力,铁素体形核显著增加。随着变形温度的降低,奥氏体晶粒由于被反复轧制产生大量的储能,易于形成较多的变形带和缺陷,该部位铁素体形核较多。未发生相变的奥氏体和部分先析铁素体进一步发生变形,晶粒内部会形成大量的位错,阻碍晶粒长大,奥氏体和铁素体晶粒进一步细化。

变形温度升高导致奥氏体晶粒内部变形带减少,降低了位错密度,如图6(c),奥氏体晶界处C原子由于缺少位错阻碍而变得极易扩散,该位置的固溶C含量急剧增加而形成C的富集,在后续冷却过程中形成渗碳体,如图6(d)所示。在较高的温度下对奥氏体进行变形时,由于回复和再结晶作用,晶粒快速长大,奥氏体在冷却过程中,C原子容易扩散,除了极少量未转变的奥氏体发生贝氏体相变外,大部分奥氏体转变为铁素体和珠光体组织^[15]。

2. 2. 2 Nb 含量对显微组织的影响

三组试验钢在相同形变条件下(变形速率 5 s^{-1} 、变形温度 850 °C)的金相组织如图7所示。随着钢中Nb含量的增加,铁素体和珠光体的尺寸显著细化。1#试验钢中的组织多为 $50\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 块状铁素

体,铁素体晶粒平均尺寸 $80\text{ }\mu\text{m}$,3#试验钢中铁素体晶粒尺寸多在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下,这是因为原始奥氏体晶粒破碎后,Nb的增加使铁素体和珠光体形核点增多,同时Nb的增加提高了钢的动态再结晶温度。3#试验钢在 850 °C 时已经处于非再结晶区轧制,在该温度区间轧制过程中积累了较多的形变储能,形核点增多^[16],相变后的铁素体晶粒尺寸细小,显著提高了试验钢强度。

图8所示为2#、3#试验钢在变形温度为 850 °C 、变形速率为 5 s^{-1} 时的析出相形貌,从图8可以看出,3#高Nb试验钢的析出相主要为NbC,尺寸较小、数量较多,相较于2#样,3#样第二相中NbC的比例增加80%以上,而析出相的平均尺寸由 100 nm 将至 50 nm 以下。钢中Nb含量的增加可显著提高Nb的第二相在高温下析出,降低奥氏体增长速度。同时,基体中的C含量足够与Nb结合形成NbC第二相,使相应的第二相比比例随Nb含量增加而增大。由于细小的NbC第二相可以钉扎晶界以阻碍奥氏体快速长大并能够抑制再结晶过程,所以奥氏体晶粒被进一步细化,提高铁素体形核率,降低铁素体晶粒尺寸。

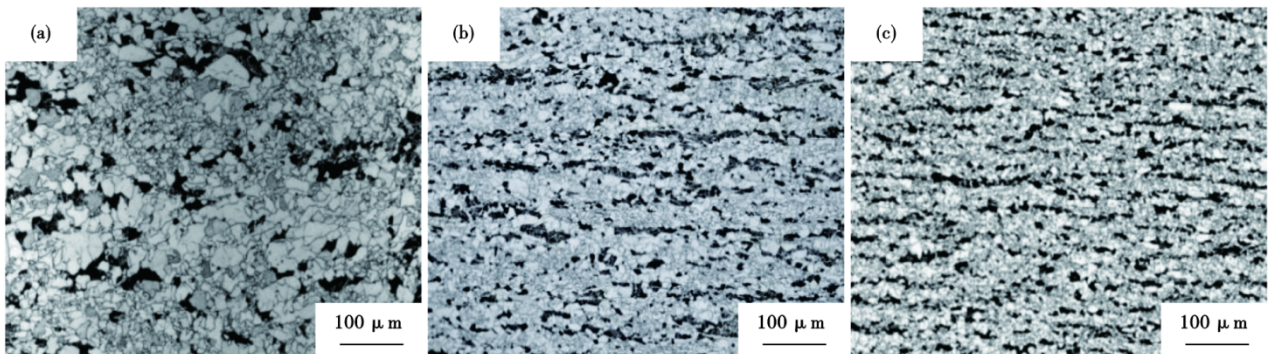


图7 三组试验钢在形变速率 5 s^{-1} 、变形温度 850 °C 时的金相组织:(a)1#,(b)2#,(c)3#

Fig. 7 Microstructure of the three groups of test steels at deformation rate 5 s^{-1} and deformation temperature 850 °C : (a) 1# , (b) 2# , (c) 3#

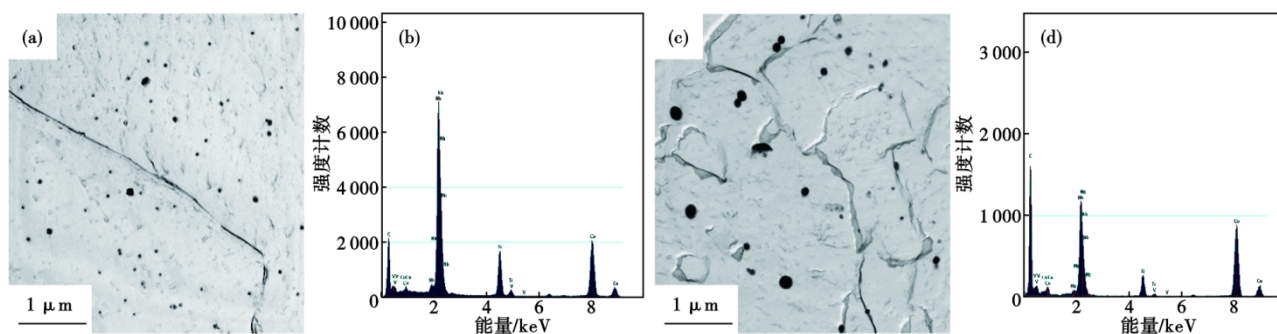


图8 试验钢TEM析出相照片:(a)3#析出相形貌,(b)3#能谱分析,(c)2#析出相形貌,(d)2#能谱分析

Fig. 8 TEM precipitated phase photos of test steel: (a) morphology of 3[#] precipitated phase, (b) 3[#] energy spectrum analysis, (c) morphology of 2[#] precipitated phase, (d) 2[#] energy spectrum analysis

3 结论

(1)通过热模拟的方法,研究了变形温度、变形速率以及Nb含量对Q345q DNH-LP耐候桥梁钢变形抗力的影响。钢板的变形抗力随着变形温度的降低、变形速率的增加和钢中Nb含量的增加而增大。变形温度超过900℃时,变形抗力降低趋势更加显著,当变形温度为1000℃时,试验钢的变形抗力较750℃时下降超过30%以上;

(2)Q345q DNH-LP耐候桥梁钢热变形后的组织为铁素体和珠光体的混合组织。随着变形温度的升高,铁素体晶粒尺寸逐渐增大。在相同变形条件

下,当Nb含量由0%增加至0.07%时,铁素体晶粒平均尺寸由80 μm降低至10 μm。当Nb含量由0.03%提高至0.07%时,第二相中NbC的比例增加80%以上,析出相平均尺寸由100 nm降低至50 nm以下,细小的纳米级NbC颗粒可有效提高铁素体形核率,细化铁素体晶粒,提高钢板的变形抗力;

(3)加入0.03%以上Nb元素可以有效抑制试验钢的变形奥氏体再结晶过程,提高再结晶温度50℃以上。在实际生产过程中,可进一步提高LP钢板的轧制温度,降低钢板形变应力和轧制力对板型的影响。

参考文献

- [1] Osamu T, Takeshi K, Keniti A. Development of High Performance Steel Plates in Terms of Reliability and Economy of Steel structure [J]. Kawasaki steel Giho, 2000, 32(3): 198-204.
- [2] 杜平,胡贤磊,王君,等. 纵向变截面钢板的发展和应 [J]. 轧钢, 2008, 25(1): 47-50.
- [3] 刘相华,刘鑫,付书涛,等. 变截面板带材产品及其深加工 [J]. 轧钢, 2015, 3(5): 1-7.
- [4] 刘相华,高琼,苏晨,等. 变截面轧制理论与应用的新进展 [J]. 轧钢, 2012, 29(3): 1-7.
- [5] Shinichi S, Ryuji M, Tadashi O, et al. Steel products for shipbuilding [J]. JFE Technical Report, 2004, (2): 41-48.
- [6] 廖建国. 厚钢板开发的现状及今后的发展趋势 [J]. 宽厚板, 2004, 10(4): 41-47.
- [7] Liu X H, Wu Z Q, Fang Z, et al. From TRB and LP plate to variable gauge rolling: technology, theory, simulation and experiment [J]. Materials Science Forum, 2012 (706/707/708/709): 1448-1453.
- [8] 日本铁钢联盟,日本桥梁建设协会. 耐候性钢桥梁的适用 [R]. 东京:日本铁钢联盟, 2010.
- [9] Chen Aihua, Xu Jianqiu, Li Ran, et al. Corrosion resistance of high performance weathering steel for bridge building applications [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19(6): 59.
- [10] 李立彦,周成,尹雨群,等. 模拟滨海环境免涂装耐候钢锈层研究及其耐腐蚀机制 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(6): 545.
- [11] 张光倩,谢康笛,郭慧琦,等. 奥氏体化温度对M54二次硬化钢组织及力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43(10): 118-127.
- [12] 叶晓瑜,黄贞益,李拔,等. 再结晶区轧制工艺参数对X80管线钢组织及结构的影响 [J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 12-16.
- [13] 骆小刚,马艳丽. 高强耐候钢变形抗力及模型的研究 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12(7): 22-24.
- [14] 王庆敏,刘鑫. Q345GJC高层建筑钢热变形行为及流变应力数学模型研究 [J]. 特殊钢, 2020, 41(1): 12-15.
- [15] 戴启勋,程晓农. 金属组织控制原理 [M]. 北京:化学工业出版社, 2009.
- [16] 吕晓芳,孙伟,杜慧起,等. 控轧控冷对低合金钢Q355D厚板组织和力学性能的影响 [J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 68-71.