

碳、铬和钼对冷镢钢铸坯高温力学性能的影响

段路昭^{1,2} 崔娟^{1,2} 赵俊岭¹

(1 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027)

摘要 通过 GLEEBLE-3500 热模拟机, 研究了六种不同碳、铬和钼含量对冷镢钢(/% : 0.19C, 0.36C, 0.19C-0.96Cr, 0.39C-0.98Cr, 0.19C-0.91Cr-0.21Mo 和 0.37C-0.98Cr-0.22Mo) 在 650 ~ 1 200 °C 温度内的高温力学性能的影响。结果表明, 六种钢在 650 ~ 850 °C 温度都存在明显的第Ⅲ脆性区。第Ⅲ脆性区的起始温度随着碳含量减少和铬含量的添加移向更高温度。铬的添加使得材料的高温塑性恶化, 促进第Ⅲ脆性区扩大。而钼的添加可改善含铬冷镢钢的第Ⅲ脆性区塑性。

关键词 C Cr Mo 冷镢钢 高温力学性能

Effect of Carbon, Chromium and Molybdenum on Mechanical Properties of Casting Bloom of Cold Heading Steel at Elevated Temperature

Duan Luzhao^{1,2}, Cui Juan^{1,2} and Zhao Junling¹

(1 Xingtai IRON & STEEL Co Ltd, Xingtai 054027; 2 Hebei Engineering Research Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

Abstract The effect of different carbon, chromium and molybdenum contents on mechanical properties of six kinds of cold heading steels (/% : 0.19C, 0.36C, 0.19C-0.96Cr, 0.39C-0.98Cr, 0.19C-0.91Cr-0.21Mo and 0.37C-0.98Cr-0.22Mo) at 650 ~ 1 200 °C had been studied by using GLEEBLE-3500 thermal simulation machine. Results reveal that: the third brittle region of all of the steels is obvious in the temperature range 650 ~ 850 °C. The starting temperature of the third brittle region moves to higher temperature with the carbon content decreasing or chromium element adding. Addition of chromium deteriorates the ductility and promotes the third brittle region expanding. Addition of molybdenum in the chromium alloyed cold heading steels improves the ductility of the third brittle region.

Material Index Carbon, Chromium, Molybdenum, Cold Heading Steel, Mechanical Properties at Elevated Temperature

钢铁材料在连铸生产过程中容易产生横向裂纹和角部裂纹等众多表面缺陷。一方面与生产工艺有关, 另一方面与材料在高温条件下的力学性能密切相关^[1], 而化学成分是影响材料在高温条件下力学性能的重要因素之一, 很多学者对 Ni、Cu、Nb、Ti、V、N 和 B 对材料高温力学性能影响及机理进行了详细的研究^[2-6]。本文通过 GLEEBLE-3500 热模拟机研究 C、Cr 和 Mo 对冷镢钢高温力学性能的影响。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

高温力学性能试验的试样取自连铸坯次表层, 加工为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的两端带螺纹的棒状样品, 在 GLEEBLE-3500 热模拟试验机上进行试验。铸坯的生产流程为: 炼铁 \rightarrow 80 t 转炉 \rightarrow LF 精炼 \rightarrow 280 mm \times 325 mm 连铸坯。编号为 1[#] ~ 6[#] 的六种成分的试验钢种为 SWRCH22A、SWRCH35K、ML20Cr、

ML40Cr、ML20CrMo 和 SCM435, 其化学成分如表 1 所示。

1.2 试验方案

以 10 °C/s 的加热速度将试样加热至 1 150 °C, 保温 5 min, 然后以 3 °C/s 的速率降温(或升温)到 650 ~ 1 200 °C 的不同温度保温 3 min, 然后以 0.01 s⁻¹ 应变速率加载拉伸, 直至断裂, 并测定其断面收缩率和抗拉强度。

2 试验结果及分析

2.1 C 对高温塑性的影响

图 1(a) 显示, 当变形温度高于 800 °C 时, 1[#] 和 2[#] 的断面收缩率均大于 80%。而当变形温度处于 650 ~ 800 °C 时, 材料 1[#] 和 2[#] 的断面收缩率随变形温度均呈现快速升降的趋势, 呈“V”型。相同变形温度条件下, 1[#] 的断面收缩率低于 2[#]。而 1[#] 的断面收缩率极小值对应的温度要高于 2[#]。在这个温度范

表1 试验冷镦钢化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of test cold heading steels / %

编号	钢种	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Ni	Cu
1 [#]	SWRCH22A	0.19	0.07	0.91	-	-	≤0.030	≤0.035	≤0.20	≤0.20
2 [#]	SWRCH35K	0.36	0.21	0.72	-	-	≤0.030	≤0.035	≤0.20	≤0.20
3 [#]	ML20Cr	0.19	0.22	0.79	0.96	-	≤0.035	≤0.035	≤0.20	≤0.20
4 [#]	ML40Cr	0.39	0.19	0.71	0.98	-	≤0.035	≤0.035	≤0.20	≤0.20
5 [#]	ML20CrMo	0.19	0.23	0.67	0.91	0.21	≤0.030	≤0.035	≤0.20	≤0.20
6 [#]	SCM435	0.37	0.21	0.71	0.98	0.22	≤0.030	≤0.035	≤0.20	≤0.20

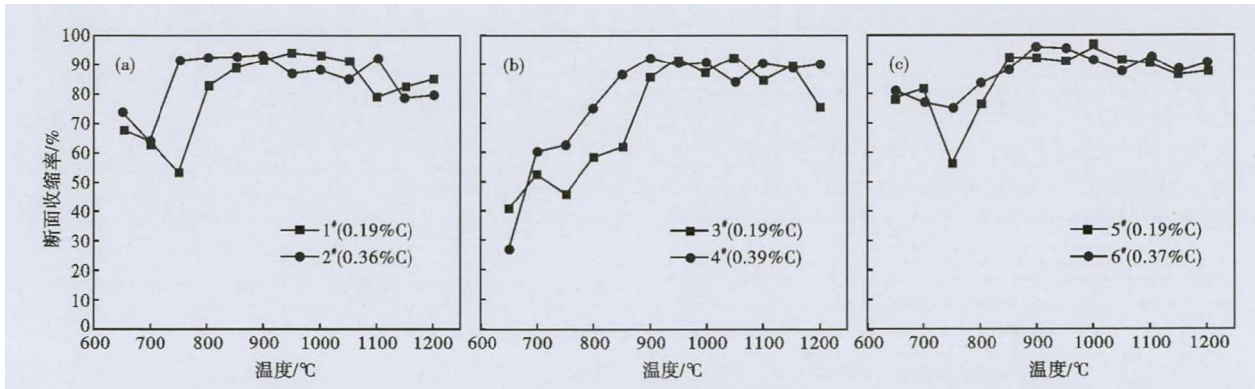


图1 C含量对冷镦钢高温塑性的影响(a) 1[#](SWRCH22A)和2[#](SWRCH35K);(b) 3[#](ML20Cr)和4[#](ML40Cr);(c) 5[#](ML20CrMo)和6[#](SCM435)

Fig.1 Effect of carbon content on reduction of area of cold heading steels (a) 1[#](SWRCH22A) and 2[#](SWRCH35K); (b) 3[#](ML20Cr) and 4[#](ML40Cr); (c) 5[#](ML20CrMo) and 6[#](SCM435)

围内,1[#]的断面收缩率的极小值小于60%,2[#]断面收缩率的极小值接近60%,此时材料有较高的裂纹敏感性。通常,这个温度区间被称为第Ⅲ脆性区。

图1(b)显示,当变形温度在900~1200℃内时,3[#]和4[#]的断面收缩率都维持在很高的水平;当变形温度降低时,两种钢的断面收缩率均呈现迅速降低趋势,但3[#]的断面收缩率下降的更快,开始下降的温度更高。

图1(c)显示,当变形温度在850~1200℃内时,5[#]和6[#]的断面收缩率都稳定维持在80%以上;但随着变形温度的降低,材料塑性均有所下降,但是6[#]的变化幅度更加明显。

整体而言,六个钢种均存在明显的第Ⅲ脆性区,且C含量越低,第Ⅲ脆性区的起始温度越高,第Ⅲ脆性区越明显。

这是因为在650~1200℃,脆性区与奥氏体晶粒度、C含量、奥氏体析出物及奥氏体向铁素体的转变情况有关,有些因素之间相互影响^[7-8]。第Ⅲ脆性区由单相奥氏体脆性区和奥氏体-铁素体双相脆性区组成。而单相奥氏体脆性区主要是由于低温奥氏体区域析出物引起。双相区脆性是由于随着变形温度继续降低,材料在原始奥氏体晶界处开始出现铁素体形核,甚至出现薄膜状铁素体,微裂纹就容易在铁素体或者铁素体与奥氏体界面上产生、长大,直

至失效断裂。C能够显著影响冷却过程中奥氏体向铁素体的转变,且在亚共析钢成分范围内,C含量越低,奥氏体向铁素体转变的温度越高,出现第Ⅲ脆性区的起始温度越高。此外,在Fe-C相图中,对于亚共析钢而言,随着C含量的增加,A₁和A₃点之间的温度差变小,这是第三脆性区的宽度和深度随C含量变化的一个原因。

2.2 Cr和Mo对高温塑性的影响

从图2(a)所示的1[#]和3[#]的断面收缩率曲线可以发现,Cr的添加使得材料在650~850℃温度区间的塑性恶化,即添加约0.96%的Cr(3[#])使得材料的第Ⅲ脆性区变宽、变深。而复合添加约0.91%Cr元素和0.21%的Mo(5[#])时,断面收缩率较单独添加Cr有所改善。图2(b)显示出相同的变化规律。

这是因为Cr为铁素体形成元素,虽然它对Fe-C相图中G点的影响随含量而变化,但是其却使得材料的相变A₁和A₃点向左上方移动,且其为碳化物形成元素。这些因素使得添加了Cr的3[#]和4[#]钢与相当C含量的钢种的第Ⅲ脆性区相比,起始温度更高,也更深。Mo不仅可以有效抑制高温先共析铁素体转变,并且可以强化铁素体基体,减小铁素体与奥氏体的强度差,同时还能细化晶粒^[9-10]。钼的这些作用使得材料在第Ⅲ脆性区内的断面收缩率较

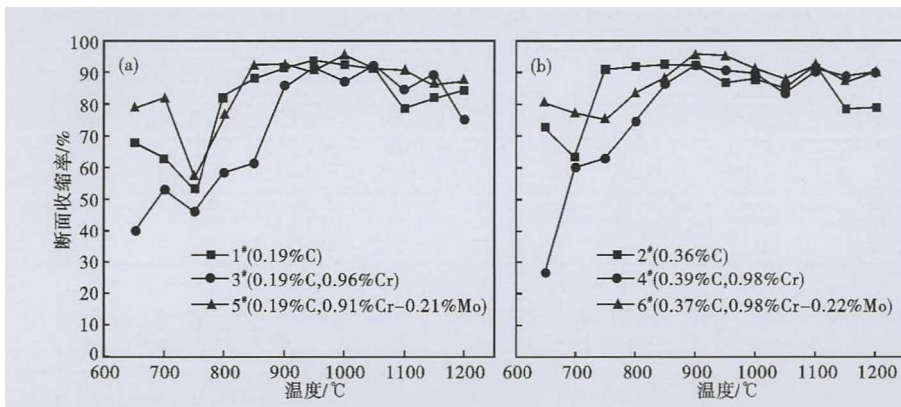


图 2 Cr 和 Mo 含量对冷镦钢高温塑性的影响 (a) 1[#]、3[#] 和 5[#]; (b) 2[#]、4[#] 和 6[#]
 Fig.2 Effect of chromium and molybdenum content on reduction of area of cold heading steels (a) 1[#], 3[#] and 5[#]; (b) 2[#], 4[#] and 6[#]

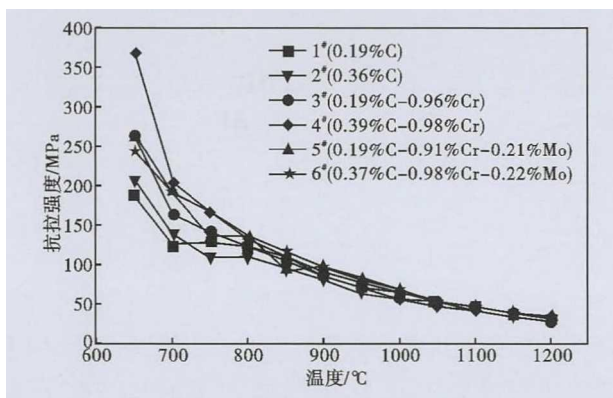


图 3 合金元素对冷镦钢强度的影响
 Fig.3 Effect of alloying elements on strength of different cold heading steels

单纯只添加 Cr 的钢种有所改善。

2.3 合金元素对高温条件下抗拉强度的影响

图 3 为六种试验钢的抗拉强度随变形温度的变化曲线。当变形温度低于 850 ℃ 时,材料的成分对六种钢抗拉强度的影响较为明显。在相同的变形温度条件下,C、Cr 和 Mo 的增加均使得材料的强度增加。但是,当变形温度超过 850 ℃ 时,温度成为了影响材料强度的主导因素,C、Cr 和 Mo 对材料强度的影响居于次位,六者逐渐趋于接近。

整体而言,试验温度范围内,六种试验钢的抗拉强度随温度的升高整体表现为下降的趋势,但并不是单一的线性关系。

3 结论

(1) 六种冷镦钢均在 650 ~ 850 ℃ 存在有明显的第Ⅲ脆性区,因此应该避免在此温度区间进行铸坯矫直,且在冷却或再加热的过程中应采取缓慢地

降温或升温方式,以减少裂纹产生的概率。

(2) 对于六种试验钢,C 含量越高,对应的第Ⅲ脆性区的温度也就越低。

(3) Cr 的添加使得第Ⅲ脆性区变深、变宽,塑性恶化。而钼的添加能够有效的改善含 Cr 中低碳冷镦钢第Ⅲ脆性区的塑性。

(4) 六种试验钢的抗拉强度随变形温度的升高整体表现为下降的趋势。超过 850 ℃ 时,材料成分对强度的影响变弱,变形温度是最主要影响因素。

参考文献

- [1] Schwerdtfeger K, Spitzer K H. Application of Reduction of Area-Temperature Diagrams to the Prediction of Surface Cracking Formation in Continuous Casting of Steel [J]. ISIJ International, 2009, 49 (4): 512-520.
- [2] Mintz B. Influence of Nitrogen on Hot Ductility of Steels and its Relationship to Problem of Transverse Cracking [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2000, 27(5): 343-347.
- [3] Mintz B, Abushosha R. The influence of Vanadium on Hot Ductility of Steel [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1993, 20(6): 445-452.
- [4] Cho K C, Mun D J, Koo Y, et al. Effect of Niobium and Titanium Addition on the Hot Ductility of Boron Containing Steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 3556-3561.
- [5] Mintz B, Abushosha R, Crowther D N. The Influence of Small Additions of Cu and Ni on the Hot Ductility of Steels [J]. Materials Science and Technology, 1995, 11(5): 474-481.
- [6] Lopez-Chipres E, Mejia I, Maldonado C, et al. Hot Ductility of Boron Microalloyed Steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 460: 464-470.
- [7] Mintz B. Understanding the Low Temperature end of the Hot Ductility Trough in Steels [J]. Materials Science and Technology, 2008, 24(1): 112.
- [8] Guillet A, Yue S, Akben G M. Influence of Heat Treatment and Carbon Content on the Hot Ductility of Nb-Ni Microalloyed steels [J]. ISIJ International, 1993, 33(3): 413-419.
- [9] 翟士斌, 余万华, 周斌斌, 等. Mo 元素对热轧双相钢 DP600 相变规律影响 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36(11): 54-59.
- [10] 谭淳礼, 白秉哲, 方鸿生. Mo 在新型空冷低碳 Mn-Si-Cr 系贝氏体钢中的作用 [J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 48-51.

段路昭 (1986-), 男, 硕士 (2013 年北京科技大学), 工程师, 2010 年燕山大学 (本科) 毕业, 高级线材产品的开发与研究。E-mail: duanzl2006@126.com。

收稿日期: 2019-12-13