

GH4169 合金细晶棒材的连轧工艺及其组织与性能

Microstructure and Properties of Fine Grain GH4169

Alloy Bar Rolled by Continuous Roller

陈国胜, 王庆增, 张玩良, 李 伟, 王资兴, 刘丰军, 王世普

(宝山钢铁股份有限公司 特钢事业部, 上海 200940)

CHEN Guo-sheng, WANG Qing-zeng, ZHANG Wan-liang,

LI Wei, WANG Zi-xing, LIU Feng-jun, WANG Shi-pu

(Special Steel Business Unit, Baoshan Iron & Steel Co. Ltd., Shanghai 200940, China)

摘要: 介绍了最新引进的我国第一套高合金钢连轧生产线及其所生产的 GH4169 合金 $\phi 20 \sim \phi 55$ mm 热轧细晶棒材的组织与性能。与传统的横列式轧机轧制的同规格棒材相比, 该连轧工艺更易于获得晶粒均匀、适量 δ 相合理分布的细晶棒材; 在所研究的规格范围内, 晶粒度可稳定控制在 10 级左右, 且工艺更稳定可控。因而, 其轧棒具有更优良稳定的综合性能。同时产品尺寸精度和成材率均有较大幅度的提高。

关键词: GH4169 合金; 热连轧棒材; 组织; 性能

中图分类号: TG113 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)04-0018-04

Abstract: The newly imported high-alloy steel continuous rolling line which was the first line in our country was introduced for about two years, and the microstructure and properties of GH4169 alloy hot-rolling bars produced by this line were studied, and the sizes of such bars were in the range of $\phi 20 \sim \phi 55$ mm. Comparing with the traditional horizontal roller, this continuous rolling technology was tend to get finer grain bar and the grains were more uniform and the δ -phase distributed properly. The specifications range, the grain size can be controlled about 10 grade and the process was more stable. So the rolled bars possess more stable and comprehensive properties. Meanwhile, the size precision and production rate of the products are both increased markedly.

Key words: GH4169 alloy; hot continuous-rolling bar; microstructure; property

国内高温合金热轧棒材一直采用横列式轧机轧制。存在着轧制精度和成材率低, 操作过程中人为影响因素大, 工艺参数难以准确控制等问题。对于高温下使用的 GH4169 合金棒材, 除上述问题外, 还存在组织难以控制在最佳状态的问题。

均匀的 10 级左右晶粒度、适量 δ 相呈颗粒状或短棒状在晶界弥散分布的 GH4169 合金具有良好的高温综合性能^[1, 2]。理论上, 这种组织的获得一般要求在坯料原始晶粒较细的前提下, 于 δ 相溶解温度 ($1005 \sim 1015^\circ\text{C}$)^[3, 4] 附近加热, 在略高于动态再结晶温度 (950°C 左右) 热加工, 同时将终加工温度控制在 δ 相析出峰温 ($900 \sim 950^\circ\text{C}$)^[5] 附近。工程实践中, 除薄板轧制、模锻和快速锻饼等少数热加工方式外, 其他工业性热加工方式难以达到这一苛刻的温度要求。横列式轧机轧制的 GH4169 合金 $\phi 30 \sim \phi 80$ mm 轧棒在保证充分再结晶、且 δ 相合适的前提下, 晶粒度一般只能

细化至 8~7 级^[6]。

国外发达国家已采用连轧机轧制高温合金棒材, 由于连轧机工艺的可控性远高于落后的横列式轧机, 因而其高温合金轧棒的组织性能易于达到技术最佳值。国内关于高温合金连轧方面的工艺技术报道较少。

宝钢特钢事业部 2007 年率先引进了意大利的高合金钢连轧生产线。本工作介绍了该生产线轧制 GH4169 合金细晶棒材的工艺及其组织与性能, 并与横列式轧机轧制的同规格棒材进行了综合对比。

1 连轧设备和实验用料

图 1 为高合金钢棒材连轧生产线示意图, 生产线工序和环节组成: 连续加热炉 (或室式炉) \rightarrow 可逆式粗轧机 \rightarrow 隧道控温炉 \rightarrow 16 机架 CCR (Compact Cassette Rolling mill) 连轧机组 \rightarrow 控冷 \rightarrow 冷床。

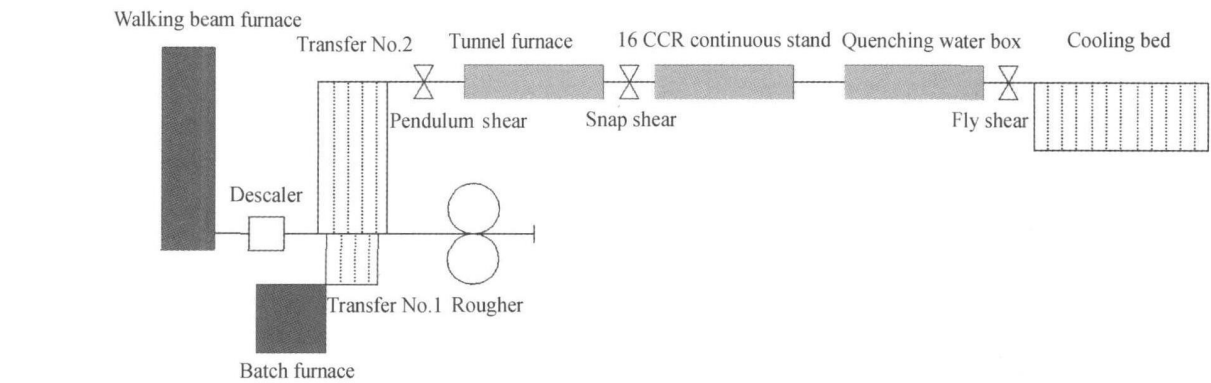


图 1 高合金钢棒材连轧生产线示意图

Fig.1 Graph of high-alloy steel bar continuous rolling line

该连轧机轧制圆棒的规格范围为 $\phi 14\sim \phi 85\text{mm}$, 圆棒尺寸精度范围为 $\pm 0.25(<\phi 20\text{mm})\sim \pm 0.90(>\phi 80\text{mm})\text{ mm}$, 使用坯料规格为: 横截面尺寸 $110\text{mm}\times 110\text{mm}\sim 140\text{mm}\times 140\text{mm}$, 长度 $2500\sim 4000\text{mm}$ 。根据品种和规格的不同, 可选用不同规格的坯料, 并经粗轧机轧制成不同规格和晶粒度的中间坯。中间坯经隧

道炉控温, 根据产品种类、规格和组织要求选用适当的控温温度和保温时间, 然后经 CCR 连轧机组轧制成品。CCR 成品轧制过程中可选择不同的轧制线速率。

实验用 GH4169 合金的化学成分范围列于表 1。热处理工艺: $960^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$, 空冷+ $720^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$, 以 $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度冷却至 $620^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$, 空冷。

表 1 实验用 GH4169 的化学成分 (质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of experimental GH4169 alloys (mass fraction/ %)

C	Cr	Mo	Nb	Ta	Al	Ti	Ni	B
0.02-0.03	18.5-19.5	3.0-3.2	5.4-5.3	≤ 0.1	0.45-0.55	0.98-1.10	52.5-53.2	0.003-0.005
S	P	Si	Mn	Cu	Co	O	N	Fe
< 0.002	< 0.015	< 0.35	< 0.35	< 0.30	< 1.0	< 0.001	< 0.008	Bal

横列式轧机轧制的棒材规格和轧机分别为: $\phi 20\sim \phi 45\text{mm}$ 棒材由 300mm 轧机轧制; $\phi 50\text{mm}$ 和 $\phi 55\text{mm}$ 棒材由 550 轧机轧制。

2 实验结果

该连轧设备自 2007 年 7 月投产后, 已研制了多批次 GH4169 合金 $\phi 20\sim \phi 55\text{mm}$ 热轧棒材, 摸索出了较佳的热轧工艺。根据用途的不同, 通过工艺参数的调整, 可生产出不同晶粒尺寸、不同 δ 相析出量的 GH4169 合金棒材。

按特定工艺轧制的 GH4169 合金细晶棒材低倍组织均匀。图 2 为连轧和横列式轧机轧制的 GH4169 合金细晶棒材中心的晶粒度、持久塑性与规格的关系。可见, 前者不同规格棒材均具有 10~ 9.5 级的细晶组织和良好的持久塑性, 而后者随着棒材尺寸增大, 晶粒明显长大, 持久塑性明显下降。表 2 列出了两种工艺轧制的不同规格 GH4169 合金棒材各部位的晶粒度。可见, 连轧棒材中心、 $R/2$ 和表面均获得了 10 级左右的细晶组织, 边缘的晶粒度约比中心细 1 级左右。图

3 是不同规格连轧棒材各部位的晶粒度特征。 δ 相在晶界呈颗粒状和短棒状均匀弥散分布(见图 4), 棒材边缘部位 δ 相的数量比中心略有增多, 但二者差异较小, 均处于较佳范围。

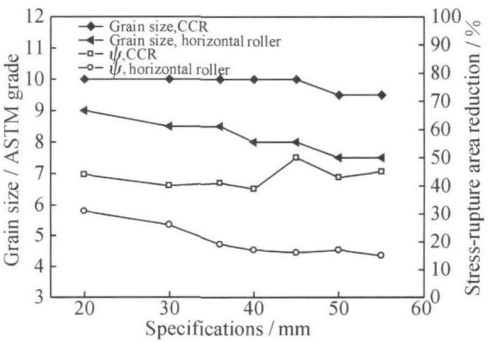


图 2 两种轧机轧制棒材中心晶粒度、650℃/690MPa 持久面缩率与棒材规格的关系

Fig.2 Center grain size, stress-rupture area reduction (650℃/690MPa) of the bars rolled by two rollers

表 2 还反映了传统的横列式轧机轧制条件下, 只有规格较小的棒材(如 $\phi 20\text{mm}$) 可获得 9 级以上的细

表 2 两种轧机轧制的不同规格棒材的晶粒度(级)

Table 2 Grain sizes of different size bar rolled by two roller(ASTM grade)

Roller	$\phi 20\text{mm}$			$\phi 30\text{mm}$			$\phi 45\text{mm}$			$\phi 55\text{mm}$		
	Center	R/2	Surface	Center	R/2	Surface	Center	R/2	Surface	Center	R/2	Surface
CCR	10	10	10.5	10	10.5	11	10	10.5	11	9.5	10	10.5
Horizontal	9	10	11	8.5	9	10	8	8.5	10	7.5	8.0	9

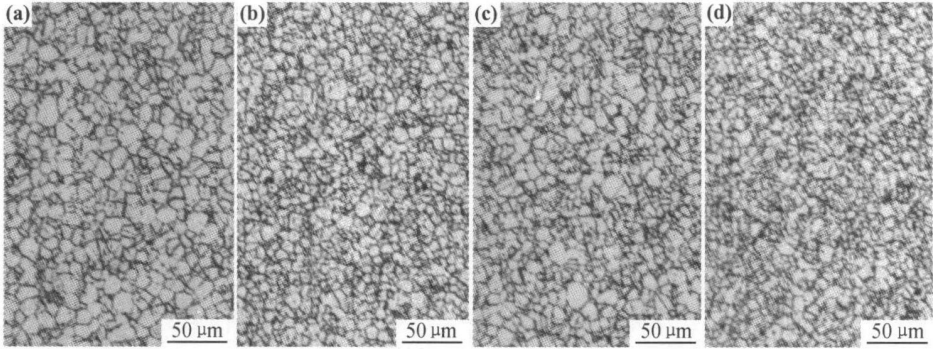


图 3 不同规格连轧棒材各部位的晶粒度

(a) $\phi 20\text{mm}$, 中心; (b) $\phi 20\text{mm}$, 边缘; (c) $\phi 45\text{mm}$, 中心; (d) $\phi 45\text{mm}$, 边缘

Fig. 3 Grain sizes at different section of different sizes continuous-rolling bar

(a) $\phi 20\text{mm}$, center; (b) $\phi 20\text{mm}$, surface; (c) $\phi 45\text{mm}$, center; (d) $\phi 45\text{mm}$, surface

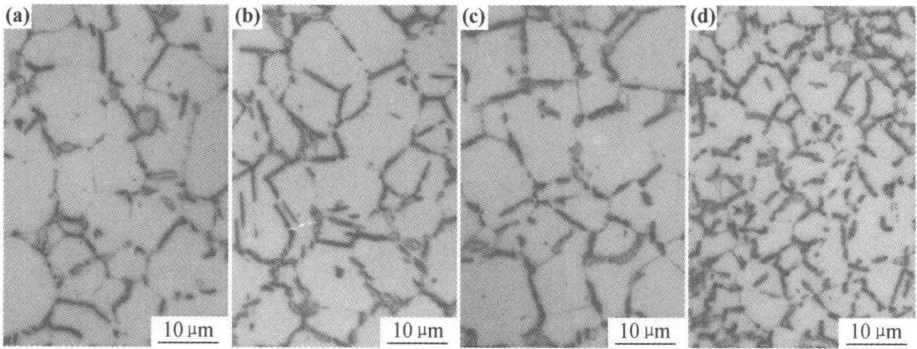


图 4 不同规格连轧棒材各部位的组织特征

(a) $\phi 20\text{mm}$, 中心; (b) $\phi 20\text{mm}$, 边缘; (c) $\phi 45\text{mm}$, 中心; (d) $\phi 45\text{mm}$, 边缘

Fig. 4 Microstructures at different section of different sizes continuous-rolling bar

(a) $\phi 20\text{mm}$, center; (b) $\phi 20\text{mm}$, surface; (c) $\phi 45\text{mm}$, center; (d) $\phi 45\text{mm}$, surface

晶组织。但是,随着规格增大,获得 9 级以上细晶组织的工艺难度显著增加。生产实践中,当规格大于 $\phi 30\text{mm}$ 时,很难获得相对均匀的 8.5 级以上细晶组织。同时,从表 2 还可以看出,传统横列式轧机轧制的棒材,中心和边缘晶粒相差 1.5~2.0 级,明显高于本连轧工艺的级差。此外,横列式轧机历年工艺控制最好的 $\phi 20\text{mm}$ 的小规格棒材虽也可获得 10 级以上的细晶组织,但由于轧制时间较长,温降过大,而使表面、甚至中心和 R/2 处 δ 相呈针状大量析出,从而导致室温塑性大幅度下降。

表 3 给出了两种轧机轧制的 $\phi 20\text{mm}$, $\phi 45\text{mm}$ 棒材的力学性能。可以看出,两种轧机轧制的 $\phi 20\text{mm}$ 的小规格棒材性能相近。当棒材规格大于

$\phi 30\text{mm}$ 时,连轧工艺轧制的棒材具有更好的高温塑性,尤其是持久塑性。 $\phi 45\text{mm}$ 棒材,二者的持久塑性相差 1 倍以上。生产统计结果表明,成熟的连轧工艺轧制的 GH4169 合金棒材,组织性能稳定,从未出现缺口敏感性,而传统的横列式轧机轧制的过程中,操作稍有失误,协调稍有不妥,容易出现缺口敏感性。

3 分析与讨论

传统的横列式轧机轧制 GH4169 合金棒材,如按前述的理论低温加热,将因咬入困难而难以一火轧制成材。即使依靠人力勉强一火轧制成材,也会因长时

表 3 两种轧机轧制的 $\phi 20\text{mm}$, $\phi 45\text{mm}$ 棒材的力学性能
Table 3 Mechanical properties of $\phi 20\text{mm}$ and $\phi 45\text{mm}$ bars rolled by different rollers

Specification/ mm	Roller	Tensile property at 20℃			Tensile property at 650℃			650℃/690MPa stress rupture*		
		σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%	T_r (h:min)	δ /%	ψ /%
$\phi 20$	CCR	1400	26	51	1160	30	56	95:48	21	44
	Horizontal	1405	23	45	1165	29	53	90:25	21	45
$\phi 45$	CCR	1415	27	49	1170	26	43	83:07	20	50
	Horizontal	1420	22	41	1150	20	32	76:16	8	16

* Lasting to 25h after the test, every 8h to increase the load 35MPa.

间轧制过程中表面(甚至中心和 $R/2$ 处)温降过大,导致存在大量不能完全再结晶的冷变形组织和针状 δ 相而脆化。因而,低温加热的轧制技术无法在横列式轧机中获得工业性应用。实际工业性轧制过程中,加热温度一般偏高至接近 1120°C ,因而原始晶粒粗大。文献[7]介绍,2 级原始粗晶的合金坯料,不但热变形抗力大,而且 950°C 变形量高达 80% 以上的条件下,仍远不能充分完成动态再结晶。轧制过程中,如果操作偏快,中前期坯料心部温度势必进一步升高而使再结晶晶粒粗大,同时因终轧温度随之升高而使 δ 相析出量显著减少,甚至无 δ 相析出,且棒材尺寸越大,这种效应越明显。如果操作偏慢,则表面温降过大,导致表面出现冷变形组织和 δ 相过多,甚至出现表面裂纹和无法咬入等不良后果。这一对难以平衡的矛盾致使在顺利完成轧制和保证表面质量的前提下,难以获得均匀的细晶组织。此外,人为影响因素较大,轧制速度、开轧温度、终轧温度等工艺参数均难以稳定控制。

与之相反,CCR 连轧工艺可通过连续炉高温加热、隧道炉低温加热和合理选择坯料尺寸等工艺手段,在获得大变形量、高效率的同时,使中间坯连轧前的原始晶粒控制在较细小的范围,从而降低连轧过程中的热加工抗力和有利于晶粒的细化。针对不同规格棒材,通过粗轧和 CCR 连轧变形量、隧道炉加热温度和保温时间、连轧线速率以及过程冷却方式等工艺参数的合理选定、配合和调整,易于将坯料不同部位的连轧过程温度和终轧温度均控制在所需的范围,因而该工艺轧制的不同规格棒材均获得了均匀细小的晶粒,适量的 δ 相和良好的综合性能。此外,工艺参数选定后,可通过程序自动控制实现,因而人为影响因素小,具有良好的可控性和稳定性。

对于小规格棒材,传统的横列式轧机轧制过程中,内升温效应较小,因而可能获得与连轧工艺相近的组织 and 性能。但相对于本连轧工艺,其轧制时间偏长,轧制后期温降过大,因而 δ 相易于过量析出,导致室温塑性下降,且棒材心部和边缘的组织均匀性较差。本连轧工艺还具有尺寸精度高、成材率和生产效率高的优点。

4 结论

(1)CCR 连轧生产线轧制的 GH4169 合金 $\phi 20\sim\phi 55\text{mm}$ 棒材,中心、 $R/2$ 和边缘的晶粒度均可控制在理想的 10 级左右,中心与边缘的晶粒度相差仅约 1 级;各部位 δ 相差异也较小,基本呈颗粒状和短棒状在晶界均匀弥散分布,因而具有良好的综合性能。

(2)与传统的横列式轧机轧制的同等规格 GH4169 棒材相比,本连轧工艺克服了晶粒随棒材尺寸增大而显著长大和 δ 相难以稳定控制等问题。其中 $\phi 30\text{mm}$ 以上棒材晶粒细化 2 级左右,同时横截面上晶粒更均匀, δ 相的形貌和分布更合理,因而具有更优良的综合性能,持久塑性提高了 1 倍以上。

(3)本连轧技术工艺稳定,人为影响小,其棒材尺寸精度和成材率均比传统轧制工艺有较大幅度的提高。

参考文献

[1] 庄景云,杨锦炎,田耘,等. GH169 合金中 δ 相与持久缺口敏感性的关系[J]. 北京科技大学学报, 1991, (增刊): 177.
[2] YUAN H, LIU W C. Effect of the δ -phase on the hot deformation behavior of inconel 718[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 408: 281- 289.
[3] SAIED AZADIAN, LIU YING WEI, RICHARD WARREN. Delta phase precipitation in inconel 718[J]. Materials Characterization, 2004, 53: 7- 16.
[4] CAI Da-yong, ZHANG Wei-hong, NIE Pei-lin, et al. Dissolution kinetics of δ -phase and its influence on the notch sensitivity of inconel 718[J]. Materials Characterization, 2007, 58: 220- 225.
[5] 庄景云,杜金辉,邓群,等. 变形高温合金 GH4169[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006.
[6] MICHAEL WALTER, AMOLD TATSCHL. Processing of rolling technologies for alloy 718[A]. LORIA E A. Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives 2005[C]. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2005. 111.
[7] 曹美华,陈国胜,周奠华,等. 变形速度及晶粒度对 GH4169 合金高温性能和组织的影响[J]. 钢铁研究学报, 2003, (7): 361- 365.

收稿日期: 2009-01-04; 修订日期: 2009-11-20
作者简介: 陈国胜(1955—), 男, 教授级高级工程师, 现从事高温合金的研究工作, 联系地址: 上海市宝山区水产路 1269 号宝钢股份特钢事业部技术中心(200940), E-mail: chenguosheng@baosteel.com