

半固态钢铁材料轧制产品的力学特性*

宋仁伯 康永林 孙建林 赵爱民 毛卫民

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要 将弹簧钢 (60Si2Mn) 和不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 在半固态下 1 道次轧制成形, 对轧制产品进行拉伸实验, 研究其在室温条件下的力学性能, 并对拉伸变形过程中的塑性变形机理进行了分析。研究表明: 不同的固相率对轧制产品的力学性能有明显的影响, 在研究范围内随着固相率的提高, 其力学性能亦提高; 半固态轧制过程中所产生的液固相分离, 导致半固态轧制产品组织分布差异, 使轧制产品不同区域的力学性能不同; 同时由于半固态轧制产品特有的球形固相颗粒, 其拉伸时的塑性变形机理也有自身的特点。

关键词 半固态, 轧制, 力学性能, 固相率, 塑性变形

中图分类号 TG111.4, TG33, TG113.25 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2002)02-0153-04

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROLLED PRODUCTS OF SEMI-SOLID STEELS

SONG Renbo, KANG Yonglin, SUN Jianlin, ZHAO Aimin, MAO Weimin

School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Correspondent: SONG Renbo, lecture, Tel: (010)62332983, E-mail: songrb@263.net

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59995440)

Manuscript received 2001-03-23, in revised form 2001-08-15

ABSTRACT Spring steel (60Si2Mn) and stainless steel (1Cr18Ni9Ti) were rolled by one pass in the semi-solid state, and the tensile test of their products was carried out. The room temperature mechanical properties and the mechanism of plastic deformation during tensile deformation were investigated. The results show that the mechanical properties is obviously effected by solid fraction, and increased with solid fraction increasing. The liquid and solid phases were broken away during rolling in the semi-solid state, which resulted in the difference of microstructural distribution, so that the difference of mechanical properties at different regions appeared. At the same time, the mechanism of plastic deformation during tensile deformation of rolled products of semi-solid steels has their own characteristics.

KEY WORDS semi-solid, rolling, mechanical property, solid fraction, plastic deformation

金属材料的半固态加工技术是不同于目前以枝晶凝固为基础的任何形式的加工技术。在金属凝固过程中, 该工艺可使初生树枝状晶体破碎为颗粒状或抑制树枝晶的生成, 形成固液相共存的、具有流变性和触变性的非枝晶熔体, 然后再对半固态浆料进行加工。与传统的热加工方法相比, 该技术具有应用范围广、节能节材、变形力小、产品组织性能均匀等优点, 因此 80 年代后期以来, 该技术得到了科技工作者的普遍承认和高度重视, 成为当今金属材料加工的新领域^[1-3]。

当前, 金属材料的半固态加工主要集中在铝合金、镁

合金、铅合金等低熔点材料方面, 对高熔点钢铁材料的半固态加工研究较少。利用半固态工艺对钢铁材料加工时, 由于变形抗力小、组织均匀、晶粒细小、无枝晶和偏析的特点, 可实现大变形轧制, 减少轧制道次, 生产一些目前热轧所不能生产的特殊形状的产品而不需要再加工或深加工, 这样可提高钢材制品质量、降低钢材成本。

本文利用自行设计和研制的半固态钢铁材料轧制系统, 以应用广泛的 60Si2Mn 和 1Cr18Ni9Ti 为研究对象, 对其进行 1 道次的半固态轧制, 变形量为 60%, 研究在不同固相率条件下轧制产品的力学性能, 并对其在拉伸过程中的塑性变形机理进行了分析。

1 实验方法

1.1 实验材料

本实验所选择的 60Si2Mn 和 1Cr18Ni9Ti 的化学成

* 国家自然科学基金 59995440 资助项目

收到初稿日期: 2001-03-23, 收到修改稿日期: 2001-08-15

作者简介: 宋仁伯, 男, 1970 年生, 博士生

分如表 1 所示。

表 1 半固态 60Si2Mn 和 1Cr18Ni9Ti 的化学成分

Table 1 The chemical compositions of steels 60Si2Mn and 1Cr18Ni9Ti tested

(mass fraction, %)								
steel	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P
60Si2Mn	0.61	1.83	0.70				≤0.03	≤0.035
1Cr18Ni9Ti	0.1	≤0.1	≤2.0	17.43	10.63	0.59	≤0.03	≤0.035

1.2 实验装置及工艺

本实验所用的装置为自行设计和研制, 设备简图如图 1 所示:

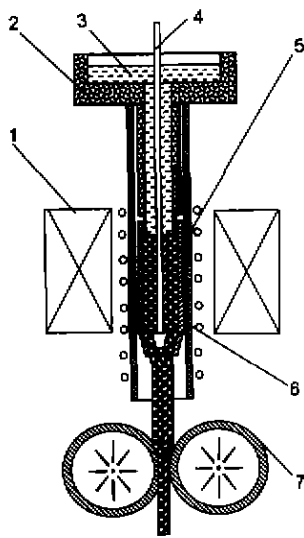


图 1 半固态流变浆料制备和半固态直接轧制示意图

Fig.1 Schematic diagram of semi-solid steel preparation and rheorolling

1 — Electromagnetism stirring coil, 2 — Pouring gate, 3 — Liquid steel, 4 — Bung, 5 — Semi-solid slurry, 6 — Stirring crucible, 7 — Water-cooling roller

实验工艺路线为: 60Si2Mn 和 1Cr18Ni9Ti 的热轧料在感应炉中加热熔化后倒入流变器, 经电磁搅拌形成半固态浆料, 经导流管 (内部有加热保温装置) 进入轧机轧制, 然后水淬, 最后加工试样进行拉伸。拉伸试样的尺寸如图 2 所示。

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

2.1.1 60Si2Mn 拉伸实验 60Si2Mn 拉伸实验是在 MTS 拉伸试验机上进行, 为了便于比较和分析, 我们把一般常规轧制条件下的轧制产品也加工成试样, 进行拉伸实验, 试验温度为 20℃, 测得的数据如表 2 所示。

从拉伸实验结果来看, 半固态 60Si2Mn 轧后的各项性能指标均不如常规轧材, 主要由于 60Si2Mn 半固态浆

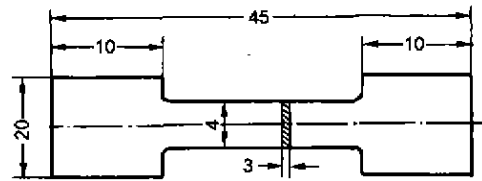


图 2 拉伸试样尺寸

Fig.2 Dimension of tensile sample

表 2 60Si2Mn 拉伸实验参数

Table 2 Experimental parameters of steel 60Si2Mn tensile tested

Sample	Gauge length L_0 , mm	Ultimate force F_b , kN	Ultimate tensile strength σ_b , MPa	Gauge length tensioned L_1 , mm	Elongation δ , %
Conventionally (more passes)	19.79	12.20	994.4	32.40	13.20
Semi-solid (one pass)	19.83	8.38	680.3	21.80	9.56

料的固相率较低 ($f_s=0.3$), 球形固相晶粒少, 细小的枝晶多, 仅经过 1 道次的轧制变形, 轧制产品的组织成分不均匀, 晶粒还比较粗大^[4], 如图 3 所示, 因此轧后材料的抗拉强度和延伸率要明显地比常规热轧 60Si2Mn 的低, 并且表现为明显的脆性断裂。

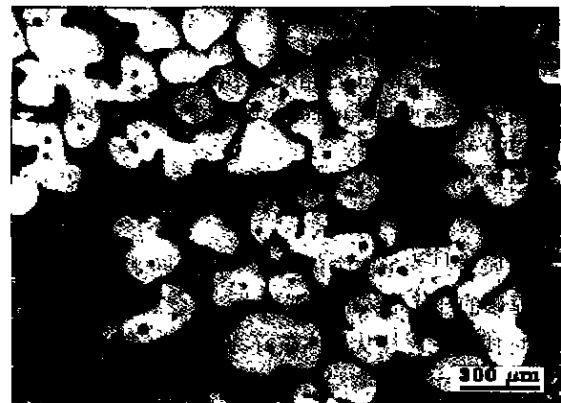


图 3 半固态 60Si2Mn 轧件的室温组织

Fig.3 Room temperature microstructure of semi-solid 60Si2Mn rolled piece

2.1.2 1Cr18Ni9Ti 拉伸实验 为了研究半固态轧件在不同位置的力学性能, 本实验在半固态 1Cr18Ni9Ti 轧件上的不同位置取三块试样 a、b 和 c, 取样位置如图 4 所示, 加工试样尺寸如图 2 所示, 在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行拉伸实验, 实验结果如表 3 所示。

表 3 还列出了普通热轧状态下的 1Cr18Ni9Ti 的力学性能, 由于实验中 1Cr18Ni9Ti 轧制产品的固相率高

($f_s=0.4-0.6$)，晶粒大多为球形或椭球形晶粒，组织成分比较均匀^[5,6]，如图 5 所示，虽然只轧制一道次，但所得到的力学性能要普遍高于普通轧制状态下的力学性能。通过比较发现，在轧件的不同位置，其力学性能不同，a、c 试样的力学性能相差不大，而 b 试样的力学性能要明显高于 a、c 试样的力学性能，尤其是抗拉强度(σ_b)已经达到 1022 MPa，并且试样在塑性变形后的断裂过程中，存在着金属缓慢的撕裂现象，表现为明显的韧性断裂，延伸率为 40%。

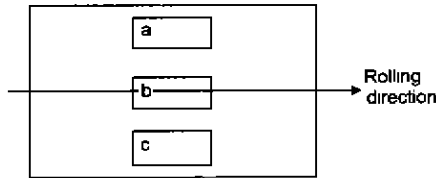


图 4 1Cr18Ni9Ti 拉伸实验取样位置示意图

Fig.4 Sampling positions of 1Cr18Ni9Ti

表 3 1Cr18Ni9Ti 钢半固态轧制后和普通热轧后的力学性能

Table 3 Mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti stainless steels semisolid-rolled and conventionally hot-rolled

Sample	Thermal treatment	Room temperature mechanical properties		
		σ_b , MPa	σ_s , MPa	$\delta\%$
Position a	Water cooling	612	500	16
Position b	Water cooling	1022	480	40
Position c	Water cooling	665	490	27
Conventionally hot-rolled	1100 °C, water cooling	541-790	196-510	40-81

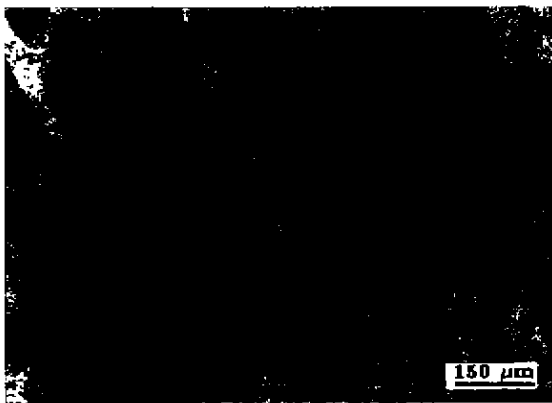


图 5 半固态 1Cr18Ni9Ti 轧后组织

Fig.5 Microstructure of steel 1Cr18Ni9Ti rolled in Semi-solid state

2.2 实验结果分析

实验表明，半固态浆料固相率的高低将直接影响其轧制产品的力学性能。在研究范围内($f_s \geq 0.3$)固相率愈

高，其轧制产品的力学性能整体水平愈高；半固态浆料在轧制过程中，由于固液两相的变形、流动分别进行^[7,8]，固相球形颗粒大多聚集在轧件的中部，而液相则主要流向轧件的边部，造成轧件宽度方向上组织分布的不同^[9]，即轧件中部的初生球形固相颗粒多，边部相对少一些，从而导致轧件在不同区域力学性能上的差异。这说明半固态浆料仅经过 1 道次的轧制变形是不够的，需要多道次的轧制变形，细化晶粒，均匀组织，获得良好的机械性能，以达到产品质量的要求。

根据传统的塑性变形理论，在冷变形条件下，金属及合金的塑性变形主要是晶内变形，晶间变形只起次要作用。但从变形机理来说，仍然是滑移和孪生^[10]。当合金发生塑性变形时，滑移首先发生于较弱的相中；如果较强相的数量少，则变形基本上是在较弱的相中进行。对于半固态浆料轧制产品来说，其内部组织中的初生球形奥氏体固相颗粒经过轧制变形后，通过组织观察发现，仍然保持为球形或椭球形；而其中的液相成分凝固成细小的枝晶，分布在固相颗粒的周围(如图 3, 5 所示)。由于只经过 1 道次的轧制变形，半固态轧制产品的试样在拉伸变形过程中，其宏观组织可以近似地看作铸态组织。金属的塑性变形首先发生在较弱的相中，细小的枝晶组织先发生塑性变形，即金属发生屈服，若半固态浆料的初生固相少，那么拉伸试样的力学性能主要由体积分数占大多数的细小枝晶相的存在情况所决定，一般来说枝晶相属于硬脆相，塑性低，60Si2Mn 拉伸试样就属于此种情况，其力学性能明显地比常规热轧条件下轧制产品的低；当初生固相体积分数达到一定数值时(以 1Cr18Ni9Ti 为例)，其塑性变形机理发生了改变，变形仍然首先发生在枝晶相中，但由于其含量少，不起主导作用；同时枝晶相在其长大过程中受到固相颗粒的阻碍作用要比 60Si2Mn 的明显，枝晶粒比较小，有利于提高金属的塑性。随后变形很快过渡到固相颗粒间的晶间变形，即晶界滑动^[11]，相邻晶粒沿公共界面发生相互移动、相互转动以及相邻晶粒的换位等。由于半固态轧制产品其特有的球形或椭球形晶粒(见图 3, 5)，与传统的多边形晶粒相比，改善了晶间变形条件，晶粒的滑移和孪生更易于进行，提高了轧制产品的塑性，当变形量达到一定程度时，塑性变形过渡到较强相——初生固相颗粒的变形。球形或椭球形的初生固相颗粒首先发生整体性的拉伸变形，然后是固相颗粒内部的晶内变形和晶间变形，与传统的多边形晶粒相比有利于发生塑性变形，最后与其它晶粒相互协调变形直至试样断裂，因此半固态轧制产品的塑性变形过程可以简化为如下模式：枝晶相的晶内变形——初生固相颗粒间的晶间变形——初生固相颗粒的整体变形——初生固相颗粒内部的晶内和晶间变形。从上面的论述可知，固相率愈高，诸多有利于塑性变形的条件越明显，金属的塑性愈高，抗拉强度愈高，但由于变形都是首先发生在枝晶相内，因而固相率的高低并不影响试样的屈服变

形,即屈服点大致是相同的(见表3)。以1Cr18Ni9Ti为例,其力学性能与固相率的关系如图6所示。

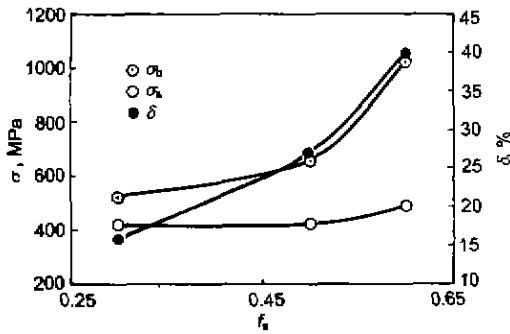


图6 σ_b 、 σ_s 和 δ 与固相率 f_s 的关系曲线

Fig.6 Relationships between σ_b , σ_s , δ and solid fraction f_s

3 结论

(1) 半固态钢铁材料轧制产品的力学性能随着固相率的增加而提高;由于轧制过程中固液两相流动和变形的的方式不同,会发生不同程度的液固相偏析,使轧制产品的组织及性能不均匀,轧件中间区域比轧件边部的组织及性能要好一些,并且需要多道次的轧制变形,加以消除这种不均匀现象;

(2) 半固态轧制产品在进行拉伸变形过程中,随着固相率的不同,其塑性变形机理也略有区别,固相率愈高,初生固相颗粒的晶间变形和晶内变形在整个塑性变形过程中所占的比例愈大,但对轧制产品的屈服强度影响不大,主要影响轧制产品的抗拉强度、延伸率和断裂类型。

参考文献

- [1] Mayerhofer J. In: Chiarmetta G L, Rosso M eds, *Proceedings 6th International Conference on Semi-solid Processing of Alloy and Composites*, Materials Science and Chemical Engineering Department, Italy, Turin: 2000: 195
- [2] Miwa K, Kawamura S. In: Chiarmetta G L, Rosso M eds, *Proceedings 6th International Conference on Semi-solid Processing of Alloy and Composites*, Materials Science and Chemical Engineering Department, Italy, Turin: 2000: 279
- [3] Xie S S, Huang S H. *Technique and Application of Semi-solid Metal Processing*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999: 2
(谢水生, 黄声宏. 半固态金属加工技术及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 2)
- [4] Chen X Y, Mao W M, Zhong X Y. *Mater Mech Eng*, 1998; 22(4): 25
(陈晓阳, 毛卫民, 钟雪友. 机械工程材料, 1998; 22(4): 25)
- [5] Lapkowi W, Sinczak J, Rusz S. *J Mater Technol*, 1997; 63: 260
- [6] Kang C G, Chei J S. *J Mater Technol*, 1998; 73: 251
- [7] Owasaki H, Mori T, Mabuchi M, Higashi K. *Acta Mater*, 1998; 46: 6351
- [8] Chei J S, Hyung J P. *J Mater Technol*, 1998; 82: 107
- [9] Jiang P, He X M, Zhang X F. *Hot Rolling Work*, 1999; (1): 42
(蒋鹏, 贺小毛, 张秀峰. 热加工工艺, 1999; (1): 42)
- [10] Yu H Q, Chen J D. *Metal Plastic Forming Theory*. Beijing: Machinery Industry Press, 1999: 15
(俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理. 北京: 机械工业出版社, 1999: 15)
- [11] Chen P Q. *Microstructure Superplasticity*. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1988: 112
(陈浦泉. 组织超塑性. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988: 112)