

• 工程应用 •

(20 1.1h - 123)

用高速钢 W18Cr4V 扁锭锻造 方坯时内部裂纹的研究

A Research on Internal Crack in Square Billet
Forged from the Flat Ingot of Highspeed Steel W18Cr4V

吕二乐

Lu Erle

陈红兵

Cheng Hongbing

(重庆特钢集团公司锻钢厂, 重庆, 630032)

周杰

Zhou Jie

苏长清

Su Changqing

金伟东

Jin Weidong

(重庆大学机械工程二系)

TG317

TG317.0.19<

A 摘要 在微机上采用刚-粘塑性有限元分析法对高速钢锻造过程进行了模拟研究, 发现纵向裂纹主要是由于锻造过程中双鼓形的存在, 使锻平时横截面内出现较大横向拉应力, 其数值超过坯料强度而形成的。据此提出了合理工艺参数和改进锻造工艺的措施, 有限元分析结果与实际相符。

关键词 高速工具钢; 高合金钢; 锻造; 裂纹; 有限元法/扁锭锻造; 钢-粘塑性有限元法

高速钢

中国图书资料分类法分类号 TG316.192; TG317; TG301

ABSTRACT Forged from the flat ingot of the high-speed steel, W18Cr4V, the square billet was tested by ultrasonic. In the hurted-wave, sliced sheet, where a kind of longitudinal small cracks whose form and distribution had some definite rule could be found. Different to the forging cracks introduced in the traditional high-speed steels technology, the cracks were difficult to be explained by that theory. With the forging process of the high-speed steels having been simulated and researched by the rigid-viscoplastic FEM in the microcomputer, the reason why cracking may occur at the center area of the billet is the existence of the double duling in the forging process. When it was forged to plat, high cross tensile stress in the billet developed and exceeded the strength of the billet. Acoordingly, the reasonable parameters and the steps made the forging technology better were put forward, and the results analyzed by FEM were agreeable to practical results.

KEYWORDS high-speed tool steels; high alloy steels; forging; cracks; finite element analysis / flat ingot forging; rigid-viscoplastic FEM

• 收文日期 1994-09-01

0 引言

为改善高速钢碳化物不均匀性,从 60 年代开始,我国各特殊钢厂就在冶炼、锻造等各个方面进行了大量的试验研究,许多成果已用于实际,其中采用扁锭改善钢锭铸态组织来提高钢材质量,是一项有效措施。多年生产实践证明,扁锭通过加工确能获得满意的碳化物分布。但是,扁锭也因其形状特点,给锻造加工带来不利,即当从其宽度方向锻打时,锻透性差,容易开裂,成坯率低。

除上述缺点外,重庆特钢集团公司锻钢厂,还在“525”型扁锭锻成的大尺寸方坯内部发现一种形态和分布有一定规律的小裂纹,此种裂纹与传统高速钢工艺理论中的锻造裂纹不同,将有这种缺陷的大方坯二次加工成小方坯后,裂纹能够焊合而消失。在现有文献中,找不到有关这种缺陷的资料介绍,我们认为这是高速钢扁锭开坯锻造在一定条件下产生的一种特有内部缺陷。搞清楚其产生原因与机理,对于指导生产实际和丰富锻造工艺理论,具有重要实用价值和理论意义。为此,采用刚-粘塑性有限元分析法,进行了本文的分析研究。

1 锻造工艺与裂纹特征

1.1 裂纹特征

笔者研究的内部裂纹缺陷,产生在用 W18Cr4V 钢“525”型扁锭锻成的 170 mm 方坯上。

1.1.1 裂纹的宏观特征

170 mm 方坯作超声波控伤,在伤波处切取的横向低倍组织试片上观察到的裂纹,其数量一般为几条,多则十余条,长度一般为 3~10 mm,且分布在方坯断面距心部约 1/4 边长范围内,方向趋向于与扁锭窄面的一边平行并沿纵向扩展。此为该缺陷的典型特征。后面称此种裂纹为纵向裂纹,如图 1 所示。

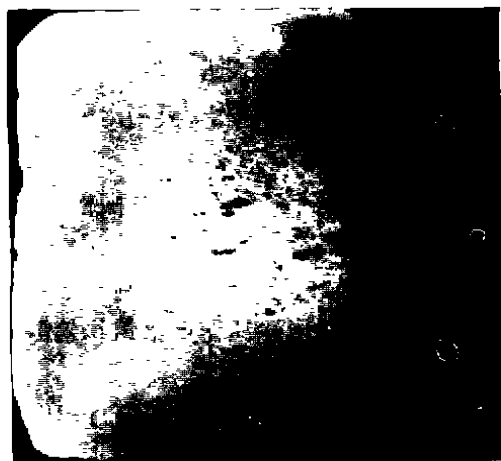


图 1 横向低倍组织试片上观察到的纵向裂纹分布



图 2 纵向裂纹的微观组织特征($\times 100$)

1.1.2 裂纹的微观特征

在有裂纹的低倍组织试片上切取金相试样,显微镜下观察到裂纹处均有粗大的共晶碳化物,即裂纹是沿共晶碳化物粗大组织裂开的。如图 2 所示。

1.2 锻造工艺

1.2.1 “525”型扁锭的主要参数

主要尺寸:扁锭头部宽度 \times 厚度 $=390\text{ mm}\times190\text{ mm}$,扁锭尾部宽度 \times 厚度 $=350\text{ mm}\times150\text{ mm}$,锭身长 800 mm 。见图 3。

表面形状:扁锭四方表面均为平面。

1.2.2 锻造主要工艺参数

扁锭在连续式加热炉内加热,加热时间 $>6\text{ h}$,加热温度 $1180\sim1230^\circ\text{C}$,开锻温度 $>1140^\circ\text{C}$,停锻温度 $\geq 900^\circ\text{C}$ 。在 3 吨锤上采用两火,即头、尾各一火锻成 170 mm 方坯。

1.2.3 锻造变形特点

由于“525”型扁锭的厚度与锻成方坯的边长差异不大,整个锻造过程以沿扁锭宽度方向打击为主。由于高速钢变形抗力大,开始锻造时锻透性很差,心部变形很小,加上钢锭两侧面为平面,变形中很容易出现“双鼓”形状,如图 4(a)所示,翻面将“双鼓”锻平后,如图 4(b)所示,再从宽度方向锻打,“双鼓”再次出现,再次翻面锻平,直至锻成 170 mm 方坯,如图 4(c)所示。

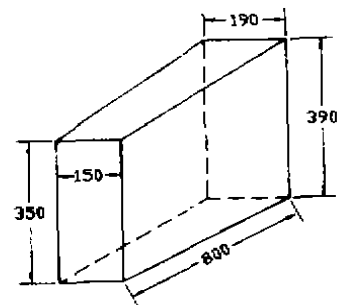


图 3 “525”型扁锭结构示意图

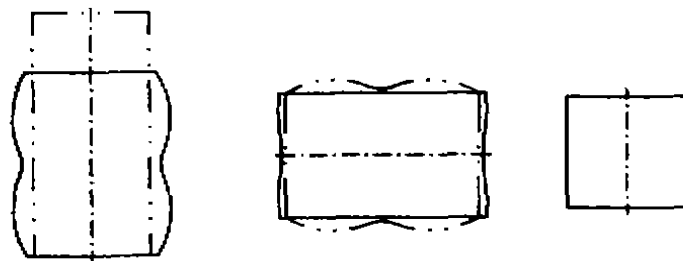


图 4 “525”型扁锭锻造过程横断面示意图

1.3 裂纹焊合

为了摸索裂纹缺陷对二次开坯质量带来的影响,取 3 炉经逐只作超声波探伤证明有裂纹的 170 mm 方坯共 77 只,作二次开坯试验,二次坯尺寸为 72 mm 方坯,其中一炉(炉号 64934)共 25 只采用锻造开坯,另两炉(炉号为 64943, 64938)共 52 只采用轧制开坯,试验工艺一律按正常生产工艺制度执行。经过二次坯逐只作超声波探伤并抽作低倍组织检验,结果未发现任何缺陷, 170 mm 方坯中的内部裂纹全部焊合。

根据上述高速钢锻造工艺,在微机上采用刚-粘塑性有限元法,对全过程进行模拟研究。

2 刚-粘塑性有限元法的理论及技术

2.1 刚-粘塑性有限元法简介^[1,2]

刚-粘塑性有限元法是求解塑性成形问题的一种计算机数值模拟法,能对金属塑性成形过程进行全面的分析,可有效地提供材料变形力学方面的详细信息,使过去传统的依靠定性分析和实践经验的工艺分析转变为定量的数值分析,大大节约了时间和实验费用,同时可以获得在实验过程中所不能获得的许多有用的信息。

2.2 刚-粘塑性材料的本构关系^[1,2]

对于金属成形问题,材料的本构关系为:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{2}{3}(\bar{\sigma} / \dot{\bar{\epsilon}})\dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

刚-粘塑性材料真实流动应力 $\bar{\sigma}$ 受变形程度($\bar{\epsilon}$)、应变率($\dot{\bar{\epsilon}}$)、温度(T)、材料性质(H)等一系列因素的影响,可表示为:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T, H) \quad (2)$$

Backofen 粘塑性模型^[1,2,5]为:

$$\bar{\sigma} = C(\dot{\bar{\epsilon}})^n \quad (3)$$

流动应力 $\bar{\sigma}$ 现采用 Backofen 粘塑性模型,该模型适用于高于再结晶温度的热成形工艺分析。

2.3 刚-粘塑性材料的变分原理^[1,2]

$$\delta_s = \delta \left\{ \int_V E(\dot{\bar{\epsilon}}) dV + \int_V \frac{1}{2} K \dot{\bar{\epsilon}}^2 dV - \int_{S_F} F(u) dS \right\} = 0 \quad (4)$$

式中 E ——功函数 $E(\dot{\bar{\epsilon}}) = \int_0^{\dot{\bar{\epsilon}}} \bar{\sigma} d\dot{\bar{\epsilon}}$

K ——引入材料体积不变条件的惩罚因子,一般为 $K = 10^5 \sim 10^7$;

$F(u)$ ——摩擦力边界条件,一般为:^[2]

$$F(u) = -\frac{2}{\pi} mk \left\{ \arctg \left(\frac{V_r}{A} \right) \right\} \quad (5)$$

V_r ——接触面上材料与横具的相对速度;

A ——比模具速度小几个数量级的正常数,一般为 $A = 10^{-3} \sim 10^{-5}$;

k ——剪切屈服极限。

经单元离散化并采用 Newton-Raphson 迭代法,式(4),(5)可成为以节点速度增量 Δu_i 为未知数的、在初始速度场 u_0 附近的线性方程组:

$$\left[\frac{\partial \pi}{\partial u_i} \right]_{u=u_0} + \left[\frac{\partial^2 \pi}{\partial u_i \partial u_j} \right]_{u=u_0} \Delta u_j = 0 \quad (6)$$

简写为:

$$[K] \{\Delta u\} = \{F\} \quad (7)$$

式中 $[K]$ 、 $\{\Delta u\}$ 、 $\{F\}$ ——整体坐标系中的刚度阵、结点速度增量列阵和载荷阵。

对(7)式进行反复迭代,直至速度误差范数小于预定值(10^{-4})。

本文首先在微机上建立了刚-粘塑性有限元法模拟系统,并使其与 Auto CAD 系统接口,这为计算机数值模拟技术的微机化提供了方便的条件。

3 高速钢锻造过程的刚-粘塑性有限元模拟

3.1 模型简化

高速钢("525"型)扁锭沿宽度方向锻打时,相对于砧子的进给量较小,坯料变形主要沿纵向(长度方向),横向(垂直于长度方向)展宽量相对很小,故扁锭沿宽度方向打击时其变形可简化为沿纵向的平面变形。

扁锭压下一一定程度后,如图 4(a) 所示侧面出现较大双彭形,翻转 90° 锻平时,砧子与坯料的横向接触宽度 B 相对于纵向接触长度 C 较小,即 $B \ll C$,根据最小阻力定律,变形量 $\Delta B \gg \Delta C$,故锻平时坯料的变形可简化为沿横断面的平面变形。直到锻平快结束时, B 与 C 数值接近,变形才非主要沿横向。

3.2 "525"型扁锭锻造过程模拟条件

采用刚-粘塑性有限元法模拟"525"型高速钢扁锭的锻造过程,理论分析条件为:摩擦因子取 $0.15 \sim 0.30$,假设为等温成形(取温度为 1000°C),材料流动应力

$$\bar{\sigma} = C(\dot{\bar{\epsilon}})^m \quad (8)$$

式中 C 、 m ——材料因子,与等效应变 $\bar{\epsilon}$ 有关, C 、 m 值见下表^[6]。

C 和 m 值 (温度 1000°C)

$\bar{\epsilon}$	$C/(\text{MN}/\text{m}^2)$	m	$\bar{\epsilon}$	$C/(\text{MN}/\text{m}^2)$	m
0.10	261.8	0.072	0.50	235.9	0.102
0.30	266.7	0.087	0.70	195.3	0.124

3.3 模拟结果分析

图 5 为"525"型扁锭沿宽度方向打击时纵剖面初始网格及其应力分布。从图(b)、(c)可知,锤击处坯料心部区域 $\sigma_x > 0$, $\sigma_y < 0$,但当坯料送进到不同位置时,坯料该部的 σ_x 方向相反,且随着坯料宽度的降低, σ_x 值大大减小。图(d)为 σ_x 分布图,除表面及端部有拉应力外,心部区域 $\sigma_x < 0$,即表示沿断面方向应力为负,说明扁锭沿宽度方向打击时不会形成如图 1 所示的垂直于打击方向的纵向裂纹,而只可能产生横向裂纹。

图 6 为扁锭压下一一定程度后翻转 90° 时的初始网格及锻平时的应力分布。从图(b)可知断面距中心约 $1/4$ 边长范围内 $\sigma_x > 0$,且绝对值较大,其拉应力区域在整个锻平过程中变化不大。考虑到坯料前次变形主要沿纵向,横向展宽量很小,横向性能较纵向性能差,特别是心部区域组织性能差、粗大共晶碳化物未能完全打碎,其强度极低,塑性、韧性几乎等于零^[6],故此次锻平时在较小拉应力下即可形成平行于扁锭窄面(厚度方向)的纵向裂纹。裂

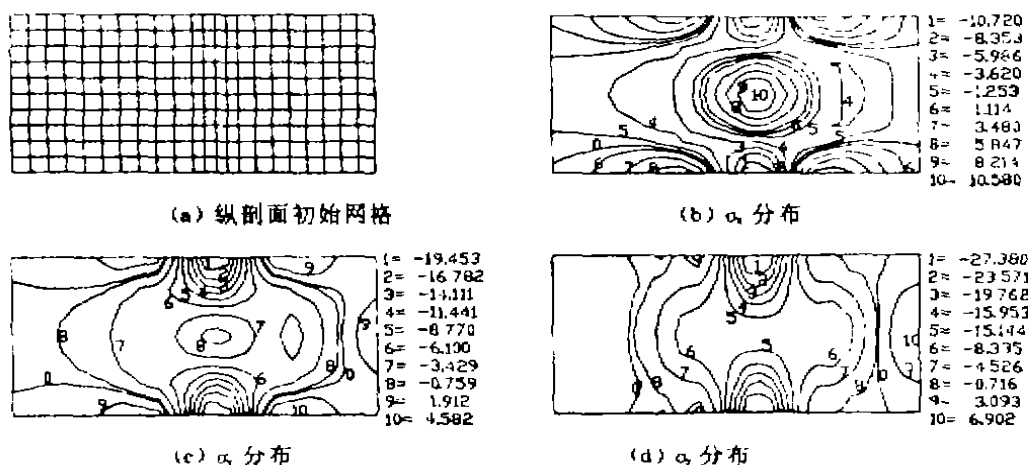


图5 宽度方向锻造时纵剖面初始网格及应力分布

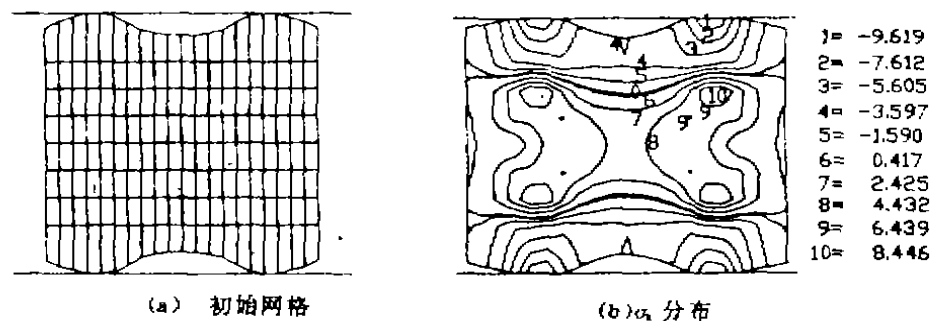


图6 翻转锻平时断面内初始网格及应力分布

纹方向和分布范围恰好与图1所示的裂纹基本一致。从而很好地解释了纵向裂纹的形成原因。

由此可见,纵向裂纹主要是由于双鼓形的存在,锻平时出现横向拉应力,其数值超过坯料强度而形成的。

在不同工况下,锻平时坯料中部横向拉应力的数值亦不同。模拟结果表明,双鼓形(凹度)越大,锤击速度越高,则横向拉应力越大,横向拉应力分布范围越大,形成裂纹趋向亦越大。这在工艺上就要求尽可能避免双鼓形产生,一旦形成则应立即翻转 90° 锻平,且在锻平时应轻击。

3.4 裂纹焊合条件分析

3.4.1 裂纹焊合条件^[3,4,5]

为达到破碎钢锭铸态组织,锻合内部裂纹等孔穴性缺陷,必须具备以下基本条件:1) 有足够大的变形程度,即足够的等效应变 $\bar{\epsilon}$ 量;2) 缺陷周围为负的静水压力状态,即应力球张量 $\sigma_m < 0$;3) 较高的锻造温度;4) 缺陷表面未被氧化;5) 不存在非金属夹杂。对于高速钢锻造时的裂纹焊合问题,条件3)、4)、5)自然满足。

3.4.2 锻成170 mm方坯时内裂纹焊合性分析

由于扁锭平均厚度为170 mm,锻造过程中厚度方向实际展宽量很小,故锻成170 mm方

坯时,厚度方向压下量始终很小,即应变量很小,且应力球张量 $\sigma_m > 0$,不能满足焊合条件。所以锻至 170 mm 方坯时裂纹将残留于方坯中。

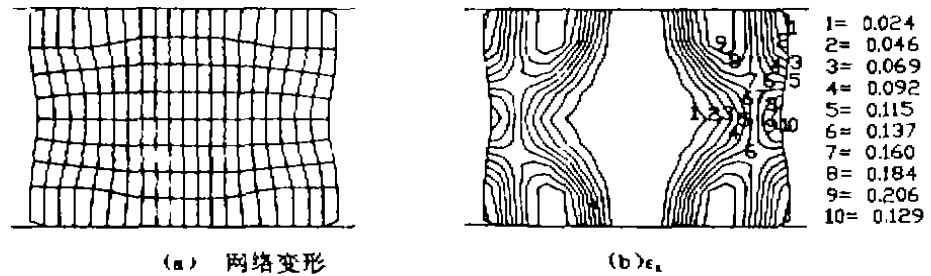


图 7 锻平结束时沿横断面网格及应变分布

从图 7 所示锻平结束时的网格及应变分布可知,心部区域横向累积应变 ϵ_x 很小,说明沿此方向锻透性差,共晶碳化物不能完成击碎。为焊合已形成的内裂纹、破碎共晶碳化物、获得理想晶粒尺寸,一般变形程度应大于 25%^[7]。对于平均厚度为 170 mm 的扁锭而言,沿厚度方向压下量 Δ 应大于:

$$\Delta \geq B \times 25\% = 170 \times 25\% = 42.5 \text{ mm} \quad (9)$$

式中 B ——扁锭平均厚度。

考虑到实际锻造过程中厚度方向有一定的展宽量,约为 12.5 mm,则沿厚度方向还应有约 30 mm 的压下量。

因此,为避免纵向内裂纹发生,可将平均厚度为 170 mm 的扁锭锻成 ≤ 140 mm 的方坯,或将扁锭平均厚度加大到约 200 mm 锻成 ≤ 170 mm 的方坯,这样按正常锻造工艺就能保证较高成坯率。

3.4.3 二次开坯内裂纹焊合性分析

从 170 mm 方坯二次开坯锻造到 72 mm 方坯时,不论是高度方向还是宽度方向,都有较大压下量,单边变形程度约为 58%,且锻造过程中不会出现双鼓形,锻透性好,在翻转过程中原裂纹区域应力方向和应力分布发生了显著变化,应力 σ_x 较小, $\sigma_x \ll 0$,应力球张量 $\sigma_m \ll 0$,在高温下完全满足焊合条件。故方坯锻至 72 mm 时内部裂纹将全部焊合。

3.4.4 凸度扁锭锻造过程分析

由前述可知,为锻得 170 mm 方坯,需改变扁锭结构,增加扁锭厚度,保证厚度方向有足够的压下量,即使因有一定的双鼓形而产生裂纹,锻平到位时也可将已形成的裂纹焊合。

但单纯增加整个扁锭厚度对铸态组织不利,考虑到上述锻造工艺特点,为避免双鼓形产生,扁锭应铸出一个凸度,即如图 8 所示的单鼓形扁锭。此扁锭沿宽度方向打击时侧面凸度可补偿双鼓形变形区的凹部,从而避免了在扁锭侧面产生较大双鼓形。又因扁锭中部厚度加

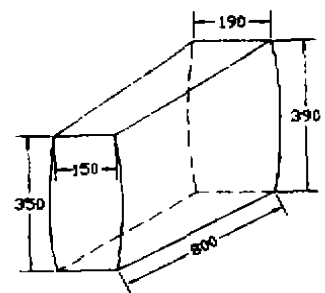


图 8 凸度型扁锭结构示意图

大, 锻平到所需方坯尺寸时保证了厚度方向有足够的压下量, 应力、应变分布在锻造过程中都有明显好转, 对击碎共晶碳化物有利, 在高温下满足裂纹焊合条件, 从而避免了纵向裂纹的形成。

由此可见, 为锻得边长为 170 mm 方坯, 扁锭需铸出具有侧凸面的单鼓形, 其单边凸度平均应大于 15 mm。通过分析, 扁锭单边凸度 T 与扁锭厚度 B 和锻造过程中扁锭腰部沿厚度方向实际展宽度 Z 的关系为:

$$T \geq 0.5 \times (B \times 25\% - Z) \quad (10)$$

4 结 论

通过对高速钢 W18Cr4V“525”型扁锭锻造过程进行分析, 由模拟结果可得下列结论:

1) 高速钢 W18Cr4V 锻坯纵向内裂纹的产生原因是由于扁锭在锻造过程中侧面出现双鼓形, 当翻转 90°锻平时因较大横向拉应力超过坯料强度而形成。

2) 在锻造过程中影响产生纵向内裂纹的主要因素有: 出现双鼓形的大小、锤击速度和成坯尺寸。

3) 利用“525”型扁锭锻造时, 为保证较高的成坯率, 可将扁锭锻成 ≤ 140 mm 的方坯。

4) 为锻得 170 mm 合格方坯, 需改变扁锭结构, 增加扁锭厚度, 最好扁锭铸出具有侧凸面的单鼓形, 单边凸度平均应大于 15 mm, 通式为: $T \geq 0.5 \times (B \times 25\% - Z)$ 。

5) 通过改变扁锭结构, 实际生产结果表明无内裂纹产生。

参 考 文 献

- 1 Altan T. Process Simulation of Hot Die—Forging Process. Advanced Technology of Plasticity, 1988, 11(3): 37~41
- 2 Kobayashi S, Oh S I, Altan T. Metal Forming and Finite Element Method. New York: Oxford University Press, 1988. 180~300
- 3 王祖唐. 大钢锭焊合内部缺陷的工艺性研究. 大型铸锻件, 1984, (3): 27~30
- 4 任猛. 大钢锭内部孔洞性缺陷锻合过程的数值模型和实验研究: [学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 1987
- 5 [美]阿尔坦著; 陆索译. 现代锻造. 北京: 国防工业出版社, 1984. A293
- 6 张志文. 锻造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1983. A361~372
- 7 汪大年. 金属塑性成形原理. 北京: 机械工业出版社, 1982. A197