

综述

## 钢材混晶组织缺陷的形成机理及控制策略

郝彦英<sup>1</sup>, 孙万利<sup>2</sup>, 张朝磊<sup>2</sup>, 刘运娜<sup>1</sup>, 刘献达<sup>1</sup>, 蔡纪升<sup>1</sup>

(1. 河钢集团石家庄钢铁有限责任公司, 河北 石家庄 050031; 2. 北京科技大学 碳中和研究院, 北京 100083)

**摘要:** 混晶是钢材极易产生的一种内部组织缺陷, 对于钢材的微观组织和综合力学性能有很大损害。消除混晶缺陷, 实现组织均匀化控制是提升钢材综合性能的必然要求。首先明确了混晶的概念及其定量分析评价方法; 其次结合已有的研究基础从钢材变形和加热过程出发揭示了混晶组织缺陷的形成机理, 依据成因将其分为4类混晶组织以阐述混晶的特征, 包括热变形时部分再结晶引起的混晶、低于临界变形量形变引起的混晶、组织均匀的钢材二次加热后出现的混晶和加热时异常不均匀长大引起的混晶; 最后针对性地提出了有效控制策略, 对于钢材生产过程提供理论性指导。

**关键词:** 混晶; 组织缺陷; 部分再结晶; 晶粒异常长大; 热变形

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.001

**中图分类号:** TG142.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0001-06

## Formation mechanism and control strategy on mixed grain structure defect for steel

Hao Yanying<sup>1</sup>, Sun Wanli<sup>2</sup>, Zhang Chaolei<sup>2</sup>, Liu Yunna<sup>1</sup>, Liu Xianda<sup>1</sup>, Cai Jisheng<sup>1</sup>

(1. HBIS Group Shijiazhuang Iron and Steel Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China;

2. Institute for Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Mixed grain is an internal microstructure defect that is easily produced in steel, which has great damage to the microstructure and comprehensive mechanical properties of steel. Eliminating mixed grain defect and realizing microstructure homogenization control are the inevitable requirements for improving the comprehensive performance of steel. Therefore, firstly, the concept of mixed grain and its quantitative analysis and evaluation method were clarified. Secondly, the formation mechanism of mixed grain structure defect was revealed from the deformation and heating process of steel combined with the existing research basis. Then, according to the causes, the characteristics of mixed grain were described in four kinds of categories, including the mixed grain caused by the partial recrystallization during thermal deformation, the mixed grain caused by the deformation below the critical deformation amount, the mixed grain after reheating of steel with uniform structure and the mixed grain caused by the abnormal uneven growth during heating. Finally, the effective control strategies were proposed to provide theoretical guidance for steel production process.

**Key words:** mixed grain; structure defect; partial recrystallization; grain extraordinary growth; thermal deformation

在合金成分一定的情况下, 微观组织决定钢材的宏观性能。钢质追求洁净化、均质化, 组织追求细化、均匀化, 成为提升钢材综合性能的基本途径。混晶组织是钢材内部一种十分常见的组织缺陷。伴随着人们对钢铁材料的微观组织与力学性能要求的日益提高<sup>[1]</sup>, 研究混晶组织的定量评价、形成机理及控制策略显得愈发重要。

钢铁材料混晶组织形成的原因众说纷纭。合金钢材混晶组织的形成往往是由于材料内部化学成分的不均匀分布而造成的<sup>[2-3]</sup>, 材料各部分晶粒受这些质点的阻碍作用不同<sup>[4]</sup>, 使晶粒长大不连续。如合金碳化物优先形核且在珠光体中由于择优取向而不均匀分布, 取向相近的晶粒团在后续晶粒长大过程中消失、合并而形成大晶粒, 由此形成混晶组织<sup>[5]</sup>。此外, 不同的合金元素的细化晶粒作用有所差异, 原始钢锭发生偏析现象进而导致各区域成分产生差异时, 各微区均是相对独立的部分, 其中晶粒的种类及长大趋势均有差异, 并且很难通过热处理手段消除<sup>[6]</sup>。也有研究表明, 混晶组织的形成与热变形工艺制度有关。热变形过程中的变形温度<sup>[7]</sup>和

收稿日期: 2022-10-01; 修订日期: 2023-01-06

基金项目: 河北省重大科技成果转化专项项目 (22281004Z);  
河钢集团重点科技项目计划 (HG2022114)

作者简介: 郝彦英 (1971-), 女, 硕士, 教授级高级工程师

E-mail: cnhao1999@126.com

通信作者: 张朝磊 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhangchaolei@ustb.edu.cn

变形程度<sup>[8-10]</sup>均是决定钢材再结晶情况的重要考量因素。较低温度下,变形量起主导作用,大变形量时会出现严重混晶<sup>[11]</sup>;在较高温下,变形量较小则无法发生完全再结晶,导致各微区晶粒间的能量发生波动,进而导致晶粒长大程度不同,形成混晶组织。这些混晶组织遗传至最终的淬火环节,引起更加明显的晶粒度异常现象<sup>[12]</sup>。此外钢材发生塑性形变时,除去晶粒尺寸差异的影响<sup>[13]</sup>,晶体之间也存在着各向异性,微观上表现为各晶体所受的应力不一致,宏观上表现为滑移系上的分应力差异,处于有利取向的晶粒将首先发生滑移变形,进而导致晶粒的受力程度不同,出现混晶现象<sup>[2]</sup>。

本文明确了混晶组织的概念,梳理了其定量评价指标,归纳总结了 4 类混晶情况的形成机理及控制策略,探讨混晶缺陷的消除对钢材质量提升的重要作用。

## 1 混晶组织的概念及其定量评价

晶粒是钢铁材料的“细胞”,其与钢材性能和失效密切相关。晶粒大小及其均匀性是表征金属材料组织好坏的重要定量指标,一般晶粒度的级别越高,材料越好。首先必须要指出的是,钢材的晶粒并不是大小一致的。通常,晶粒大小符合正态分布规律,存在一定的不均匀性。只有这种不均匀性明显超出正常程度时,才会被判定为异常,即出现混晶组织缺陷。混晶,即大小极不均匀的晶粒混杂在一起,一般主要是指钢在奥氏体化完成后,奥氏体晶粒大小极不均匀的现象<sup>[14]</sup>,如图 1b 所示。其英文可译为“mixed grain”或“mixed grain structure”,不可译为“mixed crystal”,因为存在差异的并不是晶体或晶体结构。

如果在高级别晶粒的区域中混入低级别的晶粒,就会拉低金属材料整体性能,低级别晶粒所占比例越大,材料的整体性能越不稳定。一般情况下,晶粒度相差 3~4 级的晶粒同时出现在组织当中时,就认为其发生了混晶。当低级别晶粒所占比例超过 10% 时,就不得不重视其可能造成机械零件的早期失效问题。混晶缺陷未得到有效控制并遗传至最终组织后,将会使得材料的强度、塑性及韧性等综合力学性能大幅度降低<sup>[15]</sup>,材料的服役性能受到较大影响。

工业生产时,一般采用晶粒度极差定量评价晶粒大小的不均匀程度。一般以相差 3~4 级晶粒度的组织作为主要判断标准。JIS G0551:2020<sup>[16]</sup>定义了混晶组织是在一定视场内相对于整体而言晶粒度级

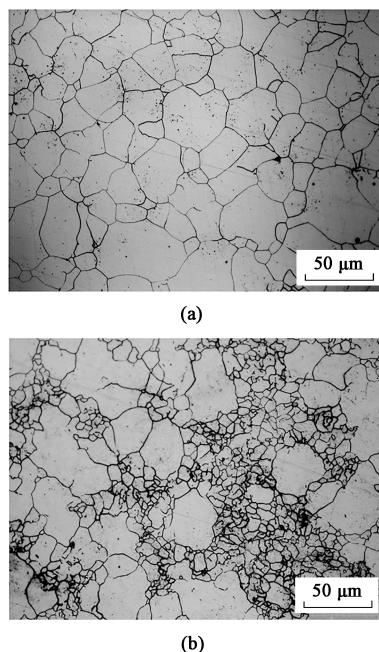


图 1 原奥氏体晶粒

(a) 均匀晶粒 (b) 混晶

Fig. 1 Prior austenite grains

(a) Uniform grain (b) Mixed grain

别差 $\geq 3$ 级的晶粒出现最多、且占面积的 20% 以上的组织。与此同时,混晶组织的特征因钢材成分、规格等不同而有所区别,具体钢种不同,要求也不尽相同。一些要求更为严格的钢种,晶粒度相差 2 级的晶粒同时出现在组织中时,即认为发生了混晶。国内外关于混晶组织的具体评定方法大体相同,GB/T 6934—2017<sup>[17]</sup>指出遇到混合晶粒度时,应单独报告各种晶粒尺寸及其所占面积百分比。

除晶粒度极差以外,还可以用晶粒尺寸的方差系数和不均匀因子来定量评价晶粒大小的不均匀程度,分别如式 (1) 和式 (2) 所示:

$$S = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N}}}{\bar{x}} \quad (1)$$

式中:  $S$  为方差系数;  $x$  为晶粒尺寸;  $\bar{x}$  为平均晶粒尺寸;  $N$  为晶粒个数。

$$n = \frac{x_{\max}}{\bar{x}} \quad (2)$$

式中:  $n$  为晶粒不均匀因子;  $x_{\max}$  为最大晶粒尺寸。

方差系数越大,晶粒大小的均匀性越差,正常晶粒的方差系数为 0.5 左右,正常晶粒的不均匀因子一般为 3~4。上述 3 种方法均是对混晶组织的定量分析,需根据具体的要求进行相应选择。

## 2 混晶组织的成因、分类及控制

在明确混晶组织成因的基础上, 进行科学的分类, 对于其有效控制具有重要意义。钢材生产及使用过程中产生的混晶现象与其轧制和锻造等加工工艺、热处理工艺均有关系。因此, 可以通过选用最为合理的热处理工艺以及改变热变形方式来改善混晶程度<sup>[18]</sup>。依据混晶的成因可分为以下4类。

### 2.1 热变形时部分再结晶引起的混晶

钢材热变形时, 形变条件的不同将使得再结晶状态不同。在变形量(取决于坯型、成品尺寸、道次变形量分配等)、变形速率(取决于变形量、轧速等)一定的条件下, 从低温到高温, 依次为完全未再结晶区、部分再结晶区、完全再结晶区, 如图2所示, 其中,  $A_{r3}$  为冷却时奥氏体向铁素体转变的开始温度。

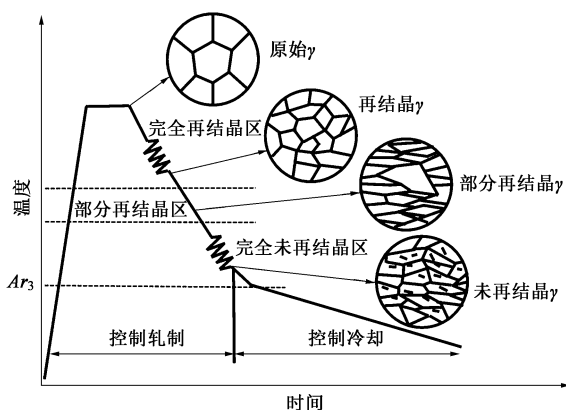


图2 “避免部分再结晶区轧制” 控轧示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rolling control for "avoiding partial recrystallization zone rolling"

通常, 钢材热变形均在完全再结晶温度区内进行, 通过多轮次的再结晶细化、均匀化组织<sup>[19]</sup>。在特殊情况下, 针对特定钢种通过低温轧制实现完全未再结晶温度区控轧, 采用亚动态再结晶等实现组织细化甚至超细化。钢材热变形过程中内外冷速不

一致, 外层冷却较快, 临界变形量较大, 易发生部分再结晶, 而内部冷却速度受到影响, 慢速情况下易发生完全再结晶<sup>[20]</sup>。未发生再结晶的晶粒受到变形力的作用而保持拉长状态, 若变形节奏偏慢, 变形能量得到充分释放, 导致形核位置减少<sup>[21-22]</sup>, 最终保留部分形变的粗大组织, 与已完成再结晶的组织形成混晶。当变形温度进一步下降至低于  $A_{r3}$  时, 奥氏体难以完成充分再结晶, 更易发生混晶现象<sup>[23]</sup>。此外, 向钢中加入 Nb、Ti 等阻止奥氏体再结晶的元素, 将会提高再结晶温度, 进而导致发生完全再结晶所需的临界变形量变大, 在较高的温度范围内, 铸造枝晶也不会向等轴晶的转化, 组织均匀化程度降低, 也会直接引起严重的混晶现象<sup>[24-26]</sup>。该类混晶的典型特征在于, 粗大的晶粒为形变态即沿着变形方向呈条带状。因此, 在钢材热变形过程中, 应注意控制变形温度, 保证其在完全再结晶区内进行<sup>[27-28]</sup>, 防止出现部分再结晶区变形, 特别在采用低温控轧工艺提升钢材的强韧性时, 需要避免出现此类混晶问题。

### 2.2 低于临界变形量形变引起的混晶

决定再结晶退火后晶粒大小的最主要因素是预先变形量, 如图3所示, 预先当变形量很小时, 晶格吸收的能量较低, 形核率低而且再结晶过程缺少持续能量的推动<sup>[29]</sup>。再结晶情况仅发生在少数奥氏体晶粒中, 并且形核位置集中于晶界处<sup>[30]</sup>。当预先变形量达到某特定值(如碳钢为2%~10%)时, 晶粒发生再结晶后会出现粗晶现象, 此值被称为临界变形量<sup>[31]</sup>。

这主要是因为再结晶晶粒的平均直径  $d$  决定于再结晶核心的长大速度与形核率的比值, 如式(3)所示。

$$d = K \cdot (\dot{\epsilon}/\dot{N})^{1/4} \quad (3)$$

式中:  $K$  为常数;  $\dot{\epsilon}$  为再结晶核心的长大速度;  $\dot{N}$  为形核率。

如图4所示, 低于临界变形量时, 形核率低,

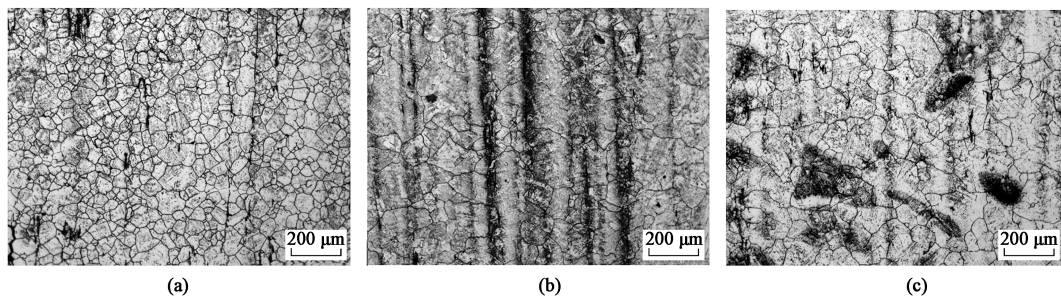


图3 不同变形量下 49MnVS3 钢的原奥氏体晶粒度

(a) 未变形 (b) 变形量为2% (c) 变形量为6%

Fig. 3 Prior austenite grain sizes of 49MnVS3 steel under different deformation amounts

(a) Undeformed (b) Deformation amount of 2% (c) Deformation amount of 6%



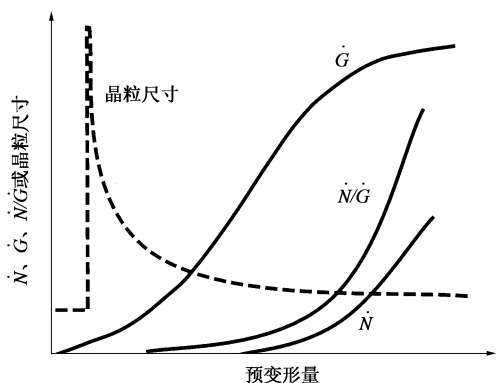


图 4 再结晶时形核率、长大速度、晶粒大小与预变形量的关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of relationship between nucleation rate, growth rate, grain size and pre-deformation amount during recrystallization

但是再结晶核心的长大速度快。意味着少数晶粒将急剧长大，造成变形过程中先后长大的晶粒混杂，形成混晶。

在非调质钢曲轴模锻时，由于曲轴形状的复杂性，其不同位置的变形程度不尽相同。在有些位置的变形量小于临界变形程度，诱发部分晶粒快速长大，导致出现混晶缺陷。该类混晶的典型特征在于：粗大的晶粒尺寸非常大，能达到 0 级甚至 00 级。如此粗大的晶粒，即使在 1200 °C 加热数小时的条件下，晶粒通过正常的均匀长大，也是无法得到的<sup>[32]</sup>。因此，为了细化晶粒并防止粗晶混晶现象的出现，应结合实际条件，尽可能保证材料在临界变形量以上加工；或者通过成分优化等手段，改善材料的基本特性，降低材料的临界变形量。

### 2.3 组织均匀的钢材二次加热后出现的混晶

钢材室温组织是均匀的，但是再加热奥氏体化后淬火，组织出现混晶，这将会导致晶粒度检验指标不合格，并可能进一步影响后续零部件的晶粒均匀性。最终变形环节温度低是该类晶粒度不合格的主要原因<sup>[33]</sup>，本质上还是发生了部分再结晶。当热变形过程处于较高温度区时，回复再结晶的时间较短，形成择优取向是十分困难的。在奥氏体晶粒长大过程中，温度较低时晶界钉扎主导动力学<sup>[34]</sup>，会发生不完全的回复再结晶，变形过程继续发生，这些未完全再结晶的晶粒会被不断地沿变形方向拉长<sup>[35]</sup>，使得原本较为复杂的结晶学位向倾向于一致，在后续热处理过程中这些发生择优取向的晶粒就会合并长大。当热变形过程处于较低温度区时，部分奥氏体可能在发生变形前已转变为铁素体，这些发生变形的铁素体与无应变铁素体同时存在，相邻晶粒间能量出现差异引起异常晶粒生长，产生混晶现象<sup>[36]</sup>。随着最

终变形温度的升高，原始组织的混晶程度将会随之改善<sup>[37]</sup>。针对此种混晶现象，结合实际生产工艺情况，建议最终变形温度不宜过低，此时原始奥氏体晶粒混晶程度及本质晶粒混晶程度均较小。

### 2.4 加热时异常不均匀长大引起的混晶

钢材随着温度的升高，晶粒可以通过晶界的迁移和晶粒的合并两种方式实现长大<sup>[38]</sup>。钢材边缘处在低温与较大等效应变情况下发生形变诱导铁素体的析出，诱导析出的新生铁素体的硬度仅为奥氏体的 1/4，在其上优先进行变形<sup>[39]</sup>，积累大量的畸变能，同时晶粒被拉长，晶界比面积增加，晶界能较高，为降低体系的界面能，将自发生晶界迁移，大晶粒吞并小晶粒而长大，从而形成粗晶。如图 5 所示，对于本质细晶粒钢，特别是添加了强烈抑制晶粒长大的元素 Ti、Nb 等，晶粒粗化曲线将出现明显分段，存在一个晶粒开始急剧长大的拐点温度，即晶粒粗化温度。在明显低于粗化温度或高于粗化温度时，均是正常的均匀长大；但是在粗化温度时，会出现异常不均匀长大，非均匀程度严重时，便会出现混晶。

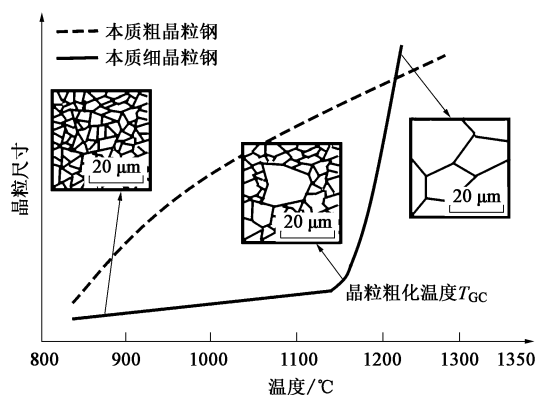


图 5 奥氏体晶粒粗化规律示意图

Fig. 5 Schematic diagram of austenite grain coarsening laws

一般情况下，对于亚共析钢，渗碳温度在 900~940 °C 左右，淬火温度一般在  $A_{c3}$ （加热时先共析铁素体全部转变为奥氏体的终止温度）温度以上 30~50 °C 进行。对于有些钢种，如 22CrMoH 高淬透性齿轮用钢等，通常要进行较高温度、较长时间的渗碳淬火，该渗碳条件下奥氏体晶粒极易出现长大现象，进而出现混晶现象<sup>[40]</sup>。较为粗大晶粒使渗碳层的碳浓度相对增高，导致材料脆性升高，强度降低。混晶现象的出现还有可能使齿轮之间的热处理畸变失去规律而出现配对失败现象<sup>[41]</sup>。因此，对于本质细晶粒钢，应对于其晶粒粗化温度进行测定，防止其加热温度处于晶粒粗化温度敏感区间，导致混晶组织的出现。

### 3 结论

(1) 钢材混晶组织的定量评价是处理混晶缺陷的首要步骤。晶粒度极差法被广泛应用于工业生产中, 通过分析视场内的晶粒级别差异表征其不均匀性。而在科学研究中还可以通过方差系数和不均匀因子深入分析混晶状况。

(2) 依据成因将混晶分为4类, 包括热变形时部分再结晶引起的混晶、低于临界变形量形变引起的混晶、组织均匀的钢材二次加热后出现的混晶和加热时异常不均匀长大引起的混晶。混晶组织将极大地降低组织均匀性, 严重恶化钢材质量。针对相应形成机理, 可以采取避免在部分再结晶区变形、增大变形量或降低材料临界变形量、提高最终变形温度, 以及避免晶粒粗化温度区间加热的方法, 对具体钢材结合工艺流程进行缺陷分析和相应控制, 减弱混晶组织的影响。

#### 参考文献:

- [1] Seong G K, Yong B P. Grain boundary segregation, solute drag and abnormal grain growth [J]. *Acta Materialia*, 2008, 56 (15): 3739-3753.
- [2] 刘吉猛, 黄烁, 张晓敏, 等. GH2132 合金混晶条带组织分析及其对力学性能影响 [J]. *钢铁*, 2022, 57 (6): 110-119.  
Liu J M, Huang S, Zhang X M, et al. Microstructure analysis of GH2132 alloy band-typed mixed grain structure and its effect on mechanical properties [J]. *Iron & Steel*, 2022, 57 (6): 110-119.
- [3] Yang H L, Xu G, Wang L, et al. A study of growth of austenite grains in a steel microalloyed with Ti and Nb [J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, 59 (1): 8-13.
- [4] 徐晓文, 刘亮. 湘钢 ML40Cr 钢线材表面混晶原因分析及控制 [J]. *山东冶金*, 2019, 41 (6): 24-25.  
Xu X W, Liu L. Analysis and control of mixed crystal of ML40Cr at Xianggang [J]. *Shandong Metallurgy*, 2019, 41 (6): 24-25.
- [5] 莫伟灵. 热加工工艺对奥氏体本质晶粒度的影响 [J]. *特殊钢*, 1980, (2): 94-102.  
Mo W L. Effect of hot working process on the grain size of austenite [J]. *Special Steel*, 1980, (2): 94-102.
- [6] 俞雁, 谢利群, 高吉祥, 等. CSP 工艺热轧钢板显微组织混晶问题分析 [J]. *冶金丛刊*, 2008, 8 (4): 10-12.  
Yu Y, Xie L Q, Gao J X, et al. Analysis on mixed-grains microstructure of hot rolled strip in CSP line [J]. *Metallurgical Collections*, 2008, 8 (4): 10-12.
- [7] 于爽. 变形温度对钢板混晶组织的影响分析 [J]. *山东冶金*, 2016, 38 (3): 40-42.  
Yu S. Analysis of the influence of deformation temperature on the mixed grain structure of steel plate [J]. *Shandong Metallurgy*, 2016, 38 (3): 40-42.
- [8] 田秀刚, 冯晓勇, 宋晓娟. 超低碳 IF 热轧带钢表面混晶的分析与控制 [J]. *河北冶金*, 2018, (6): 47-49, 31.  
Tian X G, Feng X Y, Song X J. Analysis and control of surface mixed crystal in ultra-low carbon hot strip steel [J]. *Hebei Metallurgy*, 2018, (6): 47-49, 31.
- [9] 于爽. 变形量对钢板混晶组织的影响分析 [J]. *山东冶金*, 2015, 37 (4): 42-44.  
Yu S. Analysis of the influence of deformation amount on the mixed grain structure of steel plate [J]. *Shandong Metallurgy*, 2015, 37 (4): 42-44.
- [10] Pradhan S K, Mandal S, Athreya C N, et al. Influence of processing parameters on dynamic recrystallization and the associated annealing twin boundary evolution in a nickel base superalloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 700: 49-58.
- [11] 胡德林. 奥氏体混晶的形成与消除 [J]. *热加工工艺*, 1986, (2): 13-18.  
Hu D L. Formation and elimination of austenite mixed grain [J]. *Hot Working Technology*, 1986, (2): 13-18.
- [12] 刘秀莲, 班君, 罗燕, 等. 消除 8Cr4Mo4V 钢“混晶”试验研究 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (14): 165-168.  
Liu X L, Ban J, Luo Y, et al. Experimental study on elimination of mixed grain of 8Cr4Mo4V steel [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47 (14): 165-168.
- [13] Li Y Q, Shen P, Zhang H M, et al. Deformation heterogeneity induced coarse grain refinement of the mixed-grain structure of 316LN steel through limited deformation condition [J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110057.
- [14] 常铁军, 马茂元. 钢的混晶程度评价方法探讨 [J]. *理化检验物理分册*, 1989, 25 (1): 40-41.  
Chang T J, Ma M Y. Discussion on the evaluation method of the degree of grain mixing of steel [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 1989, 25 (1): 40-41.
- [15] Shang X Q, Zhang H M, Cui Z S, et al. A multiscale investigation into the effect of grain size on void evolution and ductile fracture: Experiments and crystal plasticity modeling [J]. *International Journal of Plasticity*, 2020, 125: 133-149.
- [16] JIS G0551: 2020, 鋼-結晶粒度の顕微鏡試験方法金属平均晶粒度測定方法 [S].  
JIS G0551: 2020, Steel-grain microscopy test method metal mean grain size determination method [S].
- [17] GB/T 6394—2017, 金属平均晶粒度测定方法 [S].  
GB/T 6394—2017, Determination of estimating the average grain size of metal [S].
- [18] 董芳. 锻造及预备热处理工艺对 18Cr2Ni4WA 锻件本质晶粒度的影响 [J]. *金属加工: 热加工*, 2017, (11): 61-64.  
Dong F. Effect of forging and preparatory heat treatment process on the particle size of 18Cr2Ni4WA forgings [J]. *Metal Working*, 2017, (11): 61-64.
- [19] Wang G Q, Chen M S, Li H B, et al. Methods and mechanisms for uniformly refining deformed mixed and coarse grains inside a solution-treated Ni-based superalloy by two-stage heat treatment [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 77: 47-57.
- [20] 李波, 陈方玉, 陈胜, 等. 20CrMnTi 棒材表面混晶及消除方法

- [J]. 武汉职业技术学院学报, 2013, 12 (3): 107-108, 112.
- Li B, Chen F Y, Chen S, et al. On methods of eliminating mixed crystal on 20CrMnTi work piece [J]. Journal of Wuhan Polytechnic, 2013, 12 (3): 107-108, 112.
- [21] 张继永, 李红俊, 申震, 等. 700 MPa 级汽车大梁钢混晶组织问题研究 [J]. 轧钢, 2021, 38 (1): 84-88.
- Chen J J, Li H J, Shen Z, et al. Research of mixed crystal structure of 700 MPa grade plate for automobile beam [J]. Steel Rolling, 2021, 38 (1): 84-88.
- [22] 李绍杰, 樊一丁, 黄胜永. Al、Ti、Nb 微合金化对 ZF7 渗碳钢晶粒混晶的影响 [J]. 特殊钢, 2013, 34 (2): 52-54.
- Li S J, Fan Y D, Huang S Y. Effect of Al, Ti, Nb microalloying on mixed grain size of case-hardened steel ZF7 [J]. Special Steel, 2013, 34 (2): 52-54.
- [23] 樊璐璐, 刘晓飞, 翟月雯, 等. 成形全过程奥氏体混晶预测模型及其工程应用 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 49-61.
- Fan L L, Liu X F, Zhai Y W, et al. Prediction model of austenitic mixed grains in the whole forming process and its application in engineering [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 49-61.
- [24] 王倩, 姜敏凤, 冯勇, 等. Q460C 钢板的混晶组织特征和成因探讨 [J]. 山东冶金, 2011, 33 (1): 34-35, 40.
- Wang Q, Jiang M F, Feng Y, et al. Discussion on the characteristics and genesis of mixed grain structure for Q460C plate [J]. Shandong Metallurgy, 2011, 33 (1): 34-35, 40.
- [25] 何建中, 刘雅政, 常大勇, 等. CSP 生产 X60 管线钢的化学成分和轧制工艺对混晶的影响 [J]. 特殊钢, 2005, (5): 57-59.
- He J Z, Liu Y Z, Chang D Y, et al. Effect of chemical composition and rolling process on mixed grain of CSP produced X60 pipeline steel [J]. Special Steel, 2005, (5): 57-59.
- [26] 宗云, 赵莉萍, 麻永林, 等. X60 钢在 CSP 热轧过程中的组织演变与混晶现象 [J]. 上海金属, 2006, (2): 43-47.
- Zong Y, Zhao L P, Ma Y L, et al. Microstructure evolution and mixed grains phenomenon of X60 steel during hot rolling in CSP [J]. Shanghai Metals, 2006, (2): 43-47.
- [27] 刘清友, 董瀚, 孙新军, 等. CSP 工艺中含 Nb 钢的混晶问题及改善方法 [J]. 钢铁, 2003, (8): 16-19.
- Liu Q Y, Dong H, Sun X J, et al. The mixed-grains microstructure of nb microalloyed strip and eliminating methods in CSP processing [J]. Iron & Steel, 2003, (8): 16-19.
- [28] 卢文增, 张卫东. 研究混晶的定量金相新方法 [J]. 物理测试, 1990, (4): 48-50.
- Lu W Z, Zhang W D. A new method for quantitative metallographic study of grain mixing [J]. Physics Examination and Testing, 1990, (4): 48-50.
- [29] Tan L M, Huang Z W, Liu F, et al. Effects of strain amount and strain rate on grain structure of a novel high Co nickel-based polycrystalline superalloy [J]. Materials & Design, 2017, 131: 60-68.
- [30] 刘靖, 彭杰, 张备, 等. X80 管线钢热轧过程再结晶规律研究 [J]. 天津冶金, 2011, (1): 23-25, 49.
- Liu J, Peng J, Zhang B, et al. Study on X80 pipeline steel recrystallization law in hot rolling process [J]. Tianjin Metallurgy, 2011, (1): 23-25, 49.
- [31] Doherty R D, Hughes D A, Humphreys F J, et al. Current issues in recrystallization: A review [J]. Materials Science and Engineering: A, 1997, 238 (2): 219-274.
- [32] 杨勇, 周乐育, 蒋鹏, 等. 模锻变形对曲轴用非调质钢 1538MV 显微组织的影响 [J]. 工程科学学报, 2018, 40 (5): 579-586.
- Yang Y, Zhou L Y, Jiang P, et al. Influence of die-forging deformation on microstructure of 1538MV non-quenched and tempered steel for crankshaft [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40 (5): 579-586.
- [33] 黄绪传, 裴新华, 薛军. 连续变形与冷却工艺对低碳钢微观组织的影响 [J]. 四川冶金, 2018, 40 (2): 9-12.
- Huang X C, Pei X H, Xue J. Influence of continuous deformation and cooling process on microstructure for low carbon steel [J]. Sichuan Metallurgy, 2018, 40 (2): 9-12.
- [34] Pous-Romero H, Lonardelli I, Cogswell D, et al. Austenite grain growth in a nuclear pressure vessel steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 567: 72-79.
- [35] Azarbarmas M, Aghaie-Khafri M, Cabrera J M, et al. Dynamic recrystallization mechanisms and twinning evolution during hot deformation of Inconel 718 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 678: 137-152.
- [36] 罗兴壮, 罗庆革, 兰钢, 等. ML08Al 线材混晶组织原因分析与改进措施 [J]. 轧钢, 2020, 37 (3): 93-96.
- Luo X Z, Luo Q G, Lan G, et al. Causes analysis of mixed-grain microstructure of ML08Al wire and its countermeasures [J]. Steel Rolling, 2020, 37 (3): 93-96.
- [37] 王欢, 胡佳丽, 张朝磊, 等. 履带销轴用 1E1158M 钢的奥氏体混晶情况 [J]. 钢铁, 2020, 55 (11): 126-132, 139.
- Wang H, Hu J L, Zhang C L, et al. Mixed crystal of austenite grain size in track pins 1E1158M steel [J]. Iron & Steel, 2020, 55 (11): 126-132, 139.
- [38] 宋海刚. F91 钢的混晶原因以及消除方法 [J]. 中国金属通报, 2017, (8): 71-72.
- Song H G. Causes of crystallization of F91 steel and how to eliminate them [J]. China Metal Bulletin, 2017, (8): 71-72.
- [39] 万文华, 徐乐钱, 沙鹏飞, 等. AISI1008 圆钢混晶原因分析及有限元模拟和工艺改进 [J]. 特殊钢, 2021, 42 (2): 42-45.
- Wan W H, Xu L Q, Sha P F, et al. Analysis and finite element simulation of mixed grain of round steel AISI1008 and process improvement [J]. Special Steel, 2021, 42 (2): 42-45.
- [40] 孙后金, 张永安, 张三平. 22CrMoH 齿轮钢奥氏体晶粒度影响因素及混晶原因分析 [J]. 山东冶金, 2019, 41 (6): 29-31.
- Sun H J, Zhang Y A, Zhang S P. Influencing factors of austenite grain size and analysis on mixed crystal of 22CrMoH gear steel [J]. Shandong Metallurgy, 2019, 41 (6): 29-31.
- [41] 齐建军, 李绍杰. 铝氮比对轿车用渗碳钢晶粒混晶的影响 [J]. 河北冶金, 2015, (2): 1-4.
- Qi J J, Li S J. Influence of aluminum-nitrogen rate on mixed grain structure of 20MnCr5 carburizing steel for car [J]. Hebei Metallurgy, 2015, (2): 1-4.