

轴承钢碳化物控制及其对压碎负荷的影响探析

1. 江阴兴澄合金材料有限公司 线材研究所

2. 江阴兴澄特种钢铁有限公司 棒材研究所

3. 山东东阿钢球集团有限公司 技术部

官跃辉¹ 张林¹ 张剑锋¹ 陆长河¹ 翟蛟龙² 石长民³

【摘要】碳化物均匀性是影响轴承疲劳性能主要因素之一，本文对钢厂采用不同工艺生产的原材料制成钢球进行压碎试验，并对压碎后的钢球进行碳化物网状、带状解剖分析。本试验结果表明碳化物网状对压碎负荷值影响大于碳化物带状，且碳化物颗粒大小与压碎负荷值存在明显的相关性，最终为原材料生产过程中的碳化物控制提供方向。

【关键词】碳化物网状、碳化物带状、钢球、压碎负荷

1. 前言

钢球的工作特点是承受集中点接触应力和交变载荷，因此对钢球的非金属夹杂类型和尺寸、成分均匀性、碳化物分布等要求都十分严格。高碳铬轴承钢具备高耐磨性、高接触疲劳强度和优良的冲击韧性等特性，遂广泛用于钢球制造^[1~2]。压碎负荷作为检测钢球接触疲劳寿命指标之一，其具有设备相对简单、检测周期短等特性，受到钢球厂的广泛关注和重视。通过压碎试验，对其断口形貌及组织进行分析，可以反推钢球原材料方面的缺陷^[3]。为此，按 JB/T1255-2001 标准规定，每组试验 3 粒钢球，以便于试验结果的统计和评价，并查找碳化物对钢球压碎负荷值的影响，指导原材料生产过程中的碳化物控制，压碎试验模型如图 1。

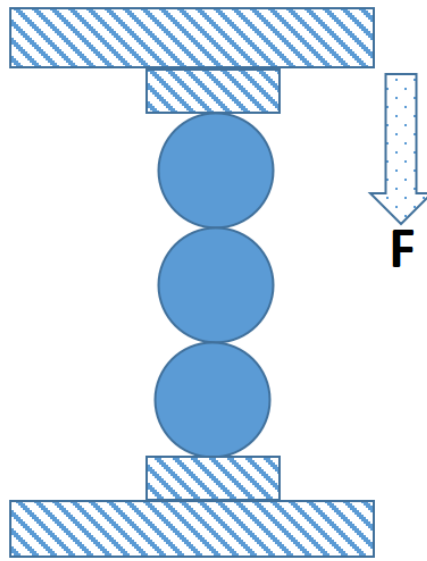


图 1 压碎负荷试验模型

Fig 1 Crushing load test model

2. 试验的材料和方法

试验钢球所用的原材料均为国内某特钢生产的高纯净度二火材高碳铬轴承钢，其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 试验轴承钢化学成分（质量百分比，%）

Tab 1 Chemical composition of bearing steel (W%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	O	Ti	Ca
下限	0.95	0.15	0.25	-	-	1.40	-	-	-	-	-
上限	1.05	0.35	0.45	0.018	0.005	1.60	0.10	0.10	0.0005	0.001	0.001

选择同一批次连铸坯料，由钢厂分别对坯料进行 7h 和 16h 高温扩散，且高温扩散 16h 的坯料在轧制过程中，分别使用常规工艺和控轧控冷工艺生产盘条，以上所得母料进行同等工艺生产成 $\phi 13.494\text{mm}$ 的钢球，最终对选定的试验钢球进行表面探伤检查，确保无表面缺陷。根据不同种类材料选择足量

钢球进行压碎负荷试验，具体方案如下表 2：

表 2 试验方案

Tab 2 experimental plan

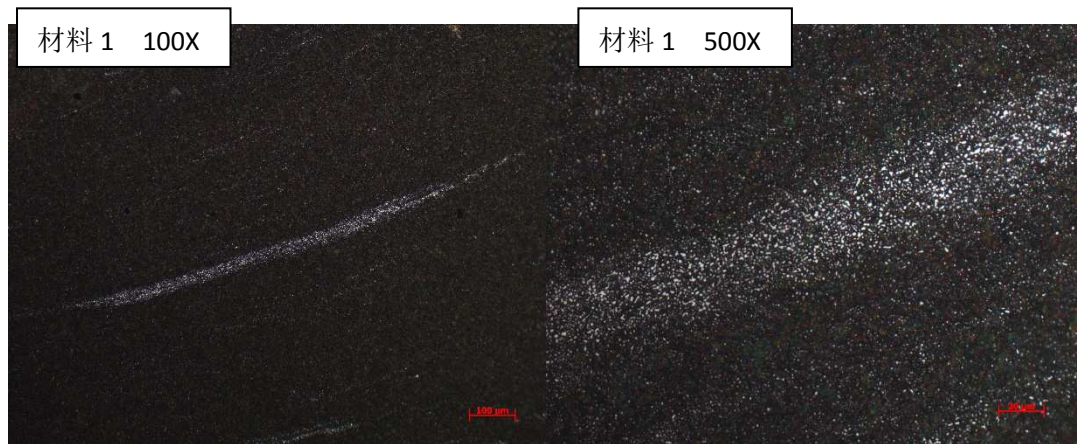
试验方案	高温扩散时间 h	轧制工艺	试验组数
材料 1	7	正常	25 组
材料 2	16	正常	25 组
材料 3	16	控轧控冷	25 组

试验方法：压碎试验在上海申克 WE-300 型试验机上进行，本试验加载速度为 1KN/S，试验主要考察钢球能够承受的最大载荷，并分析其与碳化物的相关性。

有效样品选择：钢球压碎时断口形貌不一，但根据经验选择开裂形态小于等于 3 块的更有利于试验结果分析^[3]，并对开裂钢球的开裂源逐个进行 SEM 分析，去除因夹杂导致的开裂的钢球样品，最终所得开裂钢球作为有效样品。

3. 试验结果及讨论

材料 1 和材料 2 钢球中的碳化物带状为典型的两种不同类型，材料 1 的高温扩散时间短，碳化物颗粒相对较大，且聚集程度更集中，碳化物带宽窄，见图 2 (a、b)；而材料 2 的扩散时间更长，碳化物颗粒细小、相对均匀弥散分布，但碳化物带宽明显更宽，见图 3 (a、b)。可见，坯料在后续轧钢高温扩散时间偏长时，能使富碳富铬区的碳化物浓度降低、碳化物颗粒细小弥散化，从而降低与基体组织的浓度差；而当扩散时间短时，碳化物颗粒未能充分扩散分布开，碳化物颗粒仍偏大且聚集，带状相对还是较严重^[4~5]。

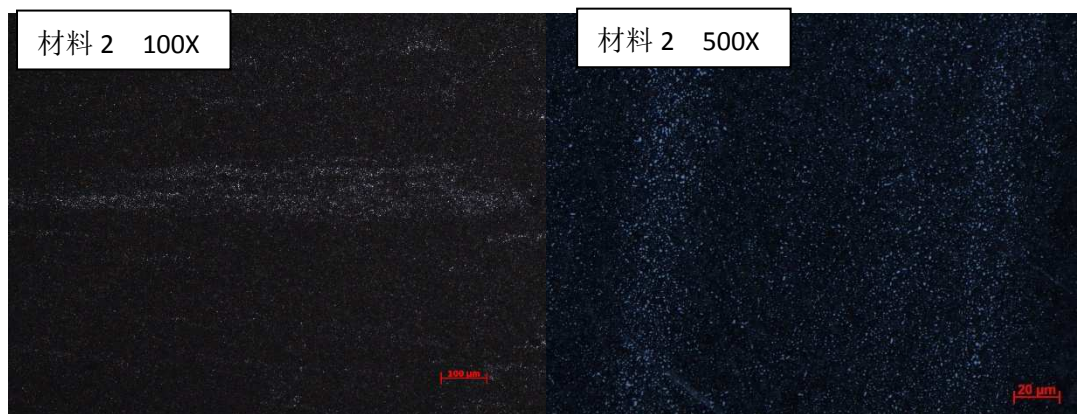


a 碳化物带状 100X

b 碳化物带状 500X

图 2 (a、b) 材料 1 碳化物带状

Fig 2 (a、b) carbide streak of Material 1



a 碳化物带状 100X

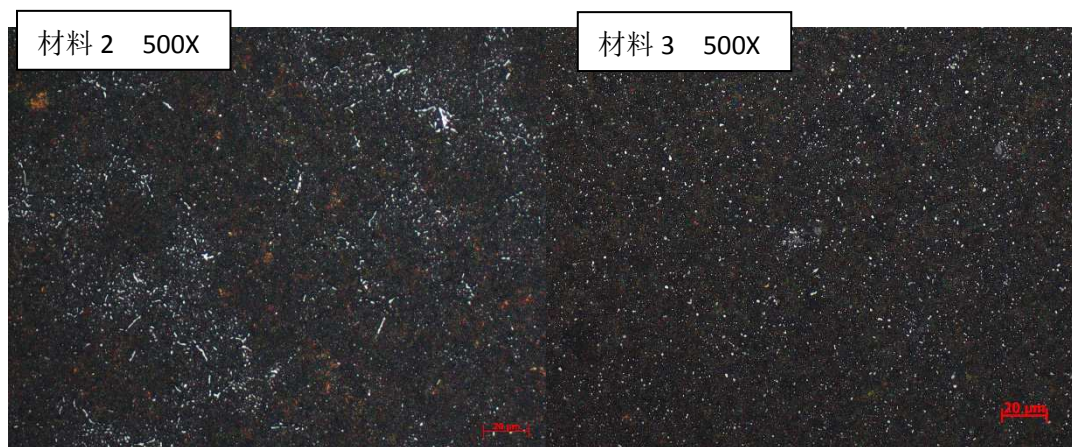
b 碳化物带状 500X

图 3 (a、b) 材料 2 碳化物带状

Fig 3 (a、b) carbide streak of Material 2

材料 2 和材料 3 钢球的碳化物网状进行金相评级对比分析，未进行特殊控轧控冷工艺的材料 2 的碳化物网状更差，晶界非常明显，按 GB/T 18254 评级达到了 3.0 级甚至 3.5 级，见图 4a；而进行控轧控冷工艺的材料 3 的碳化物并未出现明显网状情况，未看到明显晶界，按 GB/T 18254 金相评级仅有 1.0 或 1.5 级，见图 4b。低温控轧工艺，可以抑制再结晶晶粒长大，保留轧制变形引起的细小晶粒缺陷，使析出的碳化物厚度较为细薄，分布更弥散，改善了初期碳化物网状形成；同时结合控冷工艺，可以破坏碳化物沿晶界扩散析出所需的时间及温度两个条件，确保迅速跨过碳化物网状析出所需的合

适温度，缩短碳化物沿晶界析出时间，使得其无法形成断续或连续的网络状，能够明显抑制碳化物网状的形成^[6~7]。



a 材料 2 碳化物网状 500X

b 材料 3 碳化物网状 500X

图 4 (a、b) 不同轧制方式碳化物网状图

Fig 4 (a、b) Carbide network with different rolling methods

对以上三种状态料的最终钢球压碎负荷值数据统计见图 5，材料 1 钢球的压碎负荷均值为 201.133KN，材料 2 钢球的整体压碎负荷均值为 216.919KN，而材料 3 钢球的压碎负荷均值达到了 251.581KN，材料 3 钢球明显高于材料 1、材料 2 钢球的压碎负荷值，可见碳化物网状对压碎负荷值的影响相对碳化物带状更明显，网状碳化物越严重压碎负荷值越小。其原因可能是，网状碳化物的析出主要是在晶界上，降低了晶格间的延续性，削弱了金属间的结合力，使钢的力学性能降低，尤其使冲击韧性下降，脆性增加，在受集中应力作用下极易引起沿晶开裂，导致最终钢球开裂。

同时结合统计分析看，在同等碳化物网状形态下，材料 2 比材料 1 的钢球压碎负荷均值更高，可以看出，碳化物颗粒细小、均匀弥散分布，带宽宽的形态更有利于压碎负荷值的提升，究其原因可能是，碳化物颗粒较大且聚集程度集中的带状形态，在淬火后，会形成大块的粗针状过热马氏体组织，较周围基体硬度相对更高，与基体的结合力更差，在承受压碎负荷这种单点集中应力变形时，易形成微裂纹源，降低抗疲劳强度，导致钢球开裂。

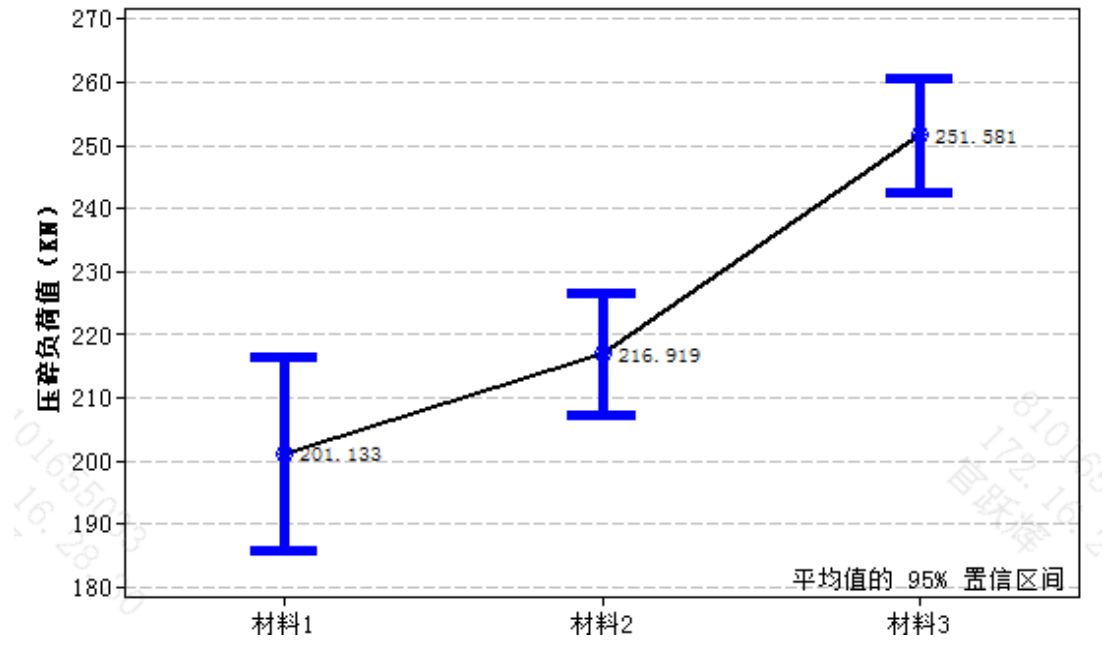


图 5 不同状态材料的压碎负荷值统计

Fig 5 Statistics of crushing load values of materials in different states

为了进一步统计碳化物颗粒大小对压碎负荷值的影响，采用电镜对每个样品中选择最大的 10 个碳化物颗粒均值进行标定统计分析，其相关性如图 6 所示。

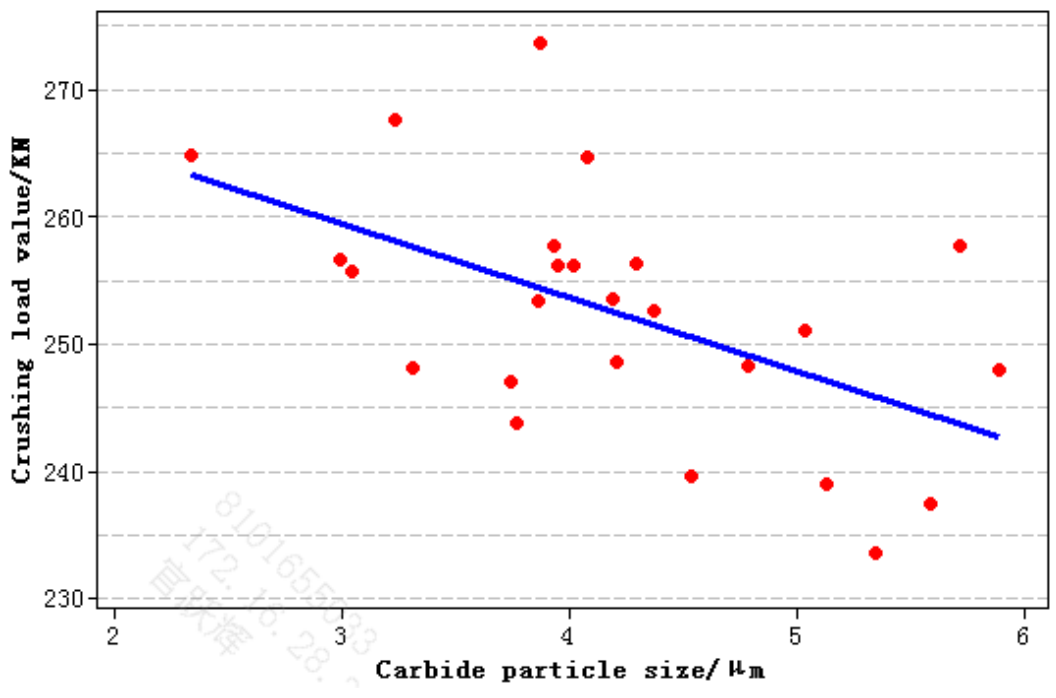


图 6 碳化物颗粒尺寸与压碎负荷值的相关性

Fig 6 Correlation between carbide particle size and crushing load value

由上图可见，破碎钢球样品中碳化物颗粒的大小与压碎负荷值存在明显的相关性，碳化物颗粒越大，压碎负荷值越小。其原因可能是大尺寸碳化物颗粒都是由碳、铬偏析聚集而形成的亚共晶碳化物，它具有很高的脆性和硬度，但强度和塑性很差，危害类似脆性夹杂，它破坏了微观组织间的连续性，在淬火时易产生细微裂纹源^[8]，其在受到集中应力变形时，会引起钢球最终破裂。

4. 结论

通过对生产过程工艺控制不同碳化物形态的原材料及其在本试验中有效开裂钢球样品的统计分析，可得出以下结论：

(1) 钢厂通过延长坯料高温扩散时间，可以改善碳化物带状，获得细小、弥散分布的碳化物颗粒；通过控轧控冷工艺能够明显改善碳化物网状。

(2) 碳化物网状对压碎负荷值的影响大于碳化物带状；碳化物网状评级越高，压碎负荷值越小；碳化物颗粒细小、均匀弥散分布，带宽宽的形态更有利于压碎负荷值的提升。

(3) 碳化物颗粒的大小与压碎负荷值存在明显的相关性，整体碳化物颗粒越大，压碎负荷值越小。

【参考文献】

- [1] 李文兴,刘振明. GCr15 轴承钢碳化物高温扩散的研究[J]. 河北冶金,2012,195(3):23-26
- [2] 李文竹,马惠霞,黄磊,王晓峰. 高碳铬轴承钢网状组织遗传性及其危害[J]. 金属热处理,2012,37(8):36-37
- [3] 赵高明,周勇,马林. 热处理工艺对钢球压碎载荷值的影响[J]. 轴承,2014,10:35-38
- [4] 王伟,董庆,魏丽华等. 高温扩散对轴承钢盘条带状组织的影响[J]. 热加工工艺,2020,49(17):112-114
- [5] 曹文全,俞峰,王存宇等. 高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向[J]. 特殊钢,2021,42(1):1-10
- [6] 邓湘斌,胡昭锋,冯杰斌等. 终轧温度和冷却工艺对 $\phi 36\text{mm}$ GCr15 轴承钢网状碳化物的影响[J]. 特殊钢,2017,38(4):57-59
- [7] 韩逊. 控轧控冷改善 GCr15 钢网状碳化物[J]. 特钢技术,2011,17(68):27-31
- [8] 王晓燕,宗铎,黄文涛等. GCr15 柱塞裂纹分析[J]. 热加工工艺,2016,45(16):260-262