



冷锻三销轴用钢 SCR420H 混晶原因探究及工艺优化

张学诚, 姚海龙, 李忠平

(江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214400)

摘要: 对三销轴零件进行线切割与腐蚀, 显微组织观测结果表明, 三销轴轴头冷变形率最大的区域存在严重的混晶现象。对此现象进行深入探究, 分析该区域混晶的原因为三销轴冷挤压过程轴头两侧区域经历了极大的形变, 高温渗碳过程细小的晶粒相互融合, 最终形成粗大的晶粒。为消除三销轴零件轴头两侧区域的粗大晶粒, 采用不同的正火与退火预处理工艺, 使材料内的 AlN 化合物再次大量析出, 并在晶界处形成偏聚, 形成新的 AlN 析出相起到了强力钉扎晶界的作用。不同正火与退火预处理工艺, 均可不同程度改善三销轴零件的奥氏体晶粒度, 改善效果最佳的预处理方案为 900 °C 以上预正火工艺。采用该方案可使原本混晶严重的三销轴零件的晶粒得到改善, 三销轴零件晶粒达到 7.0 级以上。

关键词: 三销轴; 晶粒; 正火; 退火

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00190 **中图分类号:** TG156. 1

Exploration and Process Optimization of Mixed Crystal Reasons in Steel SCR420H for Cold Forging Three-pins Shaft

Zhang Xuecheng, Yao Hailong, Li Zhongping

(Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214400, China)

Abstract: The wire cutting and corrosion of the three-pins shaft part were carried out, and the microstructure observation results showed that there was severe mixed crystal phenomenon in the area with the highest cold deformation rate of the three-pins shaft head. Through in-depth exploration of this phenomenon, it was analyzed that the reason for mixed crystals in this area is due to the significant deformation experienced on both sides of the shaft head during the cold extrusion process of the three-pins shaft. During the high-temperature carburizing process, small grains fused with each other, ultimately forming coarse grains. In order to eliminate coarse grains on both sides of the shaft head of the three pin shaft component, different normalizing and annealing pretreatment processes were adopted to cause a large amount of AlN compounds in the material to precipitate again and form segregation at the grain boundaries, forming new AlN precipitates that play a strong role in pinning the grain boundaries. The normalizing and annealing pretreatment processes with different process parameters can improve the austenite grain size of the three-pins shaft parts to varying degrees. The best pretreatment scheme for improving the effect is the pre normalizing process above 900 °C. The adoption of this scheme can improve the grain size of the three-pins shaft parts that were originally severely mixed, and the grain size of the three-pins shaft parts can reach 7.0 or above.

Key Words: Three-pins Shaft; Grain; Normalizing; Annealing

三销轴零件是汽车驱动系统中的关键零部件, 它减小了汽车的转弯半径, 实现了汽车转向的高机动性。三销轴零件结构、形状较为复杂, 行业内基本采用冷锻工艺生产该汽车零部件, 冷锻工艺是在室温环境下对钢材表面施加巨大的载荷, 使钢材在短时间内变形为结构复杂的异形零件^[1-2]。

江阴兴澄特钢供客户的 SCR420H 低碳齿轮钢, 生产工艺为转炉-精炼-真空脱气-大方坯连铸-开坯-小方坯轧制成型, 热轧圆钢的规格为 $\phi 30 \sim 45$ mm。第一次小批量试供货时, 该公司使用 $\phi 37$ mm 的 SCR420H 制造乘用车传动系统万向节三销轴, 热轧

圆钢冷锻成三销轴后直接渗碳淬火, 渗碳淬火后的三销轴零件存在较为严重的混晶现象。随即对该批次零件进行隔离, 重点排查了该批次零件的制造过程以及原材料的生产过程。

1 三销轴零件分析

1.1 三销轴制造流程

汽车三销轴的制造全流程为兴澄 SCR420H 热轧圆钢锯切下料→短料球化退火(770 °C 保温 5 h, 10 °C/h 降温至 720 °C 后保温 6 h, 出炉空冷)→磷皂化→冷挤压成三销轴→中心钻孔→中心拉齿→渗

基金项目: 中信集团重大科技创新项目(项目 2022ZXKYA06100)

作者简介: 张学诚(1986—), 男, 高级工程师; **E-mail:** zhangxuecheng@citicsteel.com; **收稿日期:** 2024-07-31

碳淬火(930 °C保温 3 h 渗碳,降温到 880 °C后油淬)→磨削→成品。用户采用以上工艺制造的汽车三销轴零件如图 1 所示。



图 1 汽车三销轴 SCR420H 照片

Fig. 1 Photo of three-pins shaft SCR420H for automobiles

1.2 试样制备与显微组织观察

使用线切割将汽车三销轴零件沿着图 1 红线圆柱形轴头位置切开,三销轴圆柱形轴头切开位置采用 1200 目的砂纸打磨随后使用绒布进行镜面抛光,抛光后的试样放入 5% 的饱和苦味酸溶液并加入少量洗洁精,洗洁精作为催化剂,有助于加速晶界腐蚀,更清晰地显示出原始奥氏体晶粒的晶界。将腐蚀剂加热至 55~60 °C 后腐蚀圆柱形轴头,通过电化学反应显示出钢材的晶粒度。三销轴轴头横向解剖后腐蚀的照片如图 2 所示,三销轴轴头的直径为 $\phi 23$ mm,腐蚀后的三销轴轴头左右两侧(水平面位置)存在肉眼目视可见的粗大“晶斑”。

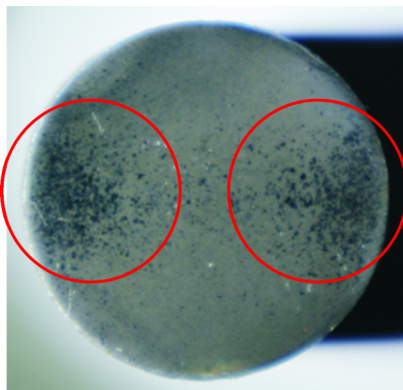


图 2 销轴轴头腐蚀宏观照片

Fig. 2 Macroscopic photo of corrosion on the shaft head

渗碳淬火后的三销轴腐蚀后重点观察粗大“晶斑”处的显微组织,金相显微镜放大 100 倍,观测到粗大的 0~4 级奥氏体晶粒与细小均匀的 7~8 级奥氏体晶粒无序地混合,三销轴轴头腐蚀后的显微组织照片如图 3 所示。

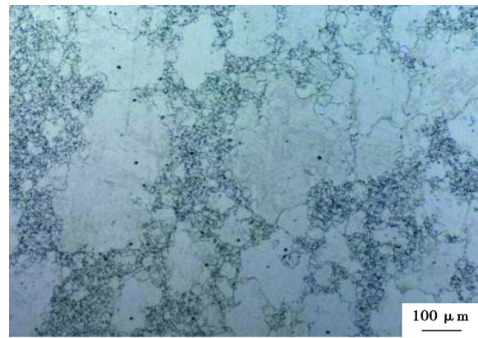


图 3 三销轴轴头腐蚀显微组织

Fig. 3 Corrosion microstructure of three-pins shaft head

1.3 粗晶对三销轴零件的影响

显微组织中存在大量粗大的晶粒意味着晶界的界面占比急剧下降,三销轴零件在高强度、长时间使用后内部不可避免开始产生微小的疲劳裂纹源,若微小的疲劳裂纹源在粗晶处形成,由于材料的晶界占比较小,晶界阻碍裂纹扩展的能力显著降低,微小的裂纹容易更快速扩展变大,最终形成疲劳失效。因此,渗碳淬火后的三销轴零件必须具备晶粒细小并且均匀,且无 5 级以下的粗大晶粒存在,确保三销轴零件拥有足够的晶界占比。材料的晶界占比直接决定了三销轴零件的疲劳强度与疲劳寿命,晶界处的原子排列犬牙交错,存在大量原子位错、偏聚、空位等情况,晶界附近的原子扩散激活能量显著高于晶粒内部的原子,晶界附近的原子拥有极快的扩散速度,当材料处于晶粒逐渐长大的倾向中,晶界边缘的部分溶质原子能够快速扩散至晶界,在晶界处析出、沉淀并且偏聚,晶界处的能量得以稳步提升,此类析出相有效地限制了晶界的迁移以及阻碍了相邻晶粒物质之间的交换与融合,起到了钉扎晶界的作用,钉扎的晶界可有效阻碍晶粒之间原子的继续扩散与混合,使得不同晶粒之间保持相对独立,限制了晶粒进一步融合与长大,大幅度降低混晶形成的可能性^[3-4]。

2 混晶原因分析与讨论

2.1 混晶结果分析

三销轴轴头腐蚀宏观照片显示,本批次三销轴零件最严重的混晶区域主要集中在零件左右两侧位置,零件其余区域的晶粒相对较为细小。依据实际生产流程逐一排查,从冷锻前的原材料、冷锻后的零件半成品、渗碳后的零件每个流程均检测其奥氏体晶粒度,最终分析出造成三销轴冷锻零件产生混晶的总体原因基本为以下两点:①三销轴冷锻

时,材料发生塑性冷变形,剧烈的变形会导致材料晶界处已产生原子位错、偏聚的析出相AIN重新排列分布,随着变形率的增加晶界处的析出相AIN逐渐进入晶内,失去钉扎晶界的作用,相邻晶粒物质之间开始交换并融合,细小的晶粒逐渐相互融合成为较大的晶粒。②低碳齿轮钢中的析出相AIN会随着温度的升高而加速溶解,低碳齿轮钢在900~1 000 °C温度保温1 h后,使用扫描电镜放大30 000倍观察AIN析出相减少的比例,AIN析出相减少的比例即为AIN析出相的溶解的速率,选取低碳齿轮钢SCR420H,钢材在900~1 000 °C温度各温度保温1 h后,观察AIN析出相减少的比例,最终确定了低碳齿轮钢中AIN析出相各温度溶解速率,低碳齿轮钢中AIN析出相各温度溶解速率如图4所示。当渗碳温度稳定在950 °C以下时,钢中的AIN析出相溶解速度非常缓慢,AIN析出相在渗碳过程中可以长时间稳定存在,AIN析出相可以稳定钉扎晶界,防止晶界迁移,抑制晶粒长大;当渗碳温度大于950 °C时,AIN析出相溶解速度急剧上升,并且随着温度的升高,AIN溶解速度将进一步加快,从而失去了对晶界的钉扎作用,导致晶粒长大变粗^[5-6]。

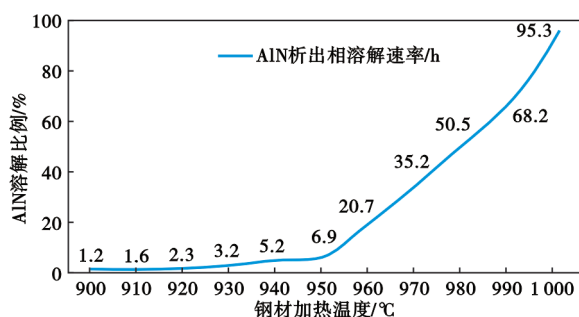


图4 低碳齿轮钢中析出相AIN各温度溶解速率

Fig. 4 Dissolution rates of AlN precipitates in low-carbon gear steel at various temperatures

2.2 原材料生产过程

调查了本批次三销轴零件原材料的冶炼与轧制生产全过程,重点调查方向为钢中细化晶粒元素Al、N加入的方式与加入后其含量的变化趋势,为保证Al元素拥有良好的收得率以及实现Al化学成分的精准确制,需在冶炼后期向钢水中喂入适量的铝线,本炉SCR420H钢水,钢包中钢水重量为102 t,真空脱气后向钢液中喂入了95 m铝线,随后立即测定了钢液中Al的含量为0.031%,同时,从钢包底部向钢液内通入氮气,密度较小的氮气在钢液中形成大

量弥散的气泡,使得钢液内部获得良好的流动性,在提升钢液化学成分的均匀性的同时,精准地提升了钢液中的氮含量。当氮气扩散到高温的钢液中时,由于铝与氮在高温条件下具有较强的亲和力,钢液中的大部分铝元素将与氮气在高温环境下会飞速发生反应,形成稳定的氮化物: $2Al+N_2=2AlN$;少量的铝元素与钢中微量的氧元素结合形成氧化物, $4Al+3O_2=2Al_2O_3$,由于氮气增强了钢液内部的流动性,增加了细微的 Al_2O_3 夹杂物相互碰撞与聚集长大的概率,细微的 Al_2O_3 夹杂物长大变成 Al_2O_3 簇群,较大的 Al_2O_3 簇群受浮力作用上浮至钢液表面的渣层中,被钢液表面的渣层捕捉并去除,从而使得钢液中的铝含量出现明显下降。钢液底吹氮结束后重新测定钢液中的Al与N, $w[Al]$ 为0.025%, $w[N]$ 为0.009 7%;连铸浇铸过程从中间包内取样测定了钢中的Al与N,经测定 $w[Al]$ 仍为0.025%, $w[N]$ 为0.009 8%,从测定结果直接反映出本炉SCR420H钢材的连铸过程保护浇铸措施较好,浇铸过程钢液中的铝元素未被外界的氧气所氧化,连铸浇铸过程基本没有发生增N。经检测分析,兴澄特钢生产SCR420H钢材细化晶粒元素Al、N加入的方式符合本质细晶粒钢的生产控制要求,并且生产过程Al与N的变化趋势无异常,SCR420H钢材生产过程化学成分见表1。

表1 SCR420H钢材生产过程化学成分变化趋势(质量分数)

工序	C	Si	Mn	Cr	P	S	Al	N
真空脱气后喂铝线	0.20	0.21	0.87	1.23	0.012	0.002	0.031	0.0025
底吹氮后	0.20	0.21	0.87	1.23	0.012	0.002	0.025	0.0097
连铸浇铸过程	0.20	0.21	0.87	1.23	0.012	0.002	0.025	0.0098
连铸成品	0.20	0.21	0.87	1.23	0.012	0.002	0.025	0.0099

2.3 三销轴制造过程

同时配合客户调查三销轴零件的制造全过程,客户制造本批次三销轴的全流程为锯切下料→短料球化退火(770 °C保温5 h,10 °C/h降温至720 °C后保温6 h,出炉空冷)→磷皂化→冷挤压成三销轴→中心钻孔→中心拉齿→渗碳淬火(930 °C保温3 h渗碳,降温到880 °C后油淬)→磨削→成品。三销轴零件的渗碳温度为930 °C,渗碳时间仅为3 h,较低的渗碳温度加上较短的保温时间,钢中的AIN析出相溶解度小于10%,大量的AIN析出相仍可以确保材

料的奥氏体晶粒度均匀且细小。进一步分析三销轴混晶零件,发现整个三销轴混晶最严重的区域为三销轴轴头两侧区域,此区域在冷锻过程中的变形率最大,而三销轴轴头变形率最小的上下区域全部为细小的6级以上晶粒,由此推断出三销轴零件混晶与冷锻过程有着密切的关联性。由于三销轴整体冷变形过程各个区域的变形率是不一致的,三销轴轴头的两侧区域在冷锻过程中经历了最大的变形程度,使用扫描电镜放大30 000倍观察三销轴轴头各个区域的AIN分布情况,经过扫描电镜放大30 000倍观察,三销轴轴头位置的变形相对其它区域是最大的,使用扫描电镜放大30 000倍,可以清晰地观测到该区域的析出相AIN排列分布变化相对其它区域是最大的,三销轴轴头位置的析出相AIN几乎已经全部进入到了晶内,已无法起到钉扎晶界的作用,相邻晶粒之间的晶界也逐渐消失,在高温的作用下相邻晶粒的物质开始发生迁移,细小的晶粒逐渐相互融合长大成为较大的晶粒。

冷挤压三销轴的过程三销轴轴头两侧区域经历了极大的形变,使得该区域AIN析出相几乎失去了钉扎晶界的作用,在930℃环境下保温180 min渗碳的过程中,晶粒内的原子热运动速度加剧,晶内原子拥有较高的能量,它们能够克服能垒并发生较长距离的迁移,实现不同晶粒之间的扩散,从而带动了相邻晶粒之间的物质交换与晶粒融合,所以,在冷变形率较大的区域会形成了大量粗大的晶粒^[7-8]。三销轴零件冷锻变形之后,三销轴零件渗碳淬火之前通常需要增加一道合理的正火或退火热处理工艺使得材料内的AIN化合物再次大量析出,并在晶界处形成偏聚,这些新的AIN析出相起到了强力钉扎晶界的作用^[9-10]。

3 冷锻零件热处理效果对比

正火与退火工艺均是改善冷锻零件晶粒粗大的

有效方法,正火与退火工艺实施重点为控制热处理的温度与时间,由于材料中的AIN在不同温度与时间下有着不同的析出量,所以不同的正火工艺与不同的退火工艺材料AIN析出情况有着明显的差异性,冷锻后的三销轴采用不同热处理工艺进行渗碳前的预处理,渗碳淬火后的晶粒改善情况大相径庭^[11-12]。

3.1 不同正火预处理工艺晶粒改善对比

冷锻后的三销轴零件采用不同的正火预处理工艺改善钢材的晶粒度,不同的正火工艺参数对冷锻晶粒度的改善结果截然不同,采用四种工艺对冷锻三销轴零件进行正火预处理,预处理后的三销轴零件采用相同的工艺渗碳淬火。四种预处理正火工艺参数分别为①870℃恒温1 h,空冷;②890℃恒温1 h,空冷;③910℃恒温1 h,空冷;④930℃恒温1 h,空冷。采用这四种预正火工艺渗碳淬火后的三销轴零件轴头使用5%的饱和苦味酸溶液腐蚀,变形率最大的轴头左右两侧区域晶粒度改善情况如图5所示:图5(a)为工艺一,晶粒评级为0~7级;图5(b)为工艺二,晶粒评级为2~7级;图5(c)为工艺三,晶粒评级为7级;图5(d)为工艺四,晶粒评级为7.5级。冷锻成型的三销轴零件,采用900℃以下的正火温度时,混晶现象虽有所改善,但仍旧检测出存在一定比例的粗大晶粒;采用900℃以上的正火温度时,冷锻三销轴零件的混晶现象得到了彻底地改善,三销轴零件全截面为细小均匀的7级及以上晶粒。

3.2 不同退火预处理工艺晶粒改善对比

冷锻后的三销轴零件采用不同的退火预处理工艺改善钢材的晶粒度,不同的退火工艺参数对冷锻晶粒度的改善结果同样存在一定差异^[13-14]。采用四种工艺对冷锻三销轴零件进行退火预处理,预处理后的三销轴零件采用相同的工艺渗碳淬火。四种预处理退火工艺参数分别为①630℃恒温1 h,随炉冷却;②680℃恒温1 h,随炉冷却;③720℃恒温1 h,随炉冷却;④770℃恒温1 h,随炉冷却。采用这

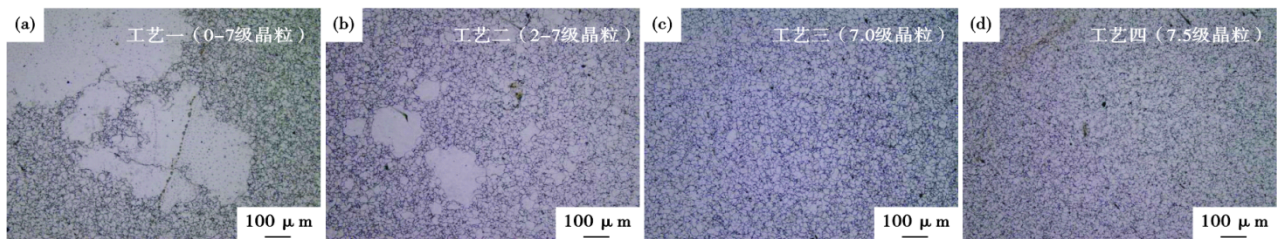


图5 不同预正火工艺三销轴晶粒改善情况:(a)工艺一,(b)工艺二,(c)工艺三,(d)工艺四

Fig. 5 Improvement of grain size in three-pins shafts using different pre normalizing processes : (a) process 1, (b) process 2, (c) process 3, (d) process 4

四种预退火工艺渗碳淬火后的三销轴零件轴头使用5%的饱和苦味酸溶液腐蚀,变形率最大的轴头左右两侧区域晶粒度改善情况如图6所示:图6(a)为工艺一,晶粒评级为3-7级;图6(b)为工艺二,晶粒评级为3-7级;图6(c)为工艺三,晶粒评级为4.5-7级;图6(d)为工艺四,晶粒评级为4-7级。冷锻成型的三销轴零件,采用630~770℃温度退火时,冷锻三销轴零件的混晶现象得到了一定的改善,晶粒可达到了3级及以上,最优的工艺为工艺三720℃恒温1h,随炉冷却,采用该预退火工艺处理的三销轴零件晶粒达到了4.5级及以上,零件在720℃温度环境下恒温,材料中的AlN化合物在此温度下存在一个析出高峰,弥散析出的AlN析出相在晶界产生一定的偏聚现象,重新钉扎了材料的晶界^[15-16]。

4 结论

1) 供国内客户的SCR420H热轧圆钢,由于冷锻过程部分区域冷挤压变形率较大,导致该区域内AlN析出相几乎失去了钉扎晶界的作用,高温渗碳过程中晶粒内部原子热运动速度加剧,晶内原子克服能垒实现了较长距离的迁移,带动了相邻晶粒之间的物质交换与晶粒融合,最终在冷变形率较大的区域形成大量粗大晶粒。

2) 正火与退火工艺可以使材料内部析出新的AlN相,从而改善冷锻零件的粗大晶粒。

3) 通过实施不同工艺参数的正火与退火预处理工艺,可不同程度改善三销轴零件的奥氏体晶粒度,改善效果最佳的热处理方案为900℃以上预正火工艺,采用预正火方案可使原本混晶严重的三销轴零件达到7.0级以上细小均匀的晶粒。

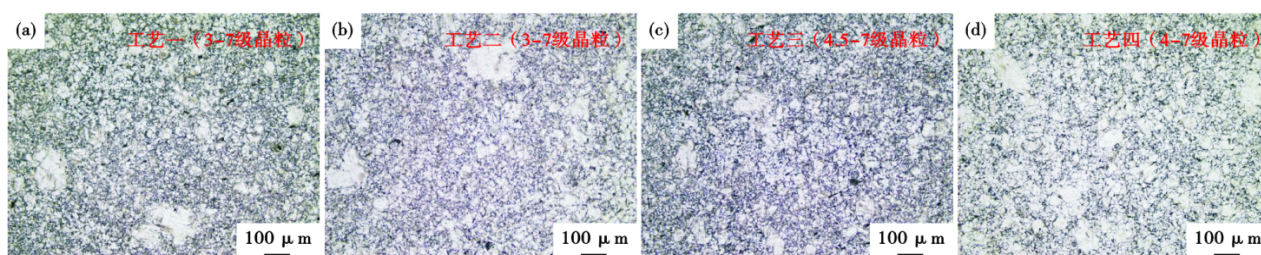


图6 不同预退火工艺三销轴晶粒改善情况:(a)工艺一,(b)工艺二,(c)工艺三,(d)工艺四

Fig. 6 Improvement of three-pins shafts grains by different pre-annealing processes : (a) process 1, (b) process 2, (c) process 3, (d) process 4

参考文献

- [1] 卢险峰. 对冷锻特点认识的一种提升与更新[J]. 金属加工(热加工), 2018(7): 81-83.
- [2] 陈学文, 陈军, 赵震, 等. 冷锻技术的发展现状与趋势[J]. 金属成形工艺, 2003, 21(5): 9-11+22.
- [3] Hung Chang-Yu, Yu Bai, Nobuhiro Tsuji. Grain size altering yielding mechanisms in ultrafine grained high-Mn austenitic steel: Advanced TEM investigations [J]. J. Mater Sci Technol. 2021, 86 (27). 192-203.
- [4] 刘化民, 黄良驹, 张士宏, 等. 闭塞冷锻轿车差速器行星齿轮组织性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(3): 275-277.
- [5] Smith J, Doe A. The influence of grain size on material properties [J]. J. Mater. Sci. 2022, 57 (3): 1234-1245.
- [6] Liu Zi-yi, Bao Yan-ping, Wang Min, 等. Austenite grain growth of medium-carbon alloy steel with aluminum additions during heating process [J]. Int. J. Minerals, Metallurgy Mater. 2019, (3). 282-290.
- [7] Johnson B, Brown C. New insights on grain size control [C]. Int. Conf. Mater. Sci. London, UK, 2023. New York: Springer, 2023: 456-467.
- [8] 苏梁, 弓硕, 王福明. 预热处理工艺对SCR420H齿轮钢高温渗碳奥氏体晶粒长大行为的影响[J]. 特殊钢, 2023(3): 74-83.
- [9] 杨少朋, 尉文超, 胡芳忠, 等. 低碳齿轮钢18CrNiMo7-6奥氏体晶粒度长大规律[J]. 金属学与热处理, 2021, 35(8): 179-183.
- [10] Hansen N. Hall - Petch relation and boundary strengthening [J]. Scripta Materialia, 2004, 51(8): 801-806.
- [11] 李明. 冷轧深冲板退火过程中AlN析出行为对深冲性能影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [12] Williams M. A study on grain size and its effects [D]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2021.
- [13] 黄道龙, 吴翔云, 侯清宇, 等. 加热工艺对16MnCr5H钢奥氏体晶粒度的影响[J]. 热处理, 2022, 37(2): 46-49.
- [14] Anderson P. Materials Science and Engineering [M]. New York: McGraw-Hill, 2020: 234-237.
- [15] Zhang L, Wang H. Effect of cold forging on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2024, 42 (3): 123-135.
- [16] Wang Y. Study on cold forging process and properties of titanium alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.