

冷却速度对厚重H型钢组织与性能的影响

李凡^{1a}, 张恒^{1b}, 陈其伟^{1b}, 邢军^{1a,2}, 黄飞^{1b}, 王永强^{1a}

(1. 安徽工业大学 a. 材料科学与工程学院, b. 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 马鞍山钢铁股份有限公司技术中心, 安徽 马鞍山 243000)

摘要:以工业试轧制的厚重H型钢为研究对象进行热处理实验,研究冷却速度对厚重H型钢翼缘厚度方向显微组织和力学性能的影响,结合连续冷却转变曲线修正适用于厚重H型钢的组织性能关系模型。结果表明:冷却速度在2~4 °C/s范围内,提高冷却速度可增加H型钢组织中珠光体含量、减小铁素体晶粒尺寸,材料的屈服强度有所增加但塑性有所降低;冷却速度大于5 °C/s时组织为铁素体+贝氏体,进一步增加冷却速度,会出现马氏体。修正模型的计算结果与实验结果吻合较好,模型预测准确度较高,通过组织测试可实现对力学性能的预测。

关键词:冷却速度;显微组织;力学性能;H型钢

中图分类号: TG 151.2; TG 142.12

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7872.2022.03.004

Effect of Cooling Rate on Microstructure and Properties of Heavy H-beam

LI Fan^{1a}, ZHANG Heng^{1b}, CHEN Qiwei^{1b}, XING Jun^{1a,2}, HUANG Fei^{1b}, WANG Yongqiang^{1a}

(1. a. School of Materials Science & Engineering; b. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Technical Center, Maanshan Iron and Steel Co., Ltd, Maanshan 243000, China)

Abstract: The heat treatment experiment was carried out with the heavy H-beam rolled in the industrial trial as the research object. The effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of the heavy H-beam flange in the thickness direction was studied. Combined with the continuous cooling transformation curve, the relationship model of microstructure and properties of the heavy H-beam was modified. The results show that when the cooling rate is in the range of 2–4 °C/s, increasing the cooling rate can increase the pearlite content structure of H-beam, reduce the ferrite grain size, and increase the yield strength, but decrease the plasticity of the material. When the cooling rate is greater than 5 °C/s, the microstructure is ferrite and bainite. If the cooling rate is further increased, martensite will appear. The calculation results of the modified model are in good agreement with the experimental results, and the prediction accuracy of the model is high. The prediction of mechanical properties can be realized by microstructure test.

Key words: cooling rate; microstructure; mechanical properties; H-beam

工业生产的结构钢通常在室温条件下使用,其综合性能取决于由奥氏体冷却转变得到的室温组织,而连续冷却过程中过冷奥氏体的转变过程和转变产物主要取决于冷却速度^[1-2]。控制冷却技术是在奥氏体相变

收稿日期:2021-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51971003);安徽高校自然科学基金项目(KJ2019A0070);安徽省高校优秀青年人才支持计划(gxyq2019023);马钢产学研项目(KFG-2019068)

作者简介:李凡(1996—),男,安徽安庆人,硕士生,主要研究方向为高性能钢铁材料。

通信作者:王永强(1982—),男,河北石家庄人,博士,副教授,主要研究方向为高性能钢铁材料。

引文格式:李凡,张恒,陈其伟,等.冷却速度对厚重H型钢组织与性能的影响[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2022,39(2):262-267.

温度区间进行冷却的技术,目的是对奥氏体的相变行为进行控制,进一步细化铁素体晶粒,同时通过改变冷却路径实现相变强化。新一代以超快速冷却为核心的热机械工艺(thermo mechanical control process, TMCP)^[3-4],不仅可解决传统TMCP工艺存在的“低温大压下”和“添加微合金元素”两个问题,还可解决传统层流冷却技术应用中出现的冷却能力不足、冷却均匀性差等问题^[5-6]。通过超快速冷却技术能够更好地利用细晶强化和相变强化等机制来提高铁素体强度,该技术在节能减排和降低成本方面也具广阔前景^[7-8]。

众多学者对超快速冷却技术在棒线材及热轧中厚钢板等钢材生产过程中的应用展开研究,闫卫兵等^[9]通过改造超快速冷却装置提高轴承钢棒材网状组织的控制水平;李为龙等^[10]通过优化设计线棒材轧制用冷却器来大幅提高线棒材生产套筒式冷却器的冷却能力,同时改善轧件表面温度的均匀性;田勇等^[11]针对中厚板轧制开发新一代轧后控冷技术,发现采用新技术可明显提高产品的强度和韧性。对于厚重H型钢,其冷却技术在车间中的应用还是不够成熟,以超快冷为核心的新一代TMCP工艺在厚重H型钢生产中的应用仍存在孔型轧制压缩比受限^[12]、超快冷却过程难以准确控制等问题。为此,本课题组^[13]提出通过精轧过程诱导动态再结晶的发生,通过细化奥氏体晶粒促进相变形核细化晶粒,而后续冷却过程中冷却速度对晶粒长大和组织组成相的影响也会影响H型钢的力学性能。鉴于此,在分析冷却速度对420 MPa级低碳微合金厚重H型钢显微组织及力学性能影响的基础上,修正适用于厚重H型钢的组织性能关系模型,以期工业轧制工艺设计提供参考。

1 实验材料和方法

以Q420级别工业试轧制的厚重H型钢为实验材料,其合金成分如表1。

表1 实验钢的合金成分

Tab. 1 Alloying chemical composition of experimental steel

w(C)/%	w(Mn)/%	w(Si)/%	w(Nb)/%	w(V)/%	w(Ti)/%	w(N)/%	w(Al)/%	w(S)/%	w(P)/%
0.080	1.620	0.240	0.048	0.008	0.010	0.003	0.024	0.002	0.013

实验钢的原始金相组织如图1,晶粒尺寸为10 μm。采用线切割方式以轧制方向(RD)为长度方向切取标准拉伸与冲击试样,拉伸试样尺寸如图2。热处理实验过程中将试样置于箱式电阻炉中加热至930 ℃(模拟出口温度),保温5 min,取出试样后,分别使用水冷、风冷、空冷和石棉冷等方式将其冷却至室温。实验过程中,采用BCL1000P多路温度测温仪记录试样温度,并依此计算不同冷却方式的冷却速度。经测量与计算,在900~700 ℃之间水冷、风冷、空冷和石棉冷4种冷却方式下的冷却速度分别为176, 13, 4, 2 ℃/s。利用DNS50电子万能试验机及NI300C冲击试验机测试试样的拉伸及冲击性能,在拉伸断后试样两端切取试样观察其金相组织及断口的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)形貌。

另取试样,将其加热至1 000 ℃保温3 min后分别以不同冷速冷却至室温,利用DIL805A/D热膨胀仪记录实验过程中试样的膨胀量;利用HVT-1000A型数显显微硬度计测量热膨胀后的试样维氏硬度。结合热膨胀曲线与显微组织利用Origin软件绘制实验钢的连续冷却转变(continuous cooling transformation, CCT)曲线。

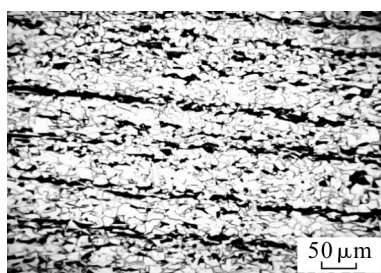


图1 实验钢原始金相组织

Fig. 1 Original metallographic structure of experimental steel

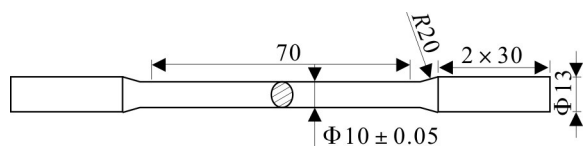


图2 实验用拉伸试样

单位:mm

Fig. 2 Tensile specimen for experiment Unit: mm

2 结果和分析

2.1 冷却速度对厚重H型钢显微组织的影响

不同冷却速度下厚重H型钢试样的金相组织如图3。从图3可见:对于石棉冷和空冷两种方式,试样组织主要为铁素体和珠光体,随冷却速度的提高,铁素体晶粒有所细化、珠光体含量有所增加;冷却速度为2 °C/s时,铁素体晶粒尺寸为12.2 μm,珠光体体积分数为18.0%;冷却速度增至4 °C/s,铁素体晶粒尺寸为9.6 μm,珠光体体积分数为22.5%。

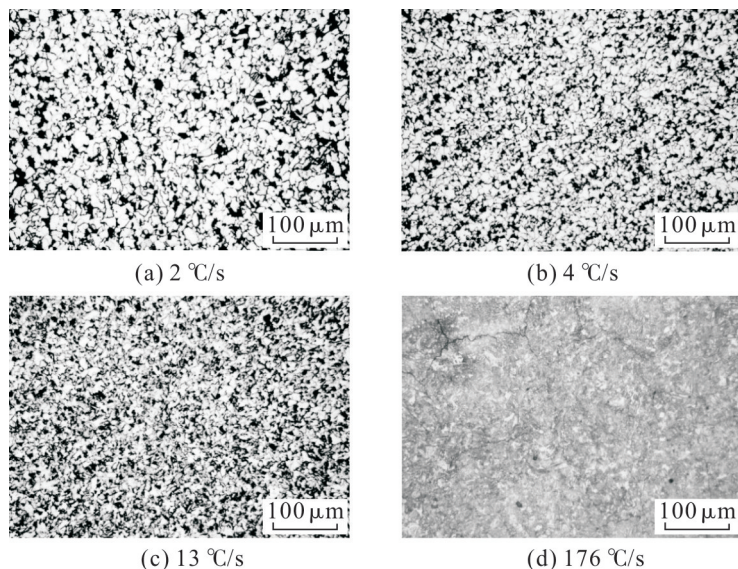


图3 不同冷却速度条件下实验钢的微观组织

Fig. 3 Microstructure of experimental steel under different cooling rates

实验钢的CCT曲线如图4。其中A为奥氏体、F为铁素体、P为珠光体、B为贝氏体、M为马氏体、 M_s 点为马氏体开始形成的温度点。结合图3分析表明:冷却速度在2~4 °C/s范围内,其对珠光体含量的影响很小,冷却速度由2 °C/s增至4 °C/s,珠光体的体积分数仅增加4.5%,但铁素体晶粒尺寸减小了2.6 μm,材料强度有所增加;冷却速度增至13 °C/s时,组织中出现了贝氏体;水冷条件下(176 °C/s),形成马氏体,同时出现裂纹。从图4可看出,冷却速度达2 °C/s时开始发生贝氏体转变,而在5 °C/s时珠光体消失,组织为铁素体+贝氏体。

2.2 冷却速度对厚重H型钢力学性能的影响

不同冷却速度热处理试样的应力-应变曲线如图5。由图5可看出:在2,4 °C/s的冷却速度下,试样对应的屈服强度为341,364 MPa,抗拉强度为464,499 MPa,塑性伸长率为34.7%,31.4%;冷却速度增至176 °C/s时,试样屈服强度大幅提高,为825 MPa,但塑性伸长率仅13.6%。

断口形貌能直接反映塑性的好坏,韧窝型断口是韧性断裂的一种典型断口形式。不同冷却方式拉伸试样断口的SEM形貌如图6。由图6可看出:2 °C/s时试样断口韧窝密度较大、韧窝分布最均匀,

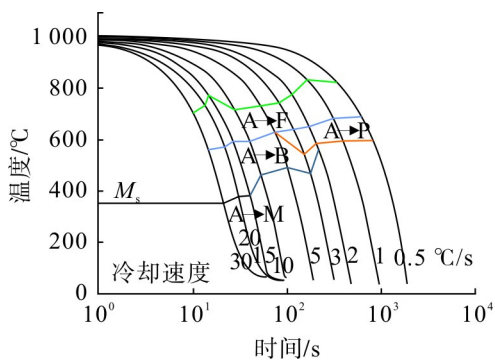


图4 实验钢的CCT曲线

Fig. 4 CCT curves of experimental steel

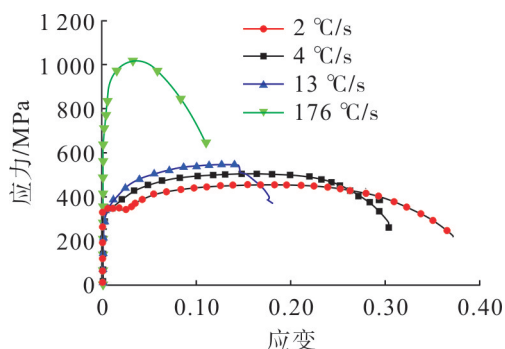


图5 不同冷却速度试样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of samples with different cooling rates

塑性最好;4 ℃/s时试样断口韧窝密度较2 ℃/s时有所降低,但韧窝更大更深,塑性较好^[14];总体看,随冷却速度的增大韧窝明显减少,且韧窝出现夹杂的沿晶断裂,沿晶断裂为脆性断裂机制,一般只有高强度而塑性差的材料才会发生^[15]。

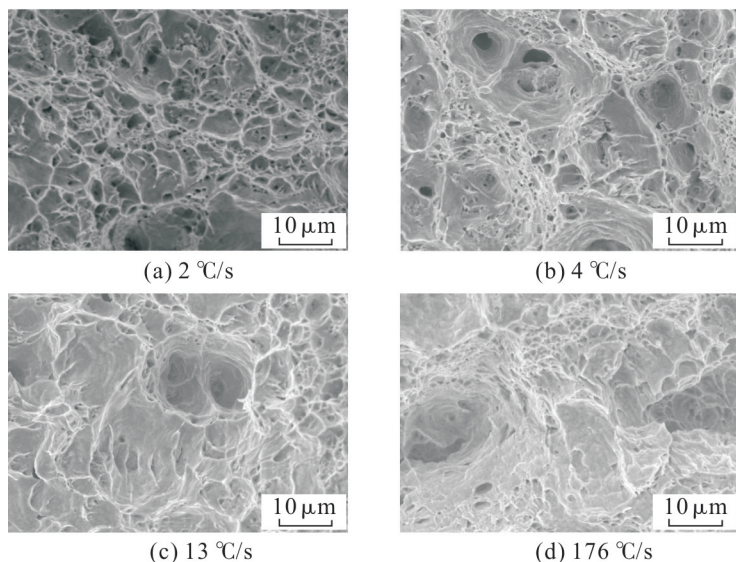


图6 不同冷却速度下试样的拉伸断口SEM形貌

Fig. 6 SEM morphology of tensile fracture of samples with different cooling rates

利用夏比摆锤冲击试验测试不同冷却速度下试样的韧性,结果如表2。由表2可看出,随着冷却速度的增加,室温冲击功逐渐下降,这也与拉伸实验结果相符合。需要指出的是,实验过程中涉及加热至奥氏体化的重结晶过程,这会导致晶粒尺寸进一步细化。因此讨论晶粒尺寸的绝对大小意义不大,文中主要分析冷却速度对晶粒尺寸的相对影响。

表2 不同冷却速度下试样室温冲击功

Tab. 2 Impact energy of samples with different cooling rates at room temperature

冷却速度/(℃/s)	冲击功/J
2	296.7
4	284.4
13	257.8
176	169.6

3 厚重H型钢的组织性能关系模型

为分析厚重热轧H型钢组织中铁素体晶粒尺寸和珠光体含量对F+P组织与力学性能的影响,结合不同冷却速度下H型钢的金相及拉伸实验结果,修正铁素体晶粒尺寸和珠光体体积分数与力学性能关系模型^[16]中的材料参数。修正后具有铁素体和珠光体两相组织组成的材料屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 公式为:

$$\sigma_s = \varphi_F^{1/3} [102 + 58.5w(\text{Mn}) + 17.4d_F^{-1/2}] + (1 - \varphi_F^{1/3}) [178.6 + 3.85S_p^{-1/2}] + 63.1w(\text{Si}) + 42.0w(\text{N})^{1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_b = \varphi_F^{1/3} [268 + 1142.7w(\text{N}) + 18.17d_F^{-1/2}] + (1 - \varphi_F^{1/3}) [719.2 + 3.54S_p^{-1/2}] \quad (2)$$

其中: $w(\text{Mn})$, $w(\text{Si})$, $w(\text{N})$ 分别为Mn, Si, N元素的质量分数; φ_F 为铁素体的体积分数; d_F 为铁素体晶粒尺寸; S_p 为珠光体片层间距, $S_p = \frac{0.018}{996 - t}$,其中 t 为珠光体转变温度,根据图4知厚重H型钢组织中珠光体转变温度约700 ℃。

根据式(1),(2)可计算试样在给定珠光体体积分数和铁素体晶粒尺寸条件下的屈服和抗拉强度,结果如图7,8。从图7,8可看出:铁素体晶粒尺寸越大,材料的抗拉与屈服强度越高;而珠光体体积分数越大,材料的抗拉和屈服强度越低。为验证模型的准确性,对实验钢进行实验验证。珠光体体积分数30%时,材料屈服和抗拉强度的实测结果分别为408, 548 MPa,模型计算结果分别为417, 535 MPa。两种结果相差不大,表明模型预测准确度较高,可通过组织测试实现对力学性能的预测,从而为厚重H型钢工业设计工艺提供依据。

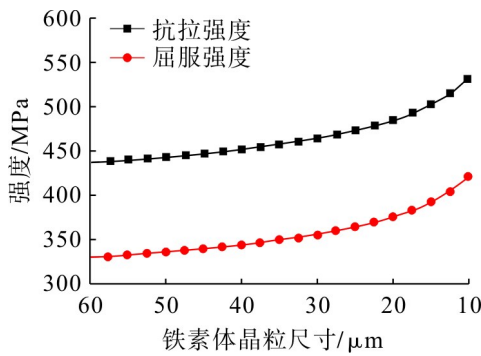


图7 铁素体晶粒尺寸与强度的关系

Fig. 7 Relationship between ferrite grain size and strength

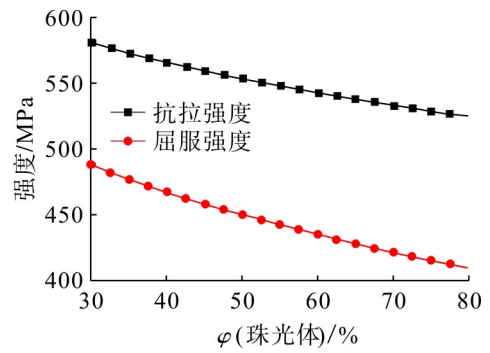


图8 珠光体体积分数与强度的关系

Fig. 8 Relationship between pearlite volume fraction and strength

根据 Rara 等^[17]的研究,钢的延伸量与晶粒尺寸的关系可用下式表示

$$A = e - 0.02\varphi_p + 0.3w(\text{Mn}) + 0.2w(\text{Si}) - 3.4w(\text{Si}) - 4.4w(\text{P}) + 0.29w(\text{Sn}) + \frac{f}{\sqrt{d_F}} \quad (3)$$

其中: A 为延伸量; e, f 为与成分相关的材料常数。将 $2, 4\text{ }^\circ\text{C/s}$ 的冷却速度下珠光体体积分数、铁素体晶粒尺寸及各元素质量分数代入式(3),求得 $e=27.8, f=1.5$ 。再利用式(3)得到晶粒尺寸与塑性的关系,结果如图9。对比图7,9可知,材料塑性对晶粒尺寸的敏感度小于强度对晶粒尺寸的敏感度,表明晶粒尺寸变化不显著时,其对材料塑性的影响不明显。

上述研究表明,空冷的试样组织长大并不显著,晶粒尺寸为 $9.6\text{ }\mu\text{m}$ 。从抑制晶粒长大的效果看,更快的冷却速度有助于减小晶粒尺寸,但过快的冷却速度会促使形成贝氏体组织,导致塑性和低温韧性的降低;进一步增加冷却速度会形成马氏体,导致裂纹产生。因此,冷却速度在 $2\sim 5\text{ }^\circ\text{C/s}$ 较合理,若采用更快的冷却速度,则在铁素体转变温度前停止快冷,采用较低的冷却速度。

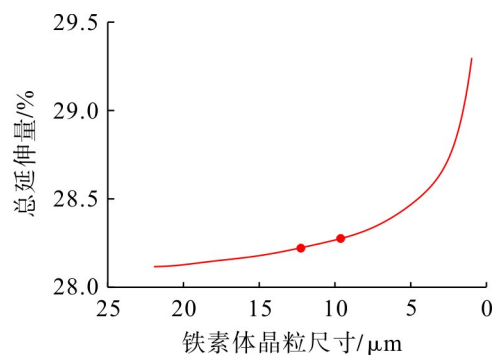


图9 铁素体晶粒尺寸对塑性的影响

Fig. 9 Effect of ferrite grain size on plasticity

4 结 论

1) 在 $900\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内,冷却速度在 $2\sim 4\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,冷却速度对厚重H型钢组织性能的影响不大;冷却速度达 $13\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时产生贝氏体组织,冷却速度达 $176\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时出现马氏体组织,伴随马氏体组织的出现,试样会形成微观裂纹。结合CCT曲线分析,冷却速度控制在 $2\sim 5\text{ }^\circ\text{C/s}$ 较合理,若采用更快的冷却速度,则在铁素体转变温度前停止快冷,采用较低的冷却速度,避免贝氏体和马氏体的形成。

2) 结合金相与拉伸实验结果修正厚重H型钢F+P组织的屈服强度、抗拉强度与延伸量模型,利用修正后的组织性能关系模型对实验钢的力学性能进行计算,抗拉强度的计算和实验结果分别为 $417, 408\text{ MPa}$,屈服强度的计算和实验结果分别为 $535, 548\text{ MPa}$ 。两种结果相差不大,模型预测准确度较高,表明采用修正的模型可通过厚重H型钢的组织测试实现对其力学性能的预测,从而为厚重H型钢工业生产工艺提供依据。

参考文献:

- [1] 孙晓冉,丁辉,孙岩,等. 冷却速度对抽油杆用NiCrMnMoV钢过冷奥氏体转变的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(11):163-166.
- [2] 宁保群,刘永长,乔志霞,等. T91铁素体耐热钢过冷奥氏体转变过程中临界冷却速度的研究[J]. 材料工程, 2007(9):9-13.
- [3] 王国栋. 以超快速冷却为核心的新一代TMCP技术[J]. 上海金属, 2008, 30(2):1-5.

- [4] 孙艳坤,吴迪.用超快速冷却新工艺生产GCr15轴承钢[J].钢铁研究学报,2009,21(1):22-25.
- [5] 李凡,衣海龙,陈军平,等.超快冷技术在鞍钢Q550工程机械用钢生产中的应用[J].轧钢,2011(5):7-8.
- [6] 李大赵,索志光,崔天燮,等.采用TMCP技术的低碳低合金高强度钢生产的研究现状及进展[J].钢铁研究学报,2016,28(1):1-7.
- [7] 冯路路,董宝奇,李萍萍.超快速冷却工艺对780 MPa级低碳高强度结构钢组织和力学性能的影响[J].热加工工艺,2020,49(10):111-113.
- [8] WU T, WU R, LIU B, et al. Microstructural and mechanical properties of ultra-high-strength dual-phase steel produced by ultra-fast cooling[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36(7):1-9.
- [9] 闫卫兵,翁鹏,张丽峰,等.超快冷技术在轴承钢网状碳化物控制上的应用[J].河北冶金,2019(1):44-47.
- [10] 李为龙,曾凡政.线棒材轧制用冷却器的优化设计与应用[J].轧钢,2020,37(2):60-63.
- [11] 田勇,王丙兴,袁国,等.基于超快冷技术的新一代中厚板轧后冷却工艺[J].中国冶金,2013,23(4):17-20.
- [12] 赵宪明,郭飞,王丽娜,等.超快冷对H型钢冷却变形的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2012,33(7):949-952.
- [13] 邢军,张建,王永强,等.一种抑制晶粒长大的厚重热轧H型钢及其生产方法:CN112410665B[P]. 2021-10-29.
- [14] SUN X, CHOI K S, SOULAMI A, et al. On key factors influencing ductile fractures of dual phase (DP) steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 526(1):140-149.
- [15] 谢和平,高峰,周宏伟,等.岩石断裂和破碎的分形研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(4):1-9.
- [16] BALU N A, VIGNESH R, GAUTHAM B P, et al. An inverse, decision-based design method for integrated design exploration of materials, products and manufacturing processes[J]. Journal of Mechanical Design, 2018, 140(11):111403.
- [17] RANA A K, PAUL S K, DEY P P. Effect of martensite volume fraction on strain partitioning behavior of dual phase steel[J]. Physical Mesomechanics, 2018, 21(4):333-340.

责任编辑:何莉

(上接第261页)

- [7] 孙业长,代梦博,罗邦曹,等.激发剂强化钢渣磁选尾渣胶凝活性的研究[J].烧结球团,2021,46(1):8-13.
- [8] 吴凡,高谦,杨志强.全尾砂胶凝材料配比正交试验及其充填体强度模型[J].中国有色金属学报,2021,31(8):2269-2278.
- [9] CHANG Q L, ZHOU H Q, HOU C J. Using particle swarm optimization algorithm in an artificial neural network to forecast the strength of paste filling material[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(4):551-555.
- [10] 袁国斌,杨志强,高谦,等.利用BP神经网络优化低活性矿渣基胶凝材料配方[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(9):1189-1195.
- [11] 温正.精通MATLAB智能算法[M].北京:清华大学出版社,2015:19-44.
- [12] ZHANG Q, LI X, YANG W. Optimization of filling slurry ratio in a mine based on back-propagation neural network[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7):2867-2874.
- [13] 闻新,张兴旺,朱亚萍,等.智能故障诊断技术:MATLAB应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2015:47-54.
- [14] 董越.多固废资源在金川矿山充填采矿中协同综合利用研究[D].北京:北京科技大学,2019:95-104.
- [15] 刘恒亮,张钦礼,王新民,等.全尾砂充填体正交BP神经网络强度预测[J].金属矿山,2016(1):43-46.
- [16] RAFAT S, PARATIBHA A, YOGESH A. Prediction of compressive strength of self-compacting concrete containing bottom ash using artificial neural networks[J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(10):780-786.
- [17] 刘志祥,周士霖,郭永乐.磷石膏充填体强度GA-BP神经网络预测模型[J].矿冶工程,2011,31(6):1-5.
- [18] 魏微,高谦.改进的BP神经网络模型预测充填体强度[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):90-95.
- [19] 胡凡,彭亮,仵峰峰,等.基于BP神经网络模型的充填体强度值预测[J].有色金属(矿山部分),2021,73(6):60-65.
- [20] 代梦博,罗邦曹,孙彩虹,等.低成本钢尾渣-矿渣基矿山充填料的优化开发[J].钢铁,2022,57(2):175-184.

责任编辑:何莉