

钒对低碳钢动态再结晶的影响规律研究

熊雪刚¹, 张开华¹, 王 羿², 叶晓瑜¹

(1.攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2.攀钢集团西昌钢铁有限公司, 四川 西昌 615000)

摘 要: 为研究钒对低碳钢动态再结晶的影响规律, 选取4种对比成分的钒氮微合金化钢, 测量动态再结晶的流变应力曲线, 获得了峰值应力 σ_p 、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 及变形温度 T 的对应关系, 分析了变形温度、V及N含量对流变应力曲线的影响。建立了钒氮微合金化钢及对比钢的热变形动态再结晶Avrami模型, 回归得到其动态再结晶名义激活能。结果表明: V对动态再结晶临界温度提高有限, V和N复合后对动态再结晶临界温度提高明显, 延迟再结晶能力增强。

关键词: 低碳钢; 钒; 微合金化; Avrami模型; 动态再结晶; 激活能

中图分类号: TF841.3, TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2019)04-0121-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.04.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Influence of Vanadium Content on Austenite Recrystallization Rule of Low Carbon Steel

Xiong Xuegang¹, Zhang Kaihua¹, Wang Yi², Ye Xiaoyu¹

(1. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Pangang Group Xichang Steel & Vanadium Co., Ltd., Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract: To investigate the dynamic recrystallization rule of vanadium microalloying low carbon steel and its influence factors, flow curves under dynamic recrystallization conditions of 4 kinds of V-N microalloy steels were obtained by experiments so that the relationship of peak stress σ_p , strain rate $\dot{\varepsilon}$ and temperature T was obtained from the flow curve. The effect of temperature and content of V, N on dynamic recrystallization model was studied. By the way, an Avrami model for V-N microalloy steels was established and the dynamic recrystallization activation energy was obtained by regression. The results show that V has a limit effect on improving the dynamic recrystallization critical temperature, while V combined with N has the significant effect on the critical temperature so as to inhibit the dynamic recrystallization.

Key words: low carbon steel, vanadium, microalloyed, Avrami model, dynamic recrystallization, activation energy

0 引言

近年来, 铌、钒、钛微合金化技术, 在合金设计原理、生产工艺、应用领域等方面都得到了巨大的发展和完善。钒作为唯一既可控制其在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 过程中的

相间析出, 又可在铁素体中随机析出的微合金化元素, 在高强度低合金钢中得到了广泛的应用^[1]。

钒在钢中主要以其碳、氮化物形式存在于基体和晶界上, 起到沉淀强化和抑制晶粒长大的作用^[2]。钒在铁素体中的溶解度比在奥氏体中的溶解度小的

收稿日期: 2018-09-06

基金项目: 攀西国家级战略资源创新开发试验区第一批项目——《钒钛微合金化钢种及制品关键技术研发与应用项目》, 招标号: 1440STC30358。

作者简介: 熊雪刚(1988—), 男, 江西金溪人, 工程师, 工学硕士, 从事高热轧品种钢开发, E-mail: xuegangxiong@163.com。

多,随着相变的进行,在一定的热力学和动力学条件下,钒的碳、氮化物在相界析出,通过在两相区加速冷却,可以细化晶粒,控制其碳、氮化物的析出,控制其沉淀物的大小和分布,决定了其沉淀强化的效果^[9]。

大量研究表明,氮是含钒微合金钢中一种十分有效的合金化元素,其与钒具有较强的亲和力,钢中增氮能优化钒的析出,起到细化晶粒的作用,进而改善钢的强韧性配合^[9]。然而,钒氮微合金化技术在国内的研究仍处于开发试验阶段,有些具体作用机理研究尚未成熟,对钢组织与性能影响的研究尚不深入。

笔者利用热压缩模拟试验对低碳钒氮微合金化钢动态再结晶行为进行研究,分析动态再结晶对奥氏体显微组织的影响,建立钒氮微合金化钢及低碳钢的热变形动态再结晶 Avrami 模型,分析变形温度、 V 及 N 含量对流变应力曲线的影响,回归得到其动态再结晶名义激活能^[9],为研究钒氮微合金化钢强韧化机理提供理论基础。

1 试验方法

试验用钢经真空冶炼炉冶炼,锻造成 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 钢锭。其化学成分如表 1 所示。将钢锭机械加工成 $\varnothing 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的热模拟圆柱试样,在 Gleeble-1500 热模拟机上进行单道次压缩热模拟试验,热模拟工艺方案如图 1 所示。

表 1 试验用钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of the tested steels(mass fraction) %

编号	C	Si	Mn	P	S	V	N
1 [#]	0.090	0.22	1.50	<0.005	0.002 7		0.005 2
2 [#]	0.110	0.22	1.50	<0.005	0.003 0	0.06	0.005 1
3 [#]	0.077	0.17	1.41	<0.005	0.002 6	0.12	0.005 6
4 [#]	0.084	0.16	1.32	<0.005	0.003 5	0.12	0.013 3

试样以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的速率加热到 $1\text{ }150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 3 min ,然后以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的速率分别降温至 $800\sim 1\text{ }100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 10 s 以消除温度差,在 0.3 s^{-1} 的应变速率下进行真应变 60% 轧制,然后以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 速率冷却至室温。为了确认钒对低碳钢热变形后微观组织的影响,将热模拟后的试样在厚度中心位置线切割(见图 2),采用硝酸酒精溶液侵蚀后,利用德国 ZEISS MEF3 金相显微镜观察厚度中心位置的金相组织。

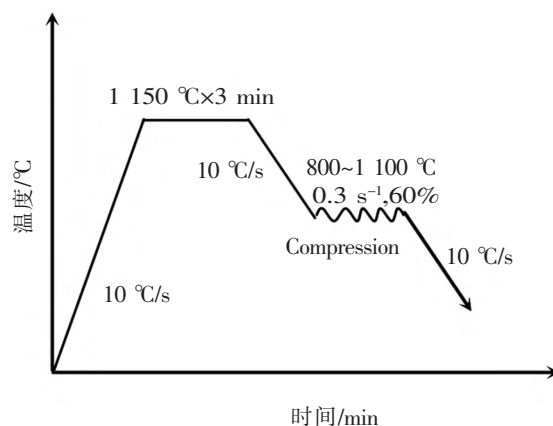


图 1 试验钢的热模拟工艺方案

Fig.1 Thermal simulation curves of the test steels

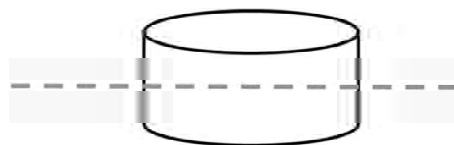


图 2 热模拟试样线切割示意

Fig.2 Sketch of sample line cutting

2 试验结果与讨论

2.1 钒对流变应力曲线的影响

图 3 为不同变形温度下试验钢的流变应力曲线。由图 3 可知:当变形温度为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,1[#]样流变应力曲线为动态回复型;而当变形温度高于 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢的流变应力曲线为动态再结晶型;随着 V 的加入(2[#]和 3[#]样),当变形温度为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,2[#]和 3[#]样流变应力曲线为动态回复型;当变形温度高于 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢的流变应力曲线为动态再结晶型;而进一步增加 N 的含量后(4[#]样),当变形温度为 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,4[#]样流变应力曲线为动态回复型;而当变形温度高于 $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢的流变应力曲线为动态再结晶型。由此可见,随着 V 和 N 的加入,动态再结晶临界温度升高,动态再结晶受到抑制。

图 4 所示为变形温度为 $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同试验钢的流变应力曲线。由图 4 可知,1[#]、2[#]、3[#]钢均存在动态再结晶,流变应力降低,4[#]钢流变应力下降趋势不明显。说明在变形温度 $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变速率 0.3 s^{-1} ,变形量 60% 的条件下,1[#]钢发生明显的动态再结晶,随着 V 的加入(2[#]和 3[#]样),钢的流变应力略微增加,再进一步增加 N 的含量后,钢的流变应力增加明显。

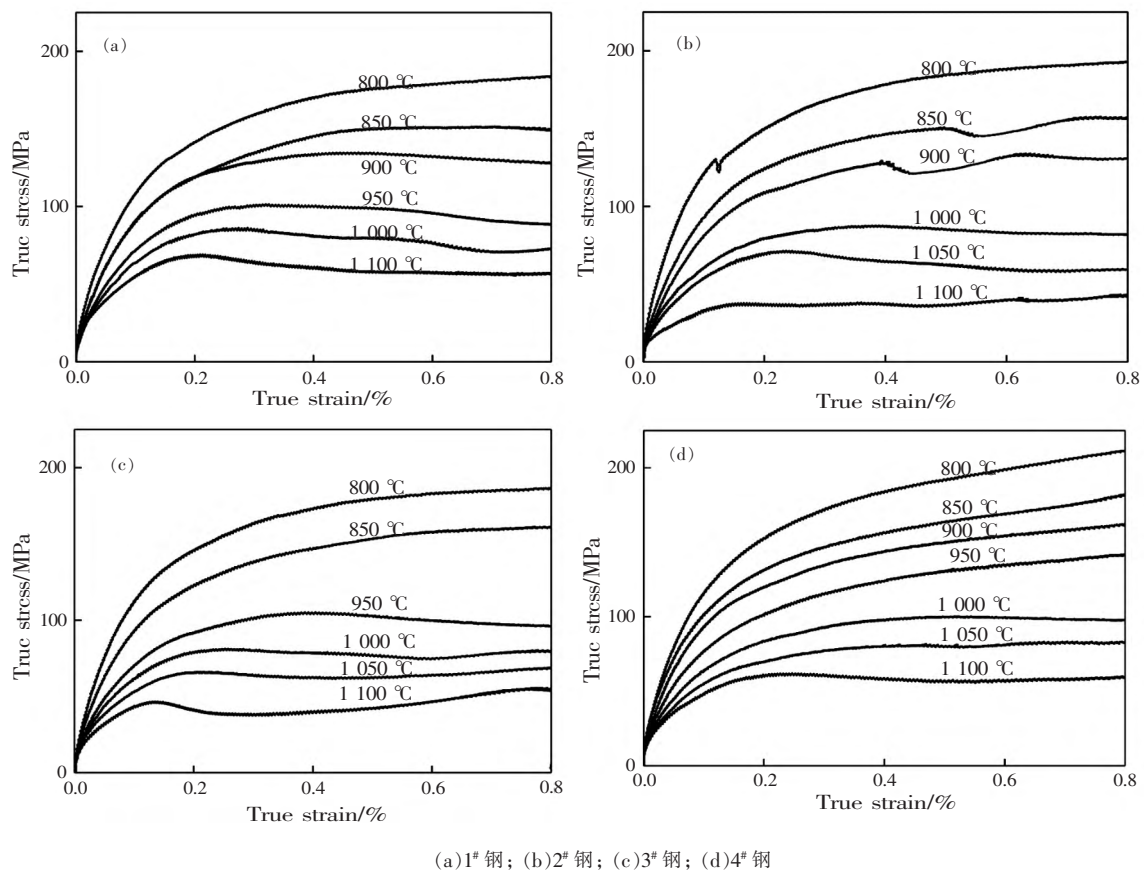


图3 不同变形温度下试验钢的流变应力曲线

Fig.3 Flow stress curves of test steels under different temperatures

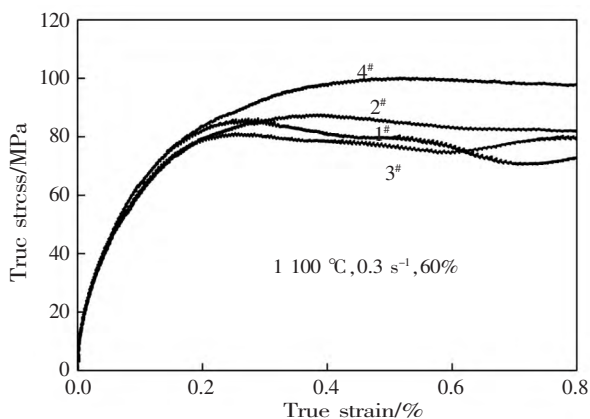


图4 不同试验钢的流变应力曲线

Fig.4 Flow stress curves of test steels

以上结果表明: 钢中添加微量 V, 对试验钢的临界再结晶温度提高有限, 这主要是 VC 的固溶积高, 因而 VC 的析出比较少, 对临界再结晶温度的影响有限; 而在含 V 微合金化钢中增加 N 含量后, 可以明显地提高试验钢的临界再结晶温度, 这主要是因为 VN 的固溶度积远远小于 VC 固溶度积,

N 含量的增加有效地促进了富氮的 V(C, N) 析出, 因而对动态再结晶的钉扎力增大, 延迟再结晶能力增强^[9]。

2.2 钒对动态再结晶激活能的影响

奥氏体再结晶是一个热激活过程, 因此可以用 Avrami 方程来描述:

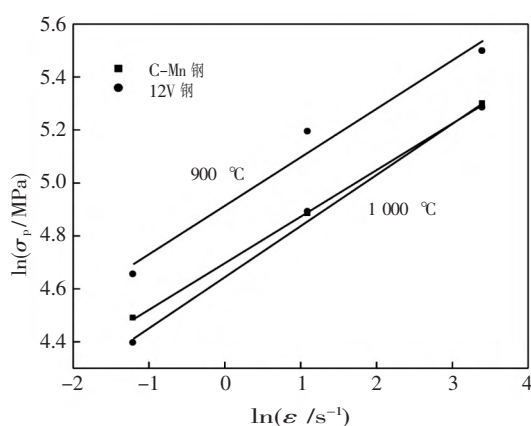
$$\dot{\varepsilon} = A \sigma_p^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; σ_p 为峰值应力; T 为变形温度; R 为摩尔气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; Q 为动态再结晶名义激活能, J/mol ; A, n 为变形材料决定的常数。

式(1)两边取对数得到式(2):

$$\ln \sigma_p = -\frac{1}{n} \ln A + \frac{1}{n} \ln \dot{\varepsilon} + \frac{1}{n} \frac{Q}{RT} \quad (2)$$

由式(2)可知, 在给定变形温度条件下 $\ln \sigma_p$ 和 $\ln \dot{\varepsilon}$ 呈线性关系, 通过线性拟合曲线 $\ln \sigma_p \sim \ln \dot{\varepsilon}$, 求出其斜率即可得到 n 值; 在给定应变速率条件下 $\ln \sigma_p$ 和 $1/T$ 呈线性关系, 通过线性拟合曲线 $\ln \sigma_p \sim 1/T$, 求出其斜率即可得到奥氏体动态再结晶的名义激活能 Q 。

图5 试验钢 $\ln\sigma_p \sim \ln\epsilon$ 曲线Fig.5 $\ln\sigma_p \sim \ln\epsilon$ curves of the tested steels

通过对在给定温度条件下的 $\ln\sigma_p$ 值和对应的 $\ln\epsilon$ 值线性回归分析可得,1[#]钢和3[#]钢的 n 值分别为 5.6 和 5.3,对在相同应变速率条件下的 $\ln\sigma_p$ 值与对应的 $1/T$ 值线性回归分析可得到 1[#]钢和 3[#]钢的动态再结晶名义激活能分别是 126、137 kJ/mol。激活能是表征原子扩散能力的重要参数,激活能越大,表明原子扩散需要越过的能垒越高,扩散就越困难,因

而再结晶就越慢。显然,C-Mn 钢(1[#]钢)添加 0.12% V 后,再结晶激活能升高,是由于 V-Fe 原子的交互作用及 VCN 析出相对位错和晶界的钉扎作用导致的,V 对再结晶的抑制作用可以通过再结晶激活能这一项体现出来。

2.3 钒对金相组织的影响

观察了 1[#]~4[#]钢在应变速率 0.3 s^{-1} ,1 000 °C 下变形 60%时的金相组织,如图 7 所示。

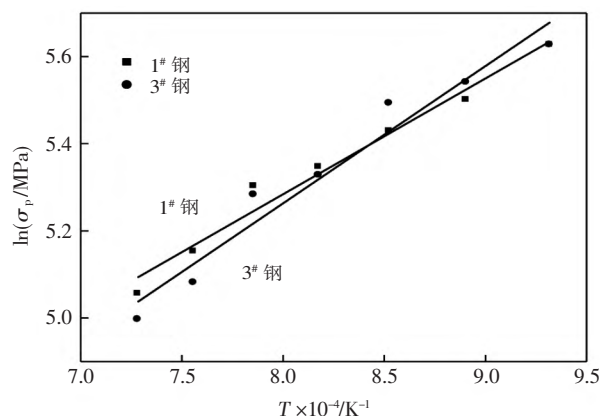
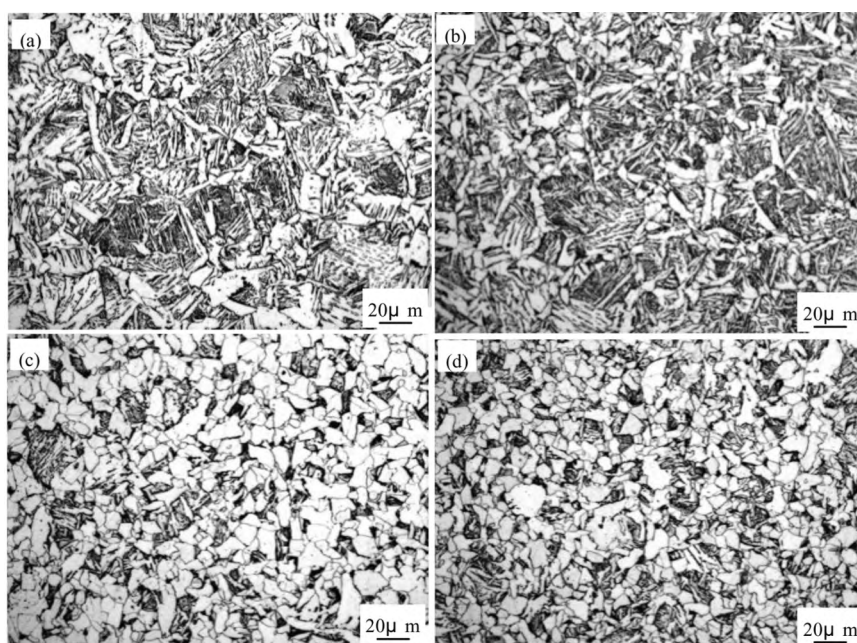
图6 试验钢 $\ln\sigma_p$ 和 $1/T$ 曲线Fig.6 $\ln\sigma_p$ 和 $1/T$ curves of the tested steels1 000 °C, 0.3 s^{-1} , 60% (a) 1[#] 钢; (b) 2[#] 钢; (c) 3[#] 钢; (d) 4[#] 钢

图7 不同试验钢热压缩后的金相组织

Fig.7 Microstructure of the tested steels after thermal compress at 1 000 °C, 0.3 s^{-1} , 60%

由图 7 可见,1[#]、2[#]钢中原始奥氏体晶粒粗大,原始奥氏体稳定性增加,相变转变不完全,形成大量残余奥氏体,后续冷却形成贝氏体组织,3[#]、4[#]钢中由于

V 含量较高,形成 V(CN) 相间析出,由于析出相对晶界的钉扎作用,抑制奥氏体晶粒长大,抑制奥氏体稳定性,延缓奥氏体—铁素体相变并为铁素体形核提供

充足的时间。这就是随着 V、N 含量增加,最终形成细小均匀的铁素体+珠光体组织的原因^[4]。

3 结论

1) 动态再结晶试验结果表明:钢中添加微量 V,对实验钢的临界再结晶温度提高有限,而在含 V 微

合金化钢中增加 N 含量后,可以明显的提高实验钢的临界再结晶温度,延迟再结晶能力增强。

2) 随着变形温度的提高,晶粒逐渐粗化,且出现了贝氏体组织,V-N 钢由于部分析出相的控制,晶粒略细,在 1 100 °C 时表现尤为明显,晶粒较 C-Mn 钢、0.06%V 钢明显细化,且贝氏体含量明显降低。

参考文献

- [1] Liu Jian, Wang Huakun, Song Lili, *et al.* The research and application of VN microalloyed high strength steels [J]. Sichuan Metallurgy, 2006, 28(1): 56-60.
(刘建,王华昆,宋立秋,等.钒氮微合金化高强度钢的研究及应用[J].四川冶金,2006,28(1):56-60.)
- [2] Liu Shuping, Yang Caifu, Zhang Yongquan, *et al.* Effect of nitrogen on property and precipitation phase in vanadium steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2001, 26(10): 7-9.
(柳书平,杨才福,张永权,等.氮对钒钢性能及析出相的影响[J].金属热处理,2001,26(10):7-9.)
- [3] Ma Xiaoyi. Study on effects of composition and rolling process on microstructure and properties of V-Ti microalloyed steels [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008: 5-7.
(马晓艺.成分及轧制工艺对钒钛微合金钢组织性能的影响[D].重庆:重庆大学,2008:5-7.)
- [4] Yang Caifu, Zhang Yongquan, Liu Shuping, *et al.* Strengthening mechanism in V-N microalloyed reinforcing bar steels [J]. Iron and Steel, 2001, 36(5): 55-57.
(杨才福,张永权,柳书平,等.钒-氮微合金化钢筋的强化机制[J].钢铁,2001,36(5):55-57.)
- [5] Wu Jinbin, Liu Guoquan, Wang Chengyang, *et al.* Dynamic recrystallization kinetics and related influence factors of vanadium-nitride microalloyed steel during hot compressive deformation [J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(1): 85-90.
(吴晋彬,刘国权,王承阳,等.钒氮微合金钢动态再结晶动力学及影响因素[J].材料科学与工艺,2011,19(1):85-90.)
- [6] Chang Lizhong, Shi Xiaofang, Jang Chunfeng, *et al.* Influence of nitrogen and vanadium on static recrystallization of austenite in vanadium-nitrogen microalloyed steels [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(11): 111-116.
(常立忠,施晓芳,蒋春风,等.钒氮含量对低碳钢奥氏体静态再结晶的影响[J].材料热处理学报,2012,33(11):111-116.)
- [7] Rune Lagnebory, Bevis Hutchinson, Tedeusz Siwecki, *et al.* The role of vanadium in microalloyed steels [M]. Translate: Yang Caifu, Wang Ruizhen, Chen Xuehui. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 27-30.
(Rune Lagnebory, Bevis Hutchinson, Tedeusz Siwecki,等.钒在微合金钢中的作用[M].杨才福,王瑞珍,陈雪慧,译.北京:冶金工业出版社,2000:27-30.)

编辑 邓淑惠

第一届河北承德国际钒钛产业链优势资源对接会议(第二轮通知)

为全面贯彻落实《中国制造 2025》《工业绿色发展规划(2016~2020 年)》战略部署,以国家钒钛新材料基地建设为契机,结合全球钒钛产业发展现状,河北省钒钛产业技术研究院定于 2019 年 9 月 4~6 日在承德组织召开“第一届河北承德国际钒钛产业链优势资源对接会议”。

会议将邀请政府主管部门及国内外钒钛产业从事研究、生产和应用的知名专家,围绕“新时代、新钒钛、新产业”这一主题,解读产业绿色发展政策,前瞻产业发展趋势。深入探讨钒钛新材料、新技术在航空航天、海洋工程、节能环保、新能源等领域的应用,为与会者搭建交流合作平台,推动行业优势资源对接,促进钒钛产业链条延伸,实现上下游产业合作共赢,共同推进钒钛产业绿色、可持续、高质量发展。

热忱欢迎国内外钒钛产业领域专家学者、科研院所、产业链企业、下游用户及其他相关单位参会。

(王海旭 供稿)