

Fe-Mn-Al-C 系低密度钢疲劳性能的研究现状

王军¹, 满廷慧^{1, 2}, 韦习成^{1, 2}, 董瀚^{1, 2}

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 上海大学(浙江)高端装备基础件材料研究院, 浙江 嘉善 314113)

Review on Fatigue Performance of Fe-Mn-Al-C Low Density Steels

WANG Jun¹, MAN Ting-hui^{1, 2}, WEI Xi-cheng^{1, 2}, DONG Han^{1, 2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444;
2. Zhejiang Institute of Advanced Materials, Shanghai University, Jiashan, Zhejiang 314113)

Abstract: During the implementation of the "Dual Carbon" strategy, lightweight has emerged as a significant trend in the development of the automotive industry. Fe-Mn-Al-C low-density steels, as a lightweight material, have garnered extensive attention owing to a combination of low density, high strength-plasticity and good toughness. Another critical consideration for materials used in automotive lightweight is their safety performance. Hence, the material's serviceability becomes a crucial aspect for its applicability in the automotive sector. This paper aims to elucidate the current status of Fe-Mn-Al-C low-density steels' research on composition design, microstructure, and tensile properties. Moreover, it put more emphasis on the fatigue performance of Fe-Mn-Al-C low density steels.

摘要:在双碳战略的践行过程, 汽车轻量化则成为汽车工业发展的重要趋势之一。Fe-Mn-Al-C 系低密度钢作为一种轻量化材料, 兼具了低密度和强塑性而受到广泛的关注。汽车轻量化用材料的另一重要考量是安全性, 因此, 材料的服役性能则是能否应用在汽车上的重要一环。本文从 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的成分设计、微观组织、拉伸性能方面的研究现状介绍, 着重综述了国内外对 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢疲劳性能的研究进展。

关键词: 低密度钢; 拉伸性能; 疲劳性能

Key words: low density steels, tensile properties, fatigue performance

0 引言

在目前的汽车、航空、航天、运输、建筑、电力等工业领域当中, 都需要高强度及高延展性的钢。在汽车领域, 汽车轻量化的设计已经成为行业主流。通过使用轻量化材料, 不仅可以显著提高汽车的运输性能, 还能够提高燃料效率, 减少燃料的消耗以及废气的排放。相关研究指出, 汽车自重每降低 10%, 将降低燃油消耗 6-8%, 降低排放 5-6%^[1]。在对汽车进行减重时, 通常从汽车白车身的材料入手, 在确保汽车整体结构的安全性达到相关安全标准的前提下, 通过降低汽车白车身钢的密

度达到汽车整体减重的目的。Fe-Mn-Al-C 系低密度钢被称作轻质钢或者低密度钢, 最早作为 Fe-Cr-Ni 钢的替代品被开发。近年来 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢由于其较好的强度-塑性组合以及高比强度(强度与重量之比), 受到研究者们广泛的关注。

日内瓦国际标准化组织将金属疲劳描述为^[2]“金属材料在应力或应变的反复作用下所发生的性能变化”。由于工程中绝大多数机械在动载荷作用下工作, 因此由于金属疲劳引起的破坏是导致工程结构和构件失效的主要原因^{[3][4]}。对低密度钢而言, 疲劳开裂是重要的失效形式之一, 因此其疲劳

收稿日期:

作者简介: 王军 1 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为 Fe-Mn-Al-C 低密度钢疲劳性能, E-mail:141547750@qq.com;

满廷慧 2 (联系人), E-mail:mantinghuilove@163.com。

性能受到学者关注。本文阐述 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢及其疲劳性能的研究进展, 分析其成分设计、微观组织、拉伸性能及疲劳性能。

1 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢成分设计及微观组织

1.1 成分设计

Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的主要组成元素为 C、Mn、Al, 其他微合金元素如 Cr、Mo、Si、Nb、V 等元素也可以被添加从而获得一些特殊性能。

Fe-Mn-Al-C 系低密度钢中 C 元素的作用主要有扩大奥氏体相区^[5]及间隙固溶强化^[6]。但过高的 C 含量会导致碳化物增多, 进而影响钢的性能^[7]。因此, 在低密度钢中, C 含量一般不超过 1.25%^[8]。

Mn 元素是奥氏体化元素, 能够提高奥氏体含量、扩大奥氏体相区以及强化基体^[9]。研究表明, 当 Mn 含量较低, 降低至 5~12wt%, C 的稳定性会显著下降, 除了硬铁素体之外, 还会通过共析反应分解奥氏体形成晶界 (GB) 型 κ -碳化物。当 Mn 含

量过高, 容易在基体中形成 β -Mn 脆性相, 不利于材料伸长率的提高, 因此 Mn 含量应控制在 30% 以内^[10]。

Al 元素是实现低密度钢轻量化最有效的元素, 随着 Al 加入量的增加, 钢的密度显著下降, 数据显示, 钢中每加入 1% 的 Al, 其密度就会降低 1.3%^[11]。Al 元素能够提高铁素体的稳定性并抑制奥氏体单相区的形成、抑制 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 的转变^[12]。同时, Al 元素的加入可以使奥氏体层错能增大, 抑制孪晶的产生, 增大晶格常数、细化晶粒、提高合金强度、降低合金应变硬化率、提高加工成型性和低温韧性^[13]等。为保证钢的强度, 通常来说, Fe-Mn-Al-C 系低密度钢中 Al 元素的质量分数会控制在 3%~12%。

此外, 在 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢中添加少量如 Cr、V、Nb、Ti 等微量元素也能够细化晶粒、起到细晶强化的效果^[14]。

1.2 微观组织

根据相组成的不同, Fe-Mn-Al-C 系低密度钢大致可以分为四类: 铁素体、奥氏体、铁素体基双相和奥氏体基双相低密度钢, 如表 1 所示。^{[15]-[28]}

表 1 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢分类

类型	铁素体 ^{[15]-[17]}	奥氏体 ^{[18]-[21]}	铁素体基双相 ^{[22]-[24]}	奥氏体基双相 ^{[25]-[28]}
主要成分	Mn:0~5% Al:2%~9% C:0~0.1%	Mn:15%~30% Al:5%~12% C:0.6%~2.0%	Mn:2%~10% Al:2%~7% C:0.005%~0.5%	Mn:5%~30% Al:5%~10% C:0.1%~1.0%
组成相	δ	γ	δ 、 α	γ 、 δ

2 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的拉伸性能

材料强度、塑性、应变硬化等许多重要的力学性能指标统称为拉伸性能, 是材料的基本力学性能, 在一定条件下可用于预测材料的其他力学性能。受合金成分及生产工艺不同的影响, Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的性能范围较宽。如表 2 不同成分 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的组成相及力学性能 所示为部分 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的组成相及力学性能^{[28]-[44]}。在许多相关的研究中发现, 在低强度水平下的钢中, 疲劳强度与抗拉强度往往存在线性关系, 但对于具

有较高强度的钢中, 广泛观察到疲劳强度与抗拉强度无关^{[45]-[46]}。即钢可以通过提高抗拉强度从而提高其疲劳强度, 但无法通过抗拉强度使疲劳强度提高至最大值^{[47]-[49]}。高玉魁等^[50]认为金属材料的疲劳极限与静强度存在着一定关系, 因此材料的静强度可用于疲劳极限的估测。郑修麟^[51]认为, 金属材料的屈服强度对疲劳极限, 疲劳裂纹起始门槛值, 以及长寿命范围内疲劳裂纹起始寿命有重大影响。韧性的提高在一定程度上也能够改善钢的疲劳性能, 但二者之间并没有直接关系。因此, 通过材料的拉伸性能对疲劳性能进行预测的方法被证明存在可行性^{[52]-[56]}。

表 2 不同成分 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的组成相及力学性能

成分	相组成	热处理工艺	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%	强塑性积 /(GPa·%)	参考文献
Fe-6.8Al	δ	退火: 900°C+1min	465	31.1	14.5	[29]
Fe-8.1Al	δ	退火: 900°C+1min	527	16.4	8.6	
Fe-9.7Al	δ	退火: 900°C+1min	626	12.7	8.0	

30.5Mn2.1Al1.2C	$\gamma+\kappa$	氩气、固溶： 1100°C+1h 时效：450°C+1h	935	75.0	70.1	[30]
30.5Mn8Al1.2C	$\gamma+\kappa$	氩气、固溶： 1100°C+1h 时效：450°C+1h	895	65.0	58.2	
30Mn10AlC	$\gamma+\kappa$	固溶：1050°C+2h	853	61.4	52.4	[31]
22.8Mn8.48Al0.86C	γ	固溶：1100°C+1h	757	68.0	51.5	[32]
15.8Mn8.55Al0.87C	γ	固溶：1000°C+1h	835	65.3	52.8	[33]
	γ	固溶：1100°C+1h+	770	70.0	53.9	
28Mn10AlC	γ	固溶：1035°C+2h	826	62.9	52.0	[34]
30.4Mn8Al1.2C	γ	氩气：1100°C+2h	900	60.0	54	[35]
30Mn9Al0.9C	$\gamma+\kappa$	固溶：1050°C+2h	765	74.1	56.7	[36]
26Mn6AlC	γ	固溶：1100°C+1h	764	47.1	36.0	[37]
26Mn6AlC	γ +SRO	固溶：1100°C+1h 时效：550°C+10h	898	50.1	45.0	
3.9Mn5.9Al0.4C	$\delta+\gamma$	退火：830°C+50s 回火：400°C+180s	906	32.0	29.0	[38]
8.5Mn5.6Al0.3C	$\delta+\gamma$	退火：900°C+30min	734	77.0	56.5	[39]
(26-28)Mn(10-12)Al(1.0-1.2)C	$\gamma+\delta+\kappa$	固溶：1050°C+25min	883	65.0	57.4	[40]
27Mn11.5Al0.95C	$\gamma+\delta$	固溶：1050°C+1h	926	50.2	46.5	[41]
20Mn9Al0.6C	$\gamma+\delta$	固溶：1000°C+10min	806	39.0	31.4	[42]
20Mn10Al1.0C	$\gamma+\delta$	固溶：1100°C+15min	843	59.1	49.8	[43]
20Mn11Al1.0C	$\gamma+\delta$	固溶：1100°C+15min	946	35.7	33.8	
18.1Mn9.6Al0.65C	$\gamma+\delta$	固溶：1000°C+30min	792	35.1	25.7	[44]
27Mn11.5Al0.95C	$\gamma+\alpha+\kappa+$ B2	固溶：1050°C+1h	926	50.2	46.5	[28]

3 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的疲劳性能

疲劳强度也被称为疲劳极限，它是表征材料在无限多次交变载荷作用下而不会产生破坏的最大应力^[57]。金属疲劳断裂的众多研究都表明，无论是何种形式的疲劳断裂，无论在怎样的环境下，应力或应变集中是断裂在该区域发生的主要原因。在疲劳性能的影响因素方面，以往的研究中，疲劳性能被认为与材料的宏观力学性能^{[58][59]}和微观变形机制^{[60]-[62]}密切相关。宏观力学性能方面，有研究报道高疲劳强度需要高单调抗拉强度值^[60]，而长低周疲劳性能（LCF）寿命与高单调延性有关^[59]。微观变形机制方面，在一些研究中也提到了层错能(SFE)对疲劳抗力的影响，它影响了变形过程中的微观结构^{[60]-[62]}。疲劳性能也受到其他多方面的影响，如材料的

合金元素^{[63]-[65]}、原始组织结构、晶粒大小^{[66]-[70]}、析出相^{[71]-[73]}、承受载荷、服役温度等。

3.1 层错能对 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢疲劳性能的影响

Ma^[60]等研究了 3 种不同层错能(SFE)的高锰奥氏体 TWIP 钢的疲劳裂纹扩展行为以探究其抗疲劳裂纹扩展性能与层错能(SFE)的相关性。研究指出，随着 SFE 的增大，TWIP 钢的疲劳裂纹扩展阈值和有效疲劳裂纹扩展阈值均减小；近阈值区域的裂纹闭合效应随着 SFE 的减小而增大，即随 SFE 的增大，疲劳性能下降。Glage^[62]指出，较小的 SFE 值促进了位错的平面排列，使合金在较高的应变幅值下也能在奥氏体基体中表现出平面结构，提高疲劳寿命。

3.2 合金元素对 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢疲劳性能的影响

根据 Mughrabi 等^[63]的研究,合金可通过提高伸长率来提高其 LCF 性能。Shao 等^[64]全面研究了不同 C 含量 TWIP 钢 0.3%-0.8%应变幅值范围内的循环变形和损伤行为,试图通过增加合金中的 C 含量,提高伸长率,从而提高 LCF 性能。研究指出,随着 C 含量的增加,初始硬化循环数随之增加,提高了合金循环硬化能力。表面损伤和裂纹分布由均匀性向局部化转变,裂纹扩展方向趋向于垂直于加载轴的方向,疲劳损伤增加。此外,随着 C 含量的增加,疲劳条纹变得更浅、更松散,裂纹扩展速度更快。因此,随着 C 含量的增加,LCF 的疲劳性能降低。

Guo 等^[65]研究了 Al 对 Fe-Mn-C 孪晶塑性(TWIP)钢疲劳性能的影响,发现 Al 元素对 TWIP 钢的循环变形及疲劳寿命影响显著。更高 Al 含量的钢最终循环硬化程度更小,循环软化程度更大。因为 Al 的加入降低了滑移平面度,提高了临界孪晶应力,因此位错在更高 Al 含量的钢中更容易发生交叉滑移,从而促进了位错的波状滑动。交叉滑移的易易性有利于细胞结构的形成,降低了循环硬化。强烈表明 Al 的加入降低了 Fe-Mn-C TWIP 钢的循环硬化能力。此外,在各应变幅值下,高 Al 含量的钢的疲劳寿命明显更低,因此 Al 的加入对 Fe-Mn-C TWIP 钢的 LCF 寿命有不利影响。因此,导致 TWIP 钢的循环变形响应和疲劳寿命不同的主要原因应与位错滑移面度的差异有关,而位错滑移面度的差异与两种钢的层错能差异密切相关。

3.3 晶粒大小对 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢疲劳性能的影响

在对疲劳性能的研究中,晶粒尺寸与钢疲劳寿命的相关性已经被证实,研究认为,均匀的粗晶粒比细晶粒具有更好的抗疲劳裂纹扩展能力。Gray、Pippan、Mall 等^{[66]-[70]}对钢疲劳性能的研究中,发现钢的晶粒尺寸越细,滑移带的长度越短,滑移变形越均匀,同时细小的晶粒尺寸细小的晶粒尺寸降低了裂纹闭合强度因子,增加了裂纹扩展的驱动力。

3.4 析出相对 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢疲劳性能的影响

低密度钢的疲劳性能不仅仅与晶粒大小有关,还与第二相的析出有关。Ho 和 Tjong^[71]认为,在循环变形过程中,合金中会析出 κ -碳化物,适当尺寸的 κ -碳化物可以增强材料。随着应变增加,逐渐增多的 κ -碳化物部分发展成一种调制结构,促进合金

的硬化行为^[72]。Li 等^[73]对不同固溶处理下的 Fe-26Mn-10Al-C 奥氏体钢在 0.4%应变幅值的室温条件下进行完全反拉压缩低周疲劳试验,在不同固溶状态下,奥氏体钢的试样均表现出良好的抗疲劳性能,这被认为是 κ -碳化物的强化作用导致,并对 κ -碳化物与疲劳性能的关系作出解释。较小的 κ -碳化物对疲劳裂纹扩展影响不大,较大的 κ -碳化物虽然会阻碍疲劳裂纹的扩展,但也会在循环变形过程中形成新的次表面裂纹。当 κ -碳化物的尺寸达到一定程度时,能够对裂纹扩展形成明显的阻碍,改变裂纹扩展方向,从而降低裂纹扩展速率,提高疲劳寿命。

4 结语与展望

Fe-Mn-Al-C 系低密度钢作为一种新型合金体系,现如今被主要应用于汽车、军事、建筑等领域,这就要求其具有高强度以及良好的塑韧性以确保结构安全性和耐冲击性。但是,对其服役性能方面的研究存在不足,针对其疲劳性能方面的研究较少。因此,系统地研究低密度钢的疲劳性能对其在汽车、军事及其他行业的广泛应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 贾朝贝.汽车结构的轻量化设计措施分析[J].时代汽车,2021(02):133-134.
- [2] Suresh S. 材料的疲劳[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [3] 赵少沅.抗疲劳设计[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [4] 陈传尧,杨新华.疲劳与断裂(第二版)[M].武汉:华中科技大学出版社,2018.
- [5] 林方敏,邢梅,唐立志,武学俊,章小峰,黄贞益.Fe-Mn-Al-C 系低密度钢及其强化机制研究进展[J/OL].材料导报,2023(05):1-15[2023-01-26].
- [6] Kalashnikov I, Shalkevich A, Acselrad O, et al. Chemical composition optimization for austenitic steels of the Fe-Mn-Al-C system[J]. Journal of materials engineering and performance, 2000, 9: 597-602.
- [7] 刘华多,刘喆.高锰钢的化学成分对组织和性能的影响分析[J].科协论坛,2010(10):101.
- [8] 宋宏伟,李慧蓉,高建新,程玉杰,王哲,李欣,李运刚.合金元素对 Fe-Mn-Al-C 系轻质钢组织和性能影响的研究现状[J].热加工工艺,2019,48(06):19-25.
- [9] 雍岐龙.钢铁材料中的第二相[M].背景:冶金工业出版社,2006.(YONG Qi-long. The phase in Iron and Steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2006.)
- [10] 张彦生,师昌绪.铁-锰、铝系奥氏体钢-耐热钢、无磁钢和低温钢[J].金属学报, 1964(3):285-300.

- [11] 张学军,唐思熠,肇恒跃,等.3D 打印技术研究现状和关键技术[J].材料工程,2016,44(2):122-128.
- [12] Imandoust A, Zarei-Hanzaki A, Heshmati-Manesh S, et al. Effects of ferrite volume fraction on the tensile deformation characteristics of dual phase twinning induced plasticity steel[J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 99-105.
- [13] Canadinc D, Sehitoglu H, Maier H J, et al. Strain hardening behavior of aluminum alloyed Hadfield steel single crystals[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(6): 1831-1842.
- [14] Liu D, Ding H, Cai M, et al. Mechanical behaviors of a lower-Mn-added Fe-11Mn-10Al-1.25 C lightweight steel with distinguished microstructural features[J]. *Materials Letters*, 2019, 242: 131-134.
- [15] Herrmann J, Inden G, Sauthoff G. Deformation behaviour of iron-rich iron-aluminum alloys at low temperatures[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(10): 2847-2857.
- [16] Morris D G, Munoz-Morris M G, Requejo L M. Work hardening in Fe-Al alloys[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2007, 460(1), 163.
- [17] Schneider A, Falat L, Sauthoff G, et al. Microstructures and mechanical properties of Fe₃Al-based Fe-Al-C alloys[J]. *Intermetallics*, 2005, 13(12): 1322-1331.
- [18] Choi K, Seo C H, Lee H, et al. Effect of aging on the microstructure and deformation behavior of austenite base lightweight Fe-28Mn-9Al-0.8 C steel[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 63(10): 1028-1031.
- [19] Gutiérrez-Urrutia I, Raabe D. High strength and ductile low density austenitic FeMnAlC steels: Simplex and alloys strengthened by nanoscale ordered carbides[J]. *Materials Science and Technology*, 2014, 30(9): 1099-1104.
- [20] Welsch E, Ponge D, Haghighat S M H, et al. Strain hardening by dynamic slip band refinement in a high-Mn lightweight steel[J]. *Acta Materialia*, 2016, 116: 188-199.
- [21] Park K T. Tensile deformation of low-density Fe-Mn-Al-C austenitic steels at ambient temperature[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(6): 375-379.
- [22] Rana R, Liu C, Ray R K. Evolution of microstructure and mechanical properties during thermomechanical processing of a low-density multiphase steel for automotive application[J]. *Acta materialia*, 2014, 75: 227-245.
- [23] Lee S, Jeong J, Lee Y K. Precipitation and dissolution behavior of κ -carbide during continuous heating in Fe-9.3 Mn-5.6 Al-0.16 C lightweight steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 648: 149-153.
- [24] Sohn S S, Song H, Kim J G, et al. Effects of annealing treatment prior to cold rolling on delayed fracture properties in ferrite-austenite duplex lightweight steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47: 706-717.
- [25] Yang M X, Yuan F P, Xie Q G, et al. Strain hardening in Fe-16Mn-10Al-0.86 C-5Ni high specific strength steel[J]. *Acta Materialia*, 2016, 109: 213-222.
- [26] Zhang L, Song R, Zhao C, et al. Work hardening behavior involving the substructural evolution of an austenite-ferrite Fe-Mn-Al-C steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 640: 225-234.
- [27] Zhao C, Song R, Zhang L, et al. Effect of annealing temperature on the microstructure and tensile properties of Fe-10Mn-10Al-0.7 C low-density steel[J]. *Materials & Design*, 2016, 91: 348-360.
- [28] Yang F, Song R, Li Y, et al. Tensile deformation of low density duplex Fe-Mn-Al-C steel[J]. *Materials & Design*, 2015, 76: 32-39.
- [29] Rana R, Liu C, Ray R K. Low-density low-carbon Fe-Al ferritic steels[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(6): 354-359.
- [30] Gutierrez-Urrutia I, Raabe D. Influence of Al content and precipitation state on the mechanical behavior of austenitic high-Mn low-density steels[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(6): 343-347.
- [31] 付锡彬,孟少博,刘文胜,张可,李昭东,曹燕光,章小峰,雍岐龙.固溶处理对 Fe-30Mn-10Al-1C 低密度钢组织及力学性能的影响[J].*金属热处理*, 2022, 47(07): 114-119.
- [32] 周占明,唐荻,赵征志,袁洪涛,何青.固溶温度对 Fe-22.8Mn-8.48Al-0.86C 低密度钢组织及性能的影响[J].*材料热处理学报*, 2017, 38(9): 123-127.
- [33] 魏学源,尚进,陈斌,赵征志,周占明.固溶温度对热轧 Fe-Mn-Al-C 低密度高强度钢组织和性能的影响[J].*金属热处理*, 2019, 44(08): 142-146.
- [34] Ma T, Li H, Gao J, et al. Effect of Al Content and Solution Treatment on Tensile and Corrosion Resistance of Fe-Mn-Al-C Low-Density Steel[C]//TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. Springer International Publishing, 2020: 537-548.
- [35] Welsch E, Ponge D, Haghighat S M H, et al. Strain hardening by dynamic slip band refinement in a high-Mn lightweight steel[J]. *Acta Materialia*, 2016, 116: 188-199.
- [36] Moon J, Park S J, Lee C, et al. Microstructure evolution and age-hardening behavior of microalloyed austenitic Fe-

- 30Mn-9Al-0.9 C light-weight steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48: 4500-4510.
- [37] Kang L, Yuan H, Li H, et al. Enhanced mechanical properties of Fe-Mn-Al-C low density steel via aging treatment[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 680776.
- [38] Seo C H, Kwon K H, Choi K, et al. Deformation behavior of ferrite-austenite duplex lightweight Fe-Mn-Al-C steel[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 66(8): 519-522.
- [39] Sohn S S, Choi K, Kwak J H, et al. Novel ferrite-austenite duplex lightweight steel with 77% ductility by transformation induced plasticity and twinning induced plasticity mechanisms[J]. *Acta Materialia*, 2014, 78: 181-189.
- [40] Frommeyer G, Brūx U. Microstructures and mechanical properties of high - strength Fe - Mn - Al - C light - weight TRIPLEX steels[J]. *Steel research international*, 2006, 77(9-10): 627-633.
- [41] 杨富强. 汽车用 Fe-Mn-Al 系轻质高强度钢制备工艺及变形机理研究[D]. 北京科技大学, 2015.
- [42] Hwang S W, Ji J H, Lee E G, et al. Tensile deformation of a duplex Fe-20Mn-9Al-0.6 C steel having the reduced specific weight[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(15): 5196-5203.
- [43] Sutou Y, Kamiya N, Umino R, et al. High-strength Fe-20Mn-Al-C-based alloys with low density[J]. *ISIJ international*, 2010, 50(6): 893-899.
- [44] Zhang L, Song R, Zhao C, et al. Evolution of the microstructure and mechanical properties of an austenite-ferrite Fe-Mn-Al-C steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 643: 183-193.
- [45] Bathias C, Paris P C. *Gigacycle fatigue in mechanical practice*[M]. CRC Press, 2004.
- [46] Gao C, Yang M Q, Pang J C, et al. Abnormal relation between tensile and fatigue strengths for a high-strength low-alloy steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 832: 142418.
- [47] Forrest P G. *Fatigue of Metals*, Pergamon Press[J]. 1962.
- [48] Murakami Y. *Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions*[M]. Academic Press, 2019.
- [49] Pang J C, Duan Q Q, Wu S D, et al. Fatigue strengths of Cu-Be alloy with high tensile strengths[J]. *Scripta materialia*, 2010, 63(11): 1085-1088.
- [50] 高玉魁, 姚枚, 邵培革等. 金属疲劳极限与静强度的相关性[J]. *机械强度*, 2001(01): 15-18.
- [51] 郑修麟. 屈服强度与疲劳裂纹起始寿命间的关系[J]. *机械强度*, 1989(01): 35-39.
- [52] .金属材料拉伸与疲劳性能预测研究取得新进展[J]. *表面工程与再制造*, 2022, 22(02): 49-52.
- [53] 庞建超, 李守新, 王中光, 等. 金属材料疲劳强度与抗拉强度一般关系[J]. *中国力学大会——— 2013*. 西安: 中国力学学会, 西安交通大学, 2013, 1.
- [54] 李海梅, 宋刚, 刘永志. 金属材料疲劳极限的估算[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2002(04): 26-29.
- [55] 郑修麟. 金属的疲劳性能与拉伸性能的关系[J]. *兵器材料科学与工程*, 1989(06): 38-42.
- [56] 王宏伟, 马晋生, 南俊马等. 表面微观屈服强度与疲劳极限的关系[J]. *金属学报*, 1991(05): 49-53.
- [57] 满廷慧, 彭伟, 王子波, 廉心桐, 陆恒昌, 董瀚. Fe-Mn-Al-C 低密度钢研究现状及展望[J]. *中国冶金*, 2022, 32(01): 11-20.
- [58] Grosskreutz J C. Strengthening and fracture in fatigue (approaches for achieving high fatigue strength)[J]. *Metallurgical Transactions*, 1972, 3: 1255-1262.
- [59] Mughrabi H, Höppel H W, Kautz M. Fatigue and microstructure of ultrafine-grained metals produced by severe plastic deformation[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51(8): 807-812.
- [60] Ma P H, Qian L H, Meng J Y, et al. Fatigue Crack Growth Behavior of High Manganese Austenitic TWIP Steels[C]//*Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2015, 833: 7-10.
- [61] Liu R, Zhang Z J, Zhang P, et al. Extremely-low-cycle fatigue behaviors of Cu and Cu-Al alloys: Damage mechanisms and life prediction[J]. *Acta Materialia*, 2015, 83: 341-356.
- [62] Glage A, Weidner A, Biermann H. Cyclic deformation behaviour of three austenitic cast CrMnNi TRIP/TWIP steels with various Ni content[J]. *steel research international*, 2011, 82(9): 1040-1047.
- [63] Mughrabi H, Höppel H W, Kautz M. Fatigue and microstructure of ultrafine-grained metals produced by severe plastic deformation[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51(8): 807-812.
- [64] Shao C W, Zhang P, Liu R, et al. Low-cycle and extremely-low-cycle fatigue behaviors of high-Mn austenitic TRIP/TWIP alloys: Property evaluation, damage mechanisms and life prediction[J]. *Acta Materialia*, 2016, 103: 781-795.
- [65] Guo P C, Liu S, Ma P H, et al. Fatigue Deformation Behavior of Fe-Mn-C-(Al) TWIP Steels[C]//*Materials*

Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2017, 879: 1524-1528.

- [66] Gray G T, Williams J C, Thompson A W. Roughness-induced crack closure: an explanation for microstructurally sensitive fatigue crack growth[J]. Metallurgical Transactions A, 1983, 14: 421-433.
- [67] Pippan R. Threshold and effective threshold of fatigue crack propagation in ARMCO iron I: the influence of grain size and cold working[J]. Materials Science and Engineering: A, 1991, 138(1): 1-13.
- [68] Mall S, Kim H K, Saladin E C, et al. Effects of microstructure on fretting fatigue behavior of IN100[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(6): 1453-1460.
- [69] Ritchie R O, Suresh S. Some considerations on fatigue crack closure at near-threshold stress intensities due to fracture surface morphology[J]. Metallurgical Transactions A, 1982, 13: 937-940.
- [70] Liu F, Lin X, Yang H, et al. Effect of microstructure on the fatigue crack growth behavior of laser solid formed 300M steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 695: 258-264.
- [71] Ho N J, Tjong S C. Cyclic stress-strain behaviour of austenitic Fe-29.7 Mn-8.7 Al-1.04 C alloy at room temperature[J]. Materials Science and Engineering, 1987, 94: 195-202.
- [72] Tjong S C, Ho N J. Transmission electron microscopy studies of the dislocation microstructures in fatigued Fe-8.7 Al-29.7 Mn-1.04 C alloy[J]. Materials Science and Engineering, 1987, 91: 161-167.
- [73] Li H, Zhao J, Wang Z, et al. Effect of heat treatment on cyclic deformation properties of Fe-26Mn-10Al-C steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26: 200-210. 赵镇南. 传热学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2002:1-11.