

● 试验与研究 ●

两种热锻模盖面堆焊修复用药芯焊丝的性能对比研究

杨世明, 秦训鹏, 黄康文

(武汉理工大学 汽车工程学院, 湖北 武汉 430000)

摘要:对 RMD756 和 HX2048G 热锻模修复焊丝的焊接工艺性、堆焊金属成分、组织和力学性能进行了对比研究。结果表明:焊接参数取电压 23.2 V、电流 260 A、送丝速度 5.6 m/min 时,焊缝成形性较好。两种焊材堆焊金属的合金元素种类复杂,与常用模具钢成分区别大,均呈低 C 高 Cr 特点。两种焊丝堆焊金属在室温下的抗拉强度均在 1000 MPa 以上,550℃时抗拉强度在 800 MPa 左右。RMD756 堆焊金属的冲击韧性为 7 J/cm²,呈解理断裂;HX2048G 堆焊金属的冲击韧性为 19 J/cm²,呈准解理断裂。两种焊材堆焊金属在 550℃干摩擦下均以粘着磨损和氧化磨损为主,RMD756 堆焊金属摩擦表面 Cr、Al 的氧化物更多,氧化剥蚀坑更少,磨损量更低。

关键词:热锻模;药芯焊丝;焊接工艺性;力学性能

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20210071

中图分类号: TG444+.7;TG115.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)05-0013-06

Comparative Study on Performance of Two Flux-cored Wires for Surfacing Repair of Hot Forging Die

YANG Shiming, QIN Xunpeng, HUANG Kangwen

(School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: The welding procedure of the two hot forging die repair flux-cored welding wires of RMD756 and HX2048G, and the composition, structure and mechanical properties of the deposited metals were studied comparatively. The results show that when the welding parameters are voltage of 23.2 V, current of 260 A and wire feeding speed of 5.6 m/min, the weld formation is good. The alloy elements of the deposited metals with the two welding wires are complex and quite different from the die steel composition, both of them show the characteristics of low carbon content and high chromium content. The tensile strengths of RMD756 and HX2048G deposited metals at room temperature are above 1000 MPa, and the tensile strengths at 550℃ are about 800 MPa. The RMD756 deposited metal has an impact toughness of 7 J/cm², showing cleavage fracture, while the HX2048G deposited metal has an impact toughness of 19 J/cm², showing quasi-cleavage fracture. Both the deposited metals of the welding consumables are dominated by adhesive wear and oxidative wear under dry friction at 550℃. The RMD756 deposited metal has lower wear rate compared with the HX2048G deposited metal, the abrasive surface has more oxides of Cr and Al and fewer oxidation and erosion pits.

Key words: hot forging die; flux-cored welding wire; welding procedure; mechanical properties

模具是工业生产中至关重要的基础工艺装备^[1]。由于我国热锻模具平均使用寿命较低,降低模具的成本是锻造行业重点关注的问题^[2]。堆焊是现阶段模具修复使用最广泛的方法,传统方式为人工型腔

满焊^[3]。近几年增材制造技术发展迅猛,在航空、汽车和医疗等多个领域都有研究^[4],在热锻模修复方面已有应用,其修复质量和修复成本均较传统修复方式更具优势^[5]。

电弧增材制造技术以焊丝为填充材料,药芯焊丝是发展的趋势^[6]。国内优良的、成熟的热锻模修复堆焊药芯焊丝较少,很多模具修复用的焊材都依赖进口。近年来国内部分高校和中小企业在药芯及金属粉芯焊丝生产研制方面做了大量工作。在高校方面,刘仁培团队研究了 Nb、石墨等添加物对堆焊金属耐磨性及工艺性影响,并开发了 RMD 系列焊

收稿日期:2021-01-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1106500);中国博士后科学基金项目(2020M682498)

作者简介:杨世明(1996-),男,湖北宜昌人,硕士,主要研究方向:电弧增材制造;电话:15727209596;E-mail:ys_ming@163.com

通讯作者:秦训鹏(1962-),男,湖北红安人,教授,博士生导师;电话:13995509555;E-mail:1276511632@qq.com

丝^[7-8]。余圣甫团队研究了钼和镍对堆焊金属组织和耐磨性能的影响,并设计了用于 5CrNiMo 钢修复的 CO₂ 气保护药芯焊丝^[9-10]。刘政军团队研究 N 和 Ti 对堆焊金属硬度和耐磨性的影响,发现钛铁含量为 12%,氮化铁含量为 27%时,堆焊层性能最佳^[11]。迟长志等人在 ER5183 焊丝合金成分基础上发现通过复合添加微量的 Zr 和 Er 元素可以优化焊接接头的拉伸性能^[12]。在企业方面,杨天文等人在模具钢常添加合金种类的基础上,通过优化合金比例以及添加 Co 的方式提高了修复模具的使用寿命^[13]。通过大量试验优化 Cr、Mo、C 的含量比例,研发了抗磨粒磨损性能优良的 YD237 药芯焊丝,其综合性能高于传统 D237 焊材^[14]。

热锻模堆焊修复用焊丝的配方设计既要考虑焊丝的焊接工艺性,又要保证堆焊金属的力学性能,其药芯组成较为复杂。对现有高校和企业的成果进行探究,能为热锻模修复药芯焊丝的设计带来启发。由于在理论、经验和成本考量上的差异,企业和高校在热锻模堆焊修复焊丝研发上可能各有所长,只有综合考虑两者才能更全面地把握热锻模堆焊修复焊丝成分设计的规律和堆焊金属的力学性能要求。故在高校和企业研发的产品中各摘选一种,分别为 RMD756 锻模修复盖面层用药芯焊丝和 HX2048G 锻模修复盖面层用药芯焊丝,两种焊丝均已投入实际生产,市场反馈较好,较为成熟。在现有文献中,对这两种焊丝的焊接工艺性及力学性能进行研究的基础工作也较少,通过对这两种焊丝焊接工艺性、成分及组织和力学性能的对比研究,可以从焊缝成形和焊接参数的关系角度出发,为这两种焊丝的实际应用提供一个适中的焊接参数。从这两种焊丝堆焊金属合金化异同点的角度出发,可以为焊丝配方设计和优化方向提供一定的指导;同时所测得的这两种焊丝堆焊金属的力学性能也可以作为焊丝设计性能指标的参考。

1 试验材料与方法

试验基板为 45 钢, RMD756 及 HX2048G 焊丝作为热锻模修复焊丝,直径均为 1.6 mm。预先清理基板表面的铁锈和油污,采用机器人电弧增材制造系统进行气保护堆焊,保护气成分为 15%CO₂+85% Ar,焊前无预热,焊后回火。预先在焊接电流 300 A 以上和 200 A 以下进行参数探究试验,随后在

220~300 A 范围内进行试验研究,其他焊接参数均相同,即焊丝干伸长为 13~15 mm,气体流量为 15 L/min,考察熔宽、熔深、余高以及焊接飞溅性,最后确定焊接电流为 260 A,焊接电压为 23.2 V,送丝速度为 5.6 m/min 作为后序的焊接试验参数。多层堆焊过程中层间停留时间为 2~3 min,用于清渣。

参考 GB/T 25776—2010《焊接材料焊接工艺性能评定方法》,采用亚克力板制作的封闭箱收集飞溅颗粒,在封闭箱的底板切割孔洞并放置铁片,用以支撑基板和导通电路,如图 1 所示。堆焊时白色箱体固定不动,透明盖板随焊枪牵引移动,在基板上堆焊 150 mm 单道,共 3 条。堆焊结束后以封闭箱内聚集的飞溅颗粒以及基板粘连颗粒、焊枪口粘连部分,计算飞溅总质量。

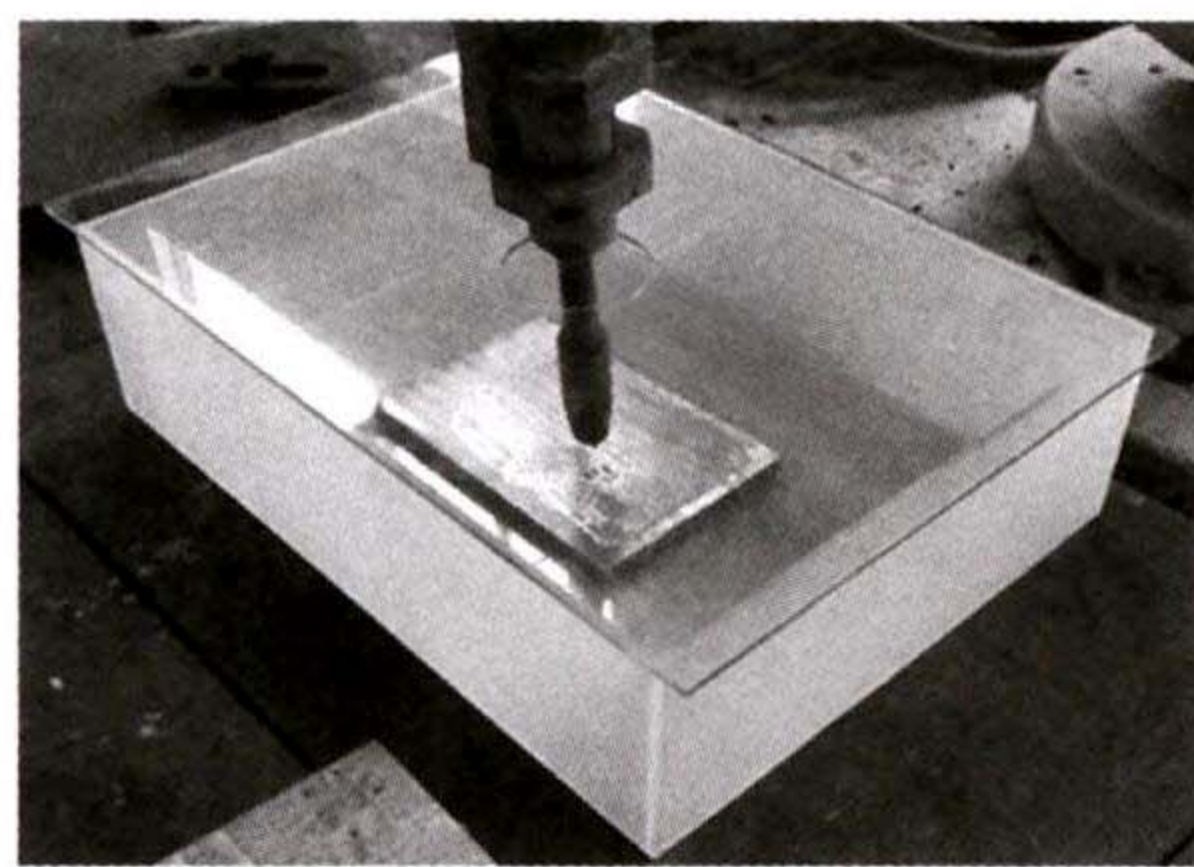


图 1 焊接飞溅颗粒收集装置

Fig.1 Collection device for welding spatter particle

焊丝焊接过程的飞溅率计算公式见式(1):

$$S = \frac{m}{m_1 - m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S 为飞溅率; m 为飞溅总质量; m_1 为焊后基板、焊道总质量; m_2 为基板初始质量。

堆焊块空冷至室温后置于电阻箱加热炉进行回火处理,从室温升至 550℃,于 550℃保温 3 h,随炉冷至 200℃,取出空冷。堆焊金属化学成分采用 X 荧光光谱仪和碳硫分析仪测定。从堆焊块中取金相试样,经研磨、抛光,用王水腐蚀 22~28 s,观察显微组织。

采用维式硬度计测定硬度并取均值。取 55 mm×10 mm×10 mm 试样,中间开 2 mm U 型槽,根据 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》测定常温下堆焊金属的冲击韧性。根据 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验》采用热模拟试验机进行常温拉伸和高温拉伸试验,拉伸速率均取 2 mm/min,试样于 2 min 内从室温加热至 550℃,在 550℃保温 10 min,并于 550℃进行拉伸试验,拉断

后于 2 min 内冷至室温。常温拉伸和高温拉伸试验各取 2 件试样进行测试,最终取均值,考察堆焊金属的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率及断面收缩率。根据 GB/T 12444—2006《金属材料磨损试验方法 试环-试块滑动磨损试验》,采用布鲁克 UMT-TriboLab 摩擦磨损试验机进行高温往复磨损试验,上摩擦副材料为直径 6.3 mm 的 SiN₄ 陶瓷球,下摩擦副使用矩形试样。试验升温速度约为 2 °C/s,加热至温度为 550 °C,保温 10 min 再进行试验,试验载荷为 400 N,滑移行程为 10 mm,速度约为 40 mm/s,持续 20 min 后于试验机上取出空冷,试验前后试块均用酒精棉球清洗,再用电子秤称量。取样示意图及试样尺寸如图 2 所示。

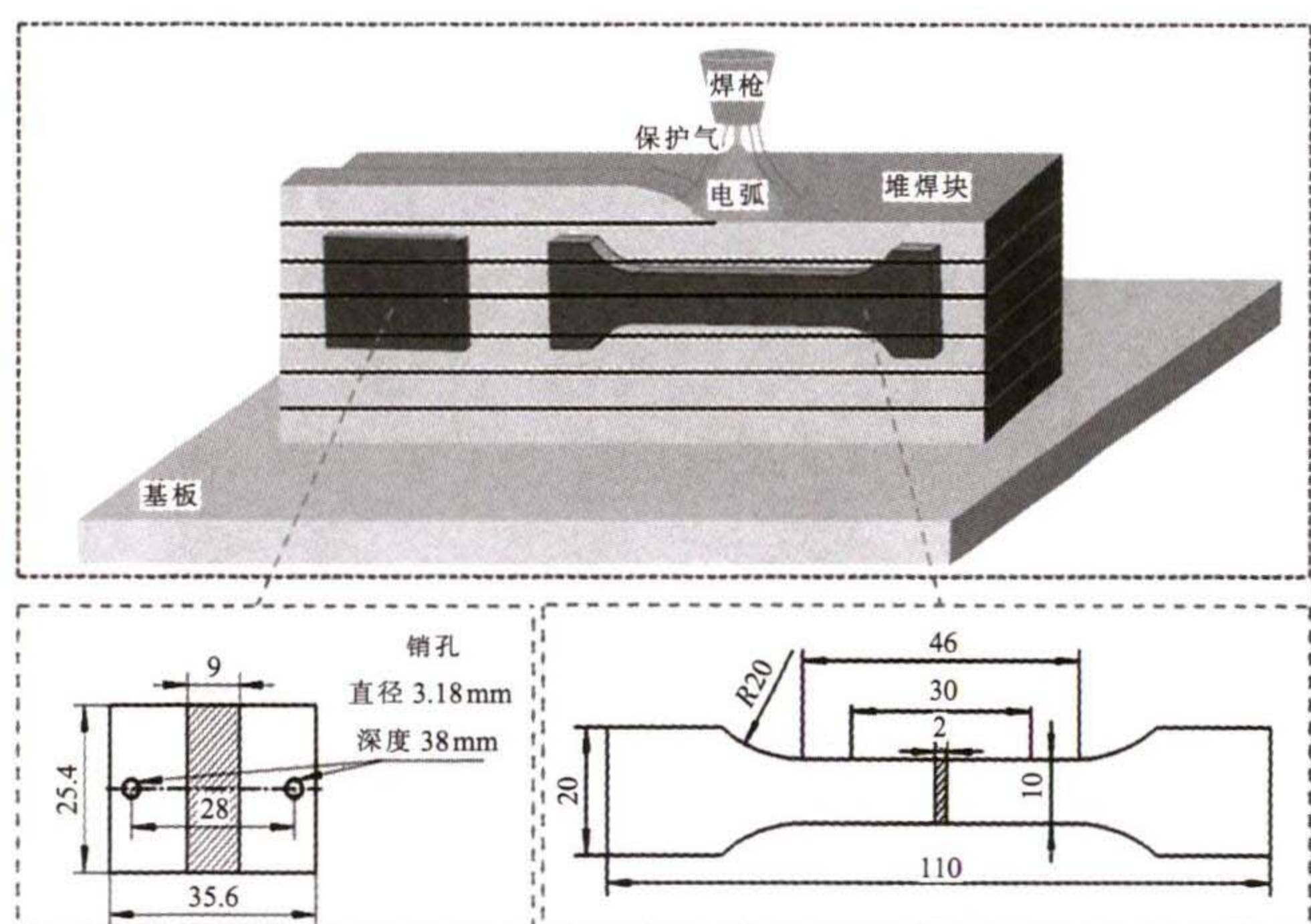


图 2 取样示意图及试样尺寸(mm)

Fig.2 Sampling schematic and specimen sizes (mm)

2 试验结果及讨论

2.1 焊接工艺性比较

2.1.1 焊缝成形

在 300 A 以上和 200 A 以下进行参数探究试验,发现电流过大时飞溅严重,焊枪口堵塞较快,在断弧起弧间焊丝容易粘连焊枪口,导致送丝受阻,需频繁清理枪口,堆焊效率低下。电流过小时,电弧不稳定,余高呈高低的周期性交替排列,表面质量较差,难以确定多层多道轨迹规划的搭接参数。为进一步确定合适的焊接参数,焊接电流在 300~220 A 之间以 20 A 的步长进行单道焊,并补充 250 A 和 270 A 单道焊,如表 1 所示。如图 3(a)、(b)所示,在各个参数下,焊道形貌较好,无气孔、咬边等缺陷。280 A 和 300 A 时飞溅较大。焊接电流在 260 A 以下时,焊道形貌一致性较好,且飞溅较小。RMD756 焊

表 1 焊接工艺参数

Tab.1 Welding parameters

编号	焊接电压 /V	焊接电流 /A	送丝速率 / $(m \cdot min^{-1})$	干伸长 /mm	气体流量 / $(L \cdot min^{-1})$
①	27.7	300	6.7	13~15	15
②	25.4	280	6.1		
③	23.2	260	5.6		
④	22.0	240	5.0		
⑤	20.7	220	4.3		
⑥	24.3	270	5.8		
⑦	22.6	250	5.3		

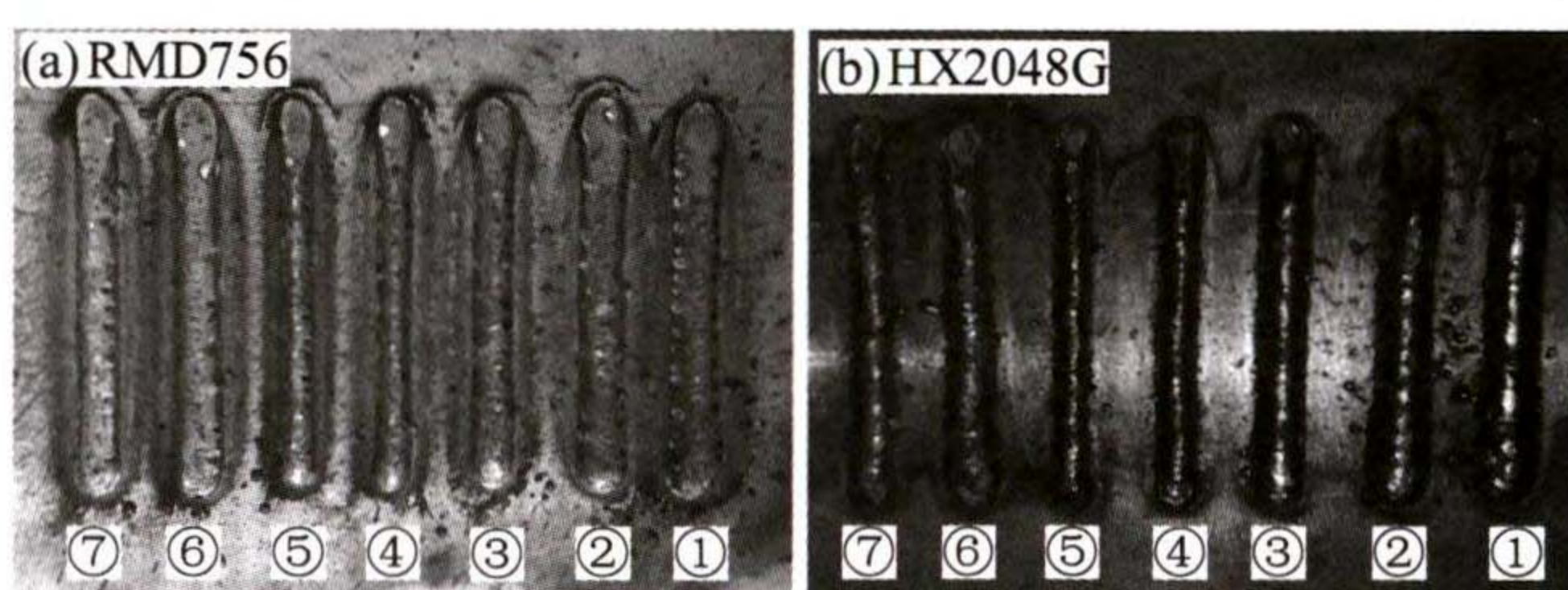


图 3 不同参数下的焊道形貌

Fig.3 Morphologies of weld beads under different parameters

丝在 250、270 A 焊接时的形貌与 260 A 的相似,但 HX2048G 焊丝在 260 A 焊接时的形貌优于 250、270 A 的。

对于热锻模堆焊修复而言,飞溅性对成本和堆焊效率有影响,表面质量对多层多道轨迹规划搭接参数的确定有影响,而余高系数和焊缝成形系数对热锻模修复区域的力学性能有影响。余高系数 (W/H , W 为焊道宽度, H 为焊道余高) 过小,焊道根部更容易产生应力集中和未熔合等缺陷, W/H 过大熔池流动性过好,易流淌。焊缝成形系数 (W/D , D 为焊道熔深) 过小,熔合区呈现两边浅中间深的沟壑状,此时熔池金属凝固过程中前一道焊道表面渣较难上浮,容易产生夹渣,对热锻模的热疲劳性能产生较大影响。 W/D 过大,熔合区又宽又浅,导致相邻焊道间熔合不够。综上,余高系数和焊缝成形系数应处于一个合适值,有利于减少堆焊区域的缺陷。

在图 3 每条焊道上取 2 个截面,测量余高、焊宽和熔深,取均值,计算余高系数和焊缝成形系数,作焊接电流与焊道余高系数 W/H 及成形系数 W/D 的点线图,如图 4 所示。在 220~300 A 间,两种焊丝余高系数总体呈上升趋势,260 A 时余高系数均处于中间值。HX2048G 焊丝焊缝成形系数在 220~300 A 间有小幅度的上下波动,波动值在 1 左右,在 250 A 时最小;RMD756 焊丝焊缝成形系数在 220~300 A 间呈下降趋势,下降幅度约为 4。在 260 A 附近,

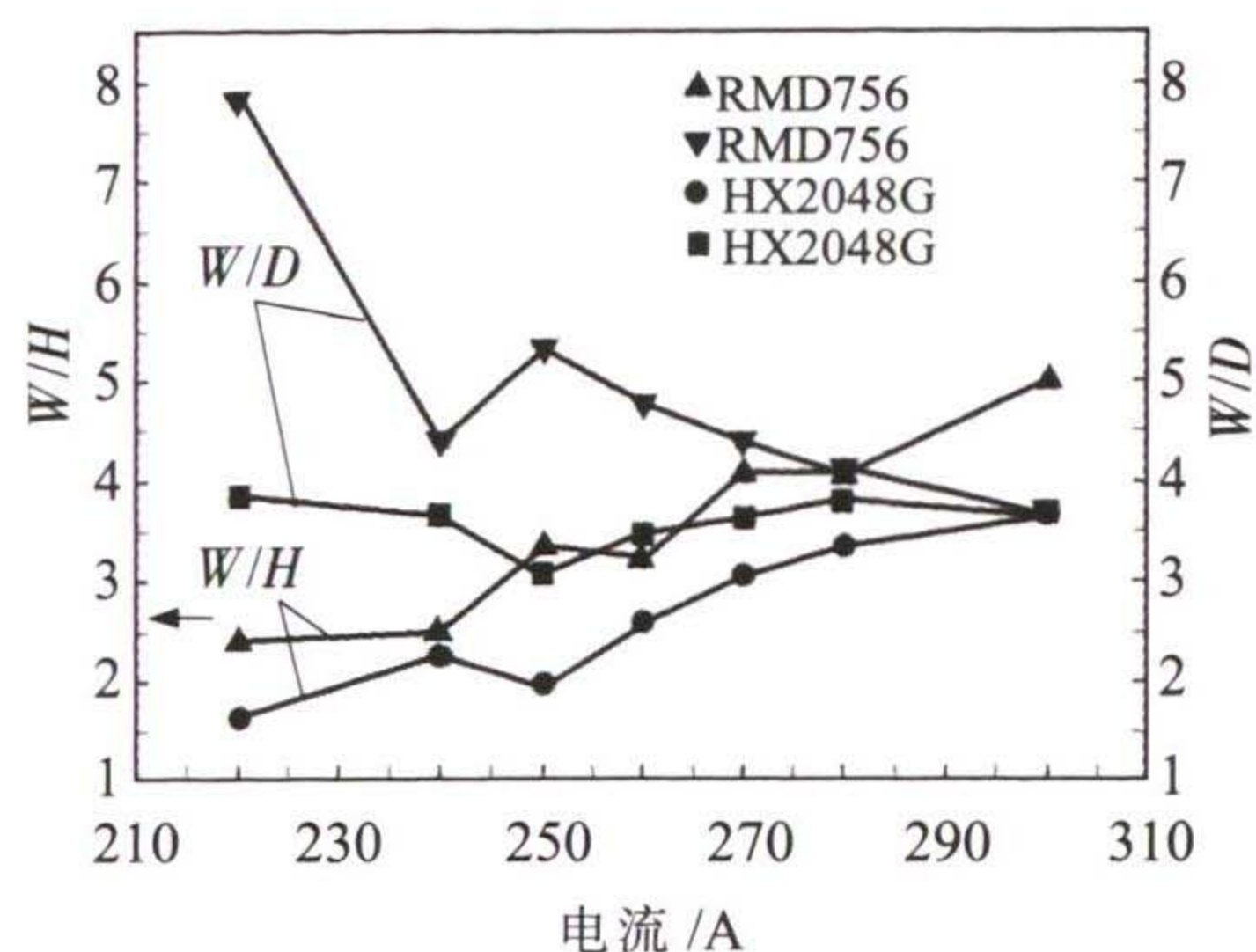


图4 不同电流下的焊缝成形系数

Fig.4 Formation factors of weld under different currents

RMD756 焊丝的余高系数和焊缝成形系数均大于 HX2048G 焊丝的, 说明 RMD756 产生夹渣的倾向更小, 但流淌的倾向更大。在 260 A 附近两种焊丝的余高系数和焊缝成形系数均处于中间值, 综合考虑最后确定焊接电流 260 A 作为设定值进行后续试验。

2.1.2 飞溅性

图 5、6 分别为高速摄像机拍摄的 RMD756 焊丝和 HX2048G 焊丝一个周期内的焊接飞溅情况, 拍摄速度为 12800 fps。图片按时间线截取特征点照片, 拍摄时间为一个周期, 整个拍摄结果重复这一现象, 标注部分为相邻照片间隔的帧数。可以看到, RMD756 和 HX2048G 药芯焊丝均在初始时短路, 此时未见弧柱, 而后由于熔滴的爆断, 产生较大的飞溅并重新燃弧, 说明两种焊丝焊接时熔滴均为短路过渡, 未出现大滴过渡, 说明电流适中。对于 RMD756 焊丝而言, 在稳定燃弧过程中也会产生飞溅, 但颗粒相对较小; 而对于 HX2048G 仅在熔滴爆断过渡的时刻产生大的飞溅, 但飞溅颗粒较大, 在稳定燃弧过程中几乎无飞溅。表 2 为飞溅率试验结果, 两种焊丝飞溅率均小于 10%, 飞溅性控制得较好。RMD756 飞溅率较 HX2048G 要高, 这与拍摄过程中

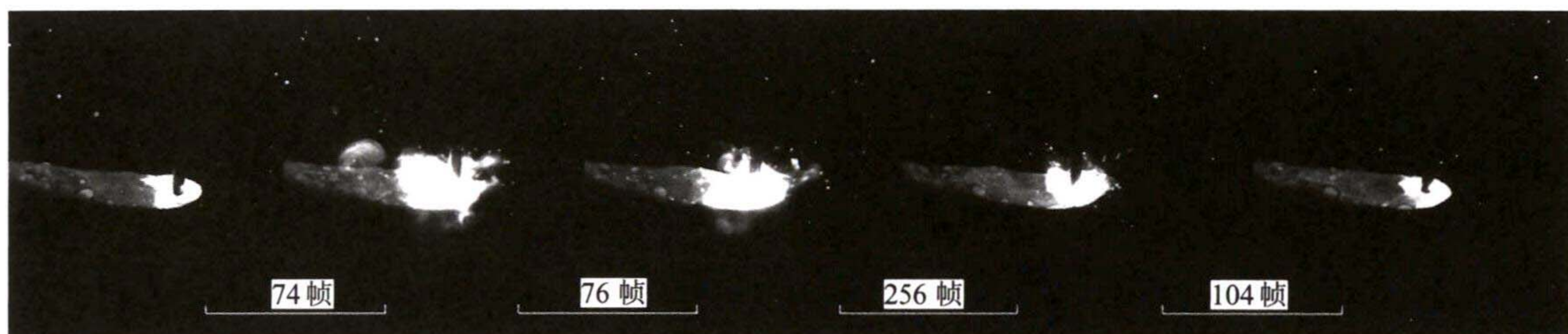


图5 一个周期内 RMD756 焊丝的飞溅情况

Fig.5 Welding spatter situation of RMD756 welding wire within one cycle

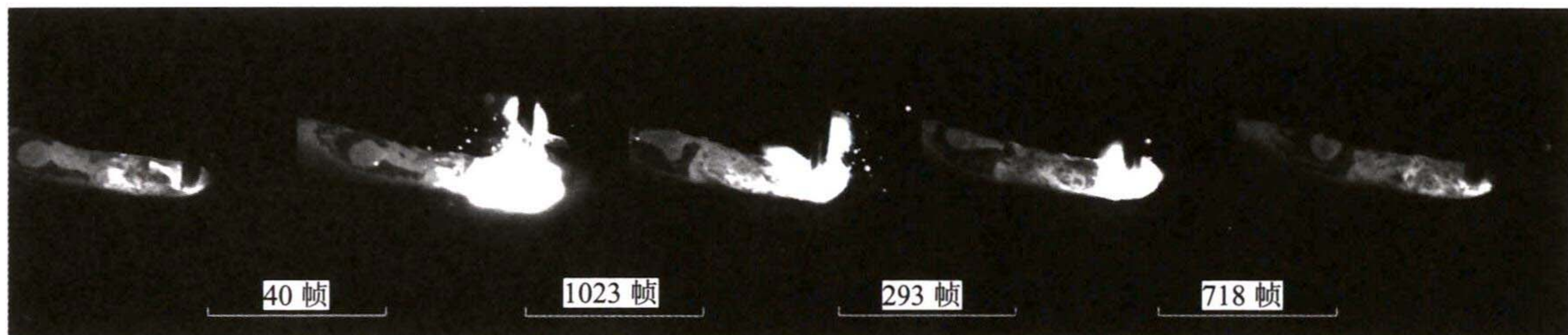


图6 一个周期内 HX2048G 焊丝飞溅情况

Fig.6 Welding spatter situation of HX2048G welding wire within one cycle

表 2 不同焊丝的飞溅率

Tab.2 Spatter loss coefficient of different wires

焊丝	基板初始质量 m_2/g	焊后基板、焊道 总质量 m_1/g	飞溅总 质量 m/g	飞溅率 S(%)
RMD756	2121.78	2190.66	6.83	9.69
HX2048G	2055.56	2119.78	4.27	6.64

一个周期内 RMD756 飞溅持续时间较 HX2048G 长的结果相符, 但高出不多, 这可能是 HX2048G 虽然飞溅持续时间相对于 RMD756 较短, 但飞溅颗粒较大所致。

2.2 焊缝金属化学成分与组织

表 3 为堆焊金属的化学成分。可以看到, 相比一般的模具钢, 无论是添加合金元素的种类还是含量, 堆焊金属的均更多。由于焊丝焊接性的要求, C 含量在低碳范围, 而低碳引起的固溶强化的减弱必须由更多的合金元素和强化方式弥补才能达到模具钢的强度及硬度要求。两种焊丝堆焊金属的共同点是低 C 高 Cr。除了 Ni、Si、Mn 等元素, 大多数为中、强碳化物的形成元素且含量大致相同, 用以增加抗回火软化能力。两种材料堆焊金属含有较多的增加淬透性的元素, 在焊后空冷下均可得到马氏体。

表3 堆焊金属的化学成分(质量分数,%)
Tab.3 Chemical composition of deposited metals (wt%)

焊丝	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Ti	Co	Nb	Ni	Al	Fe	P、S
RMD756	0.180	1.453	1.274	6.673	2.310	1.836	0.465	0.083	0.182	0.003	0.933	0.081	余量	<0.030
HX2048G	0.240	0.771	1.272	10.559	3.002	0.477	0.325	0.047	-	-	1.753	0.043		

RMD756堆焊金属的金相组织如图7(a)所示,主要为回火板条马氏体+残余奥氏体+少量粒状碳化物,回火态保留了粗大马氏体特征且成排分布,少量碳化物呈颗粒状在晶内分布。粗大的板条组织会严重削弱韧性,出现这种粗大马氏体组织是由于堆焊过程热积累严重所致。HX2048G堆焊金属的金相组织如图7(b)所示,为回火马氏体+少量残余奥氏体+碳化物;基体由于合金含量高不易侵蚀,故呈灰白色。白色块状为碳化物,部分碳化物已经带状化,并与晶界相互粘连,此外还有黑色的颗粒状和点状碳化物。

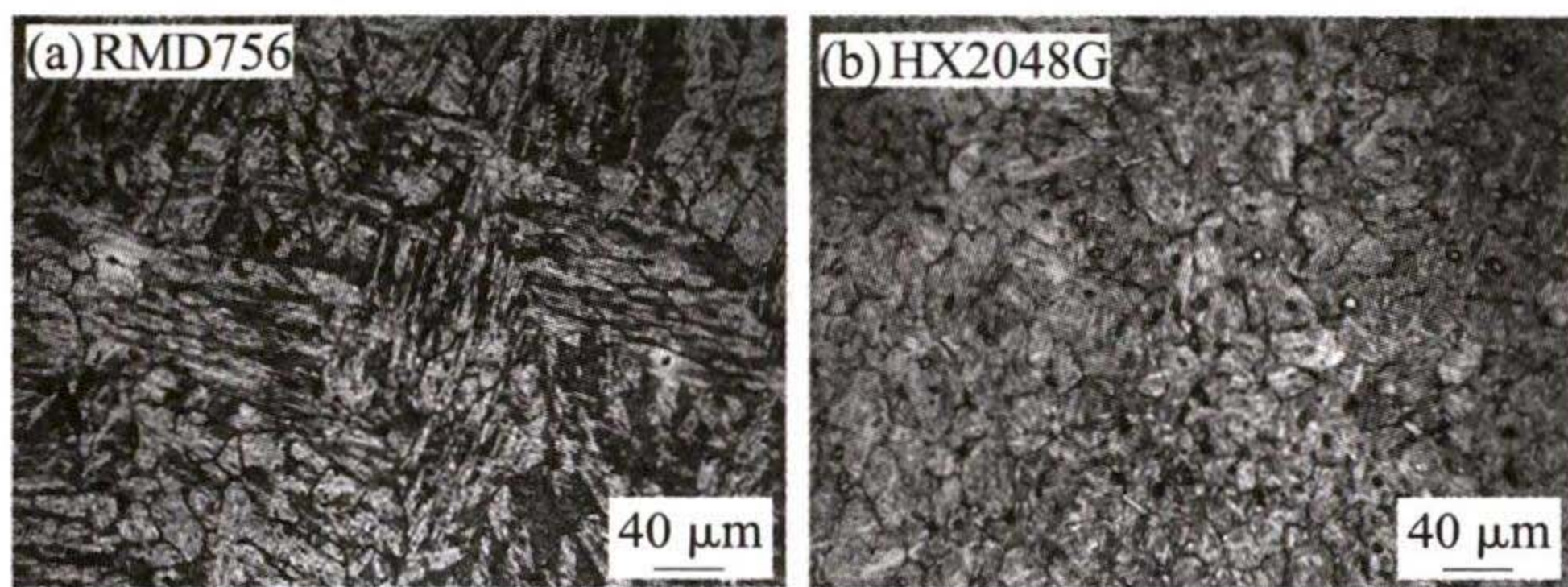


图7 堆焊金属的金相组织

Fig.7 Metallographic structure of the deposited metals

2.3 堆焊金属力学性能比较

2.3.1 冲击韧性

图8(a)、(c)宏观断口可以看到明显的放射花样,根据放射花样源头可以确定两个裂纹源即A、B处,该裂纹源靠近U型缺口但位于内部,可能为焊接过程的初始缺陷或脆性第二相,在拉应力下产生

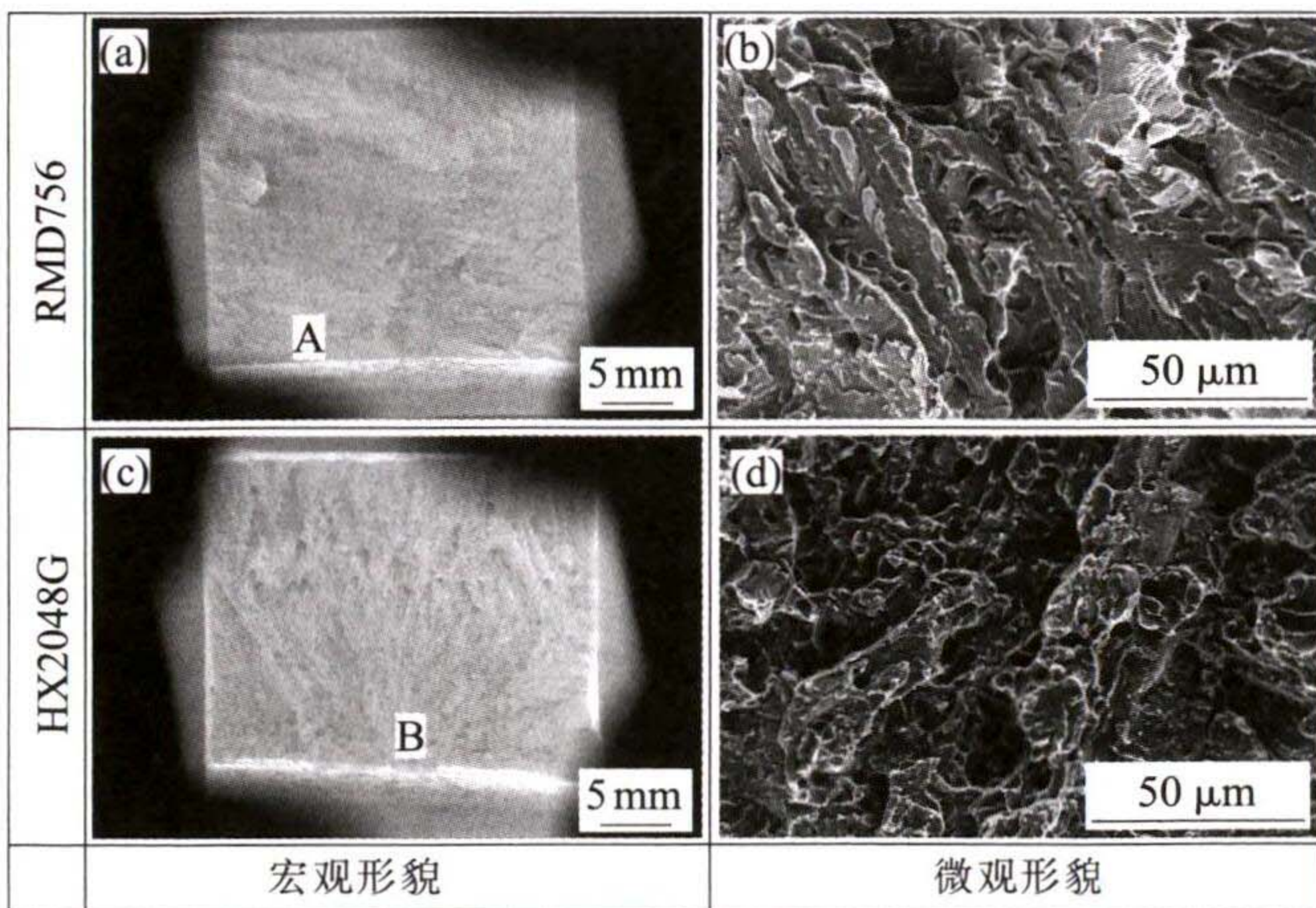


图8 堆焊金属冲击断口形貌的扫描电镜图

Fig.8 SEM images of impact fracture morphologies of the deposited metals

应力集中萌生裂纹。RMD756焊丝的断口(图8(a))光滑有光泽,断面上几乎看不见塑性变形,断口只见放射区,判断为解理断裂;其微观形貌如图8(b)所示,主要以河流花样为主,也可以看到部分解理台阶。从表4可见,RMD756焊丝堆焊金属的冲击韧性为7.0J/cm²。HX2048G焊丝堆焊金属的断口(图8(c))较为粗糙,放射区较大,塑性变形较小,但冲击韧性为19.0J/cm²,是RMD756焊丝堆焊金属的2.7倍,为准解理断裂;其微观形貌如图8(d)所示,以韧窝为主,既有小的等轴韧窝,又有大的撕裂韧窝。RMD756堆焊金属的冲击韧性低主要是由于其组织为粗大的板条马氏体,容易成为裂纹的扩展通道。HX2048G堆焊金属的Ni含量约是RMD756的2倍,既能提高晶界的强度,也能防止焊接过程中金属的过热,保持细晶组织,所以冲击韧性较高。

表4 堆焊金属的冲击韧性
Tab.4 Impact toughness of the deposited metals

焊丝	冲击功 /J	冲击韧性 /(J·cm ²)
HX2048G	18.0	19.0
RMD756	5.9	7.0

2.3.2 拉伸性能

表5为堆焊金属的拉伸性能。室温条件下,RMD756堆焊金属的抗拉强度和屈服强度较HX2048G堆焊金属的高,但两者的抗拉强度均在1000MPa以上。在室温以及550℃下,HX2048G堆焊金属的断后伸长率以及断面收缩率均比RMD756堆焊金属的高,但抗拉强度及屈服强度更小。两种焊丝堆焊金属在550℃时强度指标逐渐趋同,在550℃时堆焊金属的抗拉强度都在800MPa左右,屈服强度在700MPa左右。这主要是由于堆焊金属中有较

表5 堆焊金属的拉伸性能
Tab.5 Tensile properties of the deposited metals

焊丝	试验温度 /℃	硬度 (HV)	断后伸长率(%)	断面收缩率(%)	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
RMD756	23	482	5	2	989	1275
	550	-	8	19	761	814
HX2048G	23	435	7	18	824	1003
	550	-	11	41	694	798

高含量的中强碳化物成形元素,具备二次硬化能力,热稳定性强。

2.3.3 高温磨损性能

图 9 为两种焊丝堆焊金属的干摩擦表面的 SEM 图及能谱分析。RMD756 堆焊金属表面的特征较多,有大致与摩擦方向垂直的裂纹产生,以及分散的围绕裂纹的氧化剥蚀的小坑,同时能看见部分平行于摩擦方向的犁沟出现,从 EDX 分析频谱可见表面已经氧化并且氧化产物较多。裂纹产生的原因是在往复式干摩擦过程中在摩擦表面形成交替的拉应力,RM756 堆焊金属的冲击韧性较低,对裂纹的敏感性大,阻止裂纹扩展的能力较弱造成的。犁沟是脆硬的第二相颗粒在基体上滑移的结果。HX2048G 堆焊金属表面的特征较少,出现大片的氧化破碎层及部分犁沟,未见到裂纹;从 EDX 分析频谱可见其表面的氧含量更高,氧化更严重。根据摩擦的方式可以判断该磨损主要为粘着磨损同时伴随着氧化磨损。在高温摩擦过程中,表面金属被氧化,氧化物粘附于金属层上的粘附力较小,在发生局部的塑性变形时,氧化物被夹带着脱离金属层形成剥落坑。从表 6 磨损率来看, HX2048G 堆焊金属的磨损率约是 RMD756 堆焊金属的 1.6 倍。两种堆焊金属 550℃ 的抗拉强度大致相等,说明亚表层热软化和变形的能

力相似,对氧化层的支撑作用也相似,但 RMD756 堆焊金属摩擦表面的 EDX 结果中 Cr、Al 的含量均高于 HX2048G 堆焊金属摩擦表面的,其氧化产物较 Fe 的氧化物更为致密,能阻碍进一步的高温氧化。说明在一定范围内,提高固溶于基体的 Cr 与 Al 含量,能提高堆焊层的高温抗氧化能力,使氧化物破碎脱落的可能性更小,从而降低磨损量。

3 结论

(1) 在两种焊丝实际堆焊中,焊接工艺参数取电压 23.2 V、电流 260 A、送丝速度 5.6 m/min 时,焊缝的余高系数和焊接成形系数适中,飞溅率均在 10% 以下。

(2) 热锻模堆焊修复焊丝在合金设计时,C 含量应选择低碳范围,并增加 Cr 的含量,还应包含中、强碳化物形成元素,提高高温强度;包含适当的 Ni 元素,防止焊接过程中金属的过热,保持细晶组织,提高韧性。

(3) RMD756 和 HX2048G 堆焊金属在室温下的抗拉强度均在 1000 MPa 以上,550℃ 时抗拉强度在 800 MPa 左右。RMD756 堆焊金属的冲击断面呈解理断裂,冲击韧性为 7.0 J/cm²;HX2048G 的则呈准解理断裂,冲击韧性为 19.0 J/cm²。

(4) 在 550℃ 干摩擦时,两种焊丝堆焊金属磨损率均在 0.03 g 以下,主要的磨损方式为粘着磨损和氧化磨损,一定范围内固溶的 Cr、Al 含量越高,氧化剥落坑越少,磨损量越低。

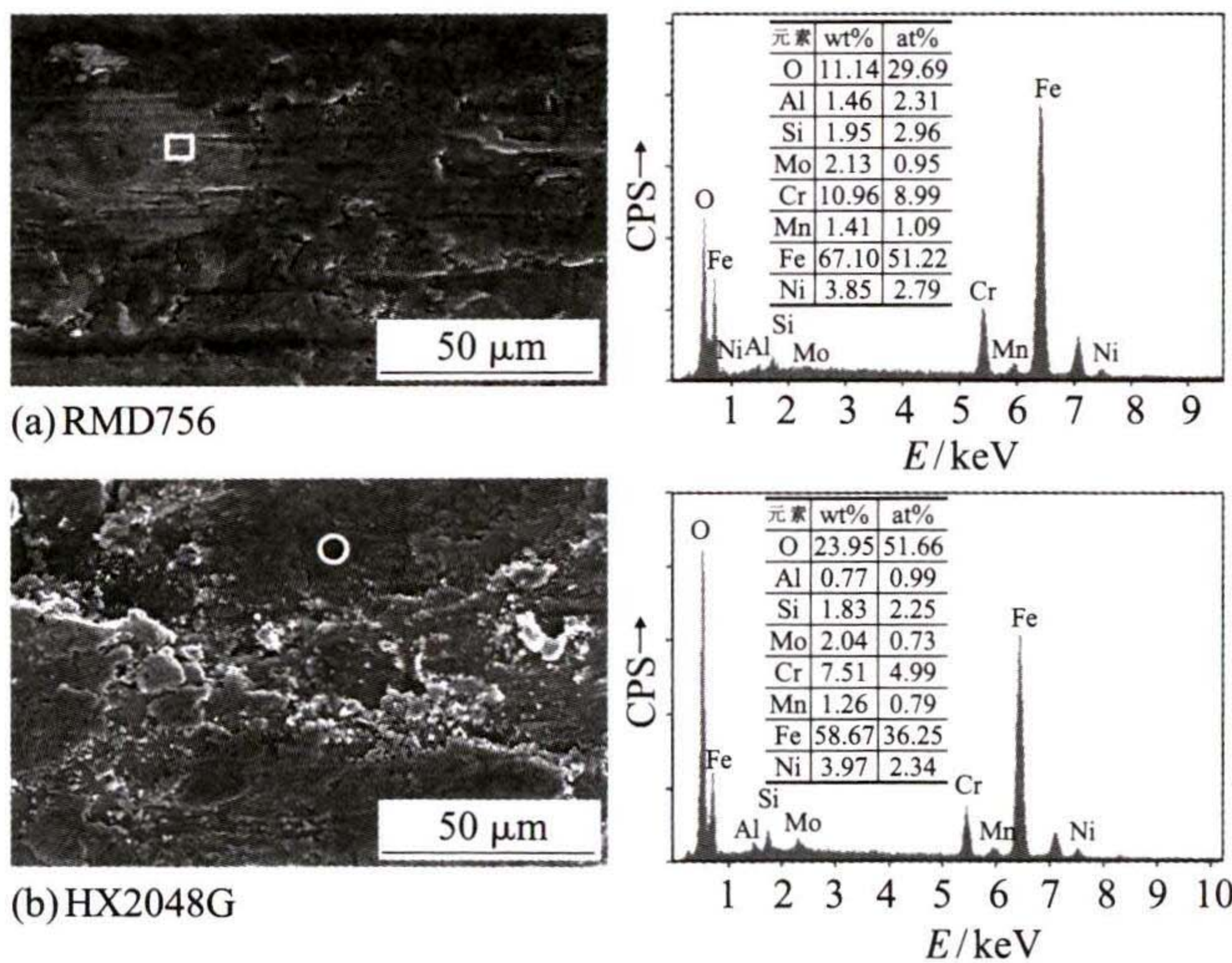


图 9 不同堆焊金属的干摩擦表面的 SEM 图及能谱分析
Fig.9 SEM images and energy spectrum analysis of the dry friction surface of different deposited metals

表 6 不同焊丝堆焊金属的磨损量
Tab.6 Wear loss of different deposited metals

焊丝	磨损前质量 /g	磨损后质量 /g	磨损量 /g
RMD756	63.8200	63.8049	0.0151
HX2048G	63.1667	63.1546	0.0242

参考文献:

- [1] 模具行业“十二五”发展规划[J]. 模具工业,2011,37(1):1-8.
- [2] 包卫平. 热锻模的典型失效形式及其原因分析[J]. 锻造与冲压,2020(5):14-17.
- [3] 刘斌,崔志杰. 模具修复技术及发展趋势 [J]. 模具工业,2017,43(2):1-5.
- [4] Guo Nannan, Leu M C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs [J]. Frontiers of Mechanical Engineering,2013, 8(3):215-243.
- [5] 夏巨谌,胡洪斌,赵海涛,等. 热锻模 3D 打印制造与再制造技术及其装备的研发和应用[J]. 锻压技术,2020,45(8):1-5.
- [6] 贾华,李萌. 我国自保护耐磨堆焊药芯焊丝的研究现状[J]. 焊接技术,2020,49(11):1-5.
- [7] 刘大双,刘仁培,邱悦,等. 无渣含铌自保护堆焊药芯焊丝的研制[J]. 焊接学报,2012,33(9):73-76.

(下转第 24 页)


晶状, Mg_2Sn 相呈长条状, 共晶 Mg_2Si 相为汉字状, 初生 Mg_2Si 相为多边形尖角状。其中, Mg_2Sn 相主要沿着枝晶间分布。370℃轧制 2 道次后, 组织中晶粒大小不一, 大的在 30 μm 左右, 大晶粒周围有少许 10~15 μm 的小晶粒, 仅发生了部分动态再结晶。合金 4 道次轧制后晶粒大小变得均匀, 动态再结晶完全, 晶粒尺寸为 15~20 μm 。

(2) 固溶处理 Mg-5Sn-Si-0.9Sb 合金经轧制后块状的多边形初生 Mg_2Si 相数量增多, 尺寸变小到 5~10 μm , 有 $Sb-Mg_2(Si_xSn_{1-x})$ 相生成。

(3) Mg-5Sn-Si-0.9Sb 镁合金经过 370℃/2 道次轧制后 T6 处理, 材料的抗拉强度和断后伸长率分别为 213.8MPa 和 11.6%。与铸态相比拉伸强度提高了 101.6%, 断后伸长率提高了 48.7%。

致谢: 感谢在试验中给予帮助的吴涛、董红阳和王至显。

参考文献:

- [1] 梁书锦, 刘祖岩, 王尔德. AZ31 镁合金轧制变形后组织与性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(5): 1411-1418.
- [2] Alaneme K K, Okotete E A. Enhancing plastic deformability of Mg and its alloys-A review of traditional and nascent developments [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2017, 5(4): 460-475.
- [3] 孙翠翠, 周吉学, 赵东清, 等. Sn 对镁及镁合金显微组织和性能影响的研究现状及展望[J]. 材料导报, 2017, 31(19): 63-68.
- [4] Nayyeri G, Mahmudi R. The microstructure and impression creep behavior of cast, Mg-5Sn-xCa alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(7/8): 2087-2098.
- [5] Liu H M, Chen Y G, Zhao H F, et al. Effects of strontium on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-5wt%Sn alloy [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2010, 504 (2): 345-350.
- [6] Zhao H D, Qin G W, Ren Y P, et al. Microstructure and tensile properties of as-extruded Mg-Sn-Y alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(S2): 493-497.
- [7] Wang Q, Chen Y G, Xiao S F, et al. Study on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Sn-Nd alloys [J]. Journal of Rare Earths, 2010, 28(5): 790-793.
- [8] Wang Q, Chen Y G, Xiao S F, et al. Microstructures, mechanical properties and compressive creep behaviors of as-cast Mg-5% Sn- (0-1.0)% Pb alloys [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011(2): 290-295.
- [9] Kozlov A, Grobner J, Schmid-Fetzer R. Phase formation in Mg-Sn-Si and Mg-Sn-Si-Ca alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2011, 509(7): 3326-3337.
- [10] 肖柳. 新型 Mg-Si-Sn 合金的等温热处理组织演变[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [11] Ma W R. Effect of cooling rates on as-cast microstructures of Mg-9Al-xSi ($x=1, 3$) alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(S2): 393-396.
- [12] 张建新. 铸态及变形 Mg-Sn-Si 合金的组织演化和强韧化[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- [13] Wang M, Zhang G, Xu H, et al. Investigation on Mg_3Sb_2/Mg_2Si heterogeneous nucleation interface using density functional theory[J]. Materials, 2020, 13(7): 1681.
- [14] 卢维娜, 李希云, 张进, 等. 镁合金板材轧制成形现状及其发展[J]. 冶金与材料, 2018, 38(4): 58-61.
- [15] Liu D, Liu Z, Wang E. Effect of rolling reduction on microstructure, texture, mechanical properties and mechanical anisotropy of AZ31 magnesium alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 612: 208-213.
- [16] Tahreen N, Chen D L, Nouri M, et al. Effects of aluminum content and strain rate on strain hardening behavior of cast magnesium alloys during compression [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 594: 235-245.
- [17] 张建新, 高爱华. 固溶处理对 Mg-5Sn-1Si 合金显微组织和硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(24): 217-219.
- [18] Wang Y, Guo X F, Yang W P, et al. Morphology and properties of Mg_2Si and $Mg_2(Si_xSn_{1-x})$ reinforcements in magnesium alloys[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(15): 1-8.
- [19] Hansen Niels. Hall-Petch relation and boundary strengthening [J]. Scripta Materialia, 2004, 5(18): 801-806.
- [20] 卢柯, 刘学东. 纳米晶体材料的 Hall-Petch 关系[J]. 材料研究学报, 1994, 8(5): 385-391. 

(上接第 18 页)

- [8] 刘大双, 刘仁培, 魏艳红. 石墨对无渣自保护药芯焊丝性能的影响[J]. 材料工程, 2014(7): 28-33.
- [9] 吕彦, 余圣甫, 行舒乐, 等. 钼、镍含量对马氏体不锈钢硬面药芯焊丝堆焊层组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2013, 37(9): 29-32.
- [10] 李昱, 余圣甫. 5CrNiMo 热作模具 CO_2 气体保护焊修复用药芯焊丝研制[J]. 焊接, 2017(6): 39-43.
- [11] 芦昊天, 刘政军, 苏允海, 等. Ti 和 N 对 Fe 基耐磨合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(6): 118-121.
- [12] 迟长志, 汤立松. Zr-Er 微合金化焊丝焊接接头的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2014, 43(9): 206-208.
- [13] 杨天文, 杨敬雷, 柳江. 热锻模具用气保护堆焊药芯焊丝的研制[J]. 焊接技术, 2018, 47(12): 81-82.
- [14] 杨刘树新, 汪昌红, 周勇. YD237 堆焊金属粉芯药芯焊丝的研制[J]. 焊接技术, 2017, 46(10): 56-59. 